



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**FOTOGRAFOVÁNÍ TERÉNU Z LETOUNU**

TERRAIN PHOTOGRAPHING FROM AN AIRCRAFT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JAN SKOČDOPOLE**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ADAM ŠIROKÝ,**

BRNO 2018

**Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií**

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2017/2018

**Zadání bakalářské práce**

Řešitel: **Skočdopole Jan**

Obor: Informační technologie

Téma: **Fotografování terénu z letounu**

**Terrain Photographing from an Aircraft**

Kategorie: Vestavěné systémy

Pokyny:

1. Prostudujte dostupnou literaturu a existující řešení pro fotografování terénu z letounu. Přitom se zaměřte jak na fázi přípravy letu, tak i na samotné fotografování za letu.
2. Vyberte existující nebo navrhnete nové řešení pro fotografování terénu tak, aby součástí návrhu byla příprava trajektorie letu a během letu také spouštění fotoaparátu a záznam telemetrie, aby pořízené fotografie bylo možno náležitě zpracovat.
3. Navrhnete způsob implementace fotografování s využitím vhodného počítačového systému. Přitom počítejte jak s možností automatického průletu plánované trasy, tak i s možností ručního řízení.
4. Implementujte navržený systém pro fotografování a demonstруйте jeho funkčnost na vhodném příkladu.
5. Diskutujte dosažené vlastnosti a možnosti pokračování práce.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Bod 1 zadání

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Široký Adam, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav počítačové grafiky a multimédií  
602 00 Brno, Božetěchova 2



---

doc. Dr. Ing. Jan Černocký  
vedoucí ústavu

## Abstrakt

Práce se zabývá fotografováním terénu z letounu. Předmětem řešení jsou fáze plánování a přípravy letu, navigace, pořizování snímků a ukládání telemetrie. Pro tyto účely je využita externí kamera umístěná pod trupem letounu a tablet s aplikací umístěný uvnitř kabiny.

## Abstract

This thesis deals with terrain photography from an aircraft. Subject of solution includes phases of planning and preparation of flight, navigation, taking images and telemetry recording. For this purpose remote camera placed under planes hull and tablet with application placed in the cockpit are used.

## Klíčová slova

fotografování terénu z letounu, fotogrammetrie, navigace, GPS, Android, Java

## Keywords

terrain photography from an aircraft, photogrammetry, navigation, GPS, Android, Java

## Citace

SKOČDOPOLE, Jan. *Fotografování terénu z letounu*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Adam Široký,

# Fotografování terénu z letounu

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Širokého. Další informace mi poskytl prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Jan Skočdopole  
15. května 2018

## Poděkování

Děkuji Ing. Adamu Širokému za vedení práce a prof. Dr. Ing. Pavlu Zemčíkovi za poskytnuté rady.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Shrnutí dosavadního stavu</b>	<b>3</b>
2.1	Snímkovací let . . . . .	3
2.2	Nosič snímacího zařízení . . . . .	7
2.3	GPS . . . . .	7
2.4	Souřadné systémy . . . . .	10
2.5	Snímací zařízení . . . . .	11
2.6	Tablet . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Zhodnocení současného stavu a plán práce</b>	<b>18</b>
3.1	Návrh řešení . . . . .	18
3.2	Návrh testování . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Popis vlastní práce</b>	<b>21</b>
4.1	Výběr hardwaru . . . . .	21
4.2	Senzory a služby . . . . .	22
4.3	Aplikace . . . . .	23
4.4	Příklad použití . . . . .	28
4.5	Testování . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>32</b>
	<b>Literatura</b>	<b>33</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého paměťového média</b>	<b>38</b>
<b>B</b>	<b>Data z testů</b>	<b>39</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Fotografie terénu pořízené ze vzduchu mohou být zdrojem cenných informací. Představují model snímaného území. Zkoumání modelu namísto jeho reálné předlohy s sebou přináší několik výhod. Není třeba přímé interakce se zkoumaným terénem, snímky zachycují stav v určitém okamžiku a takto získaná data lze zpracovávat strojově. Jsou využívány v celé řadě oborů, jako příklad lze jmenovat kartografii, geodézii, biologii, archeologii, ochranu životního prostředí, historii, využití pro účely bezpečnostních a zpravodajských složek a mnoha dalších oborech.

Počátky tohoto oboru sahají do poloviny 19. století, kdy byl jako nosič snímacího zařízení, fotoaparátu, použit horkovzdušný balon. V následujících letech probíhal postupný vývoj v oblasti fotografie, v důsledku čehož se zvyšovala kvalita pořízených snímků. Zlomový byl počátek 20. století, kdy se začaly používat letouny. V té době také dochází k pokroku v oblasti navigace. Dalším významným milníkem byla 60. léta 20. století, období prudkého rozvoje kosmonautiky. Jako nosič snímacího zařízení byly využívány umělé družice. Jako další technologie, velmi důležité pro leteckou fotografii, je nutné jmenovat globální družicový polohový systém, významně usnadňující navigaci, digitální fotografii, která snižuje náklady a technologie pro zpracování snímků na počítači, které přináší nové možnosti výstupu a rovněž šetří náklady.

Tomuto tématu se chci v práci věnovat, jelikož zahrnuje pro mně zajímavé oblasti – informatiku, fotografování a letectví. Pořízení a provoz profesionálních systémů pro snímkování terénu jsou velice nákladné. Rád bych proto vytvořil cenově dostupnou alternativu.

Cílem práce je vytvoření systému pro asistenci při snímkovacím letu, automatické ovládní snímacího zařízení a ukládání telemetrie. Pro tyto účely by měly být použity široké veřejnosti dostupné prostředky, ovšem s důrazem na zachování některých vlastností profesionálních systémů. Výstupem systému by měla být série snímků terénu, respektive jeden snímek jako jejich složenina.

V práci se budu nejdříve zabývat analýzou současného stavu, popíšu základy leteckého snímkování, budu se zabývat nosičem kamery (letounem), snímacím zařízením a navigací. V závěru kapitoly se budu zabývat popisem tabletu a jeho senzorů. Následovat bude kapitola s plánem práce a podrobnými specifikacemi. Další kapitola bude pojednávat o implementaci a testování. Poté bude v závěrečné kapitole zhodnocen výsledek práce a diskutovány možnosti dalšího vývoje.

## Kapitola 2

# Shrnutí dosavadního stavu

Fotografie terénu pořízená z letounu představuje model snímaného území [4]. Motivace k tvorbě tohoto modelu může být různá a v důsledku toho se mohou lišit i požadované parametry. Pro příklad uvedme tři vědní obory, ve kterých lze využít snímky pořízené z letounu – fotogrammetrii, archeologii a biologii. Ve vědním oboru fotogrammetrie, který se zabývá rekonstrukcí tvarů, velikostí a polohy předmětů z jejich snímků, je důležitá geometrická přesnost snímku. Oproti tomu pro účely letecké archeologie nemusí být geometrická přesnost fotografie zcela zásadní. Stejně tak nemusí být geometrická přesnost zásadní pro zkoumání vegetace v určité oblasti. Pro tyto účely však bude nejspíše vyžadována infračervená fotografie, která umožňuje snazší rozlišení jednotlivých typů rostlin [7].

Z příkladu je patrné, že technické prostředky a metody použité pro snímkování, mohou být pro jednotlivé účely značně odlišné. To je třeba respektovat při návrhu systémů pro letecké snímkování.

### 2.1 Snímkovací let

Na výslednou podobu snímků mají kromě parametrů snímacího zařízení vliv také parametry letu. Nejvýrazněji se projevuje zejména poloha, náklon letounu a tvar terénu, které určují jaká oblast bude snímacím zařízením zabírána, jak budou snímky podrobné a jaká bude perspektiva. Nezanedbatelný vliv má denní doba, meteorologické podmínky a rychlost letu, které ovlivňují kvalitu snímku. Při plánování letu je rovněž nutné vzít v potaz platnou legislativu, která definuje minimální povolenou výšku letu a vymezuje zakázané oblasti.

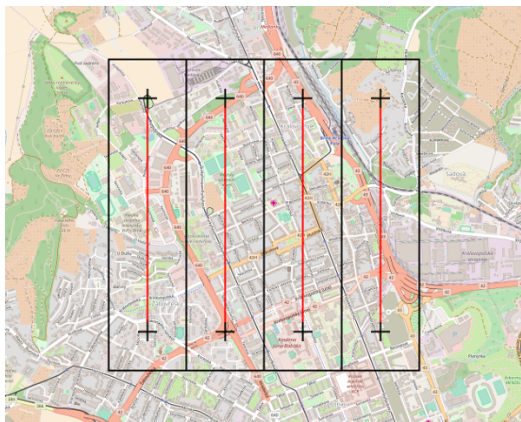
#### 2.1.1 Náletový plán

Dle požadavků na snímkování území se určuje náletový plán. Nepokryje-li úhel záběru celou plochu, pak je plocha s ohledem na parametry snímacího zařízení a cílové **GSD**<sup>1</sup> rozdělena na menší části.

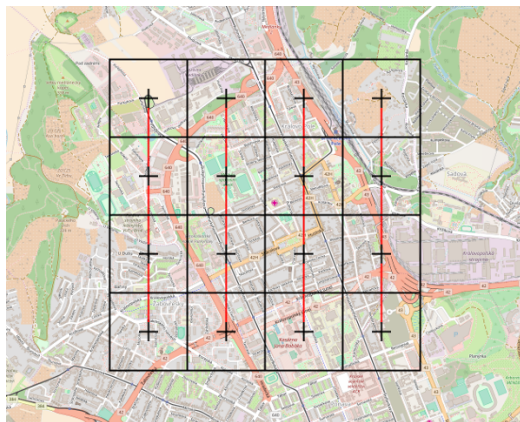
Rozdělení může být provedeno buď na rovnoběžné pásy nebo na dlaždice [5]. V první případě přelétá letadlo podél středových linií pásů, po takzvaných letových osách, daných počátečním a koncovým bodem, (znázorněno na obrázku 2.1) a snímací zařízení v pravidelných intervalech pořizuje snímky (řadové snímání). Při letu udržuje stabilní výšku, rychlost a směr. Ve druhém případě přelétá letoun ve stabilní výšce přímo nad vytyčenými body

<sup>1</sup>GSD, neboli **Ground Sample Distance**, je jednotka, značící u digitální fotografie pořízené ze vzduchu vzdálenost mezi středy pixelů (měřeno u země) [18] [8].

(znázorněno na obrázku 2.2). Snímky nejsou pořizovány v časových intervalech, ale na základě blízkosti k vytyčenému bodu. Díky tomu při něm zpravidla vzniká menší množství fotografií než při řadovém snímání.



Obrázek 2.1: Řádkové snímkování, mapový podklad převzat z: [30]



Obrázek 2.2: Dlaždicové snímkování, mapový podklad převzat z: [30]

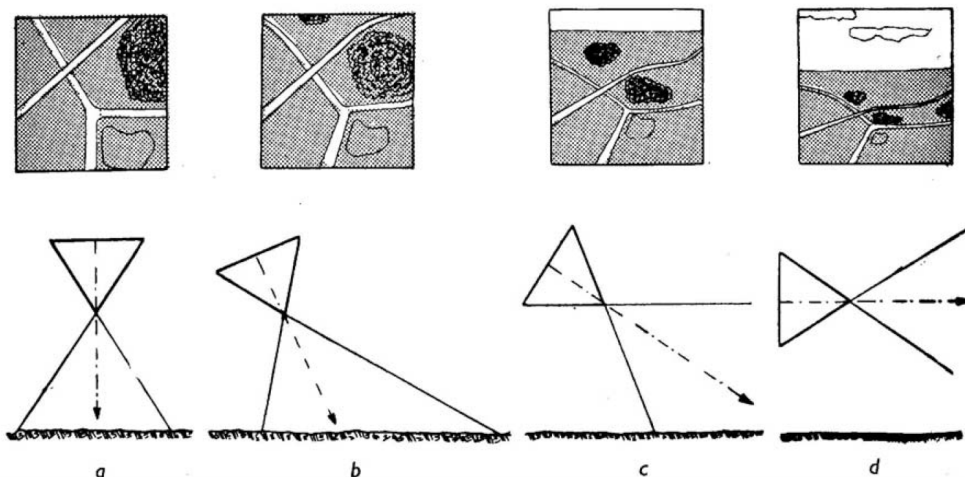
Pro obě metody jsou charakteristické překryvy snímků. Vyjadřují se v procentech a značí poměr překrývající se plochy dvou sousedních snímků a jejich celkové plochy. Překryvy zabezpečují, že v případě odchýlení letounu od kurzu nevzniknou ve snímaném území mezery, případně také umožňují stereoskopickou projekci [32]. U řadového snímání se zpravidla volí příčný překryv 25 až 30 % (mezi podélnými řadami) a podélný překryv okolo 60 % (mezi jednotlivými snímky v řadě). U snímání po dlaždicích se zpravidla volí stejné hodnoty překryvu.

### 2.1.2 Vlivy působící na geometrii fotografie

Vlivem vzájemné polohy kamery a objektů na snímku a parametrů objektivu se na snímcích projevuje geometrické zkreslení. Zkreslení se dělí na [6]:

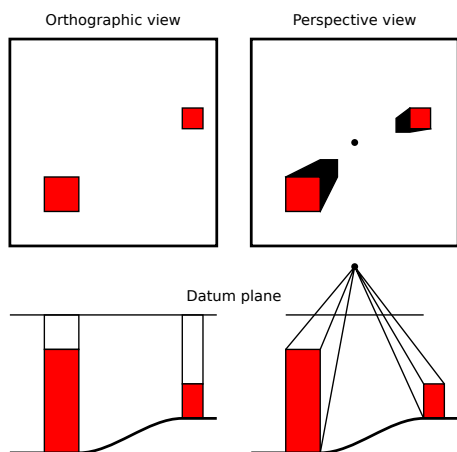
- **perspektivní** – dáno členitostí terénu
- **projektivní** – dáno sklonem snímku
- **optické** – dáno distorzi objektivu (viz kapitola 2.5)

Perspektivní zkreslení je typickou vlastností centrální projekce [6]. Vzniká kvůli nesterénné výšce objektů v záběru. Má za následek distorzi měřítko snímku. Nejméně je patrné ve středu záběru a naopak nejvíce se projevuje při krajích. Při tvorbě map je nutné ho kompenzovat, perspektivní projekce se převádí na pravoúhlou neboli ortografickou projekci. Rozdíly mezi perspektivní a ortografickou projekcí jsou znázorněny na obrázku 2.4.

