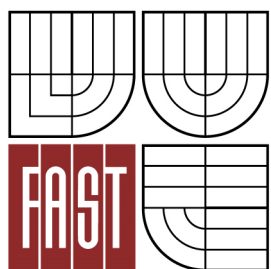




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

VÝVOJ A TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ABSOLUTNÍ KALIBRACI GNSS ANTÉN

DEVELOPMENT AND TESTING OF DEVICE FOR ABSOLUTE GNSS ANTENNA CALIBRATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

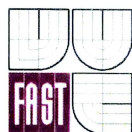
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JOSEF KOMÁREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADIM KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO 2016




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3646R003 Geodézie a kartografie (N)
Pracoviště Ústav geodézie

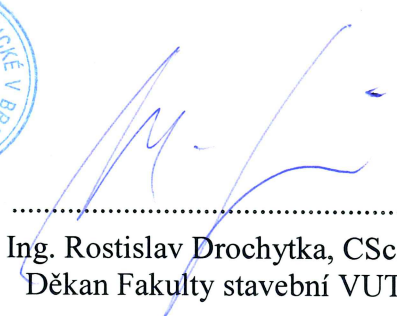
ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Komárek Josef
Název Vývoj a testování zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén
Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce 17. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce 27. 5. 2016

V Brně dne 17. 3. 2015


.....
doc. RNDr. Miloslav Švec, CSc.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

1. Wübbena, G. - Schmitz, M. - Menge, F. - Böder, V. - Seeber, G. (2000) Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. Proceedings ION GPS 2000, Salt Lake City, USA.
2. Wubben, G. - Schmitz, M. - Boettcher, G. - Schumann, C. (2006) Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern. Proceedings of the IGS Workshop, May 8-12, ESOC, Darmstadt, Germany.
3. Bilich, A. - Mader, G. (2010) GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. Proceedings ION GNSS 2010, Portland, USA.
4. Kalina, M. - Kratochvíl, R. - Kuruc, M. - Volařík, T. (2013) Polohovací zařízení pro kalibraci GNSS antén. Juniorstav 2013, Brno.
5. Brátová, K. (2014) Geometrické parametry zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén. [Diplomová práce]. VUT v Brně, FAST, Ústav geodézie, Brno.
6. Hynčicová, T. (2014) Plánování a analýza pohybu zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén. [Diplomová práce]. VUT v Brně, FAST, Ústav geodézie, Brno.


Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

1. Seznamte se s problematikou absolutních kalibrací GNSS antén, s funkcí zařízení vyvíjeného pro tento účel na Ústavu geodézie a s provedeným testovacím měřením.
2. Spolupracujte na návrhu a realizaci dalších konstrukčních prvků zařízení.
3. Proveďte navazující testovací měření zařízení v závislosti na požadavcích plynoucích z jeho vývoje.
4. Spolupracujte na implementaci zjištěných závěrů do prostředků softwarové podpory pohybu zařízení či výpočetního zpracování kalibračního měření.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).


.....
Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Obsahem diplomové práce je ověření chodu polohovacího zařízení používaného k absolutní kalibraci GNSS antén v závislosti na velikosti zatížení nosníku, ke kterému se antény upevňují.

První část práce je věnována úvodu do problematiky kalibrace GNSS antén. V další části se práce soustředí na vývoj softwarového vybavení sloužícího ke zpracování fotogrammetrického měření, které je aplikováno pro zjištění pohybových vlastností přístroje. Následující části jsou pak zaměřeny na zpracování a vyhodnocení provedeného měření.

Výsledek práce je určen pro úpravu doby stání v observačním programu.

Klíčová slova

globální navigační satelitní systémy (GNSS), absolutní kalibrace GNSS antén, zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén, počítačové vidění

Abstract

The purpose of this diploma thesis is testing motion of the device for GNSS antenna calibration according to added weight to the device's transom.

First part of this thesis is devoted to introduction into GNSS antenna calibration problematics. The thesis deals further with development of the software used to process photogrammetric images that have been taken during testing measurement. The rest of the thesis is focused to process and evaluate the measurement.

The result will be implemented into observation model used during calibration measurement. The period, during the device is still, will be corrected according to the result that has been obtained from the measurement.

Keywords

global navigation satellite systems (GNSS), absolute GNSS antenna calibration, device for absolute GNSS antenna calibration, computer vision

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Josef Komárek *Vývoj a testování zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén*. Brno, 2016. 58 s., 8 příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....
podpis autora
Bc. Josef Komárek

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radimu Kratochvílovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a jeho pomoc v průběhu tvorby této práce. Chtěl bych také poděkovat svým rodičům za jejich podporu v průběhu studia.

V Brně dne 27. 5. 2016

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	KALIBRACE GNSS ANTÉN	12
	2.1 Způsoby kalibrace	13
	2.1.1 Relativní kalibrace	13
	2.1.2 Absolutní kalibrace v polních podmínkách	14
	2.1.3 Organizace zabývající se absolutní kalibrací.....	14
	2.1.4 Absolutní kalibrace v laboratorních podmínkách.....	16
	2.2 Datové formáty výsledku kalibrace GNSS antén.....	18
	2.2.1 ANTINFO	18
	2.2.2 ANTEX.....	19
3	KALIBRACE ANTÉN NA ÚSTAVU GEODÉZIE	21
	3.1 Zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén.....	21
4	VLIV ZÁTĚŽE NA CHOD POLOHOVACÍHO RAMENE	23
	4.1 Moment setrvačnosti	24
	4.1.1 Steinerova věta.....	25
5	PROGRAM PRO DETEKCI SNÍMKOVÝCH SOUŘADNIC ZNAČKY	27
	5.1 Programovací jazyk C a C++	27
	5.1.1 Způsob zpracování programu	28
	5.2 Knihovny pro práci s obrazem	29
	5.2.1 Magick++.....	29
	5.2.2 OpenCV	30
	5.3 Program pro detekci využívající shody definované masky.....	30
	5.4 Houghova transformace	34
	5.4.1 Detekce kružnice.....	34
	5.5 Program pro detekci využívající modifikované Houghovy transformace	36
6	TESTOVACÍ MĚŘENÍ	40
	6.1 Přístrojové vybavení.....	40

6.2	Postup při měření	40
6.3	Vážení zátěže umístěné na přístroji.....	42
7	VYHODNOCENÍ.....	43
7.1	Nezatížený stav	45
7.2	Zatížený stav	49
8	ZÁVĚR	52
9	SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	56
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	57
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	58

1 ÚVOD

V sedmdesátých letech minulého století byl zahájen vývoj technologie, která o čtyřicet let později ovlivňuje a do jisté míry usnadňuje životy mnoha obyvatel planety a to i přesto, že původně byla určena pouze pro vojenské účely. Tento systém byl označen akronymem NAVSTAR GPS.

Na přelomu tisíciletí došlo k uvolnění určitých restrikcí Ministerstva obrany Spojených států amerických, které znemožňovaly neautorizovaným (nevojenským) uživatelům přesné určení polohy. Tento krok napomohl rozšíření a vývoji různých zařízení pro určování polohy a času do podoby, ve které je známe dnes.

Význam navigačních satelitních systémů potvrzuje zájem dalších mocností o jejich vývoj. Zanedlouho po systému GPS byly zahájeny práce na ruském navigačním systému GLONASS, jež je v současnosti také plně funkční. Další systémy se nacházejí v různých fázích příprav a vývoje. Je to například projekt Evropské unie a soukromých investorů zvaný Galileo, který by měl být dokončen v následujících letech nebo čínský program Compass (Beidou-2).

Spektrum aplikací GNSS je velmi rozmanité. Od méně přesných kódových měření využívaných pro osobní navigaci po přesné fázové měření využívané i pro geodetické účely. Od určení přibližné polohy mobilním telefonem, přes navigaci bezpilotních prostředků, či v budoucnu řízení autonomních vozidel, až po systémy včasného upozornění na právě začínající zemětřesení.

V geodetických aplikacích se využívá zejména relativního způsobu určování polohy, kdy se referenční aparatura nachází po dobu měření na známém bodě a simultánně probíhá měření na bodě určovaném. Na základě tohoto měření lze stanovit korekce, které mohou být v reálném čase poskytovány dalším aparaturám vykonávajícím měření nebo po skončení měření vstupují do zpracování výsledků měření. Kvalita terénního měření z velké části závisí právě na správném a přesném měření referenční stanice. Právě proto se například v celostátních sítích permanentních stanic používají nejkvalitnější aparatury spolu s eliminací systematických chyb, které mají vliv na výsledek měření.

Jednou z částí měřické aparatury je anténa sloužící k příjmu rádiových vln, které jsou vysílány satelity na orbitě. Se zachycením signálu se pojí problematika určení polohy místa příjmu ve vlastní konstrukci antény. V dnešní době výrobci definují referenční bod antény, ke kterému se kupříkladu měří výška postavení přístroje nad stabilizací. Tento bod však nepředstavuje místo, kde je signál přijímán. Bod, ke kterému je signál vztažen, se označuje jako fázové centrum antény a mění se v závislosti na frekvenci a směru, ze kterého přichází signál od družice.

Jako každé měřidlo, i GNSS antény mají určité metrologické vlastnosti, které je potřeba ověřovat a zajistit tak, aby toto měřidlo bylo ve shodě s požadavky na jeho

zamýšlené použití. Kalibrace je pak proces, kdy se určují metrologické charakteristiky přístroje. Jde tedy o určení vztahu mezi naměřenou hodnotou a hodnotou danou etalonem. Metrologickým znakem, který je předmětem kalibrace, je u GNSS antén poloha fázového centra.

Při kalibraci antén se pro určení absolutních kalibračních parametrů využívá polohovacího zařízení, které v průběhu kalibračního procesu manipuluje s kalibrovanou anténou.

Cílem této práce je na základě měření ověřit chod polohovacího zařízení v závislosti na zatížení nosníku, ke kterému se upevňují kalibrované antény, a vyvození závěru z tohoto měření.

Tato práce se v první části zabývá úvodem do problematiky kalibrací GNSS antén. Od roku 2011 jsou řešeny na Ústavu geodézie projekty specifického výzkumu *Vývoj zařízení a metod pro absolutní kalibraci antén GNSS* (FAST-S-11-66/1441) a *Testování zařízení a vývoj výpočetního zpracování pro absolutní kalibraci antén GNSS* (FAST-S-14-2468), v jejichž rámci je vyvíjeno zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén.

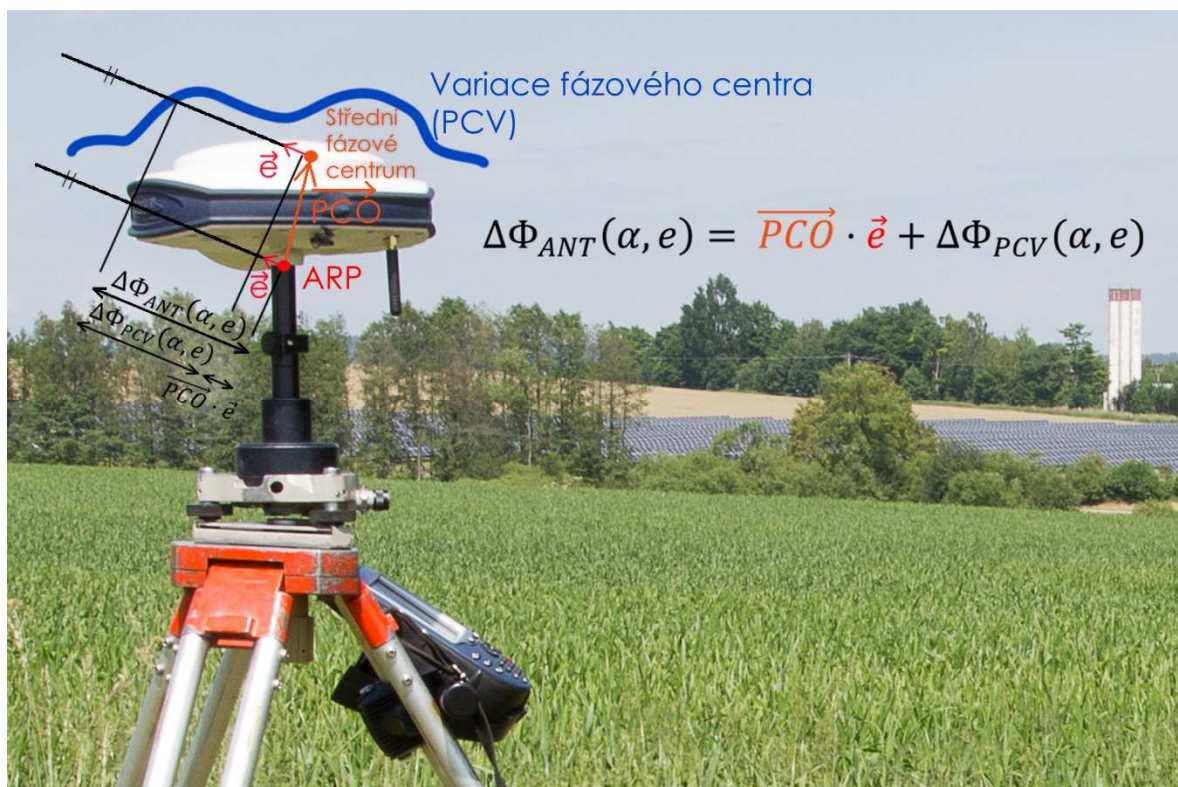
Další část práce se soustředí na tvorbu softwarového řešení, jehož je využito pro vyhodnocení fotogrammetrického měření. V tomto oddíle jsou podrobněji rozebrány použité algoritmy a část kapitoly je rovněž věnována programovacímu jazyku C++, ve kterém je software vyvíjen.

Následně je provedeno zpracování měření s využitím vytvořeného programu a jeho vyhodnocení. V závěru jsou prezentovány zjištěné výsledky a doporučení pro úpravu chodu zařízení během kalibračního měření.

2 KALIBRACE GNSS ANTÉN

V současnosti vyráběné aparatury se liší přesností, se kterou určují polohu. Od toho se odvíjí způsob konstrukce, zpracování dat a také cena. Jednotka se skládá z antény, která přijímá elektromagnetické vlny, mění je v elektrický proud a předává ho přijímači ke zpracování. Komplet doplňuje kontrolér sloužící k obsluze měření. Škála využití globálních navigačních systémů je dnes rozsáhlá a metoda GNSS nachází uplatnění i mimo oblast geodézie. S rostoucím počtem aplikací dochází i ke zvyšování nároků na jejich přesnost a kvalitu. Aby bylo možné dosáhnout nejvyšší přesnosti, je potřeba brát v úvahu vliv systematických chyb a následně se snažit o jejich eliminaci.

Jedna z těchto systematických chyb se váže s problematikou určení místa přijetí signálu, tzv. fázovému centru antény (APC). Fázové centrum antény však není exaktně definovaný bod na anténě, ale jeho poloha se mění v závislosti na frekvenci a směru, ze kterého je signál přijímán. Polohu fázového centra lze popsat střední polohou fázového centra (PCO) a variacemi fázového centra (PCV). Tyto hodnoty jsou určovány v referenčním rámci antény, jež je definován jako souřadný systém north-east-up (NEU) s počátkem nacházejícím se v referenčním bodě antény (ARP), kterým je u většiny antén průsečík osy upínacího závitu se spodní plochou antény. Kalibrační určované parametry tedy popisují rozdíly v poloze mezi fázovým centrem a referenčním bodem antény. [1]



Obr. 2.1 Schématické zobrazení opravy fázového měření (s využitím [2])

Obrázek ilustruje schématické zavedení opravy fázového měření. Vektor PCO (tvořený třemi složkami v systému NEU) vyjadřuje střední polohu fázového centra.

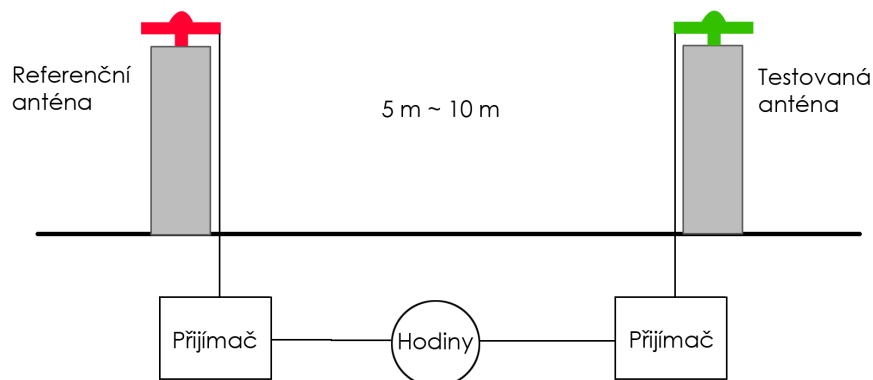
Variace fázového centra, které závisí na směru příjmu signálu, jsou vyjádřeny jako funkce elevačního a azimutálního úhlu. Poloha fázového centra je také závislá na délce nosné vlny přijímaného signálu, proto je vyžadována kalibrace na všech frekvencích, které anténa přijímá. [2]

2.1 Způsoby kalibrace

Z hlediska přístupu ke kalibraci GNSS antén můžeme rozlišit dvě metody, relativní a absolutní. Při obou způsobech kalibrace je nutné využívat referenční anténu. Během relativní kalibrace se parametry kalibrované antény určují vůči referenční anténě. Při absolutní kalibraci jsou určované parametry kalibrované antény nezávislé na parametrech referenční antény a využívá se pohyblivého mechanismu, který umožňuje otáčet a naklánět anténu do potřebných poloh. Absolutní kalibrace lze provádět jak v podmínkách terénních, tak v podmínkách laboratorních, tzv. anechoických komorách. Nutno podotknout, že výsledky relativní a absolutní metody mezi sebou nelze kombinovat.

2.1.1 Relativní kalibrace

Tato metoda využívá pro určení PCO a PCV relativního vztahu mezi kalibrovanou anténou a referenční anténou. Kalibrace probíhá v terénních podmínkách na vybudovaných základnách, jejichž geometrické parametry jsou známy. Antény jsou umístěny přibližně ve stejné výšce na pilířích vzdálených 5–10 metrů. Z důvodu minimalizace vlivu vícecestného šíření signálu (multipathu) je vhodné, aby se základna nacházela mimo vliv objektů a předmětů, které by mohly tento efekt způsobovat a snižovat tak kvalitu observace. Pro vytvoření korektního kalibračního modelu je potřeba observovat až 24 hodin, aby rozložení měřených dat bylo konzistentní po celé hemisféře. Signál přijímaný ze satelitů blízko roviny horizontu je také nepříznivě ovlivněn průchodem větší mocností atmosféry. Tyto vlivy ve výsledku znemožňují odhad PCV pod výškovým úhlem 10° . Další nevýhodou korekcí z relativní metody je problém jejich zavádění při měření dlouhých vektorů. Zakřivení Země totiž způsobuje, že stejný satelit se na obou koncích vektoru nachází pod různým elevačním úhlem. [3], [4]



Obr. 2.2 Schéma staničního uspořádání relativní kalibrace

2.1.2 Absolutní kalibrace v polních podmínkách

Další vývoj v oblasti kalibrace GNSS antén byl soustředěn na odstranění nedostatků předešlé metody. Vlivu referenční antény, multipathu a nemožnosti provedení homogenní kalibrace po celé hemisféře. Institut měření Země Univerzity v Hannoveru ve spolupráci s firmou Geo++ v druhé polovině devadesátých let vyvinul metodu absolutní kalibrace.

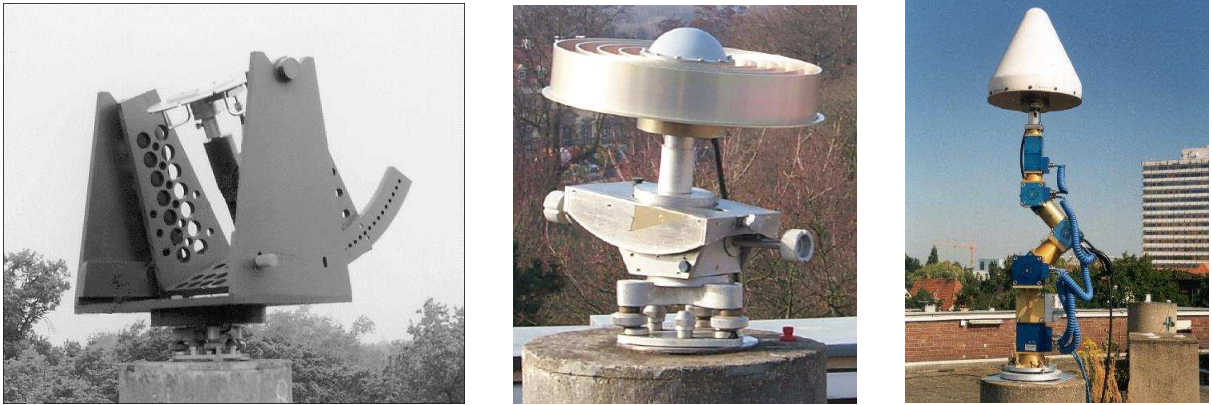
Odstranění výše popsaných vlivů je dosaženo pomocí robotického ramena, které umožňuje s vysokou frekvencí otáčet a naklánět testovanou anténu. Rychle se měnící orientace antény je důležitá, protože rozdíl mezi po sobě jdoucími epochami je několik sekund, což zaručuje, že chyby z vícecestného šíření signálu jsou korelované a multipath lze pak eliminovat Kalmanovým filtrem. Pro případ, že by takto matematicky nebyl odstraněn úplný vliv multipathu, je aplikována vysoká elevační maska až 18° , která je dynamicky přizpůsobena nakloněným pozicím. Chyby způsobené ionosférou a troposférou jsou vyrušeny díky blízké referenční stanici. [5]

Od konce roku 2006 využívá výsledků absolutní kalibrace i Mezinárodní GNSS služba (IGS), která mimo jiné poskytuje například satelitní efemeridy nebo parametry zemské rotace. [5]

2.1.3 Organizace zabývající se absolutní kalibrací

Německá organizace Geo++ se zabývá vývojem absolutní kalibrace již od roku 1996, kdy byl publikován návrh, který představil nový přístup k určení azimutálně a výškově závislých variací fázového centra. Celý proces se odehrával v polních podmínkách a poskytoval absolutní hodnoty kalibrovaných veličin. Za hlavní problém byla označena eliminace vlivu variace fázového centra referenční antény, protože se využívá diferenčního módu měření a druhým problémem byla eliminace multipathu, jelikož v reálném prostředí se multipath vždy v určité míře projeví. Redukce multipathu byla založena na předpokladu jeho opakovatelnosti ve stejném prostředí každý hvězdný den. Pokud je anténa v klidu, diferencí (rozdílem) dvou následujících dnů dojde ovšem i k odstranění informací o variacích fázového centra. Je-li anténa umístěna na polohovacím zařízení, pak je možné vytvářet fázové difference, které nejsou závislé na referenční anténě a lze monitorovat změny v jejím fázovém chování. Geometrické parametry prvního polohovacího zařízení společnosti Geo++ byly zaměřeny systémem TMS (Theodolite Measuring System) sestávajícího ze dvou elektronických teodolitů Wild T3000 (přesnost měření úhlu $1,5''$). V dalším průběhu vývoje došlo k vylepšení eliminace multipathu, a to metodou popsanou výše, tedy s využitím předpokladu, že dopady odražených signálů mezi blízkými epochami jsou identické. Polohovací zařízení prošlo rovněž vývojem. V současnosti se využívá robotického zařízení sestávajícího z pěti modulů, umožňujících dvě horizontální a tři vertikální rotace. Organizace provozuje databázi, která obsahuje

kalibrační údaje antén, u nichž byla provedena absolutní kalibrace. Přístup do databáze a stažení příslušných kalibračních souborů je umožněn přes webové rozhraní a po zaplacení poplatku za tříletou licenci. [6], [7]



Obr. 2.3 Polohovací zařízení využívané Geo++ v průběhu vývoje [7]

V roce 2010 začala absolutní kalibraci provádět také organizace NGS (National Geodetic Survey) ze Spojených států amerických. Ta do této doby prováděla kalibraci relativní. Kalibrační základna je tvořena dvěma blízkými body (5 m) v rovinném území bez výrazných překážek v blízkosti, které by mohly zpětně odrážet signál GNSS. Metodika měření a zpracování je obdobná jako u německé společnosti Geo++. Pro změnu anténní polohy se zde využívá dvouosého robota. Použitý přijímač Septentrio AsteRx2eH se hojně využívá v letectví, protože umožňuje připojit na vstup více antén a čas se tak určuje ze společných hodin. Zpracování je založeno obdobně na principu diferencí. Jednoduché diference (odstraní atmosférické vlivy a chyby z chodu hodin družice a přijímače) a následně diference mezi po sobě jdoucími epochami (pro odstranění vlivu multipathu). Přesnost kalibrace NGS testovala a porovnávala s hodnotami publikovanými IGS, čímž se ověřila funkčnost řešení. NGS vede databázi výsledků pro všechny kalibrované antény s bezplatným přístupem. V databázi jsou zpřístupněna i data z relativní kalibrace, která se prováděla před rokem 2010. [1]



Obr. 2.4 Základna pro absolutní kalibraci v NGS [1]

Dnes je jedním z nejmladších přispěvatelů v oblasti kalibrací GNSS antén čínská univerzita ve Wu-chanu, hlavním městě provincie Chu-pej, ležícím ve střední Číně. Metodika měření je obdobná jako u organizací popsaných výše. Kalibrace je prováděna na krátké, tři metry dlouhé základně. Využívá se robotického manipulátoru pro změnu polohy a orientace kalibrované antény. Pro časovou synchronizaci je využíván počítač, který zaznamenává čas při pohybu ramene. Chod hodin počítače je pravidelně korigován s časem GPS. Eliminace multipathu je založena stejně jako u Geo++ a NGS na diferencích mezi epochami. Další vývoj je spojen s novým navigačním systémem BeiDou a to právě s kalibrací antén pro aplikace vyžadující vysokou přesnost při měření v tomto systému. [8]



Obr. 2.5 Absolutní kalibrace na univerzitě ve Wu-chanu [8]

2.1.4 Absolutní kalibrace v laboratorních podmínkách

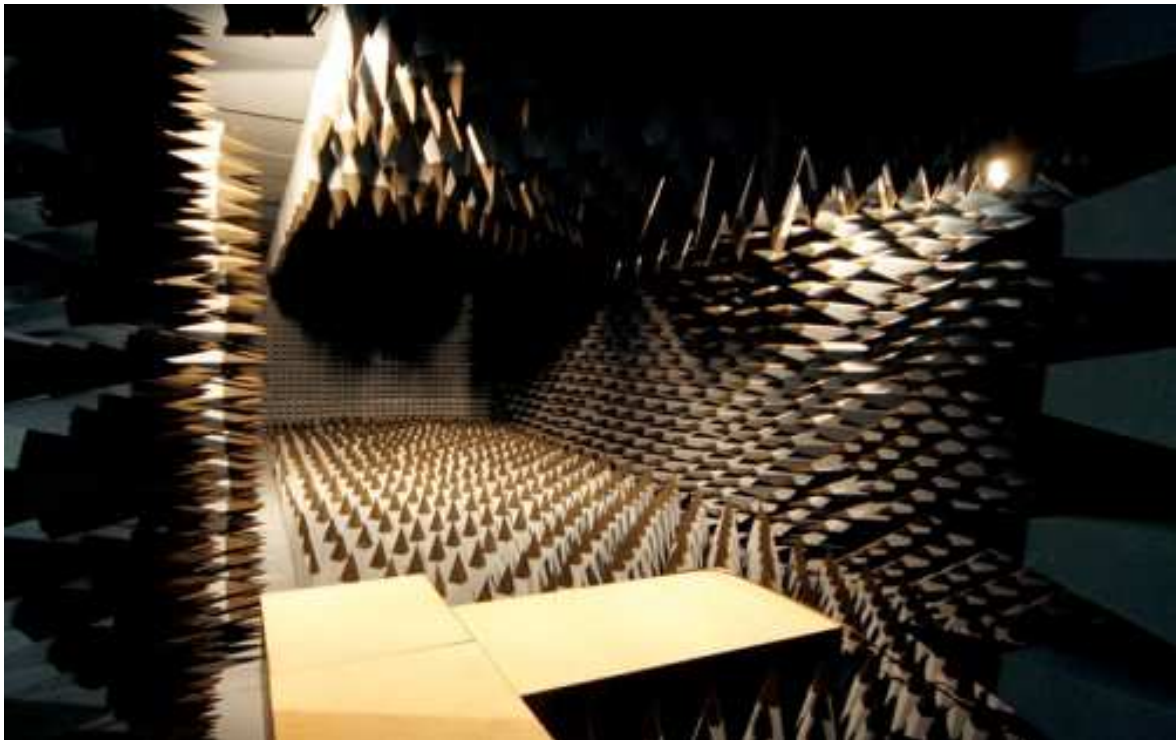
Kalibrace se provádí v tzv. anechoické komoře, jejíž interiér je speciálně navržen tak, aby maximálně tlumil odrazy, například akustických vln, nebo v tomto případě elektromagnetických vln. Obvod místnosti je obložen feritovými dlaždicemi a pěnovými jehlany z polyuretanu. Tyto materiály v kombinaci pohlcují požadované spektrum vlnových délek elektromagnetického záření, což se projevuje téměř úplnou eliminací multipathu při kalibračním měření.

Problematikou laboratorních kalibrací se zabývá univerzita v Bonnu, konkrétně Institut Geodézie a Geoinformatiky, který zkonstruoval pro účely kalibrace vlastní anechoickou komoru.

Hlavní ideou je simulace vysílaného signálu na příslušné frekvenci a přijetí tohoto signálu pod různým azimutem a elevačním úhlem testovanou anténou. Kalibrační aparatura sestává z fixní vysílací antény a motorizovaného manipulátoru, ke kterému je připojena anténa pro kalibraci. Obě antény jsou od sebe vzdáleny přibližně šest metrů. Délka této základny byla navržena s ohledem na vlastnosti chování tzv. vlnoploch vysílaného signálu a s ohledem na zachování přesnosti výsledků kalibrace. Manipulátor pohybuje s anténou po malých krocích, čímž simuluje přijímání signálu z různých směrů. [9]

Jednou z výhod tohoto typu kalibrace je možnost vysílání signálů na různých frekvencích a tím i možnost provedení kalibrace pro frekvence navigačních systémů, které například v současnosti nemají na oběžné dráze dostatek satelitů pro kvalitní provedení polní kalibrace. Dalším pozitivem je rychlost kalibrace, kdy měření trvá 40-60 minut. Nevýhodou je pak nutnost využití anechoické komory, jejíž vybudování včetně vybavení stojí nemalé finance.

V anechoických komorách jsou minimalizovány odrazy signálu od předmětů, jako jsou zdi, podlaha a další objekty. V plné míře se ale projeví efekty blízkého pole, tedy vlastní konstrukce antény, vedení kabeláže apod. Experimentem bylo zjištěno, že například minimální změna ve vedení kabelu k anténě může zapříčinit rozdíl jednoho milimetru ve výsledku kalibrace. Tento problém se ovšem netýká jen kalibračních měření, u nichž lze tyto vlivy minimalizovat na zanedbatelnou úroveň (případně jejich vliv zachovat stabilní po celou dobu kalibrace). Velmi malé změny blízkého pole však mohou mít za následek významné zhoršení kvality běžných měření. [9]



Obr. 2.6 Anechoická komora pro kalibraci GNSS antén na univerzitě v Bonnu [10]

V minulosti proběhlo porovnání výsledků kalibrace ze tří institucí, jimiž byly věnovány řádky výše. Konkrétně se jednalo o výsledky získané absolutní kalibrací v polních podmínkách, tedy německé společnosti Geo++, americké NGS a kalibrace prováděné v laboratorním prostředí na univerzitě v Bonnu. V uskutečněném testu byly porovnány tři typy antén. Cílem bylo prokázat shodu výsledků těchto organizací. Většina výsledků jednotlivých kalibračních měření se shodovala, bližší informace lze nalézt v [11].

2.2 Datové formáty výsledku kalibrace GNSS antén

S vývojem anténní kalibrace a obecně s rozvojem nových globálních navigačních systémů jsou spjaty i datové formáty výsledků kalibrace, které následně vstupují do výpočtu měření GNSS. Jedná se o původní formát ANTINFO a novější formát ANTEX. Dalším je například vlastní formát společnosti Geo++.

Každý uživatel si může prostřednictvím některé výše uvedené organizace nechat provést kalibraci vlastní antény. Pak se jedná o individuální kalibraci, kdy uživatel získá soubor dat s kalibrovanými parametry konkrétního modelu. Další možností je použití hodnot z typové kalibrace, ve které jsou jednotlivé kalibrované parametry určeny jako průměr z výběrového souboru antén stejného modelu, u kterých byla provedena kalibrace.

2.2.1 ANTINFO

Tento formát byl používán od roku 1999 organizacemi jako např. NGS pro zajištění kompatibility výsledků relativní kalibrace a implementaci těchto hodnot vstupujících do zpracování měření ve výpočetních programech.

V době, kdy byl zaváděn tento formát, pracoval v plném provozu pouze systém GPS, a proto je struktura uzpůsobena tomuto navigačnímu systému a pouze dvěma frekvencím L1 a L2. Přestože se dnes již pracuje s absolutními hodnotami PCO a PCV, organizace NGS na svých stránkách umožňuje stále přístup k relativním hodnotám ve formátu ANTINFO pro případ zpracování starších GPS měření, které byly provedeny v dřívější realizaci souřadnicového systému.

V případě, že jsou známy absolutní kalibrační parametry referenční antény, lze výsledky relativní kalibrace přičtením těchto hodnot převést na absolutní. Zde následuje ukázka právě absolutních kalibračních parametrů ve formátu ANTINFO antény Trimble Zephyr 2 Geodetic (TRM55971.00). Tento typ antén nachází využití např. v GNSS sítích, vhodná je také pro použití jako anténa referenční stanice. Výrobce u tohoto modelu udává mimo dobré eliminace multipathu rovněž dobrou opakovatelnost polohy fázového centra. Za kalibrací následuje popis struktury formátu ANTINFO. [13]

```
TRM55971.00      NONE Zephyr GNSS Geodetic II - lead-based sol IGS ( 58) 13/04/03
```

```
  1.3      -0.2      66.7
  0.0  -0.0  -0.1  -0.3  -0.5  -0.8  -1.1  -1.5  -1.9  -2.2
 -2.3  -2.3  -2.1  -1.6  -1.0  -0.2   0.9   2.5   4.7
   0.4       0.6      57.7
  0.0  -0.1  -0.4  -0.9  -1.4  -1.9  -2.4  -2.9  -3.4  -3.8
 -3.9  -3.7  -3.0  -2.1  -0.9   0.3   1.7   3.5   6.0
```

Popis struktury:

ID_ANTÉNY	KRYT_ANTÉNY	POPIS	ZRDOJ_DAT (POČET_TESTOVANÝCH_ANTÉN)	ROK/MĚSÍC/DEN						
[north]	[east]	[up]	L1 - Složky vektoru PCO od ARP [mm]							
[90]	[85]	[80]	[75]	[70]	[65]	[60]	[55]	[50]	[45]	L1 - Variace fáze v závislosti
[40]	[35]	[30]	[25]	[20]	[15]	[10]	[5]	[0]		výškového úhlu (90°-0°) [mm]
[north]	[east]	[up]	L2 - Složky vektoru PCO od ARP [mm]							
[90]	[85]	[80]	[75]	[70]	[65]	[60]	[55]	[50]	[45]	L2 - Variace fáze v závislosti
[40]	[35]	[30]	[25]	[20]	[15]	[10]	[5]	[0]		výškového úhlu (90°-0°) [mm]

2.2.2 ANTEX

Formát ANTEX (aktuálně ve verzi 1.4) umožňuje zápis výsledků kalibrací antén pro frekvence všech současných navigačních systémů a dovoluje zahrnout také korekce pro kosmický segment. Definici formátu ANTEX využívá IGS pro publikaci souboru (IGS08.atx) kalibrovaných parametrů antén, který lze získat např. na tomto odkazu:

<https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs08.atx>

Rovněž je veřejně k dispozici soubor s parametry kalibrace organizace NGS (ngs08.atx):

<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=ngs08.atx>

Pro ukázkou jsou uvedeny kalibrované parametry již výše popsané antény značky Trimble s označením TRM5971.00. [13]

```

1.4          M          ANTEX VERSION / SYST
A            PCV TYPE / REFANT
This calibration extracted from composite ngs08.atx.  See
the composite file ngs08.atx for more information.    COMMENT
                                                    COMMENT
                                                    END OF HEADER
                                                    START OF ANTENNA
TRM5971.00    NONE      TYPE / SERIAL NO
ROBOT        Geo++ GmbH      58    03-APR-13 METH / BY / # / DATE
    5.0      DAZI
    0.0  90.0  5.0      ZEN1 / ZEN2 / DZEN
    4      # OF FREQUENCIES
IGS08_1888    SINEX CODE
Number of Calibrated Antennas GPS:      058    COMMENT
Number of Individual Calibrations GPS:   116    COMMENT
Number of Calibrated Antennas GLO:      058    COMMENT
Number of Individual Calibrations GLO:   116    COMMENT
# GLONASS PCV                            COMMENT
# derived from Delta PCV per 25.0 MHz    COMMENT
# for frequency channel number k=0       COMMENT
    G01      START OF FREQUENCY
    +1.29    -0.19    +66.73    NORTH / EAST / UP
NOAZI +0.00 -0.03 -0.13 -0.29 -0.51 -0.78 -1.12 -1.49 -1.87 -2.17 -2.34 -2.32 -2.08 -1.65 -1.04 -0.23 +0.91 +2.51 +4.69
    0.0 +0.00 -0.02 -0.10 -0.24 -0.45 -0.74 -1.11 -1.55 -2.00 -2.39 -2.62 -2.66 -2.50 -2.17 -1.72 -1.11 -0.23 +1.14 +3.14
    5.0 +0.00 -0.02 -0.10 -0.24 -0.45 -0.73 -1.11 -1.55 -2.00 -2.39 -2.63 -2.68 -2.52 -2.20 -1.72 -1.08 -0.17 +1.20 +3.19
    10.0 +0.00 -0.02 -0.10 -0.24 -0.45 -0.73 -1.10 -1.53 -1.98 -2.37 -2.62 -2.68 -2.52 -2.18 -1.68 -1.00 -0.05 +1.34 +3.31
    15.0 +0.00 -0.02 -0.11 -0.24 -0.45 -0.73 -1.09 -1.51 -1.95 -2.34 -2.59 -2.65 -2.50 -2.14 -1.61 -0.88 +0.13 +1.55 +3.51
    20.0 +0.00 -0.02 -0.11 -0.25 -0.45 -0.72 -1.07 -1.49 -1.92 -2.30 -2.54 -2.60 -2.44 -2.07 -1.50 -0.72 +0.34 +1.81 +3.78
...
...
...
335.0 +0.00 -0.17 -0.54 -1.00 -1.47 -1.89 -2.30 -2.71 -3.12 -3.45 -3.58 -3.37 -2.77 -1.83 -0.68 +0.61 +2.11 +4.08 +6.90
340.0 +0.00 -0.17 -0.54 -1.00 -1.47 -1.90 -2.31 -2.72 -3.14 -3.50 -3.64 -3.45 -2.85 -1.90 -0.70 +0.63 +2.17 +4.18 +7.01
345.0 +0.00 -0.17 -0.53 -1.00 -1.47 -1.91 -2.31 -2.74 -3.17 -3.53 -3.71 -3.52 -2.93 -1.96 -0.74 +0.64 +2.22 +4.25 +7.09
350.0 +0.00 -0.17 -0.54 -1.00 -1.48 -1.91 -2.33 -2.77 -3.21 -3.59 -3.77 -3.60 -3.00 -2.02 -0.78 +0.62 +2.24 +4.30 +7.15
355.0 +0.00 -0.17 -0.54 -1.01 -1.48 -1.92 -2.35 -2.80 -3.25 -3.64 -3.83 -3.67 -3.07 -2.10 -0.85 +0.58 +2.21 +4.30 +7.15
360.0 +0.00 -0.17 -0.55 -1.00 -1.49 -1.93 -2.37 -2.83 -3.29 -3.69 -3.89 -3.73 -3.15 -2.18 -0.94 +0.48 +2.13 +4.23 +7.11
R02      END OF FREQUENCY
                                                    END OF ANTENNA
    
```