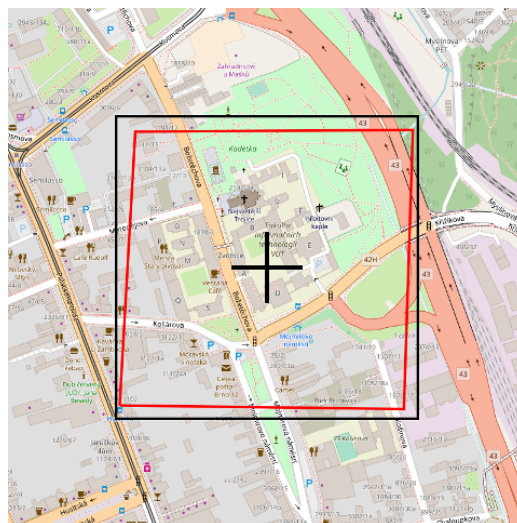


Obrázek 2.3: Snímky dle úhlu, převzato z: [6]

Snímky se dělí podle orientace osy záběru (znázorněno na obrázku 2.3) na svislé (a), šikmé (b), ploché (c) a horizontální (d) [6]. Nejčastěji se pořizují svislé snímky, jelikož netrpí distorzí měřítka.



Obrázek 2.4: Rozdíl mezi ortografickou a perspektivní projekcí, převzato z: [43]



Obrázek 2.5: Projekční zkresení, mapový podklad převzat z: [30]

Na obrázku 2.5 je znázorněna změna úhlu záběru při náklonu kamery. Černě je vyobrazen úhel záběru při svislé ose záběru, červeně při šikmé ose. Osy záběru protínají stejné místo na zemi. Z obrázku je patrné kolísání měřítka.

### 2.1.3 Navigace

Pro navigaci letounu je možno použít jeden ze tří základních způsobů (nebo jejich kombinaci) [5]. Nejjednodušším a nejméně přesným je vizuální navigace z paluby letounu. Přesnější (desítky až stovky metrů [40]), avšak nákladnější je radiolokační navigace. Proto se

v současnosti nejvíce využívá družicová navigace GPS nebo GLONASS. Kromě navigačních zařízení určených pro letouny lze v některých případech použít navigační aplikace na telefonu či tabletu.

#### 2.1.4 Meteorologické a světelné podmínky

Pro účely fotografování terénu často bývají vhodné pouze specifické meteorologické a světelné podmínky [5]. Povětrnostní podmínky by měly být takové, aby co nejméně ovlivňovaly stabilitu letounu. Pro samotnou kvalitu snímků je pak důležitý dostatek světla a průhlednost atmosféry. Ve výšce letu 2,5 km by měla dohlednost dosahovat 20 km. V jistých případech bývá výhodná vysoká oblačnost, která rozptyluje sluneční svit, díky čemuž nejsou stíny příliš ostré a rušivé. Pokud je snímování prováděno pro fotogrammetrické účely, platí další pravidla. Krajina by měla být bez sněhové pokrývky a slunce by se mělo nacházet minimálně 33° nad horizontem.

#### 2.1.5 Legislativa

Legislativa kromě jiného stanovuje minimální povolenou výšku za letu VFR<sup>2</sup>. Nad hustě zastavěnými nebo obydlenými oblastmi nebo nad větším shromážděním osob na volném prostranství činí minimální povolená výška letu 300 metrů nad nejvyšší překážkou v okruhu 600 metrů od letadla. Kdekoli jinde činí minimální povolená výška letu 150 metrů nad nejvyšší překážkou v okruhu 300 metrů od letadla [49]. Dále je třeba při plánování zohlednit existenci zakázaných a vyhrazených prostorů<sup>3</sup>.

#### 2.1.6 Telemetrie

Zpracování pořízených snímků vyvolává potřebu znalosti podmínek, za jakých byly pořízeny. Čím více relevantních údajů bude k dispozici, tím přesnější budou případné korekce. Vhodné je zaznamenávat alespoň:

- údaje o poloze
- údaje o výšce
- okamžité hodnoty náklonu (ve všech osách)
- čas pořízení snímku
- okamžitou rychlost
- údaje o indikované přesnosti měření

Zaznamenaná data by měla být snadno strojově zpracovatelná. Standardní způsob ukládání metadat do fotografie (například EXIF u formátu JPEG) není vhodný z důvodu absence některých potřebných značek [37]. Lze sice definovat vlastní značky, avšak není to doporučované. Dalším problémem může být fakt, že zařízení pro záznam telemetrie může být od kamery oddělené a nemusí s ní vůbec komunikovat. Další komplikací při zpracování

---

<sup>2</sup>Lety VFR jsou lety prováděné za lepších meteorologických podmínek než stanovená minima VMC (vzdálenost od oblaků, dohled. . .).

<sup>3</sup>Náhled mapy dostupný online: <http://aisview.rlp.cz>

by byla nutnost pracovat s celým obrázkem i při pouhém čtení metadat. Ukládání telemetrie jako metadat obrázku tedy není vhodné.

Pro strojové zpracování jsou vhodné formáty XML, JSON a v některých případech i jednodušší CSV. Jako vhodná varianta se jeví formát XML s notací **Keyhole Markup Language** (KML), která je uznávaným standardem pro distribuci geografických dat [15]. Dalším uznávaným standardem je XML s notací **GPS Exchange Format** (GPX) [42]. KML i GPX podporují většinu potřebných značek a také značky definované uživatelem.

## 2.2 Nosič snímacího zařízení

Nosič snímacího zařízení je jedním z klíčových prvků systému. Pro použití při fotografování terénu je vhodná pouze určitá skupina typů letadel. Obvykle jde o pilotované motorové letouny s nepřilíš vysokou cestovní rychlostí (150 až 200 km/h), dostupem až 6 000 metrů, s dobrou stoupavostí, dobrou stabilitou letu a dlouhou výdrží ve vzduchu [5]. Pro ilustraci jsou uvedeny parametry některých strojů společností TopGis, s.r.o. [38] [47] a GEOREAL spol. s.r.o. [13], které se zabývají leteckým snímáním, v tabulce 2.1.

<b>Výrobce</b>	Cessna	Cessna	Cessna	Zlín
<b>Model</b>	421C	402B	T206H	Z-37
<b>Cest. rychlost</b>	444 km/h	300 km/h	230 km/h	183 km/h
<b>Dostup</b>	9 200 km	8 000 m	8 230 m	4 000 m
<b>Dolet</b>	2 755 km	1 850 km	1 167 km	640 km
<b>Výdrž</b>	5 až 6 h	5 až 6 h	5 až 6 h	3,5 h

Tabulka 2.1: Parametry letounů

Kromě letounů mohou být pro snímání terénu využity jiné nosiče, například vrtulníky, vzducholodě, horkovzdušné balony a další jiné. Podrobněji však popsány nebudou, jelikož nejsou předmětem této práce.

Vlastnosti letounu hrají podstatnou roli při výběru způsobu uchycení snímacího zařízení. Může být umístěno uvnitř kabiny nebo venku pod trupem či křídly. Uchycení může být pevné nebo gyroskopicky stabilizované, které dokáže kompenzovat vibrace a do jisté míry i náklony.

## 2.3 GPS

GPS je vojenský globální polohový systém. Část jeho služeb je volně dostupná i pro civilní použití. Systém je tvořen 31 satelity [24], obíhající ve výšce 20 350 km. Každý z nich oběhne Zemi, po jednom ze šesti orbitů, dvakrát za den, čímž je zaručeno nepřetržité celosvětové pokrytí [23]. Princip funkce spočívá v měření vzdálenosti navigačního zařízení od družic, které je realizováno buď metodou kódového měření nebo fázového měření. Metoda kódového měření určuje vzdálenost na základě rozdílu času mezi vysláním signálu satelitem a přijetím signálu na GPS zařízení (rychlost šíření signálu je známa). Je méně náročná, a proto je využívána v běžných zařízeních. Přesnější metoda fázového měření pracuje s vlnovými vlastnostmi signálu a je používána zejména v geodetických přístrojích [20]. Kromě služby určování polohy poskytuje velmi přesný čas.

GPS je nejrozšířenějším systémem satelitní navigace podporovaným na drtivě většině navigačních zařízení [9]. Kromě GPS existují i jiné satelitní navigační systémy – evropský

Galileo, ruský GLONASS, čínský BeiDou (zatím není provozován globálně) a další. Pracují na podobném principu a mají i podobné základní charakteristiky a vlastnosti.

### 2.3.1 Přesnost

Důležitými metrikami při používání GPS jsou horizontální a vertikální přesnost, časová přesnost, doba určení polohy a dostupnost. Nejdůležitější faktory ovlivňující přesnost jsou [22]:

- počet a poloha viditelných družic
- kvalita a síla signálu (ovlivňovaná rušením, odrazy signálu a překážkami ve výhledu na družice)
- stav družic (přesnost hodin, aktuálnost dat...)
- metoda měření
- kvalita klientského zařízení
- rychlost pohybu klientského zařízení

Kromě technického vlivu existuje i vliv umělý. Systém GPS nabízí přesnější, ale veřejně nedostupnou službu **Precise Positioning Service** (PPS) a veřejně dostupnou **Standard Positioning Service** (SPS) [25]. Dále se budeme zabývat pouze službou SPS.

SIS	Metrika	Hodnota
Poloha	globální průměr, nulové AOD	$\leq 6 m$ 95 %
Poloha	globální průměr, všechna AOD	$\leq 7,8 m$ 95 %
Poloha	globální průměr, libovolné AOD	$\leq 12,8 m$ 95 %
Poloha	globální průměr	$\leq 30 m$ 99,94 %
Poloha	globální průměr, nejhorší případ	$\leq 30 m$ 99,79 %
Čas	globální průměr, libovolné AOD	$\leq 40 nsec$ 95 %
Země	Metrika	Hodnota
Poloha	horizontální, globální průměr	$\leq 9 m$ 95 %
Poloha	horizontální, nejhorší případ	$\leq 17 m$ 95 %
Poloha	vertikální, globální průměr	$\leq 15 m$ 95 %
Poloha	vertikální, nejhorší případ	$\leq 37 m$ 95 %
Čas	globální průměr	$\leq 40 nsec$ 95 %
Dostupnost	Metrika	Hodnota
Poloha	horizontální, průměr	$\leq 99 %$
Poloha	horizontální, nejhorší případ	$\leq 90 %$
Poloha	vertikální, průměr	$\leq 99 %$
Poloha	vertikální, nejhorší případ	$\leq 90 %$

Tabulka 2.2: Metriky signálu GPS

Tabulka 2.2 shrnuje metriky přesnosti GPS [27]. Jde o závazné hodnoty garantované vládou Spojených států amerických. Uvedená data se však nevztahují ke koncovým zařízením, ale k vysílanému signálu. První část – (SIS, **S**ignal **i**n **S**pace) – popisuje parametry signálu šířeného ve vesmíru, zatímco druhá část – Země – popisuje parametry signálu na

povrchu Země. Do výsledné přesnosti je nutné započítat přesnost uživatelského GPS zařízení.

K určení horizontální polohy je zapotřebí nejméně tří satelitů, k určení horizontální a vertikální polohy je třeba minimálně čtyř. Se zvyšujícím se počtem satelitů se zvyšuje přesnost.

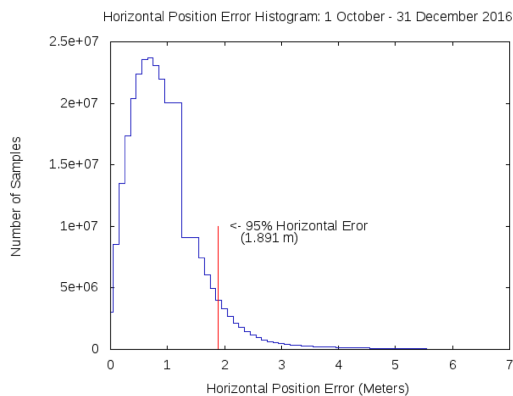
Pro správné fungování systému je nutné v určitých intervalech nahrávat na družice takzvané **NAV message data**, která tvoří parametry efemerid<sup>4</sup> a korekce hodin. Pojem **Age of Data (AOD)** doslova znamená stáří dat a vyjadřuje, před jakou dobou byla data na satelit nahrána. Na satelity se stabilními hodinami jsou nahrávána jednou denně (AOD maximálně 26 hodin), na satelity s méně stabilními hodinami až třikrát denně (AOD maximálně 10 hodin). Se zvyšujícím se AOD klesá přesnost, při nejvyšším AOD může být 95 % času menší než 12,8 metrů.

Maximální doba po jakou mohou fungovat satelity bez aktualizace parametrů efemerid a korekcí hodin jsou dva týdny. Přesnost by v takovém případě 95 % času byla menší než 388 metrů.

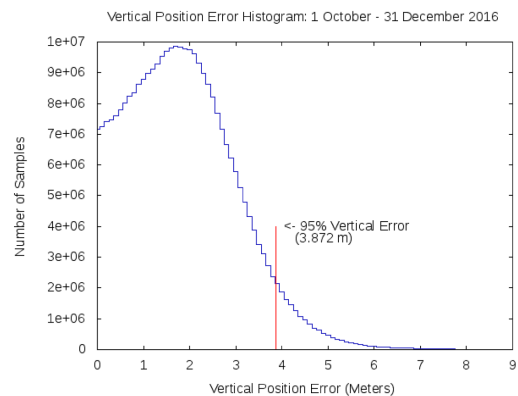
### 2.3.2 Zvyšování přesnosti

Použitím některých technik lze zvýšit přesnost určování polohy. Zařízení může být vybaveno pro příjem signálu jiného systému. Nejčastěji jde o kombinaci GPS a GLONASS. Přes 20 % zařízení dokonce podporuje GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou.

Dalším způsobem je využití **Satellite Based Augmentation System (SBAS)**, představující doplněk ke globálním polohovým družicovým systémům. Systémy SBAS se skládají ze sítě pozemních monitorovacích stanic, získávajících korekční data pro dané území, a geostacionárních satelitů, skrze které jsou korekční data vysílána k uživatelům. V Evropě jde konkrétně o systém EGNOS a ve Spojených státech amerických o systém WAAS.