První řádek obsahuje verzi formátu ANTEX a jeden znak pro definici navigačního systému, pro který je kalibrace prováděna (M značí „Mixed“ tedy kombinovaný). Znak na druhém řádku označuje typ PCV (A = absolutní / R = relativní). Jako doplněk v tomto řádku může být uvedeno výrobní číslo referenční antény. Po dvou řádcích s volitelným komentářem končí hlavička souboru a následně začíná sekce týkající se antény. Řádek „TYPE“ obsahuje označení antény dle IGS (včetně výrobního čísla při individuální kalibraci). Pod tímto označením je uvedena metoda kalibrace, název agentury a počet provedených individuálních kalibrací, ze kterých je určena střední hodnota. Řádek „DAZI“

obsahuje hodnotu azimutálního přírůstku ve stupních. „ZEN1 / ZEN2 / DZEN“ definuje interval zenitového úhlu (0° – 90°) s určeným krokem 5° . Následující řádek obsahuje počet frekvencí, na kterých se určují kalibrační parametry. „IGS08_1888“ je označení modelu kalibrace pro použití v popisném SINEX formátu. Za několika řádky s eventuálním komentářem následuje začátek první frekvence. V tomto řádku je specifikována konkrétní frekvence, pro niž následují výsledky kalibrace. Každá frekvence zde má vlastní trojici znaků (např. G01 – GPS L1, R02 – Glonass G2). Další řádek s trojicí hodnot zahrnuje excentricity PCO v systému NEU vůči referenčnímu bodu antény v milimetrech. Pak již následují variace fázového centra rovněž v milimetrech. Na prvním řádku začínajícím „NOAZI“ jsou vypsány hodnoty nezávislé na azimutu v intervalu od „ZEN1“ do „ZEN2“ s krokem „DZEN“. Ostatní řádky jsou pak azimutálně závislé variace od 0° do 360° s kroky „DAZI“ a „DZEN“. [14]

Formát ANTEX může obsahovat i další volitelné parametry, například dobu platnosti, střední chyby excentricit PCO nebo střední chyby variací. [14]

3 KALIBRACE ANTÉN NA ÚSTAVU GEODÉZIE

Ústav geodézie se problematikou kalibrací GNSS antén zabývá již řadu let. V době, kdy se začalo měření, tehdy se systémem GPS, prosazovat díky své efektivitě při budování geodetických sítí s vysokými nároky na přesnost, bylo potřeba porozumět i vlivu systematických chyb a jejich vliv eliminovat.

Na střešní terase budovy „B“ v areálu Fakulty stavební VUT byla v blízkosti permanentní stanice TUBO pro účel relativní kalibrace využívána mikrosíť tvořená soustavou pilířů s nucenou centrací. Vlastní měření bylo prováděno na základně dlouhé 9 m. Tato základna je tvořena dvěma pilíři, které jsou ukotvené v nosných zdech budovy. Kalibrace byla prováděna vůči referenční anténě Leica AT504 (Chokering). V roce 2006 byla obhájena diplomová práce Ing. Nohejla, který se ve své práci zabývá výpočtem střední polohy fázového centra sedmi aparatur a jejich porovnáním s hodnotami udávanými službami NGS, IGS a hodnotami udávanými výrobcem. Zkoumán byl také vliv teploty na polohu fázového centra. Další informace o relativní kalibraci na Ústavu geodézie lze získat v [15], [16].

3.1 Zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén

O několik let později byl zahájen dlouhodobý projekt s cílem vytvoření stabilní základny s účelem provádění absolutní kalibrace. Výzkum se zabývá konstrukcí zařízení pro polohování GNSS antén, testováním a tvorbou softwarové podpory pro zpracování měření a výpočet excentricit fázových center a jejich variací.

V rámci projektu Specifického výzkumu FAST-S-11-66/1441 (Vývoj zařízení a metod pro absolutní kalibraci antén GNSS) bylo v roce 2011 a 2012 navrženo a zkonstruováno polohovací zařízení s názvem StAnCa (Station Antenna Calibration).

Zařízení je tvořeno dvěma částmi, a to polohovacím ramenem, na kterém je upevněna kalibrovaná anténa, a řídicí jednotkou. Polohovací rameno je osazeno dvěma krokovými motory, které zajišťují pohyb nosníku s upínacím šroubem kolem vertikální a horizontální osy. Řídicí jednotka, která ovládá polohovací rameno, je tvořena zdrojem stejnosměrného napětí, ovladači motorů, vstupně-výstupní kartou s hradlovým polem, swichem a osobním počítačem s operačním systémem LinuxCNC (modifikace linuxové distribuce Ubuntu, která se využívá pro řízení CNC strojů pomocí tzv. G-kódů). Bližší informace včetně podrobného popisu zařízení lze nalézt v [17], [18].

Následující projekt FAST-S-14-2468 (Testování zařízení a vývoj výpočetního zpracování pro absolutní kalibraci antén GNSS) probíhající od roku 2014 navazuje na předešlou etapu. Projekt je zaměřen na další vývoj a úpravy polohovacího zařízení a vývoj jeho softwarové podpory. Konkrétně došlo například k navržení vyvažovacího systému pro

kompenzaci hmotnosti antény upevněné na nosníku manipulátoru. Dále byl navržen systém kladkového vedení kabelů, které propojují polohovací rameno a řídicí jednotku.



Obr. 3.1 Zařízení StAnCa při testovacím měření 29. 4. 2016

V roce 2014 byly obhájeny práce Ing. Kateřiny Brátové a Ing. Terezy Hynčicové, které se zabývaly problematikou absolutní kalibrace.

Ing. Brátová ve své práci popisuje činnosti vykonané při sestavování přístroje, dále pak určuje geometrické parametry polohovacího ramene, zkoumá pohyb přístroje a ověřuje některé geometrické parametry. V závěru své práce se věnuje matematickému modelu pohybu, díky kterému je možné určit polohu bodu ARP dle náklonu a natočení přístroje. [17]

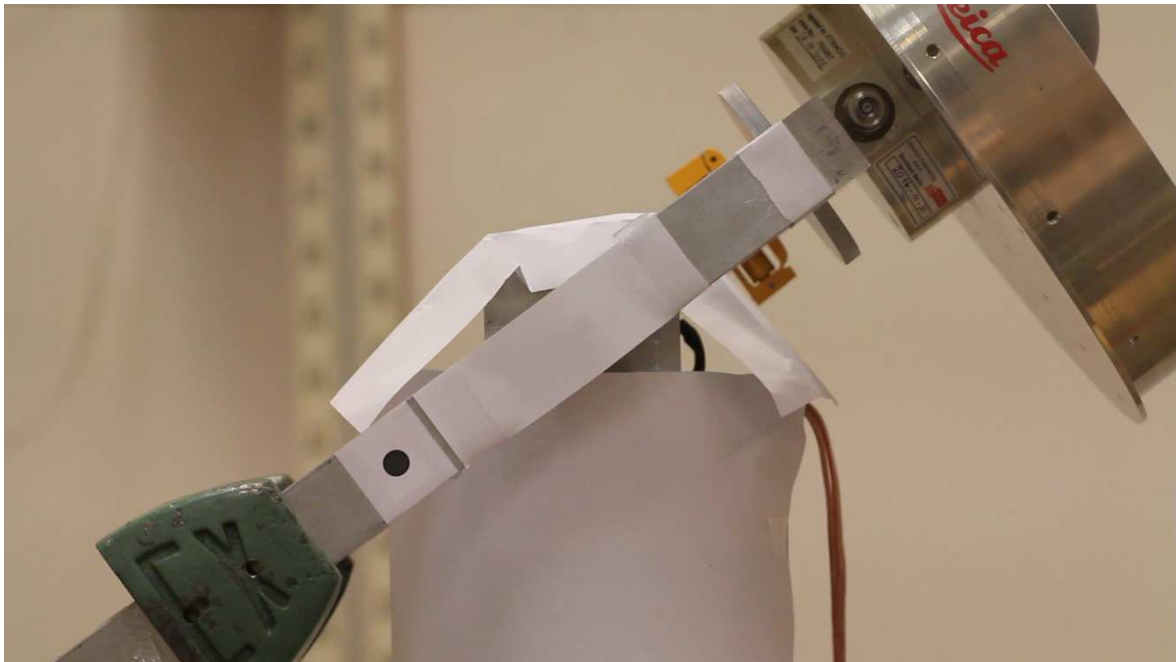
Ve stejné době probíhala práce Ing. Hynčicové, která se věnuje analýze pohybu zařízení z hlediska navázání na čas UTC. Dále se pak její práce zabývá chodem zařízení, resp. porovnáním skutečného pohybu s nominálními hodnotami a určením korekcí chodu. V závěru práce je rozebráno plánování pohybu s ohledem na rovnoměrnost observací v závislosti na pozici satelitů. [18]

V roce 2016 jsou pak k obhajobě předkládány další dvě práce týkající se dané problematiky. Jde o tuto práci a práci Marka Galaty, ve které řeší výpočetní zpracování kalibračního měření.

4 VLIV ZÁTĚŽE NA CHOD POLOHOVACÍHO RAMENE

Cílem následujících částí této práce je prostřednictvím měření zjistit, jakým vlivem se projeví setrvačnost tělesa o určité hmotnosti na vlastní chod manipulátoru.

Měření bylo provedeno metodou jednosnímkové fotogrammetrie, kdy na manipulátoru umístěná měřická značka byla předmětem vyhodnocení. Dalším cílem této práce je vytvoření programu na vyhodnocování snímkových souřadnic dané značky. Získané pozice značky byly na základě vlíčovacích bodů prostřednictvím projektivní transformace převedeny do objektového systému, ve kterém se provedla analýza chodu ramene. Program na vyhodnocení snímkových souřadnic vychází z předpokladu, že předmětem vyhodnocení je jasně identifikovatelný bod umístěný na zařízení (pro účely této práce je tímto bodem kontrastní značka, která je tvořena černým kruhem na bílém pozadí).



Obr. 4.1 Ukázka snímku se značkou, jejíž poloha je předmětem vyhodnocení

Polohovací rameno při kalibračním měření vykonává pohyb, kdy z klidu přechází do pohybu a následně znovu do polohy stání. Klidová pozice má důležitý význam z hlediska měření kalibrovanou aparaturou, protože je nezbytné zajistit, aby aparatura v době ukládání observačního měření v danou epochu byla v nehybné pozici.

Vlastní pohyb se uskutečňuje pomocí dvojice krokových motorů typu Powerpac firmy Pacific Scientific. Větší z motorů, motor M1, otáčející zařízení kolem svislé osy je model řady SM40 s přírubou NEMA42. Druhý motor M2 umístěný na otáčivé desce nad motorem M1 je řady SM30 s přírubou NEMA34. Výrobce udávaná tolerance kroku činí

$\pm 0,06^\circ$. Po přepočtení této úhlové hodnoty na vzdálenost bodu ARP od osy otáčení činí střední chyba vystavení polohy pro oba dva motory 0,3 mm.

Zařízení po udělení pokynu pro změnu polohy vykonává rovnoměrně zrychlený pohyb, dokud nedosáhne požadované rychlosti F (feed rate) udávané v $^\circ/\text{min}$. Následně v této rychlosti pokračuje rovnoměrným pohybem až do chvíle, kdy přejde do pohybu rovnoměrně zpomaleného a posléze nulové rychlosti, tedy klidu. Dosažení požadované rychlosti nenastane v případě, že celkový úhlový posun je menší než úhlový posun nezbytný pro zrychlení na tuto rychlost a poté na zpomalení (zařízení rovnoměrně zrychluje a ihned rovnoměrně zpomaluje). [18]

4.1 Moment setrvačnosti

První Newtonův pohybový zákon (Zákon setrvačnosti, 1687) říká, že: „Každé těleso setrvává ve stavu klidu nebo rovnoměrně přímočarého pohybu, pokud není nuceno vnějšími silami tento stav změnit.“ Setrvačnost je pak vlastnost hmotných těles setrvat ve stavu před působením vnější síly. Míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu vyjadřuje fyzikální veličina *moment setrvačnosti*. Zjednodušeně lze říci, že tělesa s větším momentem setrvačnosti mají vyšší tendenci odolávat vnějším silám na ně působícím oproti tělesům s nižším momentem setrvačnosti. Tato skutečnost se negativně projeví u zatíženého stavu polohovacího zařízení kmitavým pohybem při přechodu z pohybu do klidu, kdy zatížené rameno bude mít větší tendenci v pohybu pokračovat.

Základní vztah pro výpočet momentu setrvačnosti lze odvodit např. ze vzorce pro kinetickou energii E_k rotujícího tělesa. Považujme rotační těleso za soustavu částic (hmotných bodů) pohybujících se různými rychlostmi. Celková kinetická energie je dána jako součet kinetických energií všech částic tělesa. [19], [20]

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot v_i^2, \quad (4.1)$$

kde m_i je hmotnost i -té části tělesa a v_i velikost její rychlost. Rychlost v_i ale mají různé částice v tělese odlišnou, podle toho, jak jsou vzdáleny od osy rotace. Velikost rychlosti elementů však lze také vyjádřit pomocí úhlové rychlosti a vzdálenosti od osy otáčení. Všechny body v tělese pak mají v jednom okamžiku stejnou úhlovou rychlost ω .

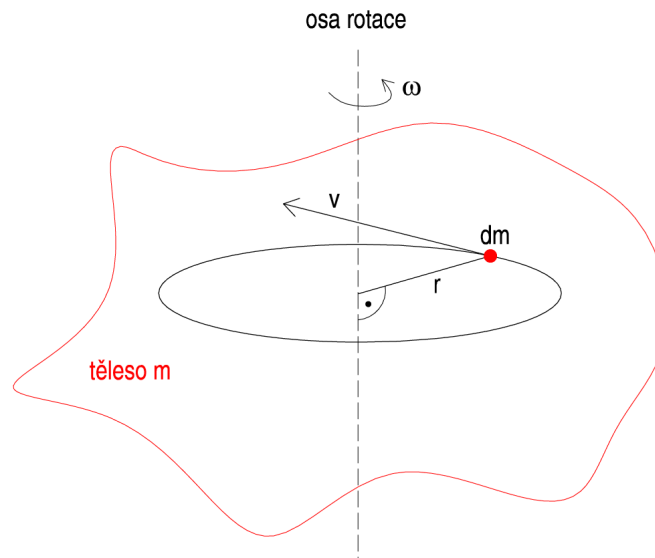
$$v_i = r_i \cdot \omega, \quad (4.2)$$

kde r_i je vzdálenost částice kolmo k ose otáčení (rovněž je to i poloměr kružnice, po které se element pohybuje). Po dosazení do (4.1):

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (r_i \cdot \omega)^2 = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot J \quad (4.3)$$

Veličina J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] tedy představuje moment setrvačnosti tělesa vzhledem k ose otáčení. Moment setrvačnosti tělesa tvořeného soustavou hmotných bodů je dán vztahem:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 \quad (4.4)$$



Obr. 4.2 Schéma pohybu hmotného bodu při kruhovém pohybu

Ze vzorce vyplývá, že moment setrvačnosti závisí nejen na hmotnosti, ale i na jejím rozložení vzhledem k ose otáčení.

Je-li hmota tuhého tělesa rozložena spojitě, je nutné vztah (4.4) nahradit integrálem. Moment setrvačnosti je pak definován vztahem:

$$J = \int_m r^2 dm \quad (4.5)$$

kde se integruje přes těleso o hmotnosti m . [19], [20]

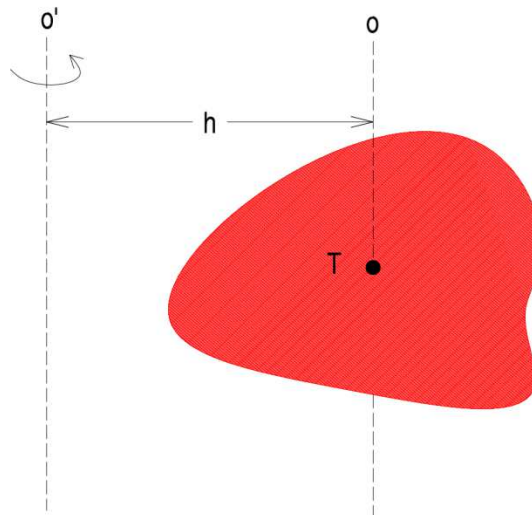
4.1.1 Steinerova věta

Steinerova věta slouží k výpočtu momentu setrvačnosti tělesa rotujícího kolem osy, která neprochází jeho těžištěm. Umožňuje tak například vypočítat moment setrvačnosti tělesa, které je tvořeno z několika základních těles.

Známe-li moment setrvačnosti tělesa J_T vzhledem k ose o procházející jeho těžištěm, můžeme vypočítat jeho moment setrvačnosti vůči jiné ose o' , která však musí být s osou o rovnoběžná. Zároveň je nutné znát vzdálenost h těchto os. Výpočet momentu setrvačnosti k ose o' je pak dán vztahem:

$$J = J_T + h^2 \cdot m \quad (4.6)$$

Moment setrvačnosti J tělesa k libovolné ose o' je roven součtu momentu setrvačnosti tělesa vzhledem k rovnoběžné ose o , která prochází jeho těžištěm a součinu hmotnosti s čtvercem vzdálenosti těchto os. [19]



Obr. 4.3 Moment setrvačnosti vůči rovnoběžné ose neprocházející těžištěm

5 PROGRAM PRO DETEKCI SNÍMKOVÝCH SOUŘADNIC ZNAČKY

V následující kapitole je popsán software, který byl vytvořen pro účely vyhodnocení měřických snímků. Úvodní část je věnována stručnému popisu programovacího jazyka, v němž byl program vytvořen, a dvěma knihovnám používaným v programu, umožňující práci s digitálním obrazem. Software je vytvořen ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2015 a samotné programy běží v příkazovém řádku.

Požadavky na funkci programu:

- Načtení obrazových dat
- Identifikace bodů kalibračního pole a následný export snímkových souřadnic
- Detekce měřické značky na snímku
- Výstup všech identifikovaných poloh ze snímků do jednoho souboru

5.1 Programovací jazyk C a C++

Program pro vyhodnocení polohy značky byl napsán v programovacím jazyku C++, který je rozšířením programovacího jazyka C. Programování není v současnosti úplně běžnou činností v geodetickém oboru, proto několik následujících řádků bude věnováno alespoň hrubému přiblížení této problematiky, konkrétně programovacím jazykům C a C++.

C je univerzální programovací jazyk tzv. nízké úrovně (pracuje pouze se standardními datovými typy, např. znaky, reálná čísla, ...). Je strukturovaný, vyniká úsporným vyjadřováním, velkým množstvím operátorů a není specializovaný pro určitou oblast. Označení „C“ vzniklo na základě převzetí vlastností ze staršího jazyka nazvaného „B“.

Počátky vývoje sahají do začátku 70. let minulého století, kdy byl Dennisem Ritchiem jazyk C navržen a implementován pod operačním systémem UNIX a tento systém v něm byl celý postupně přepsán. Jazyk C ovšem obecně není svázán s žádným operačním systémem a je dostupný na většině operačních systémů. Přenositelnost mezi platformami je zajištěna mezinárodními standardy (ANSI, ISO). Současný standard z roku 2011 je označován jako „C11“.

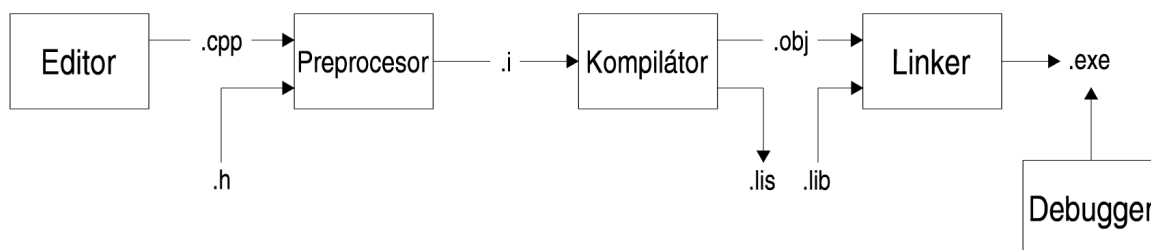
Páteří programů jsou řídicí příkazy, sloužící pro řízení běhu kupříkladu rozhodování na základě podmínky, výběr z možných případů nebo cykly s testem ukončení. Programovací jazyk C neumožňuje práci přímo se složenými objekty (znakové řetězce, množiny, pole atd.). Rovněž v jazyce C není automatická správa paměti, která se stará o čištění paměti po programu, tím je sice rychlejší, ovšem nebezpečnější. [21]

Přibližně po deseti letech od představení jazyka C začal dánský programátor Bjarne Stroustrup pracovat na vývoji programovacího jazyku „C with Classes“ (C s třídami). Název měl evokovat, že tento jazyk je nadmnožinou jazyka C a je obohacen o další vlastnosti (třídy, dědičnost, šablony atd.). V roce 1983 byl jazyk přejmenován na označení „C++“, kde „++“ značí operátor inkrementace v C. Označení „C++“ pak symbolizuje evoluční povahu. První mezinárodní standard byl publikován Mezinárodní organizací pro normalizaci až v roce 1998. Současně používaný standard je neformálně označován jako C++14. Jazyk C++ se v současnosti řadí mezi nejvyužívanější typy jazyků pro tvorbu aplikací. [22]

C++ je tzv. multiparadigmatický programovací jazyk. To znamená, že podporuje více programovacích stylů – procedurální, generické a objektově orientované programování. Typickým procedurálním jazykem je jazyk C. Kód je členěn do funkcí a určuje přesný postup, jak danou úlohu řešit. Takový postup lze přirovnat k návodu krok po kroku na sestavení nábytku od nejmenovaného švédského řetězce. Generické programování je zaměřené na sepsání kostry algoritmů s tím, že datový typ bude upřesněn až bude algoritmus používán. Tento postup je shovívavější a umožňuje programátorovi vyhnout se striktním definicím. Objektově orientované programování (OOP) napodobuje vzhled a chování objektu z reálného světa a rovněž klade důraz na znovupoužitelnost. Jedná se o určitou úroveň abstrakce (program je psán tak, jak ho vidí člověk, spíše než počítač). Základním prvkem OOP je objekt, tedy entita mající svoji identitu (např. auto). Objekt má své atributy a metody. Atributy objektu (vlastnosti) jsou data, která nese (např. barva, výkon motoru) a metody jsou jeho schopnosti (např. zrychli, zpomal). Každý objekt by měl být užitečný svému okolí. Uživatele zajímá, jaké služby objekt poskytuje, to jak funguje je pro něj nepodstatné (uživatel potřebuje nastartovat auto, není pro něj důležité znát funkci startéru). [22]

5.1.1 Způsob zpracování programu

Kompilace je proces, někdy označován také jako „build“, kdy dochází ke konverzi programu napsaného pro člověka v čitelné formě do strojového kódu. Zpracování programu je členěno do několika fází, které vedou od samotného napsání zdrojového kódu až po spustitelný soubor. Následující obrázek schematicky zobrazuje průběh zpracování programu v C/C++.



Obr. 5.1 Schéma zpracování programu v C/C++

Editor slouží k sepsání zdrojového kódu. Uživatel jej zde může měnit a upravovat. Zdrojové kódy mají konvenčně definovanou příponu `.c` (pro jazyk C) nebo `.cpp` (jazyk C++).

Preprocesor předzpracovává zdrojový kód, vynechává komentáře, zajišťuje vložení hlavičkových souborů `.h` (například příkaz ve zdrojovém kódu „`#include <stdio.h>`“ říká preprocesoru, aby načtl obsah hlavičkového souboru `stdio.h`). Výstupem preprocesoru je opět textový soubor, který je předáván kompilátoru.

Kompilátor překládá zdrojový soubor do objektového kódu počítače v binární formě. Adresy proměnných nebo funkcí nejsou ještě známy a jsou v souboru `.obj` zapsány pouze relativně. Kompilátor může také vytvářet soubor `.lis` (listing file), ve kterém jsou uloženy informace o překladu (např. vývojové prostředí Microsoft Visual Studio umožňuje do souboru uložit kód v jazyce symbolických adres, případně strojový i zdrojový kód).

Linker je sestavovací program, který může spojovat více objektových souborů. Zároveň také najde adresy dosud neznámých identifikátorů, např. funkce volané v externích knihovnách s příponou `.lib`). Výsledkem je soubor `.exe`, který je možné již načíst do paměti a spustit.

Debugger je nástroj sloužící k ladění chodu programu. Vývojář ladící program může navolit situaci, při které se program zastaví např. označením konkrétního místa v kódu (breakpoint) nebo vyvoláním výjimky. Programátor pak může zkoumat stav procesu a na jeho základě může usuzovat o příčině chyby. Po odstranění chyby se proces ladění opakuje. [22], [23]

5.2 Knihovny pro práci s obrazem

Pro práci s obrazovými daty v C++ si nevystačíme se standardními knihovnami. Programy vytvořené v této práci využívají knihovny počítačového vidění, které již umožňují práci s obrazem. Konkrétně se jedná o knihovnu Magick++ a OpenCV.

5.2.1 Magick++

Magick++ je objektově orientované rozhraní pro programování v jazyce C++ balíku nástrojů ImageMagick, určených pro zpracování obrazu. ImageMagick jako takový funguje prostřednictvím příkazového řádku a je distribuován pro různé operační systémy. Knihovna Magick++ umožňuje tvorbu programů v C++ pro zpracování bitmapových obrázků různých formátů (png, jpg, tiff, gif, CR2, ...). Mezi základní funkce patří načtení a zápis souboru, konverze formátu, editace, změna rozlišení snímku, kreslení jednoduchých tvarů nebo např. vložení textu. V této práci je používána verze knihovny Magick++ z balíku ImageMagick 7.0.0. [24]

5.2.2 OpenCV

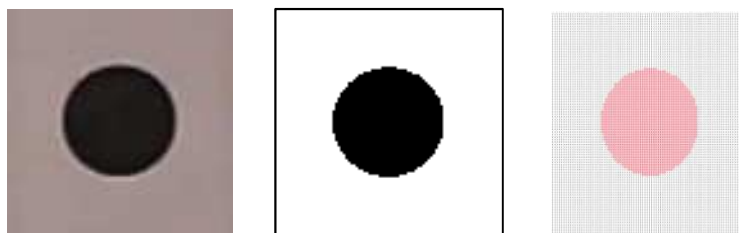
OpenCV je multiplatformní knihovna zaměřená na poskytování nástrojů k řešení problémů počítačového vidění. Knihovna obsahuje směsici funkcí nízkoúrovňového zpracování a vysokoúrovňových algoritmů, které mohou sloužit k detekci obličejů, identifikaci objektů, sledování pohybu nebo spojování snímků a vytváření mračen bodů ze stereofotografií. Tato knihovna se těší vysoké popularitě. Je využívána nejen největšími softwarovými společnostmi, ale například i v automobilovém průmyslu, kde se využívá počítačové vidění například v bezpečnostně-asistenčních systémech pro klasifikaci objektů zachycených kamerami za čelním sklem vozu. [25]

Obecně lze konstatovat, že programy pracující s obrazovými daty jsou poměrně náročné na hardwarové vybavení, proto nemusí být překvapením, že tato knihovna byla původně vyvíjena společností Intel.

5.3 Program pro detekci využívající shody definované masky

Princip tohoto programu je založen na definování masky, kterou bude software na snímku vyhledávat. Masku je možné vytvořit v libovolném bitmapovém grafickém editoru buďto ořezem nebo výběrem oblasti z jednoho z prohledávaných snímků a jejím uložením do nového souboru. Pro správnou funkčnost je zapotřebí, aby soubor, který definuje hledanou oblast ve snímku, měl stejný poměr obrazových bodů na palec (ppi) jako soubor, který se bude prohledávat (různá hodnota by způsobila nekonzistenci velikosti definované masky a prohledávaného snímku). Název souboru se značkou je *znacka.přípona* formátu souboru (př. *znacka.png*). Všechny soubory, které vstupují do programu, jsou uloženy v adresáři, který je na stejné úrovni jako soubor *.exe* (název adresáře se vstupy lze měnit v konfiguračním souboru *config.txt*, kde jsou uloženy veškeré měnitelné parametry). Vnitřní přesnost tohoto programu vychází z velikosti obrazového bodu. Program pracuje s pixelovou přesností. Tento program využívá funkce knihovny Magick++ pro načtení a uložení snímku, zjištění hodnoty pixelů, prahování nebo zakreslení kružnice okolo nalezené oblasti.

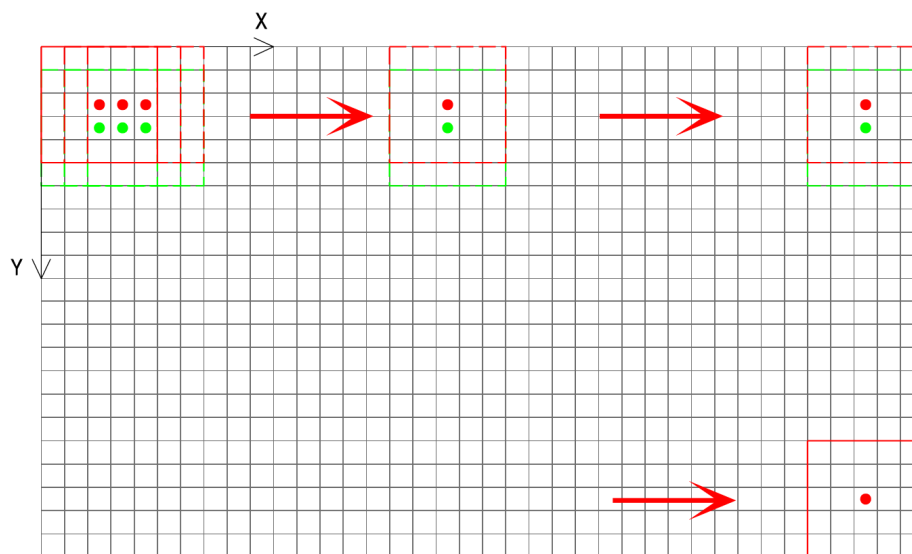
Po načtení značky program předzpracuje značku prahováním. Následně proběhne cyklus, kdy se do matice (o rozměru počet pixelů ve výšce \times počet pixelů v šířce) uloží hodnota barvy každého pixelu. Pixel, který má 100% černou barvu obdrží hodnotu 0, bílý obrazový bod má v matici hodnotu 3. Následující obrázky zachycují fáze zpracování značky. Poslední obrázek je matice (88 \times 89) pixelů, kde jsou červeně označeny čísla s hodnotou 0.



Obr. 5.2 Průběh zpracování hledané značky

Dalším bodem je už načtení samotného snímku, ve kterém se bude provádět detekce. Na snímku je opět provedena segmentace obrazu prahováním, která slouží k automatickému rozdělení obrazu do částí, které mají společné vlastnosti (např. barva, jas, textura) a usnadňuje identifikaci výrazného bodu, kterým je hledaná značka.

V prvních vývojových fázích byl postup navržen tak, že se na prohledávaném snímku pohybovala mřížka o stejné velikosti jako maska terče a určovala hodnoty jednotlivých pixelů, které se pro každou pozici porovnávaly s maskou hledaného terče. Mřížka začala na pozici $X = 0, Y = 0$ (levý horní roh snímku) a v řádku se pohybovala po sloupcích, až dorazila na okraj snímku, pak se přesunula o řádek níž na pozici $X = 0, Y = 1$ (viz obr. 5.3). Tento postup byl však výpočetně velmi náročný (pro velikost snímku 1920×1080 px a velikosti značky 100×100 px muselo být vyhodnoceno a porovnáno cca 1,8 mil. pozic). Vyhodnocení jednoho snímku tak trvalo řádově desítky minut.



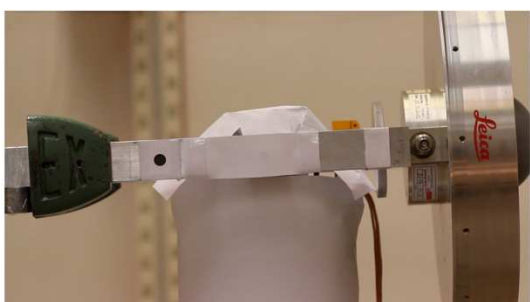
Obr. 5.3 Průchod masky snímkem

Tato doba vyhodnocení jednoho snímku byla neúnosná, a proto muselo dojít k přehodnocení postupu. Celý proces detekce je rozdělen do dvou fází. V první fázi se zmenší rozlišení snímku i hledané značky. Zmenšení se provádí pomocí násobného koeficientu, který je možno měnit v konfiguračním souboru. Pro snímek velikosti 1920×1080 px a velikosti značky 100×100 px se osvědčila volba čtyřnásobného až desetinásobného koeficientu zmenšení, kdy je algoritmus ještě schopen identifikovat značku na snímku. Následně je vytvořena matice, která má stejný počet řádků a sloupců jako je rozměr zmenšeného prohledávaného snímku. Do matice jsou uloženy hodnoty všech obrazových bodů. Matice masky je pak porovnávána s maticí snímku, obdobně jako je zobrazeno na obr. 5.3. Tímto postupem vznikne rozdílová matice, jejíž členy jsou následně sečteny. Na pozici, kde suma rozdílů je minimální se nachází hledaná značka.

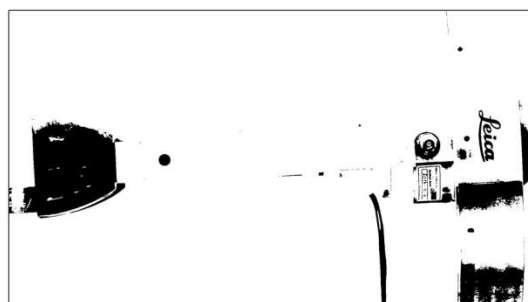
Ve druhém kroku je koeficientem zmenšení snímku vynásobena předběžná poloha značky a tím je získána poloha na původním nezmenšeném snímku. Tuto polohu ovšem

není možné považovat za definitivní, protože je de facto extrapolována ze snímku s např. čtyřikrát menším rozlišením. Přibližné souřadnice značky určené tímto postupem jsou následně využity pro definici okna na původním nezmenšeném snímku, které se bude prohledávat a porovnávat s nezmenšenou značkou. Okno o velikosti čtyřnásobku velikosti masky je umístěno středem do předběžně identifikovaného bodu ze zmenšeného snímku. Okno je procházeno stejným způsobem, který byl popsán výše. Výsledné souřadnice jsou dány jako souřadnice středu mřížky v pozici, ve které byl rozdíl mezi snímkem a hledanou značkou nejmenší. Rovněž je řešen výstup souřadnic do textového souboru. Na závěr je možné vyznačit na snímku nalezenou oblast a snímek uložit. Následující schéma zobrazuje výše popsany postup zpracování snímku a detekci hledané značky.

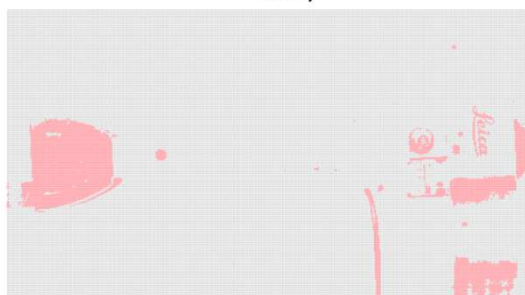
1. Načtení snímku



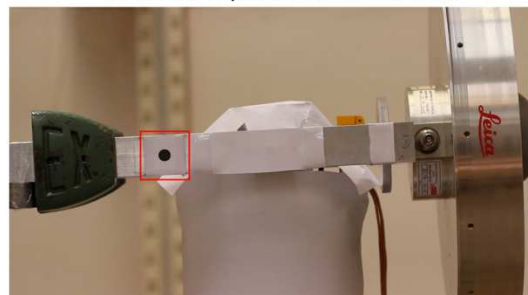
2. Zmenšení, prahování



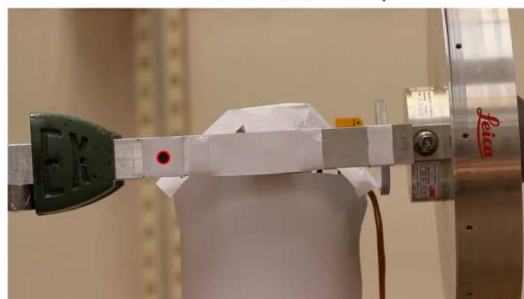
3. Hodnoty jednotlivých pixelů v paměti (červeně označeny hodnoty blízké nule)



4. Velikost okna, ve kterém se bude hledat definitivní poloha na snímku s původní velikostí



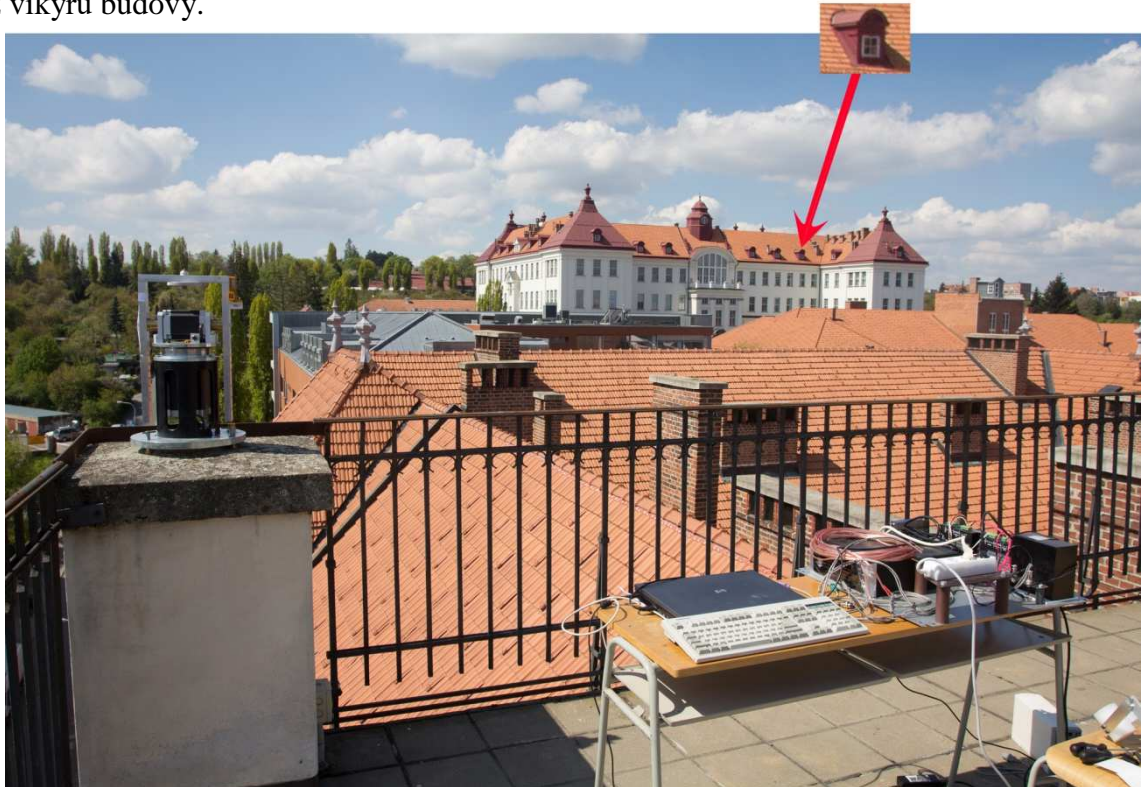
5. Střed značky



Obr. 5.4 Postup zpracování snímku

Tímto postupem byl čas potřebný ke zpracování snímku s rozlišením 1920×1080 px s hledanou značkou o velikosti 100×100 px zkrácen na jednotky sekund. Výhoda tohoto programu tkví v tom, že uživatel si může definovat vlastní tvar, který bude

předmětem detekce. Za předpokladu vypnutí prahování (lze změnou v konfiguračním souboru) umožňuje program vyhledání i jemných detailů. V takových případech má samotná maska malou velikost, proto je potřeba volit malé koeficienty zmenšení. Zároveň se však musí počítat s delší dobou průběhu algoritmu snímkem. Tato vlastnost programu je demonstrována na následující fotografii. Původní velikost fotografie je 5184×3456 px (18 mpx). Masku, která je hledána, má velikost 82×64 px a je tvořena výřezem jednoho z vikýřů budovy.