Obrázek 2.6: Histogram horizontální chyby, převzato z: [48]



Obrázek 2.7: Histogram vertikální chyby, převzato z: [48]

Systém EGNOS byl navržen, aby 95 % času poskytoval horizontální přesnost alespoň 3 metry a vertikální alespoň 4 metry [28], oproti tomu systém WAAS má ve své nejpokročilejší variantě poskytovat po 95 % času horizontální přesnost alespoň 16 metrů a vertikální alespoň 4 metry [26]. Reálná měření se systémem WAAS však ukázala mnohem vyšší horizontální přesnost (obrázek 2.6) a potvrdila vertikální přesnost (obrázek 2.7) [48].

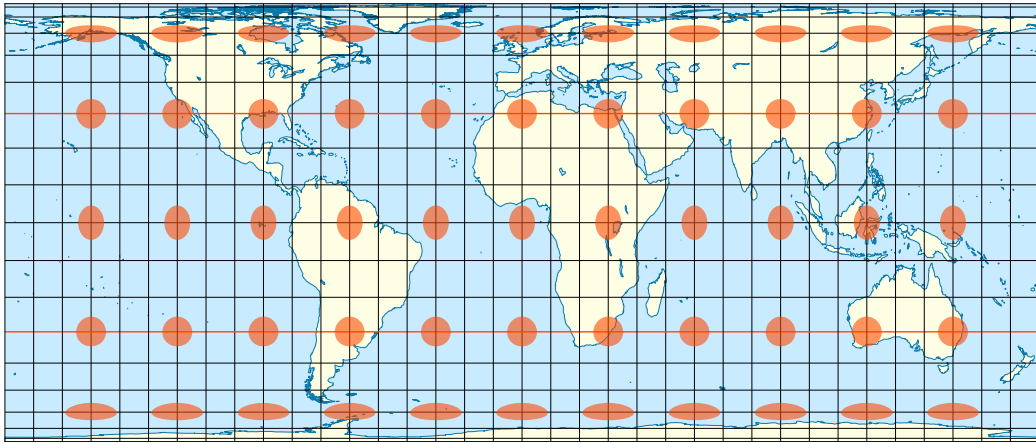
<sup>4</sup>Údaje o poloze astronomických objektů v daném čase nebo časech. [41]

## 2.4 Souřadné systémy

Tvar Země připomíná kouli, ve skutečnosti se však jedná o takzvaný geoid. Aby bylo možno provádět některé výpočty, je nutné definovat souřadný systém a geoid se značně složitým tvarem aproximovat. Postupem času vznikalo několik geodetických standardů, přičemž současným světově uznávaným se stal World Geodetic System 1984 (WGS 84) [46]. Díky tomu je používán také v GPS.

### 2.4.1 Mercatorovo zobrazení

V některých případech je výhodné tvar Země aproximovat ještě více, z trojrozměrného povrchu referenčního elipsoidu do roviny. Pro tento účel je často využíváno Mercatorovo zobrazení. Principem je konformní (úhlojevná) válcová projekce, kdy je válec rovnoběžný se zemskou osou [44]. Výsledkem je pravoúhlá síť poledníků a rovnoběžek. Z toho je patrné, že s rostoucí vzdáleností od rovníku roste i zkreslení.



Obrázek 2.8: Behrmannovo zobrazení zkreslení, převzato z: [45]

Obrázek 2.8 znázorňuje geometrické zkreslení. V oblasti mezi  $-15^\circ$  a  $15^\circ$  zeměpisné šířky je zanedbatelné, oproti tomu v oblastech pod  $-86^\circ$  a nad  $86^\circ$  zeměpisné šířky je příliš vysoké a pro tvorbu map nepoužitelné.

### 2.4.2 Převody mezi souřadnými systémy

Mercatorovo zobrazení využívá kartézský souřadný systém, který je se souřadným systémem WGS 84 nekompatibilní. Proto je třeba využít převodních vztahů.

$$\vartheta = \arctan\left(e^{\frac{y}{R}} \times 2 - \pi\right) \quad (2.1)$$

$$\varphi = \frac{x}{R} \quad (2.2)$$

$$y = \ln\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\vartheta}{2}\right)\right) \times R \quad (2.3)$$

$$x = \varphi \times R \quad (2.4)$$

Vztahy 2.1 a 2.2 popisují aproximaci převodu sférických souřadnic do kartézských souřadnic a vztahy 2.3 a 2.4 popisují opačný převod. Symbol  $\vartheta$  značí zeměpisnou šířku v radiánech,  $\varphi$  zeměpisnou délku v radiánech,  $x$  a  $y$  jsou kartézské souřadnice v metrech a  $R$  je poloměr Země v metrech. Obvykle odpovídá zeměpisná šířka souřadnici  $y$  a zeměpisná délka souřadnici  $x$ . Tento způsob aproximace je používán například službou OpenStreetMap [31].

## 2.5 Snímací zařízení

Jako snímací zařízení mohou sloužit různé typy fotoaparátů, termovize, lidar, radar a jiné. Práce se bude dále zabývat pouze fotoaparáty, konkrétně digitálními (analogové přístroje nejsou v současnosti příliš používané).

U digitálních fotoaparátů (kamer), sledujeme především tyto parametry:

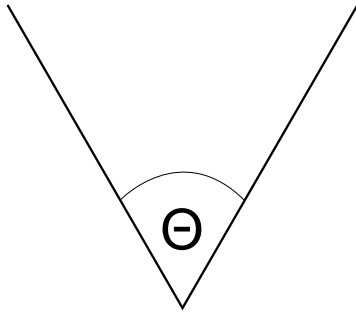
- rozlišení a velikost snímače
- ohniskovou vzdálenost objektivu a vlastnosti clony
- optickou kvalitu objektivu
- rychlosti závěrky
- podporované formáty obrázků
- typ snímače
- možnosti ovládání
- rozměry, hmotnost a možnosti uchycení kamery
- výdrž na baterii

Parametry jmenované v posledních třech bodech sice nemají přímý vliv na výsledný snímek, ale s ohledem na ně se volí způsob uchycení na letoun.

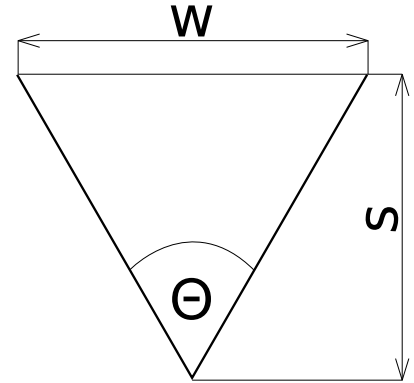
Ze všech těchto parametrů lze dopočítat další údaje důležité pro fotografování terénu z letounu.

### 2.5.1 Záběr, hloubka ostrosti a GSD

Zorný úhel je úhel mezi osami vedoucími z místa pozorování do nejkrajnějších bodů [12], které je možno v jeden okamžik při pozorování zachytit. Zorné pole je vzdálenost mezi těmito nejkrajnějšími body, ležící na ose kolmé k ose záběru, která se nachází v určité vzdálenosti od místa pozorování. Zorný úhel (anglicky **Angle of View**, AoV) je vyobrazen na obrázku 2.9 a platí pro něj vztah 2.5, zorná pole (anglicky **Field of View**, FoV) je znázorněno na obrázku 2.10 a platí pro něj vztah 2.6. Zjednodušeně řečeno, na zorný úhel má vliv ohnisková vzdálenost objektivu a velikost snímače, přičemž platí, že s rostoucí velikostí snímače roste i zorný úhel a s rostoucí ohniskovou vzdáleností naopak zorný úhel klesá.



Obrázek 2.9: Zorný úhel



Obrázek 2.10: Zorné pole

Hĺobka ostrosti je rozsah vzdáleností, ve kterých musí snímaný předmět ležet, aby se lidskému oku jevil jako ostrý [21]. Je popsána vztahy 2.9 a 2.10 [12]. Platí, že s rostoucím clonovým číslem roste i hloubka ostrosti a s rostoucím ohniskem naopak hloubka ostrosti klesá. Pro výpočet je třeba vzít v úvahu velikost snímače. Pokud srovnáme větší a menší snímač, je při stejném clonovém čísle a stejné ohniskové vzdálenosti hloubka ostrosti menší na větším snímači. V poslední řadě ovlivňuje hloubku ostrosti ostřicí vzdálenost, s jejím růstem se zvyšuje i hloubka ostrosti.

Jednotka **Ground Sample Distance** (GSD) udává vzdálenost mezi středy pixelů (měřeno u země) u fotografií pořízených ze vzduchu [18] [8]. Jinak řečeno, vyjadřuje, jak je snímek podrobný, přičemž platí, že čím nižší je hodnota GSD, tím je snímek podrobnější. U družicových snímků může dosahovat hodnota GSD řádově desítek centimetrů. Satelit WorldView-4 může pořizovat snímky s GSD až 31 cm [10]. Fotografie pořízené z letounu mohou být ještě podrobnější. Pro fotoaparát Nikon D7100 s objektivem s ohniskovou vzdáleností 70 mm (popsán v tabulce 2.3) při výšce letu 500 m nad zemí činí GSD 2,86 cm. GSD je popsáno vztahem 2.7.

$$\Theta = 2 \times \arctan \frac{h}{2f} \quad (2.5)$$

$$w = \frac{h \times s}{f} \quad (2.6)$$

$$GSD = \frac{w}{res} \quad (2.7)$$

$$H = \frac{f^2}{N \times c} + f \quad (2.8)$$

$$D_n = \frac{s \times (H - f)}{H + s - 2f} \quad (2.9)$$

$$D_f = \frac{s \times (H - f)}{H - s} \quad (2.10)$$

Ve vztazích 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 a 2.10 je  $\Theta$  zorný úhel,  $h$  rozměr strany snímače,  $f$  ohnisková vzdálenost,  $w$  zorné pole,  $s$  ostřicí vzdálenost,  $res$  horizontální či vertikální rozlišení snímače,  $H$  hyperfokální vzdálenost,  $N$  clonové číslo a  $c$  kružnice splývání [12].

V souvislosti s velikostí snímače je používán pojem **crop factor** (ořezový faktor), který udává poměr mezi plnoformátovým snímačem<sup>5</sup> a jiným snímačem. Slouží pro přepočítání některých parametrů závislých na velikosti snímače z hodnot vypočítaných pro plnoformátový snímač na hodnoty platné pro snímače jiných velikostí. Týká se to zejména ohniskové vzdálenosti, která se přepočítává na takzvanou efektivní ohniskovou vzdálenost, zorného úhlu a hloubky ostrosti.

Jako příklad vezměme digitální zrcadlovku (neboli DSLR) Nikon D7100 se snímačem o rozměrech  $24\text{ mm} \times 16\text{ mm}$  (snímače s tímto rozměrem se obvykle nazývají APS-C). Ořezový faktor má hodnotu 1,5. Upevníme-li na tento fotoaparát objektiv s ohniskovou vzdáleností 100 mm, získáme efektivní ohnisko 150 mm. Efektivní ohnisko udává, jakou ohniskovou vzdálenost by musel mít objektiv na fotoaparátu s plnoformátovým snímačem, abychom dosáhli stejného přiblížení. S tím souvisí zorný úhel. Pro uvedený příklad bude jeho hodnota činit  $13,69^\circ$  v horizontální rovině a  $9,148^\circ$  ve vertikální rovině u snímače APS-C, zatímco u plnoformátového bude hodnota v horizontální rovině  $20,41^\circ$  a ve vertikální rovině  $13,69^\circ$ . Obdobně se postupuje i při přepočtu hloubky ostrosti.

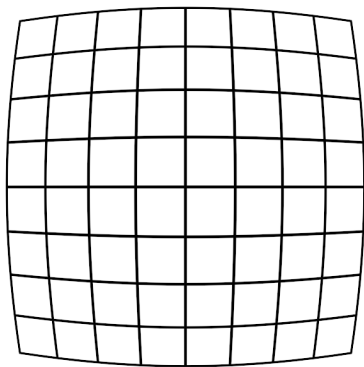
### 2.5.2 Objektiv

Objektivy lze dělit podle konstrukce na objektivy s pevnou ohniskovou vzdáleností a objektivy s proměnlivou ohniskovou vzdáleností. Obecně platí, že objektivy s pevnou ohniskovou vzdáleností mají jednodušší optickou konstrukci, díky čemuž bývají levnější, menší a mívají nižší hmotnost a bývají opticky kvalitnější než jejich ekvivalenty s proměnlivou ohniskovou vzdáleností.

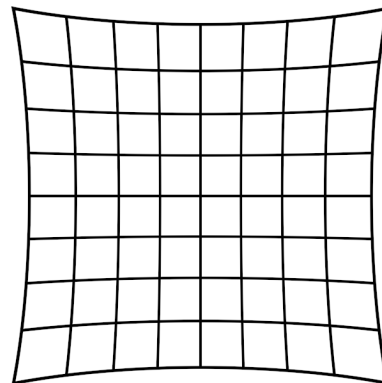
Z hlediska popisu optické kvality je důležitá ostrost, míra chromatické aberace, míra vinětace a optická distorze [33]. Ostrost je závislá na kvalitě optické soustavy a má společně s některými vlastnostmi snímače vliv na míru zachycených detailů. Chromatická aberace je způsobena nedokonalostí čoček, které způsobují disperzi (neboli rozklad) jimi procházejícího světla. Tato vada je patrná především v oblastech vysokého kontrastu. Vinětace se projevuje ztmavením snímku v rozích a vzniká, pokud nemá objektiv dostatečnou světelnost pro určitou velikost snímače. Optická distorze působí jako geometrické zkreslení obrazu. Míra distorze závislí na konstrukci optické soustavy a její kvalitě. Na obrázcích 2.11 a 2.12 jsou znázorněny základní typy distorze, soudkovitá a poduškovitá. Především pro fotogrammetrické účely představuje optická distorze problém, který je nutné řešit korekcí.

---

<sup>5</sup>Plnoformátový snímač (anglicky **Full-frame Sensor**) má rozměry  $36\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ .



Obrázek 2.11: Soudkovité zkreslení



Obrázek 2.12: Poduškovité zkreslení

Míra optických vad není v celém rozsahu plochy konstantní. Obecně lze konstatovat, že nejkvalitnější bývá obraz ve středu snímku a jeho kvalita klesá s rostoucí vzdáleností od středu optické soustavy.