Obr. 5.5 Výchozí snímek s hledanou oblastí

Následuje přiblížená část fotografie se zákřesem identifikované pozice. Tato fotografie je přímým výstupem z vytvořeného programu. Program správně vyhodnotil masku i přesto, že se na fotografii nachází další podobné vikýře (z nichž dva vrhají stejný stín a mají podobné okolí). Zpracování tohoto snímku trvalo 9 sekund, přičemž bylo zapnuto prahování.



Obr. 5.6 Část snímku s nalezenou oblastí

Přestože optimalizací výše popsaného programu, jenž pracuje se shodou masky, došlo k mnohonásobnému zrychlení zpracování jedné fotografie až na hodnoty v řádu sekund, pro zpracování většího množství snímků (řádově tisíce) byla tato doba stále dlouhá. Proto bylo rozpracováno jiné řešení, které využívá hranové analýzy a segmentace obrazu, kde je předpokládána větší časová efektivita. Jelikož hledaný terč má kružnicový tvar, jako vhodná se jevila metoda Houghovy transformace, která umožňuje detekci parametricky popsatelných objektů.

5.4 Houghova transformace

Jednou ze segmentačních metod, která vychází z detekce hran je Houghova transformace. Houghova transformace představuje způsob, jímž lze v obraze najít křivky ve tvaru, který lze analyticky popsat. Využívá se tak k detekci útvarů typu přímka, elipsa a kružnice. V případech, kdy neznáme analytický popis hledaného útvaru, uplatňuje se tzv. zobecněná Houghova transformace.

Houghova transformace, tak jak je v současné době používána, byla popsána Richardem Dudou a Peterem Hartem v roce 1972 a vychází z patentu Paula Hougha z roku 1962. [26]

Před samotným použitím této metody je potřeba obraz předzpracovat. S využitím hranového detektoru (např. Cannyho hranový detektor, Sobelův operátor) zůstanou v obraze pouze obrazové body, které tvoří linie hran, ty pak vstupují do Houghovy transformace. Pro jednotlivé pixely těchto hran se následně určují možné křivky, kterých může být daný pixel součástí. Parametry těchto křivek pak tvoří tzv. Houghův prostor, jehož rozměr je dán počtem neznámých.

5.4.1 Detekce kružnice

Jednou z křivek, kterou lze poměrně lehce matematicky popsat je kružnice. Její obecná rovnice má tvar:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2, \quad (5.1)$$

kde r je poloměr kružnice, a a b pak souřadnice středu kružnice. Proměnné x , y jsou souřadnice bodů, které splňují rovnici, tím pádem leží na kružnici. Houghův prostor je v tomto případě trojrozměrný (je dán třemi parametry – poloměrem a souřadnicemi středu). Každý bod ležící na této kružnici lze popsat souřadnicemi (viz obr. 5.7):

$$x = a + r \cdot \cos\varphi, \quad (5.2)$$

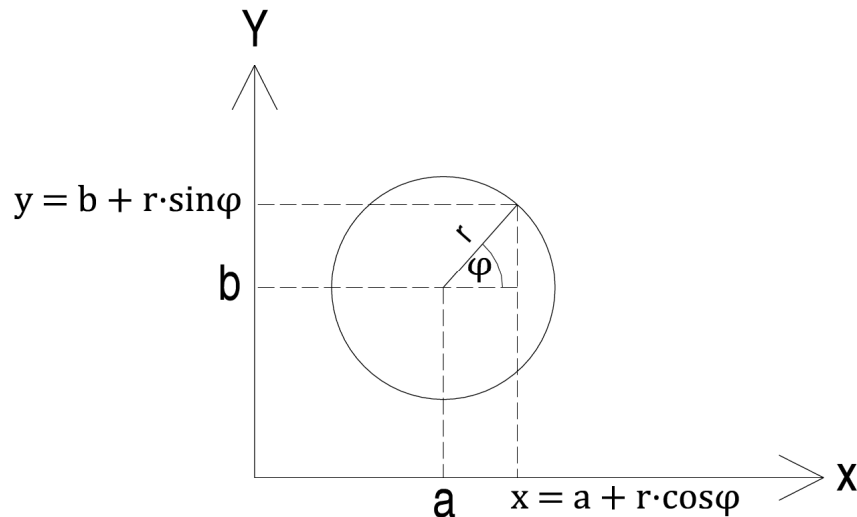
$$y = b + r \cdot \sin\varphi.$$

Hledají-li se body ležící na kružnici o poloměru r , vypočítají se jejich souřadnice dle (5.2) a určí se hodnoty parametrů a a b podle vzorce:

$$a = x - r \cdot \cos\varphi, \quad (5.3)$$

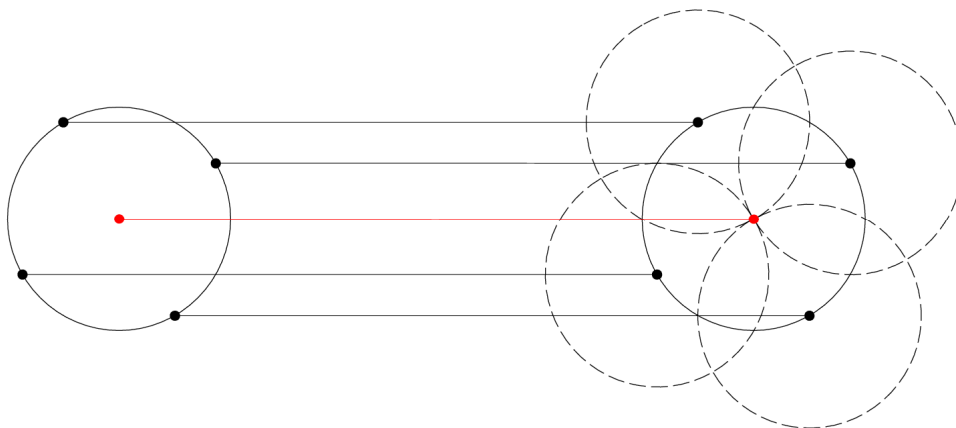
$$b = y - r \cdot \sin\varphi,$$

kde φ nabývá hodnot v intervalu 0 až 2π . Body, které mají stejnou hodnotu parametrů a a b pak leží na hledané kružnici.



Obr. 5.7 Parametrické vyjádření kružnice

Pokud je známa přesná hodnota poloměru hledané kružnice, pak neznámými parametry jsou jen souřadnice středu kružnice a a b . Houghův prostor je pouze dvourozměrný a zaplňuje se postupným vykreslováním kružnic se středy v bodech hrany, která na snímku zůstala po průchodu hranovým detektorem. Tyto kružnice se protínají v bodě, který lze označit jako střed hledané kružnice. [27]



Obr. 5.8 Princip Houghovy transformace při známém poloměru

Obecně ale neplatí, že hodnota poloměru hledané kružnice je známá. Úloha pak vede na trojrozměrný prostor, kdy výše popsaná metoda transformace musí být provedena pro různé poloměry. Souřadnice středu se nachází v rovině X, Y a osa Z reprezentuje různé poloměry. Kružnice se pak promítne v Houghově prostoru jako kužel a následně se hledá

souřadnice maxima, ve kterém je největší množství průniků kuželů. Pro efektivnější výpočetní řešení je vhodné omezit rozpětí možných poloměrů, stejně jako je nutné klást důraz na vhodnou úpravu vstupního obrazu předzpracováním snímku. [27]

5.5 Program pro detekci využívající modifikované Houghovy transformace

Obdobně jako předchozí program pracující se shodou značky je tento software vytvořen v prostředí Microsoft Visual Studio a je uzpůsoben pro běh v příkazovém řádku. Program využívá knihovnu pro jazyk C++ OpenCV verze 3.1.0. Mimo funkcí pro načítání obrazových dat, zakreslování nalezených poloh do snímků, zobrazení snímků, je využívána hlavně funkce pro hledání křivek ve tvaru kružnic. Tato funkce je v knihovně označována *HoughCircles*. Deklarace funkce vypadá následovně:

```
void HoughCircles (InputArray image, OutputArray circles, int method, double dp,
double minDist, double param1=100, double param2=100,
int minRadius=0, int maxRadius=0)
```

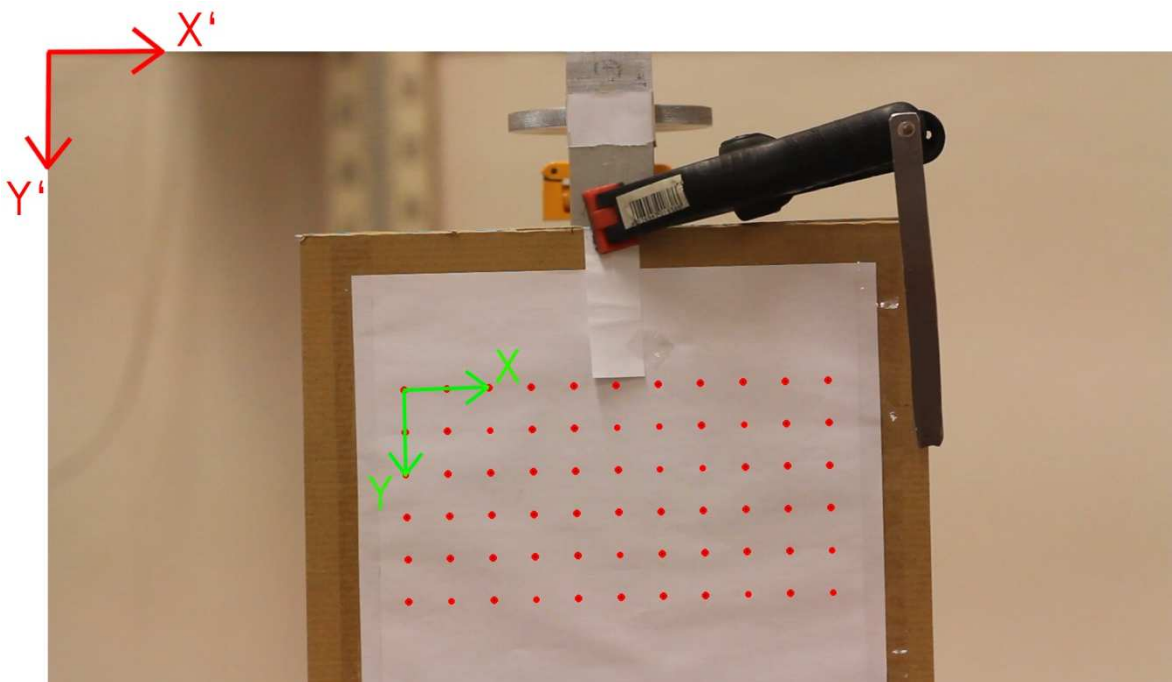
Do funkce vstupuje několik parametrů. Vstupem pro ni je obraz v režimu stupňů šedi s osmibitovou hloubkou (**image**). Výstupem je vektor (**circles**) nalezených kružnic obsahující tři prvky (souřadnice středu a , b , poloměr r). Třetí parametr (**method**) definuje metodu detekce kružnic. V současnosti implementovaná je metoda Houghova gradientu (Hough gradient method), která umožňuje efektivnější průběh algoritmu oproti klasické Houghově transformaci. Parametr **dp** specifikuje relativní velikost Houghova prostoru (akumulátoru) k velikosti snímku. Zvětšení hodnoty znamená zmenšení velikosti akumulací matice. Zvýšení této hodnoty snižuje přesnost detekce, ovšem zvyšuje robustnost metody (nedokonalé kružnice nejsou vynechávány). Parametr **minDist** [px] definuje minimální vzdálenost mezi kružnicemi. **Param1** je prahová hodnota předávaná Cannyho hranovému detektoru a **param2** pak hodnota prahu akumulátoru, která musí být dosažena pro detekci křivky. Čím je tato hodnota nižší, tím více chybných kružnic může být detekováno. Parametry **minRadius** [px] a **maxRadius** [px] umožňují definovat interval poloměru hledaných kružnic. Pro správnou funkčnost detekce je zapotřebí přizpůsobit tyto parametry dané situaci a předmětu identifikace. [25]

Struktura vytvořeného programu je následující. V první řadě proběhne kalibrace. Ta začíná načtením snímku, na kterém je zachyceno kalibrační pole. Následně je volána funkce, kde se identifikují všechny body na snímku, které budou sloužit jako identické body při transformaci do objektového systému. Vzápětí je proveden export těchto bodů do souboru a to jak souřadnic snímkových, tak souřadnic objektových (viz příloha č. 3, soubor *IB.txt*).

Objektové souřadnice jsou definovány na základě použitého kalibračního pole, které je tvořeno šesti řadami a jedenácti sloupci černých kruhů o průměru 2,1 mm se vzájemnou vzdáleností 19,9 mm. [18]

V konfiguračním souboru je možné uživatelsky definovat počet řádků a sloupců kalibračního pole, jakož i jejich rozestupů.

Počátek objektového systému je volen v levém horním rohu kalibračního pole. Kladná větev osy X je vedena ve směru řádků doprava a kladná větev osy Y směřuje dolů ve směru sloupců. Na následujícím snímku jsou červeně zobrazeny identifikované body kalibračního pole a orientace snímkového a objektového souřadnicového systému.



Obr. 5.9 Kalibrační pole se znázorněním orientace snímkového a objektového souřadnicového systému

Po provedení kalibrace je zahájena opakovaná část programu, která zpracuje snímky v počtu, který uživatel specifikuje v konfiguračním souboru. Program postupně načítá, zpracovává a vypisuje souřadnice nalezených terčů na snímku do souboru. Před aplikací funkce HoughCircles je obraz ještě mírně zjemněn Gaussovým rozostřením, čímž se předchází detekci falešných kružnic, které by mohly být detekovány z možných ostrých hran na snímku. Při vyhodnocení může nastat situace, kdy dané nastavení parametrů funkce pro hledání kružnic nevede k úspěšnému vyhodnocení snímku. Pokud taková situace nastane, program automaticky změní parametry funkce na hodnoty, které umožňují benevolentnější detekci kružnic (děje se tak přenastavením hodnoty param2). Pokud ani přesto není terč identifikován, program do příkazového řádku vypíše chybu a postupuje na další snímek v pořadí.

Při aplikaci tohoto programu pro vyhodnocení měření, kdy se bude polohovací rameno s umístěnou značkou plynule pohybovat, je vhodné, aby samotný software prováděl kontrolu nad získávanými daty. Tato kontrola má za cíl odhalit případně špatně vyhodnocené snímky, kde by se kružnice nacházela mimo oblast, ve které se nacházela kružnice na předešlém snímku. Jsou tedy vždy porovnávány souřadnice značky ze dvou po sobě jdoucích snímků. V případě, že dojde k vyhodnocení značky, jejíž střed je posunut

v jedné z os o hodnotu přesahující toleranci, program vypíše do příkazového řádku chybu včetně identifikace snímku, na kterém tento problém nastal. Hodnotu tolerance lze specifikovat v konfiguračním souboru.