### 2.5.3 Typy snímačů

Základní dělení snímačů se děje na základě možnosti zpracovávat barevné světlo. Jedná se o snímače panchromatické, které zachycují pouze jasovou složku světla a snímače multichromatické, které dokážou zachytit i barevnou složku.

Multichromatické snímače dále dělíme podle způsobu získávání informace o barevných složkách dopadajícího světla. Nejrozšířenějším způsobem je použití snímacího čipu s Bayerovou maskou [34]. Každému pixelu je předřazen barevný filtr. Filtrů propouštějících pouze červené světlo je  $1/4$ , filtrů propouštějících pouze zelené světlo je  $1/2$ , filtrů propouštějících pouze modré světlo je  $1/4$  a dohromady tvoří pravidelnou mřížku. Pro každý pixel se tedy nezískává plná barevná informace, výsledný pixel je proto nutné dopočítat z okolních pixelů. To má za následek nižší ostrost. Dalším negativním vlivem je menší množství světla, které dopadne na fotodiodu. Pro kompenzaci těchto nepříznivých vlastností se využívají alternativní podoby Bayerovy masky, které mají buď jiný poměr barevných filtrů, anebo se pro některé pixely filtry vůbec nepoužívají.

Přestože jsou snímače s Bayerovou maskou nejrozšířenější, nejsou jediné, které by byly schopny záznamu barevných snímků. Technologie snímačů Foveon X3 využívá toho, že světlo různé vlnové délky proniká v křemíku do různé hloubky [11]. Pro každý pixel je k dispozici plná barevná informace. Nevýhodou tohoto způsobu je náročnost výpočtu barevné hodnoty pixelu a vyšší digitální šum. Se snímači technologie Foveon X3 se lze setkat prakticky pouze ve fotoaparátech značky Sigma. Dalším způsobem záznamu barevného obrazu je využití optické soustavy rozkládající světlo na červenou, zelenou a modrou barvu, které následně dopadají na tři různé snímače. Tento způsob se v dnešní době používá pouze u některých videokamer a průmyslových kamer.

Kromě snímačů zaznamenávajících světlo pouze ve viditelné části barevného spektra existují například i takzvané RGB+NIR<sup>6</sup> snímače.

Dalším sledovaným parametrem je digitální šum, který je patrný především při použití vyšších citlivostí (zesílení signálu). Vliv má také velikost pixelů (větší pixel zachytí více

<sup>6</sup>Red, Green, Blue + Near-infrared

světla) a použitá technologie – vyšší šum bývá v současné době více u používané technologie CMOS než u technologie CCD [1]. Digitální šum má negativní vliv na barevnou věrnost snímku a ostrost.

Na ostrost má dále vliv použití optické dolní propusti (**Optical Low-pass Filter**). Používá se pro potlačení aliasingu (ve fotografii nazývaného moaré), tím že mírně rozostřuje dopadající světlo [2]. Na fotoaparátech s vysokou hustotou pixelů není jeho užití nezbytné.

#### 2.5.4 Snímání

Při fotografování terénu z letounu je vhodné používat neměnné nastavení expozice. Kvůli hloubce ostrosti je výhodné nepoužívat nejnižší clonová čísla a z důvodu zabránění rozmazání snímku je nutné nastavit expoziční čas v řádu stovek až tisíců sekund.

Při rychlosti 180 km/h a času expozice 1/100 *sekundy* urazí během snímání letoun vzdálenost 0,5 metru, což může působit problém. V praxi tedy bude nutné volit kratší časy závěrky.

#### 2.5.5 Formáty obrázků

Drtivá většina fotoaparátů umožňuje ukládání snímků ve formátu JPEG. Jedná se o formát se ztrátovou kompresí, což může v některých případech představovat problém. Řešením je použití bezztrátových formátů a nebo lépe, takzvaného digitálního negativu (třída formátů RAW). Digitální negativ obsahuje surová data nezpracovaná elektronikou fotoaparátu. RAW je pak možno převést do běžného bitmapového formátu na počítači, který není limitován výkonem tolik jako fotoaparát. Výsledkem takzvaného vyvolávání digitálního negativu jsou kvalitnější obrázky.

Jelikož soubory třídy formátů RAW ukládají velké množství informací, je jejich velikost vyšší než souborů JPEG (při stejném rozlišení). Při ukládání RAW je nutné zohlednit rychlost ukládání a nutnost vyšší kapacity paměťového zařízení.

#### 2.5.6 Ovládání

Při leteckém snímání nelze fotoaparát ovládat přímo, je nutné využít vzdálené ovládání. Využít lze speciální drátové spouště, připojení USB a bezdrátové připojení (zpravidla Bluetooth nebo WiFi). Ne všechna zařízení však podporují všechny způsoby.

Důležité je především ovládání spouště, jelikož parametry expozice by měly zůstat neměnné.

Bohužel způsob ovládání fotoaparátu není standardizován. Většina výrobců využívá vlastní protokoly, které se někdy liší i v rámci jednotlivých modelových řad. Existující knihovny, vyvíjené **open-source** komunitou, které tento problém řeší, však podporují jen omezené množství fotoaparátů [3] [17].

U kamer s možností ovládání přes WiFi často bývá komunikační protokol postaven nad protokolem HTTP s metodou GET. Mezi jednotlivými výrobci a modely se tak liší pouze syntaxe URL. Nezanedbatelnou výhodou je, že většina takových kamer funguje jako WiFi hotspot, což značně usnadňuje propojení s ovládacím zařízením.

## 2.5.7 Srovnání vybraných fotoaparátů

Tabulka 2.3 obsahuje přehled vybraných fotoaparátů. Byly vybrány modely, reprezentující typické představitele své kategorie – sportovní kamera [16], digitální zrcadlovka [29], profesionální fotogrammetrická kamera [39].

Výrobce Model	GoPro HERO 5 Black	Nikon D7100	VEXCEL UltraCam Eagle Mark 3
Rozlišení	4 000 × 3 000	6 000 × 4 000	8 820 × 5 688
Velikost snímače	6,2 mm × 4,7 mm	24 mm × 16 mm	–
Velikost pixelu	–	–	4 μm
Typ snímače	CMOS, RGB	CMOS, RGB	CCD, RGB+NIR
RAW	GPR	NEF	–
Ovládání	Bluetooth, WiFi	USB, WiFi modul, kabel	–
GSD v 500 m	29,38 cm	2,75 cm	2 cm
Objektiv	pevný	výměnný, Tamron	výměnný
Ohnisko	1,7 až 2 mm	24 až 70 mm	100 mm
Světelnost	f2.8	f2.8	f5.6
Hmotnost	0,117 kg	0,765 kg	61 kg
Rozměry	45/62/33 mm	136/107/76 mm	430/730/430 mm
Orientační cena	8 000 Kč	50 000 Kč	–

Tabulka 2.3: Parametry fotoaparátů

Některé údaje se nepodařilo dohledat a nebo nebyl znám způsob jejich dopočítání z jiných parametrů.

## 2.6 Tablet

Tablety se od takzvaných chytrých telefonů odlišují především větším displejem – v úhlopříčce 7" (tj. 18 cm) a více. Větší velikost těla tabletu zároveň umožňuje použití větší baterie. Tyto dvě vlastnosti jsou výhodné pro použití tabletu pro navigaci či ukládání telemetrie.

### 2.6.1 Lenovo YT3–X50M (Yoga Tab 3 10)

Lenovo YT3–X50M, známý také pod obchodním jménem Yoga Tab 3 10, je tablet střední třídy klasické konstrukce. Tabulka 2.4 shrnuje důležité parametry [19].

<b>Výrobce</b>	Lenovo
<b>Model</b>	YT3-X50M (Yoga Tab 3 10)
<b>Operační systém</b>	Android 6.1.1
<b>Rozměry (Š × V × T)</b>	253 mm × 9,5 mm až 3,5 mm × 185 mm
<b>Displej</b>	10.1" IPS (1280 × 800 pixelů)
<b>Baterie</b>	8.4 Ah
<b>Procesor</b>	Qualcomm MSM8909
<b>RAM</b>	2 GB
<b>Flash</b>	16 GB
<b>Vstupní a výstupní porty</b>	Micro USB, microSD
<b>WiFi</b>	802.11 b/g/n, 2,4 GHz
<b>Bluetooth</b>	Bluetooth 4
<b>Mobilní konektivita</b>	GSM, UMTS, CDMA, LTE
<b>GNSS</b>	GPS + GLONASS / Beidou
<b>Ostatní senzory</b>	Akcelerometr, Vibrace, Hallův senzor
<b>Orientační cena</b>	5 000 Kč

Tabulka 2.4: Parametry tabletu Lenovo YT3-X50M (Yoga Tab 3 10)

Na trh byl uveden ve čtvrtém kvartálu roku 2015 s operačním systémem Android 5.1. V současnosti je dostupná oficiální aktualizace na verzi 6.1.1.

### 2.6.2 Operační systém Android

Operační systém Android, vyvíjený společností Google Inc., je nejrozšířenějším operačním systémem pro takzvané chytré telefony a tablety. Aplikace je možné vyvíjet v jazyce Java nebo Kotlin a k dispozici je i podpora pro jazyky C/C++ [14]. K dispozici je velké množství knihoven, což značně usnadňuje vývoj.

## Kapitola 3

# Zhodnocení současného stavu a plán práce

Profesionální fotogrammetrické kamery mají špičkové parametry snímání. To je však vykoupeno vysokou cenou, poměrně velkými rozměry a vysokou hmotností. Pro širší veřejnost, velkou řadu společností a akademických pracovišť jsou finančně nedostupné. Jako problematické se rovněž jeví rozměry a hmotnost. Upevnění takové kamery je složité a nejspíš bude vyžadovat úpravy trupu letounu, které by byly nezanedbatelného rozsahu.

V případě, že je nutné realizovat vlastními silami a prostředky fotografování terénu z letounu a je možné slevit nároky na kvalitu, lze použít levnější, široké veřejnosti běžně dostupná zařízení.

### 3.1 Návrh řešení

Analýzou současného stavu (kapitola 2) bylo zjištěno, že při fotografování terénu z letounu je nutné řešit plánování a přípravu letu, navigaci, záznam telemetrie a kameru (včetně způsobu ovládání). Ze zjištěných skutečností také vyplynulo, že navigační zařízení musí být dostupné pilotovi v kabině, zatímco snímací zařízení je vhodné umístit vně trupu letounu. Systém tedy bude muset být tvořen nejméně dvěma oddělenými zařízeními, přičemž je mezi nimi nutná vzájemná komunikace.

Během přípravy letu a během letu samotného se předpokládá interakce mezi navigačním zařízením a pilotem, popřípadě jinou osobou mající na starosti průběh snímání.

Některé ze zařízení bude muset umožňovat určení pozice a polohy letounu vůči zemi, aby byly zajištěny optimální podmínky pro fotografování. Tyto a další relevantní údaje změřené v okamžiku pořízení snímku bude nutné zaznamenat.

#### 3.1.1 Hardware

Uvedeným požadavků nejvíce vyhovují některé mobilní osobní počítače (myšleno v širším slova smyslu). V úvahu připadají notebooky, tablety a takzvané chytré telefony. Jako vhodnější se jeví tablety a chytré telefony, jelikož mívají zabudované senzory pro určení pozice a polohy. Notebooky obvykle těmito senzory nedisponují (nutnost použití externích senzorů) a navíc nemají tak kompaktní rozměry. Nakonec byl při výběru upřednostněn tablet, kvůli většímu displeji, který umožňuje vyšší uživatelský komfort a kvůli větší baterii.

Kamera by měla být pokud možno snadno přimontovatelná na letoun, musí odolávat vlivům vznikajícím při letu, zejména větru a také by měla mít adekvátní výdrž na baterii. Výhodou je možnost bezdrátového ovládání.

Cena vhodného hardwaru se může pohybovat v řádu jednotek až nízkých desítek tisíc korun v závislosti na požadavcích na kvalitu snímků.

### 3.1.2 Software

Software, který by vyhovoval požadavkům, se nepodařilo dohledat, je nutné ho vytvořit vlastními silami. Tím je dána volnost při výběru operačního systému tabletu. Kritéria pro výběr vhodné softwarové platformy jsou v tomto pořadí – rozšířenost operačního systému, předchozí zkušenosti s používáním a vývojem, dostupnost a kvalita vývojových prostředků, dostupnost zařízení pro testování a dokumentace, náklady na vývoj.

Na základě tržního podílu byly do užšího výběru zvoleny operační systémy Android vyvíjený společností Google a iOS vyvíjený společností Apple [36] [35]. Výhodou je, že se oba operační systémy používají i na chytrých telefonech a aplikace jsou tedy použitelné i tam. Ostatní operační systémy měly tržní podíl v řádu jednotek procent.

S používáním zařízení s operačním systémem iOS nemá autor práce zkušenosti. Stejně tak nemá zajištěn bezproblémový přístup k vývojovým nástrojům a zařízením pro testování. S používáním zařízení s operačním systémem Android má autor práce zkušenosti. S vývojem aplikací pro tento systém sice zkušenosti nemá, ale ovládá na potřebné úrovni použitelný jazyk Java. Vývojové prostředky jsou bez problémů dostupné, dostatečně kvalitní a dobře dokumentované. Zařízení pro testování jsou bez problémů dostupná. Vývoj není zatížen licenčními ani jinými poplatky a existují vývojové prostředky dostupné bezplatně. Jako softwarová platforma byl zvolen operační systém Android a jeho knihovny.

Jako mapové podklady byly zvoleny Google Maps, kvůli jednoduchosti použití při programování. Pro účely použití aplikace dostačuje bezplatná varianta.

Zvažována byla i možnost podpory mapových podkladů OpenStreetMap, avšak samotná práce s mapami tvoří pouze malou část aplikace a Google Maps pro daný účel dostačují. Proto bylo od této myšlenky nakonec upuštěno.

### 3.1.3 Požadavky na aplikaci

Výsledná aplikace by měla být použitelná na většině vhodných tabletů s operačním systémem Android a na některých vhodných telefonech se stejným operačním systémem. Použití aplikace v letectví s sebou nese specifické nároky. Jazykem uživatelského rozhraní by měla být angličtina. Uživatelské rozhraní by mělo být jednoduché a přehledné a jednotlivé prvky dostatečně kontrastní.

Vyvíjená aplikace bude obsahovat pouze nezbytně nutné minimum navigačních údajů – směr a vzdálenost k bodům, nad kterými je plánováno pořízení snímků. Vývoj pokročilého systému navigace s plánováním trajektorie a její zakreslování do mapového podkladu by byl značně složitý a vzhledem k existenci specializovaných navigačních systémů a aplikací neúčelný. Pokud je navigace pomocí směru a vzdálenosti k bodu dostačující, je možné použít pouze samotnou aplikaci. Je-li vyžadován pokročilejší způsob navigace, je doporučeno použití doplňkového navigačního zařízení nebo souběžné použití aplikace, jež je předmětem práce, a navigační aplikace na rozdělené obrazovce tabletu (takzvaný *split-screen mode*). K dispozici by měla být navigace na body na mřížce, podél letových os a na samostatné body.

Žádoucí je podpora co největšího počtu kamer, buď v aplikaci zabudované anebo alespoň uživatelem snadno definovatelné. Postačující je alespoň ovládání spouště.

Aplikace by měla umožňovat import a export vstupních parametrů, a to pokud možno ve standardním formátu. Telemetrie by měla být ukládána rovněž ve standardním formátu.

### 3.1.4 Výběr vývojové platformy

Pro vývoj aplikace bylo zvoleno vývojové prostředí Android studio na základě doporučení společnosti Google a na základě doporučení na uživatelských fórech věnujících se problematice vývoje aplikací pro operační systém Android. Obsahuje řadu podpůrných nástrojů, například pro ladění aplikace.

## 3.2 Návrh testování

Nejdříve bude ověřena přesnost senzorů tabletu, a to jak při statické pozici, tak při pohybu.

Funkčnost jednotlivých částí aplikace bude ověřena nezávisle na sobě a poté i jako celek. Boudou zahrnuty testy s parametry předpokládaných standardních i mezních situací. Pro některé testy bude možné využít emulaci na počítači a pro některé testy bude nutné použití fyzického hardwaru.

Spolehlivost navigace a spouště kamery bude u hotové aplikace ověřena nejdříve při pohybu přes naplánované body trasy, nejdříve při nízkých rychlostech (například při chůzi) a poté v rychlostech alespoň přibližně odpovídajících rychlosti letu (například s využitím automobilu). Plánováno je rovněž testování v letounu, při parametrech odpovídajících předpokládanému způsobu letu při reálném používání systému, jež je předmětem práce. Výsledkem tohoto letu by měla být série fotografií, jež by bylo možné v běžném grafickém programu složit dohromady na základě vizuální shody překrývajících se částí sousedních snímků a uložené telemetrie. Věrnost složeného snímku realitě by pak bylo možné porovnat s dostupnými satelitními snímky.

## Kapitola 4

# Popis vlastní práce

Práce na implementaci systému pro fotografování terénu z letounu se skládala z ověření přesnosti senzorů tabletu, podrobného návrhu aplikace, implementace a testování.

### 4.1 Výběr hardwaru

Pro ověření konceptu a testování aplikace byl vybrán tablet Lenovo YT3-X50M (Yoga Tab 3 10), jehož parametry jsou popsány v tabulce 2.4. Použitý operační systém Android 6.1.1 umožňuje použití API level 23, které nabízí užitečné funkce.



Obrázek 4.1: GoPro HERO 5 Black

Předpokládanému způsobu reálného užití by nejvíce odpovídalo testování s digitálním fotoaparátem se střední až dlouhou ohniskovou vzdáleností. Z důvodu vyšší mechanické odolnosti a nižší možnosti umožňující snazší upevnění na trup letadla byla vybrána sportovní kamera GoPro HERO 5 Black, jejíž vlastnosti jsou popsány v tabulce 2.3. Přestože použití takové kamery není zcela vyloučeno, její širokoúhlý objektiv není příliš výhodný pro dosažení vyšších hodnot GSD. Pro účely testování však kamera GoPro Hero 5 Black vyhovuje. Výhodou této kamery je možnost pořízení série několika snímků při jednom spuštění.

## 4.2 Senzory a služby

Senzory na zařízeních s operačním systémem Android se dělí na hardwarové a softwarové. Hardwarové senzory v zařízení fyzicky existují a hodnoty, které poskytují, vznikají přímým měřením. Oproti tomu softwarové senzory jsou abstraktní a hodnoty, které poskytují, jsou získávány z jiných sensorů a případně zpracovány určitým algoritmem.

Údaje o orientaci a náklonu zařízení nelze získat přímo z jednoho senzoru. Využití softwarového senzoru `TYPE_ORIENTATION` bylo označeno jako zastaralé. Doporučeným způsobem je využití akcelerometru (`TYPE_ACCELEROMETER`) a senzoru geomagnetického pole `TYPE_MAGNETIC_FIELD`. Ze změřených údajů lze výpočtem s rotační maticí získat údaje o náklonu ve třech osách.

Pro získání údajů o pozici se používá služba `Location Service`, která zajišťuje práci s hardwarovými senzory.

Vzhledem k důležitosti přesného měření pozice, náklonu a orientace tabletu byla nejdříve přesnost otestována.

### 4.2.1 Ověření přesnosti měření náklonu a orientace

Byla vytvořena aplikace využívající akcelerometr a senzor geomagnetického pole. Z dat z těchto sensorů byly získávány údaje o náklonu a orientaci.

Nejdříve byla vybrána vodorovná podkladová plocha, na kterou byla umístěna rovná deska. Deska byla stavěna do různých úhlů vůči podkladové ploše a z tabletu umístěného na ní byly odečítány hodnoty náklonu.

Při měření přesnosti orientace byl tablet, stojící na vodorovném podkladu, otáčen podle svislé osy do vybraných úhlů. Po ustálení byl proveden odečet hodnot.

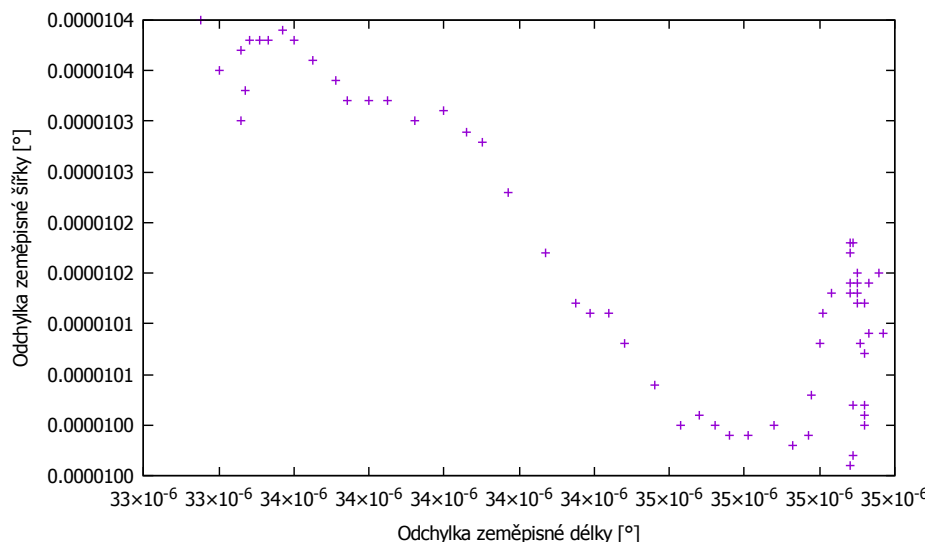
Referenční úhel	Osa X	Osa Y	Osa Z
0°	0, 2°	0, 3°	2°
15°	14, 8°	13, 7°	10°
30°	29, 9°	28, 1°	18°
45°	45, 4°	43, 8°	29°
60°	58, 6°	58, 4°	40°
75°	76, 2°	75, 4°	49°
90°	91, 1°	89, 8°	59°
135°	–	–	80°
180°	–	–	114°
225°	–	–	142°
270°	–	–	187°
315°	–	–	274°

Tabulka 4.1: Měření přesnosti určení náklonů a orientace

Tabulka 4.1 shrnuje výsledky měření přesnosti náklonů a orientace. Měřením náklonů dle vodorovných os *X* a *Y* byla zjištěna vyhovující přesnost. Oproti tomu měření náklonu vůči svislé ose *Z* (orientace) vykazovalo značnou nepřesnost. Dle očekávání bylo zjištěno, že měření orientace trpí značnou chybou je-li v blízkosti magnetický kov nebo zdroj elektromagnetického rušení.

## 4.2.2 Ověření přesnosti určení pozice

Přesnost GPS byla nejdříve testována na staticky umístěném tabletu. Během 10 minut byla v 10 sekundových intervalech zaznamenávána aktuální poloha. Sada naměřených 60 hodnot ukazuje charakteristiky přesnosti GPS (graf 4.2).



Obrázek 4.2: Graf odchylek GPS

Pro další test byly na online mapách Mapy.cz se satelitním podkladem vybrány snadno identifikovatelné body a zaznamenala se jejich poloha. Poté byl tablet přenesen na každý jeden vybraný bod, kde se zaznamenala poloha. Rozdíly vzdáleností mezi vybranými body a skutečně změřenými body jsou vyjádřeny v tabulce 4.2. V téže tabulce je vyjádřen i rozdíl změřené výšky a výšky dle online map.

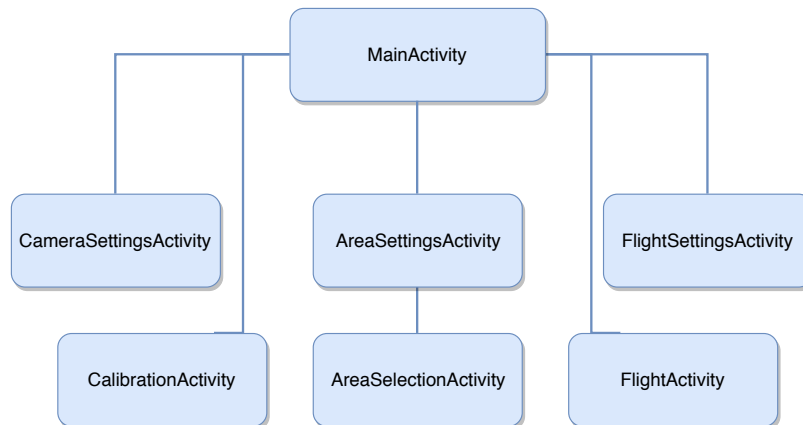
Bod	Rozdíl polohy	Rozdíl výšky	Indikovaná přesnost
1	1 m	48 m	3 m
2	2 m	47 m	3 m
3	2 m	41 m	3 m
4	1 m	39 m	5 m
5	2 m	46 m	3 m
6	2 m	45 m	3 m

Tabulka 4.2: Měření přesnosti určení polohy

Z měření vyplynulo, že horizontální přesnost se pohybuje v řádu jednotek metrů a vertikální v řádu desítek metrů.

## 4.3 Aplikace

Aplikace byla vytvořena v jazyce Java s využitím jeho standardních knihoven a knihoven operačního systému Android. Kompletní přehled je uveden v příloze. Spustitelný program má formát APK (Android Package) balíčku.



Obrázek 4.3: Třídy s grafikou aplikace

Třída `Activity`<sup>1</sup> představuje základ Android aplikace. Programátorem implementované podtřídy zajišťují pomocí grafického rozhraní interakci s uživatelem. Aplikace, jejíž vývoj je předmětem práce, je tvořena sedmi aktivitami (4.3). Při spuštění je zobrazeno grafické rozhraní z `MainActivity`, které slouží jako menu, skrze které lze spouštět další aktivity. Mezi některými instancemi podtříd `Activity` jsou předávána data pomocí metod třídy `Intent`<sup>2</sup>.

Aplikace je možno dělit na následující logické části: nastavení parametrů kamery, výběr oblasti, kalibrace senzorů polohy a orientace, snímkovácí let, ovládání kamery a ukládání telemetrie.

#### 4.3.1 Nastavení parametrů kamery

Při plánování trasy letu je nutná znalost následujících parametrů kamery: rozlišení snímače, jeho velikost a ohniskovou vzdálenost objektivu. Vytvořit a udržovat databázi všech dostupných kamer by bylo velmi náročné, a proto bylo rozhodnuto, že požadované údaje vyplní sám uživatel pomocí jednoduchého formuláře (popřípadě načte ze souboru).

Dále je nutné znát způsob ovládání použité kamery. Jak bylo zjištěno v kapitole 2.5.6, způsoby a protokoly pro ovládání kamer se různí a existující frameworky a knihovny zajišťující ovládání kamer podporují pouze část značek a modelů a jsou příliš komplexní, což se negativně projevuje na jejich velikosti. Proto byl implementován způsob, který umožní komunikaci s co největším počtem kamer, a to sice využití spouště pomocí HTTP protokolu s metodou GET. URL vyplní rovněž uživatel prostřednictvím formuláře.

Pro usnadnění navigace se počítá pouze se čtvercovým snímačem (u obdélníkových snímků se provádí ořez). Pilotovi je tak dána větší volnost ohledně směru náletu.

Na základě hodnot získaných z formuláře je vytvořena instance třídy `Camera`, která je serializována a pomocí metody třídy `Intent` předána zpět do `MainActivity`.

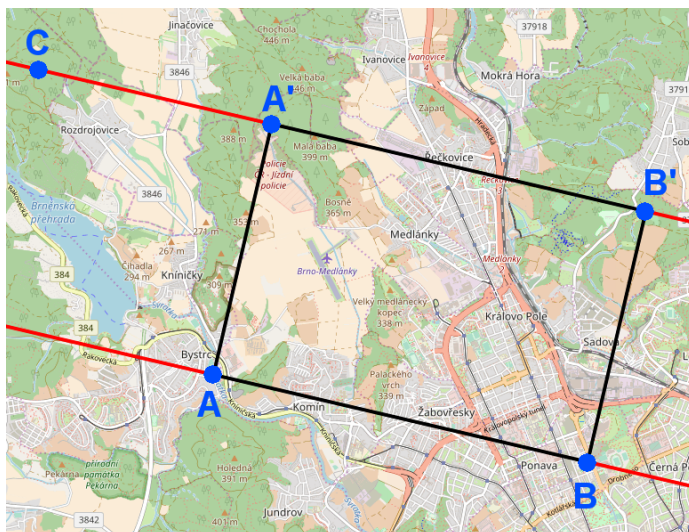
Vyplněný formulář s parametry kamery je možno uložit do souboru formátu CSV. Parametry je možno ze souboru i načíst.