Pro ukázkou je uvedena část kódu, konkrétně definice funkce pro vyhodnocení, která je volána postupně pro každý snímek. Tato část byla mírně upravena, tak aby zde zabírala menší prostor. Kompletní zdrojový kód včetně komentářů je uveden v příloze č. 1.

```
Point vyhodnoceni(string name, ofstream *output_file, int polomer, int cislo_bodu, string zobrazit,
int param2)
{
    Mat img, bw;
    img = imread(name, 1);
    if (img.empty()) cout << name << " nelze nacist." << endl;
    cvtColor(img, bw, CV_BGR2GRAY); //Převede obrázek na barvy stupně šedi
    GaussianBlur(bw, bw, Size(9, 9), 2, 2); // Zjemní snímek, zabrání tak detekci falešných kružnic
    vector<Vec3f> circles;
    HoughCircles(bw, circles, CV_HOUGH_GRADIENT, 1, 9999, 200, param2, 0, 0);
    if (circles.size() == 0)
    {
        cout << "Na snímku " << name << " nebyla nalezena značka." << "Upravuji nastavení detekce" << endl;
        GaussianBlur(bw, bw, Size(5, 5), 6, 6); // Funkce pro redukci šumu, zjemní snímek
        HoughCircles(bw, circles, CV_HOUGH_GRADIENT, 1, 9999, 90, 11, polomer-5, polomer+5);
        cout << "Pocet nalezených značek na snímku " << name << ": " << circles.size() << endl;
        if (circles.size() != 0) // Pokud nenalezne terč v při prvotním nastavením, změní se parametry
        {
            cout << "Nalezeno." << endl;
        }
        else
        {
            cout << "Snímek " << name << " nebyl vyhodnocen." << endl;
            Point Error(0, 0);
            *output_file << "Error" << endl;
            return Error;
        }
    }
    if (circles.size() > 1)
        cout << "Na snímku " << name << " nalezeno " << circles.size() << " značek." << endl;

    for (size_t i = 0; i < circles.size(); i++)
    {
        Point2f center((circles[i][0]), (circles[i][1]));
        float radius = (circles[i][2]);

        cvtColor(img, bw, CV_BGR2GRAY);
        Canny(bw, bw, 100, 620);

        vector<vector<Point>> contours;
        vector<Vec4i> hierarchy;
        Mat cont;
        int X_window, Y_window, dh, dw;
        X_window = (circles[i][0] - 2*polomer);
        Y_window = (circles[i][1] - 2*polomer);
        dh = 3.5 * polomer;
        dw = 3.5 * polomer;

        findContours(bw(Rect(X_window, Y_window, dh, dw)), contours, hierarchy, RETR_TREE,
CHAIN_APPROX_SIMPLE, Point(X_window, Y_window));
        vector<Moments> mu(contours.size());
        for (int j = 0; j < contours.size(); j++)
        {
            mu[j] = moments(contours[j], false);
        }
        vector<Point2f> mc(contours.size());
        for (int j = 0; j < contours.size(); j++) // Souřadnice těžiště hrany
        {
            mc[j] = Point2f(mu[j].m10 / mu[j].m00, mu[j].m01 / mu[j].m00);
        }
        Point2f prumer(((mc[0].x + mc[1].x) / 2), ((mc[0].y + mc[1].y) / 2));
    }
}
```

```

if (zobrazit == "ANO") // Zakreslí nalezené body a zobrazí výsledek
{
    for (int idx = 0; idx >= 0; idx = hierarchy[idx][0])
    {
        Scalar color(0, 255, 0);
        drawContours(img, contours, idx, color, 2, 8, hierarchy);
    }
    namedWindow(name, WINDOW_NORMAL); // Otevře nové okno
    imshow(name, img); // Zobrazí nalezené body
    waitKey(0);
}

*output_file << cislo_bodu + 1 << " " << fixed << setprecision(3) << prumer.x << " " <<
setprecision(3) << prumer.y << endl;

return prumer;
mc.clear();
mu.clear();
hierarchy.clear();
contours.clear();
circles.clear();
}
}

```

Při aplikaci takto navrženého programu a zpracování naměřených dat bylo zjištěno, že přesnost jednoho pixelu, se kterou je určován střed hledané kružnice, nevyhovuje požadavkům na výslednou interpretaci výsledků. Potíží je, že funkce *HoughCircles* vrací hodnoty souřadnic středu značky pouze jako celé číslo.

Přestože přesnost určeného středu značky pomocí Houghovy transformace nespĺňuje požadavky, tímto způsobem identifikovaná poloha hraje významnou roli pro další zpracování.

Pomocí Cannyho hranového detektoru jsou z původního snímku vyseparovány všechny identifikovatelné hrany včetně obrysu hledané značky. Následně je s využitím souřadnic středu kružnice z Houghovy transformace definováno okno, ve kterém se nachází značka, a jsou zjištěny souřadnice všech bodů hrany hledané značky. Výsledná poloha je pak nalezena jako těžiště těchto bodů. Tento způsob umožnil programu detekovat hledanou značku se subpixelovou přesností.

Rovněž došlo ke zvýšení rychlosti průběhu algoritmu jednotlivými snímky oproti programu pracujícímu se shodou masky, který je popsán v kapitole 5.3. Doba vyhodnocení jednoho snímku s rozlišením 1920×1080 px byla snížena pod hodnotu jedné sekundy. Tento program pro zpracování více než šesti tisíc snímků (1920×1080 px) potřeboval 42 minut. Zpracovat stejný počet snímků programu popsanému v kapitole 5.3 trvalo 185 minut.

Nevýhodou tohoto programu je, že při vyhodnocení odlišných snímků, které mají jiné expoziční parametry a značka jinou velikost než je použito v této práci, je nutné změnit hodnoty parametrů vstupujících do funkce pro detekci kružnic, a to jak pro vyhodnocení kalibračního pole tak i následující snímky.

6 TESTOVACÍ MĚŘENÍ

Dne 11. prosince 2015 proběhlo měření, jehož cílem bylo ověřit chod polohovacího zařízení v závislosti na velikosti zatížení. Měření bylo provedeno metodou jednosnímkové fotogrammetrie.

6.1 Přístrojové vybavení

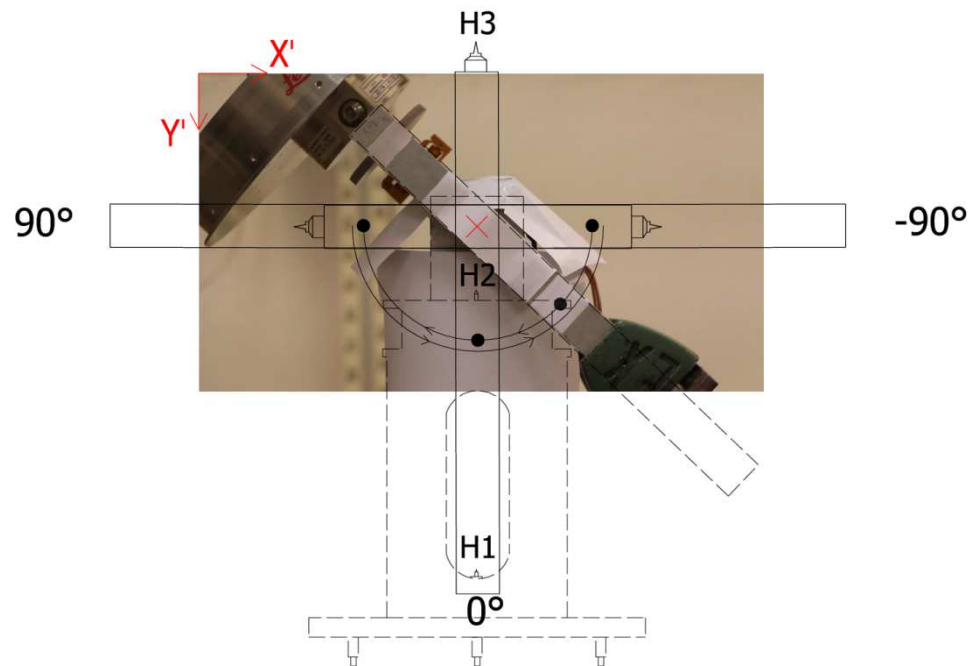
Jako snímací zařízení byl použit digitální fotoaparát Canon EOS 60D v kombinaci s objektivem Canon EF 70-200mm 4L USM. Objektiv s větší ohniskovou vzdáleností byl volen především pro jeho nízké radiální zkreslení oproti objektivu širokouhlému. Fotoaparát byl umístěn na stativ a prováděl záznam ve video formátu *MOV* s frekvencí 25 snímků za sekundu při rozlišení 1920×1080 px. Videozáznam byl pořízen jednak z důvodu vysoké frekvence snímků (při klasickém fotografování pouze 5,3 sn./s). Dalším důvodem bylo sklápění zrcadla, ke kterému dochází při expozici. Tento pohyb by mohl zapříčinit mírné otřesy, které by znehodnotily měření.

6.2 Postup při měření

Polohovací zařízení bylo umístěno na pilíři B150.1 v laboratoři B150. Před začátkem snímání bylo nutné nastavit nosník polohovacího zařízení do výchozí pozice ($Y = 0^\circ$). Dle postupu v [18] bylo teodolitem umístěným na pilíři B150.2 zacíleno svislou rýskou na hrot H2 (pod motorem M2). Tento hrot leží v točné ose přístroje. Následně bylo pomocí motoru M1 přístrojem otočeno kolem vertikální osy tak, aby osa motoru M2 ležela v záměrné přímce teodolitu, čehož bylo dosaženo ztotožněním záměrné přímky a středu inbusového šroubu spojovacího nosník s hřídelí motoru M2. Nakonec bylo potřeba umístit nosník do svislé pozice. Z kvadrantu se zápornými hodnotami úhlů bylo najeto do kvadrantu s kladnými hodnotami úhlů tak, aby hrot H3 umístěný v místě upínání antén byl ztotožněný se svislým vláknem záměrného kříže teodolitu (poloha hrotů vyznačena na obr. 6.1).

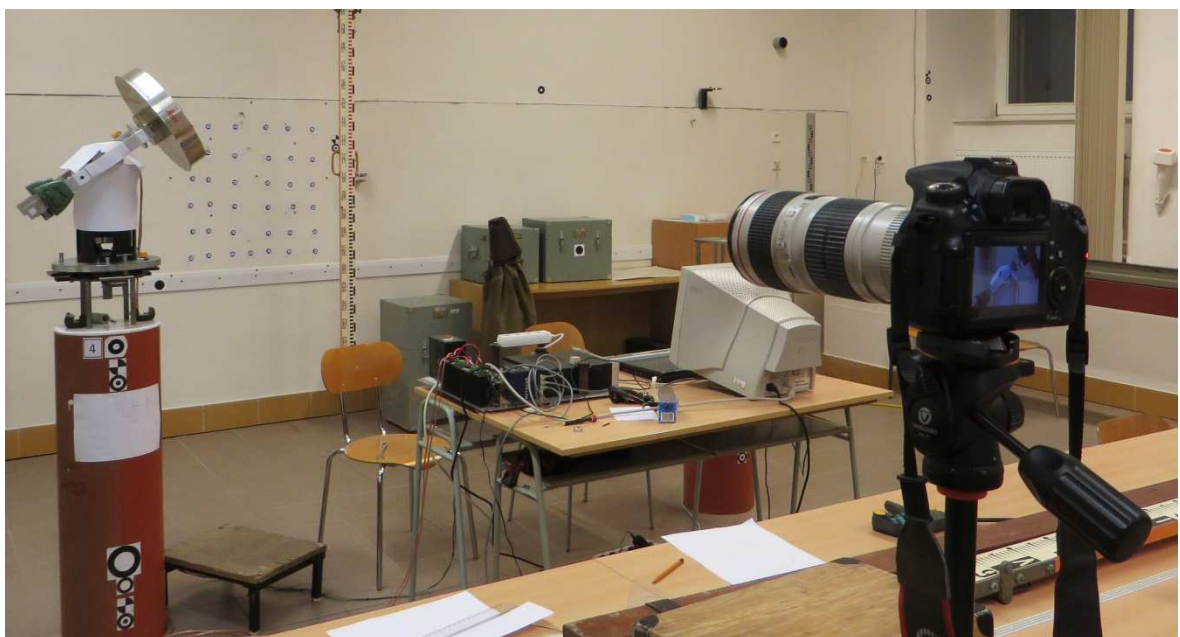
Teodolit na pilíři byl ještě využit pro zařazení fotoaparátu do přímky mezi pilíře B150.1 a B150.2. Stativ s fotoaparátem byl umístěn do vhodné výšky, aby byl střed záběru pokud možno co nejbližší ose motoru M2.

Následně došlo ke spuštění observačního programu, který byl nastaven tak, že z výchozí pozice (0°) se nosník se značkou otočil do pozice -90° . Z této pozice se pak rameno pohybovalo po 5° až do opačné pozice 90° . Po každém pětistupňovém kroku následovalo čekání v pozici po dobu 2 s. Obdobný pohyb byl vykonáván při pohybu zpět z pozice 90° do -90° .



Obr. 6.1 Pohyb zařízení při měření

Měření bylo provedeno celkem dvakrát. Pro nezatížený stav, kdy na nosníku není upevněna anténa a podruhé pro stav, kdy je připevněna anténa. Konkrétně se jednalo o anténu Leica AT504 (GG), což je geodetická anténa využívaná např. v sítích referenčních stanic a svojí hmotností (4,3 kg) spadá do kategorie antén hmotnějších. Cílem měření bylo získat informace o chování ramene při vyváženém stavu, proto bylo rameno nutné dovážit. V případě nezatíženého stavu stačilo upevnit pod nosník dvě malá závaží. Pro zatížený stav bylo nutné na druhý konec nosníku připevnit pomocí upínacích šroubů dvojici větších závaží a pro jemnější dovážení bylo použito i menších závaží.



Obr. 6.2 Průběh měření (autor Radim Kratochvíl)

6.3 Vážení zátěže umístěné na přístroji

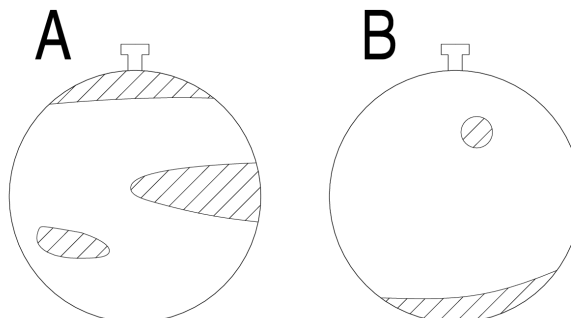
Do výpočtu momentu setrvačnosti polohovacího zařízení vstupuje vzdálenost od osy otáčení a hmotnost. Bylo tedy nezbytné určit hmotnost všech předmětů, které byly v době měření připevněny na nosníku.

Na rovnoramenných váhách byly určeny hmotnosti závaží včetně upevňovacích šroubů, antény použité při měření, ale i dalších předmětů, jejichž hmotnost by do budoucna mohlo být užitečné znát. Soupis všech předmětů a jejich váhy zobrazuje následující tabulka.

Tab. 6.1 Hmotnosti použitých závaží a antén

Předmět	Hmotnost [g]
Závaží "KIN"	1861
Závaží "EX"	1906
Šroub 13 × 35 mm	15
Závaží "váleček s otvorem"	131
Šroub s křídlovou matkou 8 × 53 mm	10
*Závaží z litinové nivelační značky "A"	616
*Závaží z litinové nivelační značky "B"	620
Anténa Leica AT 504 (GG) (s. no. 102517) bez radomu	4229

*závaží rozlišeno dle jeho vizuální struktury



Obr. 6.3 Vážení antény Leica AT504 (autor Radim Kratochvíl)

7 VYHODNOCENÍ

V prvním kroku bylo nezbytné převést pořízené videosoubory na jednotlivé snímky. K tomuto účelu byla použita utilita pro příkazový řádek *ffmpeg*, která umožňuje konverzi formátu *mov* do formátu *png*. Délka záznamu měření pohybu polohovacího zařízení činí přibližně čtyři a půl minuty. Při frekvenci 25 sn./s se celkový počet snímků pohybuje kolem 6600, což při rozlišení 1920×1080 px činí přibližně 12 GB dat.

```

Příkazový řádek - ffmpeg -i D:\DP\MVI_1118.MOV -r 25 -ss 0:00:10 D:\DP\2\foto\obr%4d.png

C:\Users\Josef Komárek>ffmpeg -i D:\DP\MVI_1118.MOV -r 25 -ss 0:00:10 D:\DP\2\foto\obr%4d.png
ffmpeg version 2.8.4 Copyright (c) 2000-2015 the FFmpeg developers
built with gcc 5.2.0 (GCC)
configuration: --enable-gpl --enable-version3 --disable-w32threads --enable-avisynth --enable-bzlib --enable-fontconfig --enable-frei0r --enable-gnutls --enable-iconv --enable-libass --enable-libbluray --enable-libbs2b --enable-libcaca --enable-libcdcodec --enable-libcddb --enable-libdc1394 --enable-libdirac --enable-libfdk_aac --enable-libgsm --enable-libimg --enable-libjvarkit --enable-liblame --enable-libltdl --enable-libmodplug --enable-libmp3lame --enable-libopus --enable-libpango --enable-libpangocairo --enable-libpangotools --enable-libpostproc --enable-librtmp --enable-librubemusic --enable-libschroedinger --enable-libsoxr --enable-libspeex --enable-libtheora --enable-libtesseract --enable-libtimg --enable-libtremor --enable-libvidstab --enable-libvoaacenc --enable-libvoamrwb --enable-libvorbis --enable-libvpx --enable-libwavpack --enable-libwebp --enable-libx264 --enable-libx265 --enable-libxavs --enable-libxvid --enable-lzma
libavutil      54. 31.100 / 54. 31.100
libavcodec     56. 60.100 / 56. 60.100
libavformat    56. 40.101 / 56. 40.101
libavdevice    56.  4.100 / 56.  4.100
libavfilter     5. 40.101 /  5. 40.101
libswscale     3.  1.101 /  3.  1.101
libswresample  1.  2.101 /  1.  2.101
libpostproc   53.  3.100 / 53.  3.100
Input #0, mov,mp4,m4a,3gp,3g2,mj2, from 'D:\DP\MVI_1118.MOV':
Metadata:
  major_brand      : qt
  minor_version    : 537331968
  compatible_brands: qt CAEP
  creation_time    : 2015-12-11 17:11:36
Duration: 00:05:34.56, start: 0.000000, bitrate: 46337 kb/s
Stream #0:0(eng): Video: h264 (Constrained Baseline) (avc1 / 0x31637661), yuvj420p(pc, smpte170m/bt709/bt709), 1920x1080, 44796 kb/s, 25 fps, 25 tbr, 25k tbn, 50k tbc (default)
Metadata:
  creation_time    : 2015-12-11 17:11:36
Stream #0:1(eng): Audio: pcm_s16le (sowt / 0x74776F73), 48000 Hz, stereo, s16, 1536 kb/s (default)
Metadata:
  creation_time    : 2015-12-11 17:11:36
[swscale @ 0373d240] deprecated pixel format used, make sure you did set range correctly
Output #0, image2, to 'D:\DP\2\foto\obr%4d.png':
Metadata:
  major_brand      : qt
  minor_version    : 537331968
  compatible_brands: qt CAEP
  encoder          : Lavf56.40.101
Stream #0:0(eng): Video: png, rgb24, 1920x1080, q=2-31, 200 kb/s, 25 fps, 25 tbn, 25 tbc (default)
Metadata:
  creation_time    : 2015-12-11 17:11:36
  encoder         : Lavc56.60.100 png
Stream mapping:
  Stream #0:0 -> #0:0 (h264 (native) -> png (native))
Press [q] to stop, [?] for help
frame= 649 fps= 11 q=0.0 Lsize=N/A time=00:00:25.96 bitrate=N/A
  
```

Obr. 7.1 Konverze videosouboru na jednotlivé snímky v programu ffmpeg

Dalším bodem vyhodnocení byla identifikace polohy terče na každém měřickém snímku. Pro tuto činnost byl použit vytvořený program založený na detekci kružnic pomocí Houghovy transformace. Výstupem z tohoto programu jsou snímkové souřadnice značky určené na každém snímku a dále identické body z kalibračního pole.

Pro transformaci snímkových souřadnic do objektového prostoru byl použit program *homography*, který vytvořil Ing. Juraj Komačka. Program má v sobě implementovanou projektivní transformaci s algoritmem vyrovnání RANSAC (bližší informace např. v [18]). Pro soubor měření při nezatíženém stavu je výběrová směrodatná odchylka vypočtená z oprav na jednotlivých bodech kalibračního pole v ose x 0,05 mm a v ose y 0,04 mm. Pro zatížený stav pak obdobně $m_x = 0,05$ mm a $m_y = 0,03$ mm. Protokol z transformace je uveden v příloze č. 5.

Následně bylo nezbytné vymyslet postup, jak z objektových souřadnic vyhodnotit chod ramene. Cílem bylo popsat z měřených dat rozdíl mezi chováním ramene bez zátěže a se zátěží. Postup byl zvolen následující. Všemi body byla proložena metodou nejmenších

čtverců kružnice a vyrovnáním zprostředkujících měření byly určeny neznámé parametry této kružnice (souřadnice středu a poloměr). Následně byly určeny směrníky ze středu kružnice na všechny body, které na ní leží. Předpoklad byl takový, že při pohybu zařízení se směrníky budou lineárně zvětšovat a ve fázi klidu budou konstantní. Nakonec byla z počtu klidových pozic určena doba, ve které se zařízení nepohybuje.