<sup>1</sup><https://developer.android.com/guide/components/activities/intro-activities>

<sup>2</sup><https://developer.android.com/reference/android/content/Intent>

### 4.3.2 Výběr oblasti

Uživatel vybírá oblast určenou pro snímkování pomocí obdélníkových hranic. Bylo by pro něj však krajně obtížné zvolit čtyři rohové body tak, aby tvořily přesný obdélník. Proto byl zvolen způsob, kdy uživatel vybere dva rohové body obdélníku a jeden bod ohraničující velikost. Zbylé dva rohové body obdélníku jsou dopočítány.



Obrázek 4.4: Výběr oblasti, mapový podklad převzat z: [30]

Na obrázku 4.5 je graficky znázorněn výpočet. Probíhá tak, že rohovými body ( $A$  a  $B$ ) je vedena přímka, k níž je vytvořena rovnoběžná přímka, procházející ohraničujícím bodem ( $C$ ). Z rohových bodů ( $A$  a  $B$ ) jsou vedeny kolmice. Na jejich průsečících s přímkou jdoucí ohraničujícím bodem ( $C$ ) leží zbylé dva rohové body ( $A'$  a  $B'$ ) obdélníku.

$$u = \frac{x_B - x_A}{y_B - y_A} \quad (4.1)$$

$$v = \frac{y_B - y_A}{x_A - x_B} \quad (4.2)$$

$$y_{A'} = \frac{x_C - x_A - u \times y_C + v \times y_A}{v - u} \quad (4.3)$$

$$y_{B'} = \frac{x_C - x_B - u \times y_C + v \times y_B}{v - u} \quad (4.4)$$

$$x_{A'} = x_A + v \times y_{A'} - v \times y_A \quad (4.5)$$

$$x_{B'} = x_B + v \times y_{B'} - v \times y_B \quad (4.6)$$

Vztahy 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 a 4.6 popisují výpočet souřadnic bodů  $A'$  a  $B'$ . Směrnice přímky procházející body  $A$  a  $B$  je značena jako  $u$ , směrnice kolmic na tuto přímku je značena jako  $v$ ,  $x_A$  a  $y_A$  jsou souřadnice bodu  $A$ ,  $x_B$  a  $y_B$  jsou souřadnice bodu  $B$ ,  $x_C$  a  $y_C$  jsou souřadnice bodu  $C$ ,  $x_{A'}$  a  $y_{A'}$  jsou souřadnice bodu  $A'$  a  $x_{B'}$  a  $y_{B'}$  jsou souřadnice

bodou  $B'$ . Vztahy je možné použít, pokud  $u \neq v$ , jinak lze použít jednodušší vztahy. Před samotným použitím vztahů je nutné převést souřadnice Mercatorova zobrazení na souřadnice kartézské. K tomu jsou použity algoritmy z dokumentace OpenStreetMap [31].

Pokud je pilot schopen alespoň zhruba zabezpečit plánovaný směr náletu k bodu, postačí překryv 20 %. Jinak by měl být překryv alespoň 40 %.

Body může uživatel zadat buď pomocí souřadnic v `AreaSettingsActivity` nebo kliknutím na mapu v `AreaSelectionActivity`. Jako mapové podklady jsou využity Google Maps. Jejich bezplatná verze pro aplikace nemá limitovaný počet načtení mapy<sup>3</sup>, na rozdíl od verze pro web.

Na základě souřadnic rohových bodů je vytvořena instance třídy `Area`, která je serializována a pomocí metody třídy `Intent` předána zpět do `MainActivity`.

### 4.3.3 Kalibrace senzorů polohy a orientace

Předpokládá se, že tablet bude v kabině umístěn tak, aby se neměnil jeho náklon vůči letounu. Vhodným způsobem je například upevnění do držáku.

Tablet však není vždy možné upevnit v takové poloze, aby jím indikované hodnoty náklonu odpovídaly hodnotám náklonu letounu. Proto je nutné umožnit kalibraci. Letoun se během tohoto procesu musí nacházet v ustáleném stavu. Poté jsou do příslušných textových polí v `CalibrationActivity` uživatelem zadány aktuální hodnoty náklonu letounu.

K určení náklonu jsou použita data z akcelerometru a senzoru geomagnetického pole, ze kterých jsou výpočtem s rotační maticí získány náklony ve dvou horizontálních osách a v ose vertikální (orientace).

Na základě získaných hodnot korekce ve třech osách je vytvořena instance pomocné třídy `PositionSensor`, která je serializována a předána zpět do `MainActivity`.

### 4.3.4 Výpočet trajektorie

Do `FlightSettingsActivity` jsou pomocí metod třídy `Intent` předány objekty `Camera` a `Area`. Uživatel prostřednictvím textových polí v této aktivitě zvolí GSD nebo výšku letu, maximální povolený náklon, toleranci vzdálenosti od bodu, překryvy a vybere směr náletu. Poté je podle výpočtů rozdělena oblast na souběžné pásy nebo dlaždice a stanovena trasa letu přes všechny body, kde má proběhnout snímání. Nadmořská výška terénu snímané oblasti je počítána jako aritmetický průměr výšek krajních bodů. Pro každý jeden bod vytvořena instance třídy `WayPoint`. Ty jsou pak vloženy do seznamu vytvořeného v objektu `Area`.

Alternativně může uživatel načíst seznam bodů ze souboru ve formátu KML. V takovém případě lze, kromě řadového a mřížkového snímání, snímat i samostatné body.

Základním snímacím režimem je snímání po dlaždicích. Pomocí něj se provádí i řadové snímání, tím že je nastaven vyšší podélný překryv (přibližně 60 %). Oproti implementaci, kdy by byly snímky pořizovány v časových intervalech, není pilot nucen udržovat konstantní rychlost letu.

Instance třídy `Area` je nakonec serializována a pomocí metody třídy `Intent` předána zpět do `MainActivity`.

<sup>3</sup><https://developers.google.com/maps/faq>

### 4.3.5 Snímkovací let

Aktivita `FlightActivity` zabezpečuje navigaci, spouštění kamery a indikaci úspěchu či neúspěchu pořízení snímku. V podstatě jde o průvodce snímkovacím letem. Z `MainActivity` jsou předány objekty `Area` a `Camera` pomocí metody třídy `Intent`.

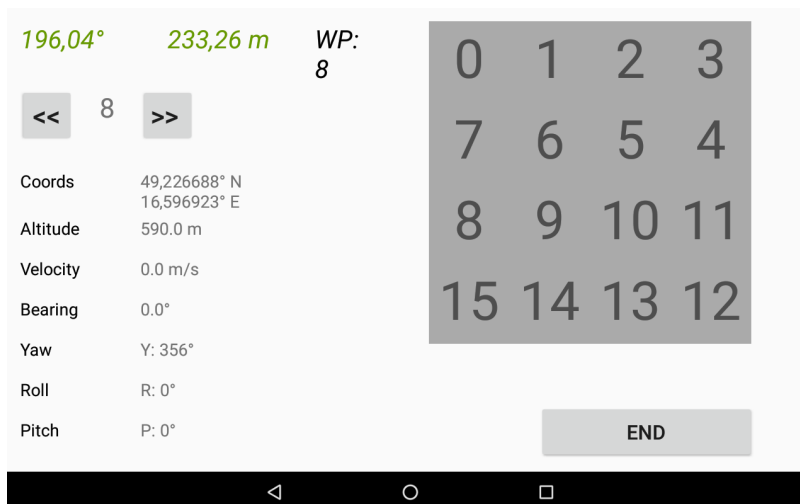
Navigaci tvoří ukazatele vzdálenosti a azimutu k bodu, který je právě v pořadí. Kromě navigačních údajů je zobrazována mřížka polí, odpovídající jednotlivým dlaždicím, na které je oblast rozdělena. Šedivá barva značí dosud nezpracovanou oblast, zelená barva úspěšně vyfotografovanou oblast a červená barva oblast, kterou se nepodařilo vyfotografovat kvůli nadlimitnímu náklonu letounu. Pořadí bodu je určováno na základě náletového plánu tak, aby bylo co nejefektivnější (co nejmenší počet přeletů nad oblastí).

Pokud se letoun dostane do dostatečné blízkosti bodu a pokud je náklon ve stanovených limitech, je pořízen snímek, uloží se telemetrie a bod je označen jako vyfotografovaný. Aplikace se poté začne navigovat na další bod v pořadí. Do výběru bodu může manuálně zasáhnout uživatel a zvolit si jiný.

Pro určování náklonu a orientace jsou použity hodnoty z akcelerometru a senzoru geomagnetického pole. Pro určení polohy je využita systémová služba `Location`. Využívá se metoda `OnLocationChanged`, která je volána v případě změny polohy.

Údaj o orientaci není využit pro kontrolu podmínek snímání, jelikož je značně nepřesný, ukládá se pouze jako telemetrický údaj.

Pokud je počet bodů v řádu nízkých stovek, je možné je fotografovat i mimo pořadí. Je-li počet vyšší, stává se množství výpočtu vzdáleností ke všem bodům, které se děje při každé změně polohy, neúnosným. Proto je při více než 400 bodech nutné striktně dodržovat jejich pořadí. V tomto případě, u bodu, který není v pořadí, se neprovede snímání, byť by byl letoun dostatečně blízko. Pořadí je možno během letu měnit manuálně.



Obrázek 4.5: Navigace

### 4.3.6 Ovládání kamery

Pro ovládání kamery je použit protokol HTTP s metodou GET. Požadavek na URL ovládající spoušť je realizován metodou třídy `HttpClient`. Třída dědí z abstraktní třídy `AsyncTask`, která umožňuje běh procesu na pozadí (na Android nutná podmínka pro HTTP komunikaci).

Pro dálkové pořízení snímku kamerou GoPro HERO 5 Black je nutné se připojit s počítačem na kamerou vytvořený Access Point a zadat HTTP GET požadavek na URL `http://10.5.5.9/gp/gpControl/command/shutter?p=1`. Totožný postup funguje na kamerách GoPro HERO 4 a novějších a velice podobný způsob (liší se pouze URL) funguje na ostatních GoPro kamerách.

#### 4.3.7 Ukládání telemetrie

Ukládaná telemetrie obsahuje následující údaje platné při pořízení snímku:

- pořadové číslo bodu trasy
- souřadnice a nadmořskou výšku
- indikovanou horizontální přesnost určení polohy
- čas ve formátu Unixového času
- rychlost
- azimut vypočítaný z pohybu
- azimut určený z údajů akcelerometru a senzoru geomagnetického pole
- náklon podle obou horizontálních os

Základní značky formátu KML umožňují ukládání polohy, nadmořské výšky a azimutu. K uložení dalších potřebných údajů jsou využity vlastní značky (**ExtendedData**) a v nich zanořené značky **Data** s pojmenováním **data** a **value** obsahující hodnotu.

### 4.4 Příklad použití

Na následujícím příkladu bude demonstrován typický případ užití systému. Uživatel chce pořídit detailní snímky okolí svého bydliště. Nejdříve ověří, zda se v této oblasti nenacházejí zakázané prostory (nutno ověřit i před samotným letem). Opatří si tablet s operačním systémem Android, vhodnou kameru a úchyty. Do tabletu nahraje aplikaci.

Kameru namontuje pod trup letounu tak, aby osa optické soustavy byla kolmá vůči zemi. Tablet upevní do kabiny tak, aby byla jeho pozice vůči letounu neměnná. Na kameře zapne WiFi hotspot a připojí k němu tablet. Dále nastaví parametry kamery ve volbě **Camera Settings**. Poté pomocí voleb **Area** a **Select Area** vybere oblast, kterou chce snímat. Vybranou oblast bude tvořit čtverec o straně 2 km. Ve volbě **Flight Settings** nastaví režim snímání jednotlivých dlaždic, cílové GSD na 15 centimetrů a překryv 20 %. Výpočtem s využitím těchto údajů a parametrů kamery bude plocha rozdělena na 16 dlaždic o straně 500 metrů a výška letu bude stanovena na 500 metrů nad terénem. Předpokládejme, že si pilot vystačí s jednoduchou navigací v aplikaci. Díky překryvu 20 % je tolerance chyby polohy až 100 metrů.

V okamžiku, kdy bude letoun ve vzduchu a ustálený, přejde se ke kalibraci (volba **Calibration**). Poté už je možno spustit prostřednictvím volby **Start** průvodce snímko-  
vacím letem. Pilot je navigován na první bod a postupně i na další. Pro představu, při rychlosti 180 km/h bude čas letu mezi dvěma body 20 sekund. Po prolétnutí celé trasy

ukončí navigaci. V tuto chvíli by mělo být na kameře 16 fotografií a v paměti tabletu uložena telemetrie ke každému snímku.

Uživatel poté může stáhnout fotografie z kamery a ve vhodném grafickém programu vytvořit výslednou složeninu. Při skládání mohou být vítanou pomocí data z telemetrie, která se zaznamenává pro každý pořízený snímek.

## 4.5 Testování

Během vývoje byly prováděny jednotkové testy všech komponent. Důraz byl kladen na ověření přesnosti výpočtu pozice bodů trasy, ovládání kamery a práce s formátem KML. Po dokončení vývoje byl proveden test funkčnosti aplikace v emulátoru, při kterém byl simulován pohyb pomocí ručního nastavování pozice. Následovaly testy v terénu, nejdříve za nízké rychlosti (při chůzi) a poté ve vyšší rychlosti (v automobilu). Plánovaný test v letounu bohužel nebylo možné z časových důvodů uskutečnit.

### 4.5.1 Testování v terénu – nízká rychlost

Cílem testování bylo ověření základní funkčnosti aplikace – navigace na jednotlivé body, pořízení snímků v jejich blízkosti, pokud vyhovoval náklon tabletu a ukládání telemetrie. Výstupem testů měly být poznatky, zda jsou v každém bodě správně pořízeny snímky a zda je uložena telemetrie.

Testy probíhaly tak, že s pomocí online map Mapy.cz byl vytyčen určitý počet bodů, obvykle 9 až 16. Tyto body byly importovány do aplikace. Tablet byl připojen ke kameře, poloměr kruhové oblasti okolo vytyčených bodů, ve kterých mělo dojít ke spuštění kamery, byl nastaven na 10 metrů. Tolerance horizontálního náklonu byla nastavena na 10°. Poté byl provedena kalibrace senzorů náklonu.

Mezi jednotlivými body se přesouvalo pěšky. Bylo potvrzeno, že při nadlimitním náklonu se snímek neprovede. Rovněž bylo ověřeno, že je možné snímat body mimo pořadí. Celkem proběhlo pět testů, při kterých nebyl zaznamenán žádný problém. Soubor s telemetrií je obsažen v příloženém paměťovém médiu.

### 4.5.2 Testování v terénu – vyšší rychlost

Cílem testování bylo ověření funkčnosti aplikace v rychlostech odpovídajících rychlosti letu. Výstupem testů měly být poznatky, zda jsou v každém bodě správně pořízeny snímky a uložena telemetrie a její statistické zpracování.

Jako ideální pro napodobení rychlostí letounu se jevil automobil. Zákon o silniční dopravě však omezuje rychlost jízdy na různých typech komunikací. Nejvyšší legálně dosažitelná rychlost je 130 km/h (36,11 m/s) na dálnicích. Tato rychlost zcela neodpovídá typické rychlosti letu při snímkování, avšak přibližuje se jí.

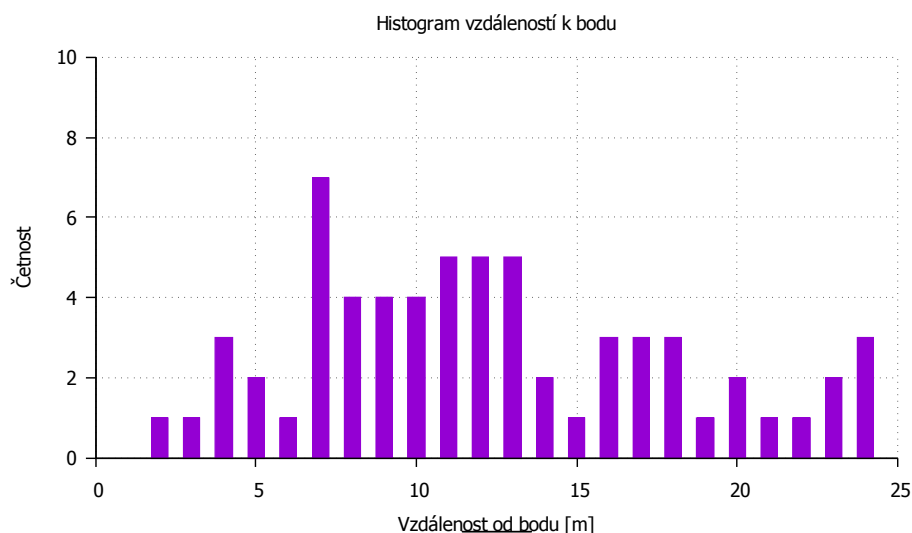
Pro účely testu byl vybrán úsek dálnice D1 mezi exitem 134 (Měřín) a exitem 146 (Velké Meziříčí-východ). S pomocí online map Mapy.cz bylo stanoveno 32 bodů ve směru na Brno a 32 bodů ve směru na Prahu. Body byly vždy umístěny mezi levým a pravým jízdním pruhem a rozestupy činily přibližně 200 metrů.

Při testu byl nastaven poloměr oblasti snímání na 10 metrů. Snímek se podařilo udělat pouze v 10 bodech z projetých 32. Poté byl test přerušeno. Analýzou telemetrie bylo zjištěno, že v mnoha případech senzor GPS nestačil zachytit okamžik, kdy se tablet nacházel v oblasti 10 metrů od bodu. Kromě nedostatečné rychlosti získávání údajů o poloze, pramenící

z vlastností samotného senzoru, mohla hrát roli i nižší přesnost GPS. Jak bylo popsáno v kapitole 2.3, s rostoucí rychlostí pohybu klesá přesnost určení polohy. Při rychlosti pohybu v řádu jednotek metrů za sekundu se pohybuje indikovaná přesnost okolo hodnoty 3 metrů. Se zvyšující se rychlostí se zvyšuje i hodnota indikované přesnosti. Při rychlosti okolo 35 m/s byla indikovaná přesnost již okolo 12 metrů.

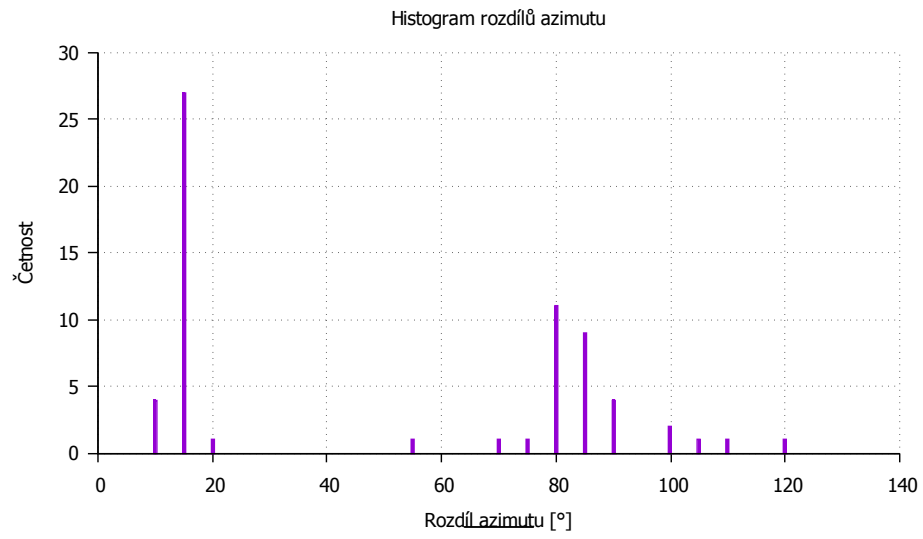
Před opakováním testu byl poloměr oblasti, ve které se má pořídit snímek, byl zvětšen na 25 metrů. Tato hodnota byla zvolena tak, aby se tablet nacházel při dané rychlosti v aktivační oblasti alespoň sekundu. Během tohoto času dokáže GPS senzor změřit polohu alespoň jednou. Test provedený se změněným poloměrem aktivační oblasti byl úspěšný. Ve všech 64 bodech se podařilo udělat snímek a uložit telemetrii.

U telemetrie byla sledována zejména vzdálenost místa pořízení snímku od plánovaného bodu trasy (znázorněno histogramem na obrázku 4.6). Z těchto údajů lze určit, zda je tolerance blízkosti k bodu pro danou rychlost a dané navigační možnosti vhodně zvolená. Mnoho bodů pořízených v krajní vzdálenosti od bodu trasy značí buď špatnou navigaci anebo pro danou rychlost neadekvátně velkou toleranci vzdálenosti. Hodnoty zaznamenané při testu se zdají být v pořádku.



Obrázek 4.6: Histogram vzdáleností k bodu

Kromě vzdálenosti byl sledován rozdíl mezi azimutem vypočítaným z pohybu a azimutem získaným z akcelerometru a senzoru geomagnetického pole (znázorněno histogramem na obrázku 4.7). Odchyłky byly mnohdy až příliš vysoké. Za přesnější lze považovat, dle kontroly azimutu mezi body na online mapách Mapy.cz, azimut vypočítaný z pohybu.



Obrázek 4.7: Histogram rozdílu azimutu

Při testu za vyšší rychlosti se podařilo pořídit všechny plánované snímky. Průměrná rychlost při snímání byla 35,6 m/s. V tabulkách [B.1](#) a [B.2](#) jsou uvedeny podrobnější informace.

## Kapitola 5

# Závěr

Cílem práce bylo vytvoření systému pro navigaci letounu, automatické ovládání snímacího zařízení a ukládání telemetrie s prostředky dostupnými široké veřejnosti.

Záměr byl splněn. Na základě poznatků získaných z dostupné literatury bylo navrženo řešení sestávající z dálkově ovládané kamery, tabletu a aplikace, kterou bylo nutné pro tyto účely naprogramovat. Aplikace slouží pro plánování trasy letu, základní navigaci, ovládání kamery a záznam telemetrie. Při ověřování funkčnosti bohužel nebylo možné z časových důvodů provést testovací let. Proto byl zvolen náhradní způsob, který se v důležitých aspektech podobal snímkovacímu letu. Ověření proběhlo úspěšně, ve všech plánovaných bodech trasy byl úspěšně pořízen snímek.

Navržený systém představuje cenově dostupnou alternativu k drahým profesionálním kamerám a navigačním zařízením. Celková cena se může pohybovat v řádu jednotek až nízkých desítek tisíc korun. Vzhledem k ceně komponent nelze očekávat kvalitu výstupu plně srovnatelnou s profesionálními systémy, avšak pro řadu účelů by měla být dostatečná. Předpokládanou uživatelskou základnu tvoří zejména akademická pracoviště s omezeným rozpočtem, menší společnosti a jednotlivci využívající snímky pro osobní potřeby.

Práce pro mě byla přínosná, jelikož mi přinesla zajímavé teoretické a praktické poznatky o fungování systému GPS. Dále jsem při implementaci získal první zkušenosti s vývojem aplikací pro operační systém Android.

Jako zajímavá se jeví možnost rozšířit aplikaci pro použití na malých bezpilotních prostředcích, takzvaných dronech. Drony se totiž čím dál více prosazují v oblasti leteckého snímání terénu, jelikož jsou méně nákladné než pilotované letouny. Upravená aplikace by mohla dron řídit.

# Literatura

- [1] Adimec Advanced Image Systems bv. : *CCD VS. CMOS, SENSITIVITY IN LOW LIGHT IMPROVEMENTS WITH INDUSTRIAL CMOS IMAGE SENSORS AND CAMERAS*. [Online; navštíveno 25.3.2018]. Dostupné z: <https://www.adimec.com/ccd-vs-cmos-sensitivity-in-low-light-improvements-with-industrial-cmos-image-sensors-and-cameras/>
- [2] Daniela Bowker : *What was an optical low-pass filter and why did we need one?* 2013, [Online; navštíveno 20.2.2018]. Dostupné z: <http://www.photocritic.org/articles/what-was-an-optical-low-pass-filter-and-why-did-we-need-one>
- [3] DigiCamControl : *Complete feature list*. [Online; navštíveno 2.5.2018]. Dostupné z: <http://digicamcontrol.com/doc/basics/featurelist>
- [4] Dobrovolný, P. : *Základy fotogrammetrie*. [Online; strana 2; navštíveno 19.12.2017]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101/um/FOTOGRAM\\_01.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101/um/FOTOGRAM_01.pdf)
- [5] Dobrovolný, P. : *Základy fotogrammetrie*. [Online; navštíveno 19.12.2017]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101/um/FOTOGRAM\\_03.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101/um/FOTOGRAM_03.pdf)
- [6] Dobrovolný, P. : *Základy fotogrammetrie*. [Online; navštíveno 26.4.2018]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101/um/FOTOGRAM\\_04.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101/um/FOTOGRAM_04.pdf)
- [7] Dobrovolný, P. *Dálkový průzkum Země, Digitální zpracování obrazu*. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Katedra geografie, 1998. ISBN 80-210-1812-7.
- [8] Driggers, R. G. *Encyclopedia of Optical Engineering: Las-Pho*. Marcel Dekker, Inc., 2003. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=f3zUKZZ\\_WjMC](https://books.google.cz/books?id=f3zUKZZ_WjMC). ISBN 978-0-8247-4251-5.
- [9] European GNSS Agency : *GNSS market report*. 2015, [Online; strana 15; navštíveno 6.2.2018]. Dostupné z: [https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/GNSS-Market-Report-2015-issue4\\_0.pdf](https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/GNSS-Market-Report-2015-issue4_0.pdf)
- [10] European Space Imaging : *Satellite details*. [Online; navštíveno 14.3.2018]. Dostupné z: <http://www.euspaceimaging.com/satellites/12-satellite-details>
- [11] Foveon, Inc. : *X3 TECHNOLOGY DIRECT IMAGE SENSORS*. [Online; navštíveno 15.3.2018]. Dostupné z: <http://www.foveon.com/article.php?a=67>
- [12] Franke, V. J. : *Depth of Field (DoF), Angle of View, and Equivalent Lens Calculator*. 2010, [Online; navštíveno 20.2.2018]. Dostupné z:

- <<https://www.pointsinfocus.com/tools/depth-of-field-and-equivalent-lens-calculator/#methodology>>
- [13] GEOREAL spol. s r.o. : *Letadla*. [Online; navštíveno 20.4.2018]. Dostupné z: <<http://www.topgis.cz/cs/o-nas-2/#technika3>>
- [14] Google Inc. : *About the platform*. [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <<https://developer.android.com/about/>>
- [15] Google Inc. : *KML Reference*. [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <<https://developers.google.com/kml/documentation/kmlreference?csw=1>>
- [16] GoPro, Inc. : *HERO 5 BLACK*. [Online; navštíveno 2.5.2018]. Dostupné z: <[https://gopro.com/content/dam/help/hero5-black/manuals/HERO5Black\\_UM\\_ENG\\_REVC\\_Web.pdf](https://gopro.com/content/dam/help/hero5-black/manuals/HERO5Black_UM_ENG_REVC_Web.pdf)>
- [17] KonradIT : *Unofficial GoPro Wifi http API*. [Online; navštíveno 2.5.2018]. Dostupné z: <<https://github.com/KonradIT/goprowifihack>>
- [18] Leachtenauer, J. C.; Driggers, R. G. *Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems: Modeling and Performance Prediction*. Artech House, 2001. Dostupné z: <[https://books.google.cz/books?id=f3zUKZZ\\_WjMC](https://books.google.cz/books?id=f3zUKZZ_WjMC)>. ISBN 978-1-58053-132-0.
- [19] Lenovo Technology B.V. organizační složka : *Yoga Tab 3 10*. [Online; strana 4-2; navštíveno 26.4.2018]. Dostupné z: <<https://www3.lenovo.com/cz/cs/tablets/android-tablets/yoga-tab-3-series/Yoga-Tab-3-10/p/ZZITZTBYT2F>>
- [20] Lombardi, M. A.; Nelson, L. M.; Novick, A. N.; aj. : *Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System (GPS)*. [Online; strana 2; navštíveno 20.4.2018]. Dostupné z: <<https://tf.nist.gov/general/pdf/1417.pdf>>
- [21] Merklinger, H. M. *FOCUSING the VIEW CAMERA*. Harold M. Merklinger, 2002. Dostupné z: <<http://www.trenholm.org/hmmerk/TIA00Fe.pdf>>. ISBN 0-9695025-0-8.
- [22] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing : *GPS Accuracy*. [Online; navštíveno 12.4.2018]. Dostupné z: <<https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>>
- [23] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing : *How GPS Works*. [Online; navštíveno 4.4.2018]. Dostupné z: <<https://www.gps.gov/multimedia/poster/poster.txt>>
- [24] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing : *Space Segment*. [Online; platné ke 14.3.2018; navštíveno 4.4.2018]. Dostupné z: <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>
- [25] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing : *GLOBAL POSITIONING SYSTEM PRECISE POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD*. 2007, [Online; strana 3; navštíveno 16.4.2018]. Dostupné z: <<https://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf>>