Aby bylo možné vypočítat směrníky ze středu kružnice, byla všemi body, jejichž poloha je určena v souřadnicích, proložena vyrovnávací kružnice. Obecný tvar aproximačního vztahu je:

$$Y + v = A \cdot x, \quad (7.1)$$

kde Y je vektor měřených hodnot, v vektor oprav, A matice plánu a x je vektor neznámých parametrů (souřadnice středu a poloměr kružnice). Po linearizaci přejde vztah na tvar

$$v = A \cdot x + l, \quad (7.2)$$

kde l je vektor prostých členů. Neznámé parametry kružnice se vypočtou dle vztahu

$$x = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot l = Q \cdot A^T \cdot l, \quad (7.3)$$

kde Q je matice kofaktorů. Střední chyby neznámých parametrů se určí dle vzorce

$$m_{x_i}^2 = m_0^2 \cdot Q_{x_i x_i} = \frac{v^T \cdot v}{n - k} \cdot Q_{x_i x_i}, \quad (7.4)$$

kde $n - k$ je nadbytečný počet parametrů. Funkční závislost mezi parametry kružnice a souřadnicemi bodů je dána vztahem

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}. \quad (7.5)$$

Po zavedení přibližných hodnot přejde rovnice oprav na lineární tvar:

$$v_i = a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dr + l_i. \quad (7.6)$$

Parciální derivace funkce (7.5) a prosté členy mají tvar:

$$a_i = \frac{x_i - x_0}{r_{0i}}, \quad b_i = \frac{y_i - y_0}{r_{0i}}, \quad c_i = 1, \quad l_i = r_0 - r_{0i}, \quad (7.7)$$

$$r_{0i} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}. \quad (7.8)$$

Výpočtem vektoru $x = (dx, dy, dr)^T$ a dosazením do vztahu

$$\begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + dx \\ y_0 + dy \\ r_0 + dr \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

jsou získány souřadnice středu vyrovnávací kružnice a její poloměr. [28]

Pro výše popsaný úkon byl v programu Scilab vyhotoven skript vyrovnání zprostředkujících měření metodou nejmenších čtverců, následný výpočet směrníků, určení počtu klidových pozic a určení vystavených směrů. V tento moment také dojde k přepočtu

směrníků na zavedené označení náklonu ramene -90° až $+90^\circ$. Aby bylo možné ve výsledku porovnat hodnoty vystavených náklonů nezatíženého a zatíženého stavu, je nutné všechny hodnoty opravit o odchylku výchozího stavu, kdy rameno má být ve svislé pozici $Y = 0^\circ$. Klidové pozice jsou určovány porovnáváním pětice po sobě jdoucích směrů. Pokud rozdíl maxima a minima těchto hodnot nepřesahuje nastavenou mez, uloží se hodnota náklonu do vektoru. Když dojde následně k překročení tolerance (rameno se začne pohybovat) je určena střední hodnota z náklonů uložených ve vektoru a vypsán počet klidových pozic. Celý skript je uveden v příloze č. 6. Pro ukázkou je zde uvedena část skriptu.

```
xi = fscanfMat ('X.txt')
yi = fscanfMat ('Y.txt')
[n1,n2]=size(xi) //n1 počet řádků, n2 počet sloupců

// Přibližné souřadnice a poloměr
x0=mean(xi)
y0=(yi(1)+yi(n1/2))/2
r0=(sqrt((xi(1)-xi(n1/2))^2+(yi(1)-yi(n1/2))^2))/2
// Matice plánu
for j=1:n1
    A(j,1)=(xi(j)-x0)/sqrt((xi(j)-x0)^2+(yi(j)-y0)^2)
    A(j,2)=(yi(j)-y0)/sqrt((xi(j)-x0)^2+(yi(j)-y0)^2)
    A(j,3)=1
end
// Vektor prostých členů
for i=1:n1
    l(i)=r0-sqrt((xi(i)-x0)^2+(yi(i)-y0)^2)
end

x=-inv(A'*A)*A'*l
v=A*x+l
```

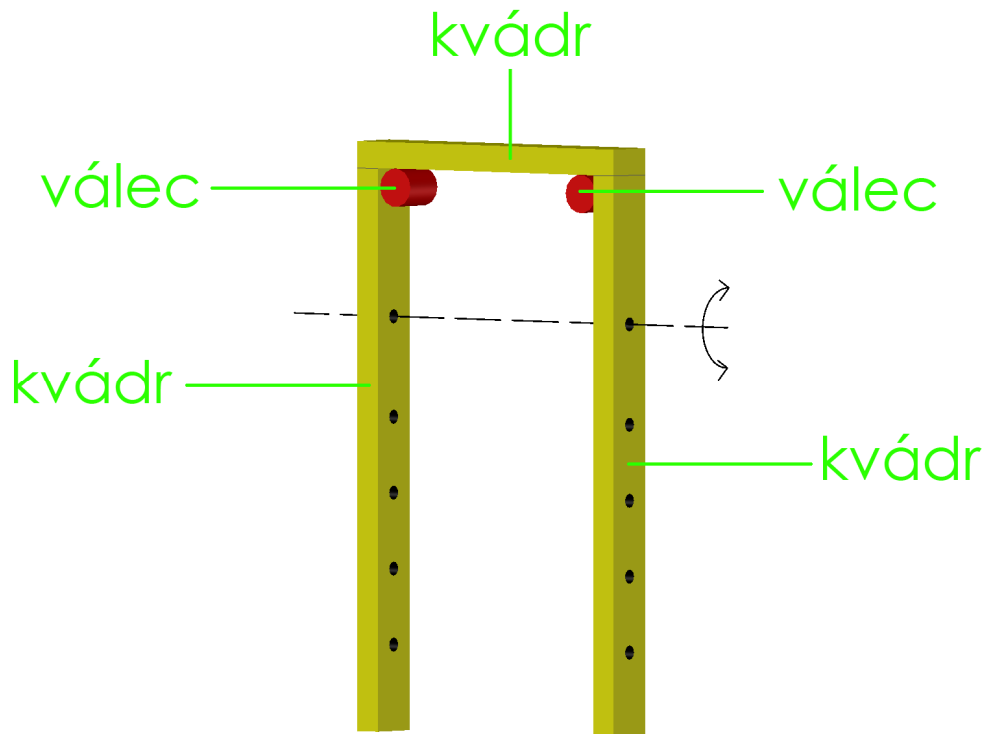
Obr. 7.2 Vyrovnání MNC v programu Scilab

7.1 Nezatížený stav

Jako první byl vyhodnocen stav ramene bez přidaného zatížení. Přestože je zde pojednáváno o stavu bez zatížení, je nutné tento termín upřesnit. Samotné rameno je tvořeno dvěma nosníky, které jsou spojeny s hřídelí motoru. Tyto dva nosníky ve tvaru hranolu jsou na jednom konci spojeny dalším hliníkovým překladem, ke kterému je upevňována kalibrovaná anténa. Těžiště tohoto celku však neprochází osou otáčení, proto je nutné pro dosažení vyváženého stavu přidat k hornímu nosníku menší závaží. Tento stav je pak v této práci označen jako nezatížený. Jedná se tedy o stav ramene, ke kterému je přidána minimální zátěž, aby bylo dosaženo vyvážení.

Pro tento stav byl vypočten moment setrvačnosti. Tvar nosníku a závaží je pravidelný a jejich hustota konzistentní, proto bylo využito vzorců pro výpočet momentu setrvačnosti geometricky pravidelných homogenních těles. Celé rameno bylo rozloženo na pět těles ($3 \times$ nosník ve tvaru kvádrů, $2 \times$ válec ve tvaru závaží), jejichž moment

setrvačnosti byl spočten k ose procházející jejich těžištěm, která je rovnoběžná s osou otáčení ramene. Následně byl pomocí Steinerovy věty (kapitola 4.1.1) vypočten moment setrvačnosti těchto dílčích těles vůči ose otáčení polohovacího zařízení.



Obr. 7.3 Rozdělení ramene pro výpočet momentu setrvačnosti, nezátížený stav

Pro výpočet momentu setrvačnosti kvádrů byl použit vzorec [19]

$$J_T = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (a^2 + b^2), \quad (7.10)$$

kde a je délka, b šířka a m hmotnost kvádrů. Vzorec pro výpočet momentu setrvačnosti válce, který se otáčí kolem osy vedené jeho těžištěm kolmo ke spojnici středů jeho podstav

$$J_T = \frac{1}{4} \cdot m \cdot R^2 + \frac{1}{12} \cdot m \cdot v^2, \quad (7.11)$$

kde R je poloměr podstavy, v výška válce a m jeho hmotnost. [19]

Výsledný moment setrvačnosti je dán jako součet momentů setrvačnosti jednotlivých těles. Moment setrvačnosti polohovacího ramene v nezátíženém stavu tedy činí $0,063 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Hmotnost ramene v tomto stavu je $2,8 \text{ kg}$. Výpočet je k nahlédnutí v příloze č. 7.

Tabulka na následující straně již zobrazuje výsledek měření. Obsahuje všech 73 klidových pozic, které byly nastaveny v observačním programu s krokem 5° a dobou stání 2 s . V prvním sloupci tabulky je určený směr náklonu v klidové pozici. Druhý sloupec zahrnuje celkový počet pozic, na kterých se polohovací rameno nachází v klidu

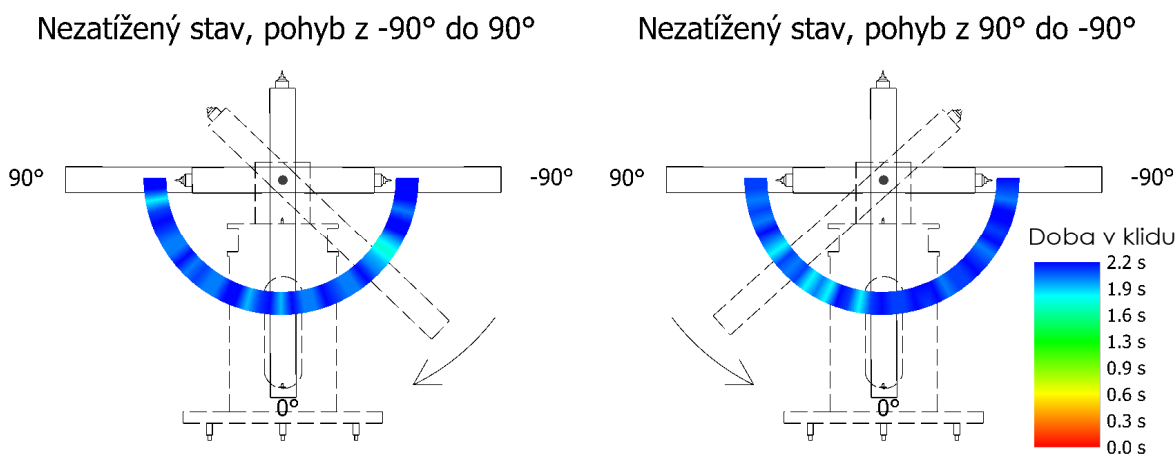
a v dalším sloupci je pak tato hodnota přepočítaná na výsledný čas, který rameno strávilo v nehybné pozici.

Tab. 7.1 Vyhodnocení pohybu bez přidané zátěže

		0° -> - 90° -> + 90°			+ 90° -> - 90° -> 0°			Rozdíl nájezdu	
		Náklon	Počet pozic	Doba stání	Náklon	Počet pozic	Doba stání	TAM-ZPĚT	
		[°]		[s]	[°]		[s]	[°]	
Postup pohybu ↓	0.0	- Výchozí pozice			0.0	- Konečná pozice			0.0
	-90.0	55	2.2	-90.1	56	2.2	0.2		
	-85.0	55	2.2	-85.1	54	2.2	0.1		
	-80.0	55	2.2	-80.1	51	2.0	0.1		
	-75.1	50	2.0	-75.1	55	2.2	0.1		
	-70.1	55	2.2	-70.2	55	2.2	0.1		
	-65.0	55	2.2	-65.1	53	2.1	0.0		
	-60.0	48	1.9	-60.0	54	2.2	0.0		
	-55.1	42	1.7	-55.1	52	2.1	0.0		
	-50.0	47	1.9	-50.1	54	2.2	0.0		
	-45.0	49	2.0	-45.0	54	2.2	0.0		
	-40.0	54	2.2	-40.0	53	2.1	0.0		
	-35.0	50	2.0	-34.9	52	2.1	0.0		
	-30.1	50	2.0	-30.1	51	2.0	0.0		
	-25.0	53	2.1	-25.0	55	2.2	0.0		
	-20.0	55	2.2	-20.0	54	2.2	-0.1		
	-15.0	51	2.0	-15.0	55	2.2	-0.1		
	-10.0	50	2.0	-10.0	52	2.1	-0.1		
	-5.1	55	2.2	-5.0	51	2.0	-0.1		
	0.0	48	1.9	0.1	53	2.1	-0.1		
	5.0	54	2.2	5.1	53	2.1	-0.1		
9.9	53	2.1	10.0	44	1.8	-0.1			
14.9	47	1.9	15.0	53	2.1	-0.1			
19.9	55	2.2	20.0	56	2.2	-0.1			
24.9	55	2.2	25.0	44	1.8	-0.1			
30.0	51	2.0	30.1	49	2.0	-0.1			
34.9	49	2.0	35.0	47	1.9	-0.1			
39.9	52	2.1	40.0	54	2.2	-0.1			
45.0	49	2.0	45.0	51	2.0	-0.1			
49.9	54	2.2	50.0	53	2.1	-0.1			
55.0	49	2.0	55.1	42	1.7	-0.1			
59.9	49	2.0	60.0	51	2.0	-0.1			
64.9	53	2.1	65.0	53	2.1	-0.1			
70.0	55	2.2	70.1	49	2.0	-0.1			
75.0	52	2.1	75.1	53	2.1	-0.1			
80.0	44	1.8	80.1	52	2.1	-0.1			
84.9	55	2.2	85.0	54	2.2	-0.1			
90.1	54	2.2	→ ↑						

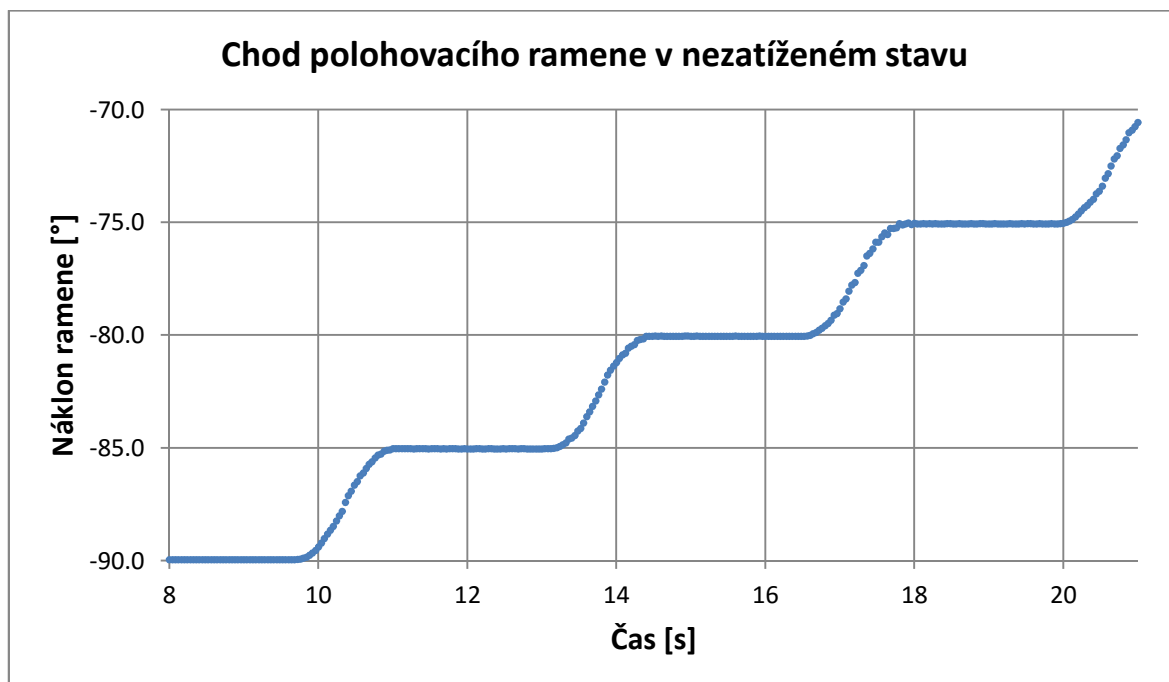
Z výsledků vyplývá, že nezatížené rameno v klidové pozici stráví v průměru 2,07 s, což odpovídá hodnotě nastavené v observačním programu. Zařízení při měření provedlo

nejprve pohyb z polohy -90° do $+90^\circ$ a následně přešlo zpět do polohy -90° , proto je možné posoudit rozdíly nájezdů do jednotlivých klidových poloh. Jak je z tabulky zřejmé, rozdíly se pohybují v intervalu $-0,1^\circ$ až $+0,1^\circ$ (s výjimkou nájezdu do konečné polohy, kde je rozdíl $0,2^\circ$) se střední hodnotou $0,0^\circ$. Pokud uvažíme přesnost, se kterou motor vystavuje zařízení do dané polohy ($m_\omega = 0,06^\circ$) a vypočítáme z ní mezní hodnotu rozdílu vystavení do polohy $\delta_{d\omega} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot m_\omega = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,06^\circ = 0,2^\circ$, hodnoty nepřesahují mezní chybu.



Obr. 7.4 Doba strávená v klidové pozici, nezatížený stav

Další graf zobrazuje chod ramene z polohy -90° a následující tři fáze stání. Z grafu vyplývá, že zařízení s výše uvedeným momentem setrvačnosti nevykonává při přechodu z pohybu do klidu kmitavý pohyb a je po dobu definovanou v observačním programu v nehybné pozici. Celý graf je k nahlédnutí v příloze č. 8.