- [26] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing : *GLOBAL POSITIONING SYSTEM WIDE AREA AUGMENTATION SYSTEM (WAAS) PERFORMANCE STANDARD*. 2008, [Online; strana 22; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf>
- [27] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing : *An Analysis of Global Positioning System (GPS) Standard Positioning System (SPS) Performance for 2016*. 2016, [Online; navštíveno 18.4.2018]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/2016-GPS-SPS-performance-analysis.pdf>
- [28] Navipedia contributors : *EGNOS Performances*. 2014, [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: [http://www.navipedia.net/index.php?title=EGNOS\\_Performances&oldid=13243](http://www.navipedia.net/index.php?title=EGNOS_Performances&oldid=13243)
- [29] Nikon Corporation : *Nikon Digital SLR Camera D7100 Specifications*. [Online; navštíveno 2.5.2018]. Dostupné z: <http://imaging.nikon.com/lineup/dslr/d7100/spec.htm>
- [30] OpenStreetMap contributors : OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org>, 2018.
- [31] OpenStreetMap Wiki contributors : *Mercator*. 2017, [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <https://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=Mercator&oldid=1531699>
- [32] Pavelka, K. *Fotogrammetrie 1. České vysoké učení technické v Praze*, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [33] Präkel, D. *The Visual Dictionary of Photography*. AVA Publishing (UK) Ltd., 2010. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=f7X5vYbUd0sC>. ISBN 978-2-940411-04-7.
- [34] Silicon Imaging : *RGB Bayer Color and MicroLenses*. [Online; navštíveno 15.3.2018]. Dostupné z: <http://www.siliconimaging.com/RGB%20Bayer.htm>
- [35] StatCounter : *Tablet Operating System Market Share Worldwide*. 2017, [Online; navštíveno 3.5.2018]. Dostupné z: <http://gs.statcounter.com/os-market-share/tablet/worldwide>
- [36] Statista : *Tablet operating systems' market share worldwide from 2013 to 2020*. 2018, [Online; navštíveno 3.5.2018]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/272446/global-market-share-held-by-tablet-operating-systems/>
- [37] Technical Standardization Committee on AV & IT Storage Systems and Equipment : *Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.2*. 2002, [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <http://www.exif.org/Exif2-2.PDF>
- [38] TopGis, s.r.o. : *Letecký park*. [Online; navštíveno 20.4.2018]. Dostupné z: <http://georeal.cz/letecky-park>

- [39] VEXCEL IMAGING : *ULTRACAM EAGLE MARK 3*. [Online; navštíveno 2.5.2018]. Dostupné z: <[http://www.vexcel-imaging.com/wp-content/uploads/2017/10/UC\\_Eagle\\_M3.pdf](http://www.vexcel-imaging.com/wp-content/uploads/2017/10/UC_Eagle_M3.pdf)>
- [40] Wikipedia contributors : *LORAN*. 2017, [Online; navštíveno 24.4.2018]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=LORAN&oldid=817765902>>
- [41] Wikipedia contributors : *Ephemeris*. 2018, [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <<https://https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ephemeris&oldid=837888216>>
- [42] Wikipedia contributors : *GPS Exchange Format*. 2018, [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS\\_Exchange\\_Format&oldid=821292762](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS_Exchange_Format&oldid=821292762)>
- [43] Wikipedia contributors : *Mercator projection*. 2018, [Online; navštíveno 23.4.2018]. Dostupné z: <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:OrthoPerspective.svg&oldid=1524950774>>
- [44] Wikipedia contributors : *Mercator projection*. 2018, [Online; navštíveno 23.4.2018]. Dostupné z: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mercator\\_projection&oldid=833842524](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mercator_projection&oldid=833842524)>
- [45] Wikipedia contributors : *Tissot indicatrix world map Behrmann*. 2018, [Online; navštíveno 23.4.2018]. Dostupné z: <[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Tissot\\_indicatrix\\_world\\_map\\_Behrmann\\_equal-area\\_proj.svg&oldid=203837825](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Tissot_indicatrix_world_map_Behrmann_equal-area_proj.svg&oldid=203837825)>
- [46] Wikipedia contributors : *World Geodetic System*. 2018, [Online; navštíveno 23.4.2018]. Dostupné z: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=World\\_Geodetic\\_System&oldid=833859450](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=World_Geodetic_System&oldid=833859450)>
- [47] Wikipedia contributors : *Zlín Z 37*. 2018, [Online; navštíveno 24.4.2018]. Dostupné z: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Zl%C3%ADn\\_Z\\_37&oldid=835097226](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Zl%C3%ADn_Z_37&oldid=835097226)>
- [48] William J. Hughes Technical Center WAAS T&E Team : *Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Analysis Report*. 2016, [Online; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <[http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN96\\_0117.pdf](http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN96_0117.pdf)>
- [49] Úřad pro civilní letectví : *LETECKÝ PŘEDPIS PRAVIDLA LÉTÁNÍ L 2*. 2017, [Online; strana 4-2; navštíveno 25.4.2018]. Dostupné z: <[https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2\\_cely.pdf](https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf)>

# Seznam obrázků

2.1	Řádkové snímkování, mapový podklad převzat z: [30]	4
2.2	Dlaždicové snímkování, mapový podklad převzat z: [30]	4
2.3	Snímky dle úhlu, převzato z: [6]	5
2.4	Rozdíl mezi ortografickou a perspektivní projekcí, převzato z: [43]	5
2.5	Projekční zkreslení, mapový podklad převzat z: [30]	5
2.6	Histogram horizontální chyby, převzato z: [48]	9
2.7	Histogram vertikální chyby, převzato z: [48]	9
2.8	Behrmannovo zobrazení zkreslení, převzato z: [45]	10
2.9	Zorný úhel	12
2.10	Zorné pole	12
2.11	Soudkovité zkreslení	14
2.12	Poduškovité zkreslení	14
4.1	GoPro HERO 5 Black	21
4.2	Graf odchylek GPS	23
4.3	Třídy s grafikou aplikace	24
4.4	Výběr oblastí, mapový podklad převzat z: [30]	25
4.5	Navigace	27
4.6	Histogram vzdáleností k bodu	30
4.7	Histogram rozdílů azimutu	31
B.1	Histogram indikované přesnosti	39

## Příloha A

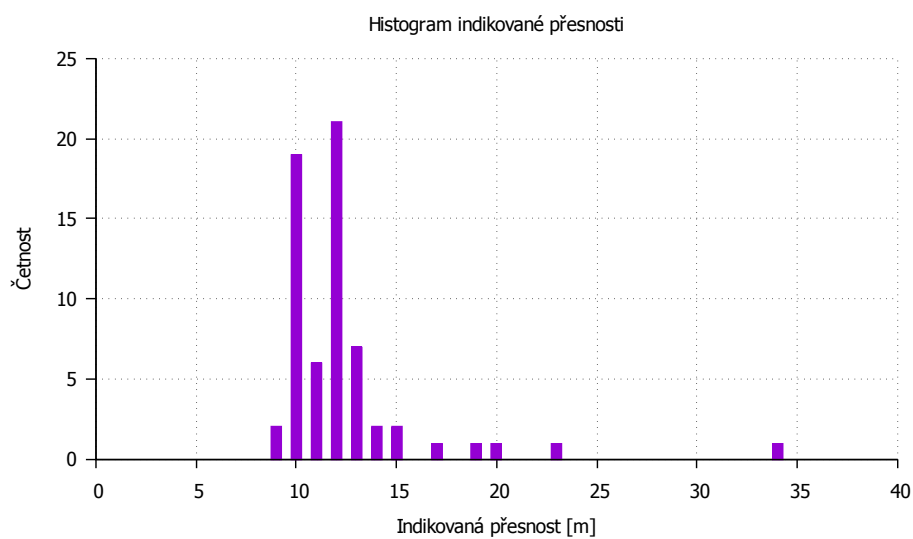
# Obsah přiloženého paměťového média

- `data/` – složka s daty z testů
- `doc/` – složka s textem práce a dokumentací Javadoc
- `img/` – složka s obrázky grafického rozhraní aplikace
- `src/` – složka se zdrojovými kódy aplikace
- `README` – soubor s obecnými informacemi

## Příloha B

# Data z testů

Histogram na obrázku B.1 znázorňuje četnosti indikované přesnosti GPS. Tabulky B.1 a B.2 obsahují data z testu aplikace při vyšších rychlostech na dálnici. WP (Way Point) značí pořadové číslo bodu trasy, Distance je vzdálenost místa pořízení snímku od bodu trasy, Velocity aktuální rychlost v místě pořízení snímku, Accuracy indikovaná přesnost GPS, Bearing azimut vypočítaný z pohybu a Yaw je azimut vypočítaný na základě údajů z akcelerometru a senzoru geomagnetického pole.



Obrázek B.1: Histogram indikované přesnosti

WP	Distance	Velocity	Accuracy	Bearing	Yaw
0	21,05 m	35,94 m/s	15 m	117,8°	125,8°
1	11,13 m	36,04 m/s	15 m	117,2°	126,1°
2	7,46 m	35,4 m/s	13 m	112,8°	124,6°
3	17,5 m	35,69 m/s	17 m	109,1°	121,8°
4	14,68 m	35,51 m/s	34 m	106,1°	120,5°
5	23,54 m	35,83 m/s	19 m	104,6°	121,4°
6	18,97 m	36 m/s	23 m	106,5°	121°
7	23,46 m	35,83 m/s	20 m	110,7°	123,8°
8	13,49 m	33,11 m/s	12 m	114°	127,5°
9	9,07 m	35,02 m/s	12 m	118,2°	130,5°
10	11,28 m	34,01 m/s	11 m	117°	129,9°
11	13,23 m	35,89 m/s	11 m	115,7°	128,8°
12	8,16 m	35,98 m/s	11 m	115,8°	129,1°
13	19,98 m	35,69 m/s	10 m	116,1°	129,3°
14	12,38 m	35,22 m/s	11 m	116,3°	129,4°
15	6,76 m	35,86 m/s	12 m	118,7°	127°
16	19,8 m	36,1 m/s	12 m	115,5°	128,5°
17	7,71 m	36,08 m/s	13 m	114,1°	128,9°
18	4,2 m	35,88 m/s	12 m	116,5°	128,3°
19	21,77 m	35,89 m/s	12 m	118,3°	128,2°
20	4,13 m	35,92 m/s	12 m	115°	128,4°
21	15,8 m	35,98 m/s	13 m	115,7°	128,5°
22	8,94 m	35,33 m/s	12 m	114,9°	128,7°
23	5,29 m	35,6 m/s	13 m	116,4°	127,8°
24	7,75 m	36,11 m/s	13 m	116°	128,6°
25	9,84 m	35,25 m/s	12 m	115,3°	128,5°
26	17,28 m	36,06 m/s	13 m	116°	128°
27	7,01 m	35,26 m/s	12 m	116,2°	128,8°
28	11,44 m	35,64 m/s	12 m	116,6°	130°
29	9,68 m	35,44 m/s	12 m	118°	130,1°
30	4,12 m	36,03 m/s	13 m	117,6°	130,9°
31	6,16 m	35,48 m/s	12 m	117,9°	130,8°

Tabulka B.1: Test na dálnici D1, směr Brno

WP	Distance	Velocity	Accuracy	Bearing	Yaw
32	2,93 m	35,74 m/s	14 m	294, 5°	13, 6°
33	17,12 m	36,06 m/s	12 m	294, 4°	14, 1°
34	9,33 m	35,78 m/s	12 m	294, 4°	12, 9°
35	12,06 m	35,91 m/s	12 m	293, 6°	10, 4°
36	13,58 m	35,29 m/s	12 m	294°	15, 5°
37	7,81 m	35,88 m/s	12 m	293, 9°	9, 1°
38	11,15 m	36,02 m/s	14 m	299, 4°	8, 5°
39	11,95 m	36,1 m/s	12 m	295, 7°	12, 5°
40	17,6 m	35,44 m/s	10 m	296, 4°	15, 7°
41	10,66 m	35,74 m/s	10 m	296, 4°	13, 5°
42	22,58 m	35,76 m/s	10 m	296, 2°	15, 6°
43	9,5 m	35,89 m/s	10 m	296, 5°	19, 9°
44	14,49 m	35,92 m/s	10 m	296, 2°	20, 7°
45	7,03 m	35,08 m/s	10 m	296°	23, 6°
46	23,77 m	35,99 m/s	10 m	296, 2°	17, 7°
47	12,76 m	36 m/s	10 m	296, 3°	25, 3°
48	13,12 m	35,66 m/s	10 m	296, 2°	18, 5°
49	15,56 m	35,77 m/s	11 m	296, 5°	18, 8°
50	11,54 m	35,52 m/s	10 m	296, 3°	19, 5°
51	18,22 m	35,93 m/s	10 m	296, 5°	23, 3°
52	13,28 m	35,54 m/s	10 m	296, 7°	19, 6°
53	6,54 m	36,02 m/s	10 m	297, 3°	15, 8°
54	7,09 m	36,56 m/s	10 m	297, 2°	18, 2°
55	16,54 m	35,85 m/s	10 m	297, 4°	16, 2°
56	1,51 m	35,12 m/s	9 m	294, 9°	23, 8°
57	24,36 m	36,08 m/s	9 m	293, 4°	34, 4°
58	9,6 m	35,85 m/s	10 m	289, 2°	35, 9°
59	7,07 m	35,2 m/s	12 m	285, 4°	45, 3°
60	4,77 m	34,01 m/s	11 m	286, 3°	336, 4°
61	16,19 m	34,2 m/s	12 m	289, 5°	359, 8°
62	9,1 m	34,05 m/s	10 m	294, 8°	34, 05°
63	12,26 m	35,08 m/s	10 m	294, 3°	30, 7°

Tabulka B.2: Test na dálnici D1, směr Praha