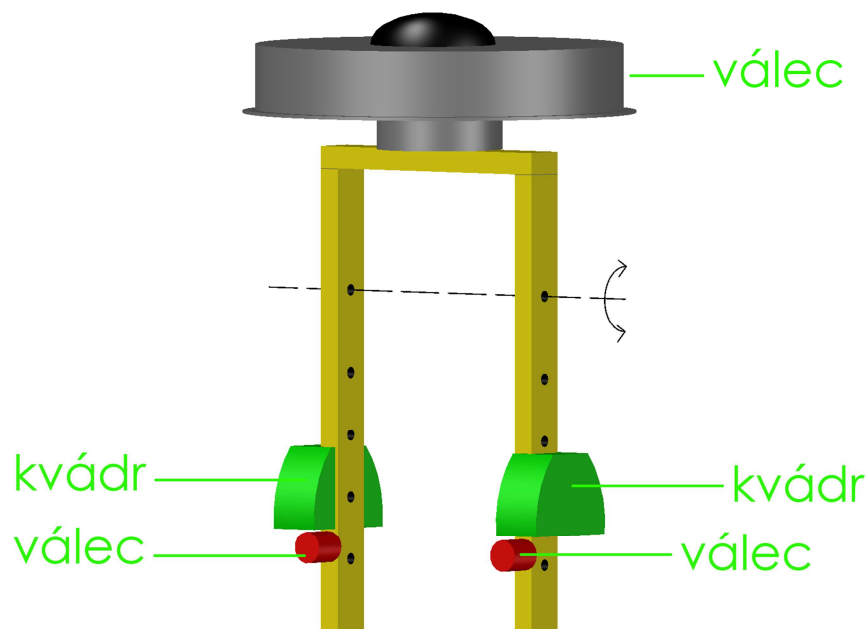


Graf 7.1 Pohyb polohovacího ramene v nezatíženém stavu

7.2 Zatížený stav

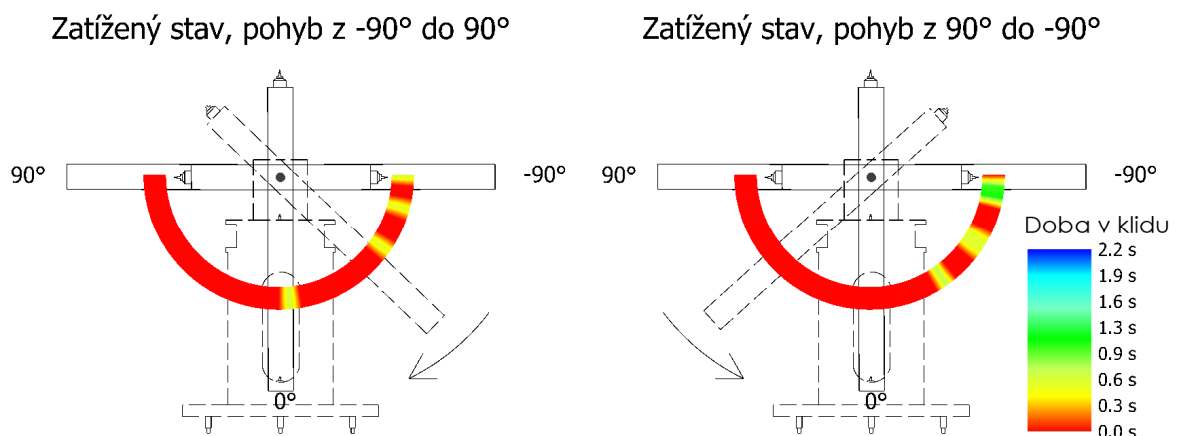
Při druhém měření byla na nosník polohovacího zařízení umístěna zátěž v podobě antény Leica AT504 a závaží, kterým bylo rameno vyváženo. Hmotnost ramene tak vzrostla o 8 kg oproti nezatíženému stavu.

Obdobně jako při stavu nezatíženém byl vypočítán moment setrvačnosti ramene osazeného anténou a závažím. Celek byl opět rozdělen na jednotlivá tělesa, jejichž moment setrvačnosti byl určen vůči ose procházející těžištěm, která je rovnoběžná s osou otáčení. Na obr. 7.4 je zobrazeno, jakými tělesy byly nahrazeny jednotlivé části celku, který vykonává otáčivý pohyb. Moment setrvačnosti hliníkového nosníku je stejný jako v případě nezatíženého stavu, proto již nebyl znovu počítán. Výpočet je doložen v příloze č. 7. Při celkové hmotnosti ramene 10,8 kg je moment setrvačnosti $0,341 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.



Obr. 7.5 Rozdělení ramene pro výpočet momentu setrvačnosti, zatížený stav

Vyhodnocení měřených dat proběhlo stejně jako při nezatíženém stavu. Tabulka na následující straně zobrazuje všechny pozice s krokem 5° , kdy mělo být zařízení v klidu.



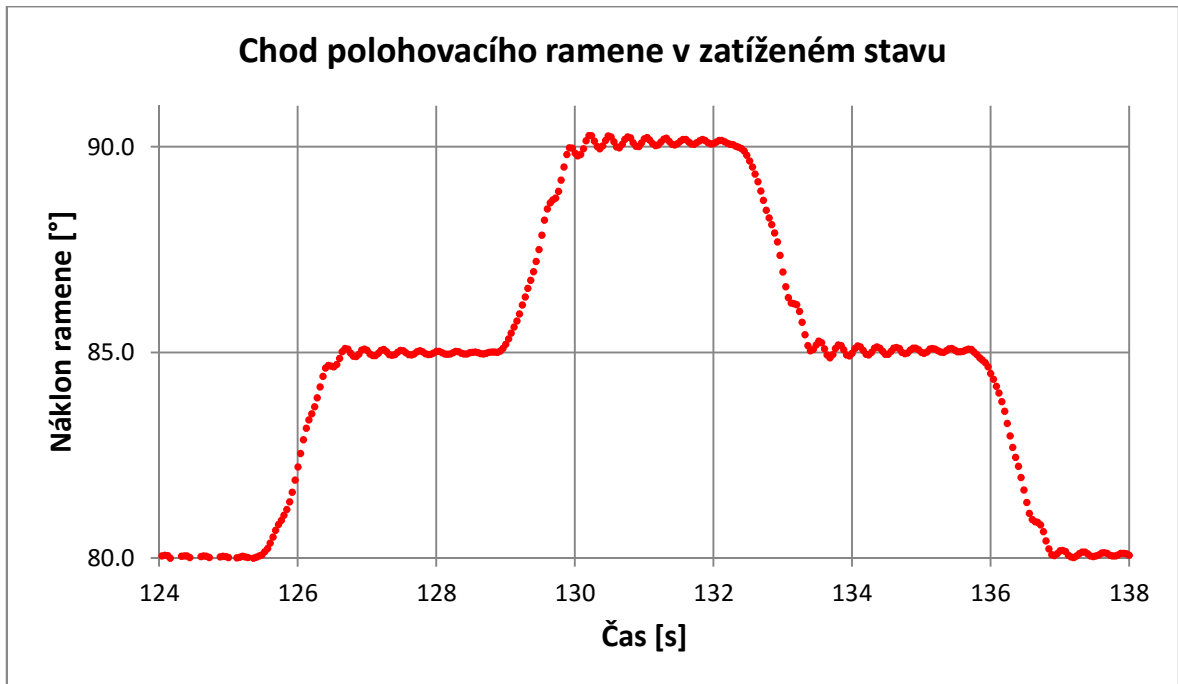
Obr. 7.6 Doba strávená v klidové pozici, zatížený stav

Již na první pohled je zřejmé, že polohovací rameno vlivem působení momentu setrvačnosti při přechodu z pohybu do klidu vykonávalo kmitavý pohyb, který znemožnil ustálení zařízení v době 2 sekund, vyjma několika poloh, kde se ke konci doby stání zařízení na krátkou dobu ustálilo. Rovněž byl určen rozdíl nájezdu do jednotlivých poloh. Náklon byl určen jako hodnota, kolem které rameno vykonávalo kmitavý pohyb. Žádný z rozdílů nájezdu nepřesáhl hodnotu mezního rozdílu. Červeně označený sloupec zobrazuje porovnání absolutních hodnot vystavené polohy mezi nezatíženým a zatíženým stavem. Navzdory značné zátěži (téměř 4× vyšší než v předchozím stavu) dokáže motor M2 vystavit zařízení do požadované pozice s odpovídající přesností, což dokládají téměř všechny nulové hodnoty rozdílů.

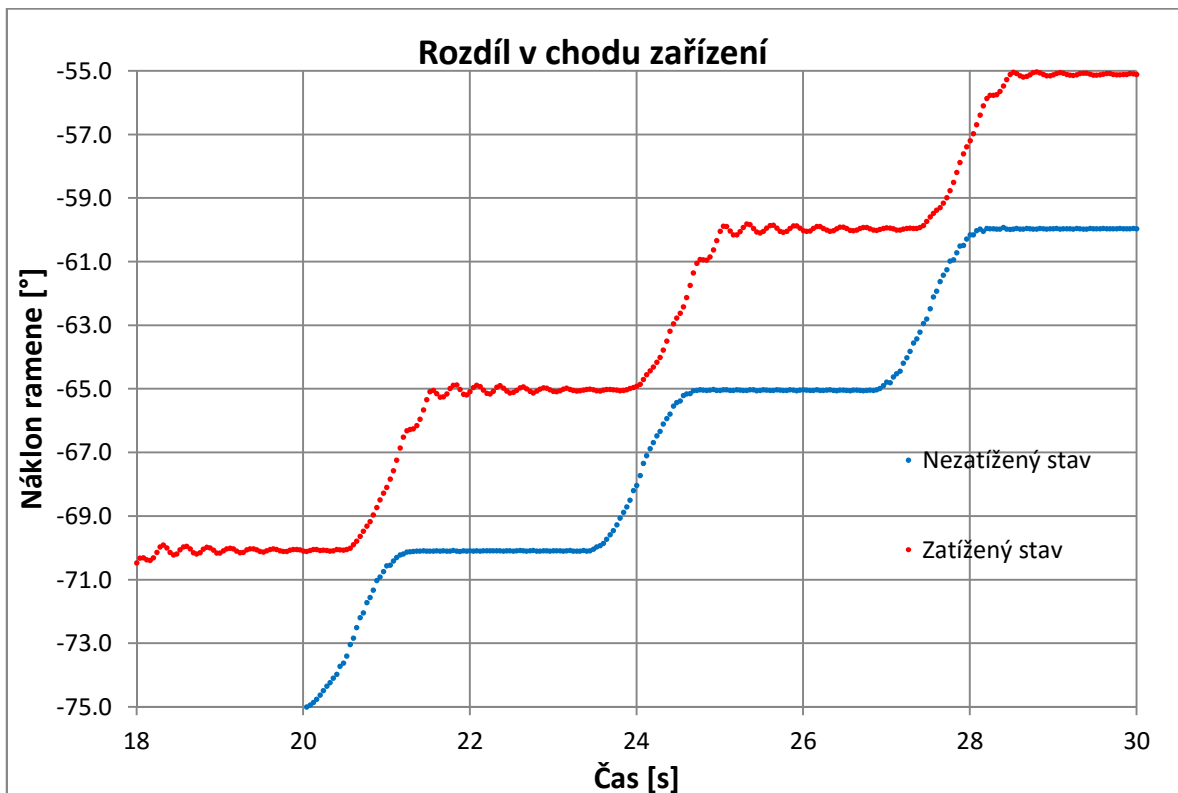
Tab. 7.2 Vyhodnocení pohybu s přidanou zátěží

0° -> - 90° -> + 90°			Nezatížený -	+ 90° -> - 90° -> 0°			Nezatížený -	Rozdíl nájezdu TAM-ZPĚT
Náklon	Počet pozic	Doba stání	zatížený	Náklon	Počet pozic	Doba stání	zatížený	
[°]		[s]	[°]	[°]		[s]	[°]	[°]
0.0	- Výchozí pozice		0.0	0.0	- Konečná pozice		0.0	0.0
-89.9	17	0.7	0.0	-90.1	0	0.0	0.0	0.2
-85.0	0	0.0	0.0	-85.2	26	1.0	0.0	0.1
-80.1	0	0.0	0.0	-80.2	28	1.1	0.0	0.1
-75.1	15	0.6	0.0	-75.2	0	0.0	0.0	0.1
-70.1	0	0.0	0.0	-70.2	0	0.0	0.0	0.1
-65.0	0	0.0	0.0	-65.1	0	0.0	0.0	0.1
-60.0	0	0.0	0.0	-60.0	15	0.6	0.0	0.1
-55.1	15	0.6	0.0	-55.1	16	0.6	0.0	0.0
-50.0	0	0.0	0.0	-50.1	0	0.0	0.0	0.0
-45.0	0	0.0	0.0	-45.0	0	0.0	0.0	0.1
-40.0	0	0.0	0.0	-40.0	0	0.0	0.0	0.0
-35.0	0	0.0	0.0	-34.9	21	0.8	0.0	0.0
-30.1	0	0.0	0.0	-30.1	0	0.0	0.0	0.0
-25.0	0	0.0	0.0	-25.0	0	0.0	0.0	0.0
-20.0	0	0.0	0.0	-20.0	0	0.0	0.0	0.0
-15.0	0	0.0	0.0	-14.9	0	0.0	0.0	0.0
-10.0	0	0.0	0.0	-10.0	0	0.0	0.0	-0.1
-5.1	18	0.7	0.0	-5.0	0	0.0	0.0	-0.1
0.0	0	0.0	0.0	0.1	0	0.0	0.0	-0.1
5.0	0	0.0	0.0	5.1	0	0.0	0.0	-0.1
10.0	0	0.0	0.0	10.1	0	0.0	0.0	-0.1
14.9	0	0.0	0.0	15.0	0	0.0	0.0	-0.1
19.9	0	0.0	-0.1	20.0	0	0.0	-0.1	-0.1
25.0	0	0.0	0.0	25.0	0	0.0	0.0	-0.1
30.0	0	0.0	0.0	30.1	0	0.0	0.0	-0.1
34.9	0	0.0	0.0	35.0	0	0.0	0.0	-0.1
39.9	0	0.0	0.0	40.0	0	0.0	0.0	-0.1
45.0	0	0.0	0.0	45.1	0	0.0	0.0	-0.1
50.0	0	0.0	0.0	50.1	0	0.0	0.0	-0.1
55.0	0	0.0	0.0	55.1	0	0.0	0.0	-0.1
59.9	0	0.0	0.0	60.0	0	0.0	0.0	-0.1
65.0	0	0.0	-0.1	65.1	0	0.0	0.0	-0.1
70.0	0	0.0	-0.1	70.1	0	0.0	0.0	-0.1
75.0	0	0.0	-0.1	75.1	0	0.0	0.0	-0.1
80.0	0	0.0	0.0	80.1	0	0.0	0.0	-0.1
85.0	0	0.0	0.0	85.0	0	0.0	0.0	0.0
90.1	0	0.0	0.0	→ ↑				

Následující grafy zobrazují chod zatíženého ramene a porovnání obou měřených stavů v jednom grafu. Z grafu je zřetelné, jak zařízení zrychluje, zpomaluje a následně buďto přejde do klidové polohy nebo tlumeně kmitá.



Graf 7.2 Pohyb polohovacího ramene při zatíženém stavu



Graf 7.3 Porovnání průběhu obou stavů

8 ZÁVĚR

Úvodní část diplomové práce se věnuje problematice kalibrací GNSS antén a popisuje metody, jimiž je kalibrace prováděna. Rovněž jsou v této části uvedeny organizace, které se v současnosti zabývají kalibrací GNSS antén a publikují své výsledky.

Následující kapitola je věnována minulosti a současnosti provádění anténní kalibrace na Ústavu geodézie Vysokého učení technického v Brně. Ústav geodézie se kalibrací GNSS antén věnuje již od minulého desetiletí a v současnosti pracuje na vytvoření stabilní základny pro absolutní kalibraci. V této kapitole je popsáno vyvíjené polohovací zařízení, jehož testování je předmětem této diplomové práce.

Další kapitola popisuje problém chodu manipulátoru v závislosti na jeho zatížení. Blíže je zde popsáno, jaké fyzikální vlivy působí při otáčivém pohybu. Tato kapitola rovněž nastiňuje, jakým způsobem bude provedeno ověřovací měření a metodiku jeho zpracování.

Jedna ze stěžejních částí této práce se věnuje vývoji softwarových prostředků pro zpracování fotogrammetrického měření, kterým se vyhodnocuje chod polohovacího zařízení. V programovacím jazyku C++ byly vytvořeny dva programy pro vyhodnocování snímkových souřadnic měřické značky. První program umožňuje uživateli definici vlastní značky, která je předmětem detekce, druhý program pracuje s tzv. Houghovou transformací, která umožňuje detekci kružnic. Oba tyto programy mohou najít své uplatnění v budoucnu i v dalších činnostech. Stejně tak jejich další vývoj může probíhat dál a díky komentářům a poznámkám ve zdrojovém kódu si je může uživatel upravit pro své konkrétní potřeby, bez nutnosti hluboké znalosti daných vztahů.

Následující kapitoly se již věnují vlastnímu testovacímu měření, které má za cíl ověřit chování polohovacího zařízení v závislosti na zatížení nosníku, ke kterému se upevňuje kalibrovaná anténa. Bylo provedeno dvojí měření. Při stavu, kdy nosník nebyl zatížen a při stavu, kdy na rameno bylo umístěno další závaží o hmotnosti 8 kg. Měření bylo vyhodnoceno s využitím vytvořeného programového vybavení a jednoznačným výsledkem testu je nutnost prodloužení čekací doby, během které se musí pohyb nosníku s anténou ustálit. Pokud by k ustálení nedošlo, anténa by během kalibračního měření měřila v okamžiku, ve kterém by se z důvodu kmitavého pohybu způsobeného momentem setrvačnosti pohybovala, a tím by vnesla do kalibračního měření hrubé chyby. Z průběhu vyhodnoceného chodu lze vyvodit závěr, že pro dosažení klidové pozice je potřeba prodloužit dobu stání o jednu sekundu. Dobu stání je možné prodloužit v observačním programu, který ovládá pohyb polohovacího zařízení. Dalším závěrem je, že zařízení je schopno vystavovat anténu opakovaně do stejných poloh nezávisle na velikosti hmotnosti antény, která je k němu upevněna.

9 SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] BILICH, Andria a Gerald L. MADER. *GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey* [online]. ION GNSS 2010, Portland, Oregon, Usa, 2010 . Dostupné z: http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Bilich-and-Mader_ION2010.pdf
- [2] WÜBBENA, Gerhard, Martin SCHMITZ, Falko MENGE, Volker BÖDER a Günter SEEBER. *Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time* [online]. ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, USA, 2000. Dostupné z: http://geopp.de/download/Ion2000_presented_at.pdf
- [3] MADER, Gerald. R. *GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey* [online]. 1999. Dostupné z: <ftp://cors.ngs.noaa.gov/pub/abilich/calibPapers/Mader1999.pdf>
- [4] SCHMID, Ralf, MADER, Gerry, HERRING, Tom. From relative to absolute antenna phase center corrections. In: *Celebrating a Decade of the International GPS Service, Workshop and Symposium 2004*. 2005. p. 209-221.
- [5] SCHMITZ, Martin, WÜBBENA, Gerhard, PROPP, Michael. Absolute robot-based GNSS antenna calibration—features and findings. In: *PowerPoint presentation International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications*. 2008.
- [6] WÜBBENA, Gerhard, Falko MENGE, Martin SCHMITZ, Günter SEEBER a Christof VÖLKSEN. *A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations* [online]. ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1996. Dostupné z: <http://www.geopp.de/pdf/ion96.pdf>
- [7] *Geo++* [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.geopp.com/>
- [8] HU, Zhigang, Qile ZHAO, Guo CHEN, Guangxing WANG, Zhiqiang DAI a Tao LI. *First Results of Field Absolute Calibration of the GPS Receiver Antenna at Wuhan University* [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/28717/htm>
- [9] ZEIMETZ, Philipp a Heiner KUHLMANN. *On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber* [online]. FIG Working Week, Stockholm, Sweden, 2008. Dostupné z: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2008/papers/ts05g/ts05g_01_zeimetz_kuhlmann_2901.pdf
- [10] ZEIMETZ, Philipp a Heiner KUHLMANN. *Validation of the Laboratory Calibration of Geodetic Antennas based on GPS Measurements* [online]. International Federation of Surveyors Article of the Month – February 2011, 2011. Dostupné z: http://www.fig.net/resources/monthly_articles/2011/february_2011/february_2011_zeimetz_kuhlmann.pdf

- [11] BILICH, Andria, Martin SCHMITZ, Barbara GÖRRES, Philipp ZEIMETZ, Gerald MADER a Gerhard WÜBBENA. *Three-Method Absolute Antenna Calibration Comparison* [online]. IGS Workshop 2012, University of Warmia and Mazury (UWM), July 23-27, 2012, Olsztyn, Poland., 2012. Dostupné z: <https://igscb.jpl.nasa.gov/assets/pdf/Poland%202012%20-%20P09%20Bilich%20PR59.pdf>
- [12] *Trimble - Transforming the Way the World Works* [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.trimble.com/>
- [13] Antenna Calibrations. *National Geodetic Survey* [online]. National Geodetic Survey, 2016. Dostupné z: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>
- [14] ROTHACHER, M. a R. SCHMID. *ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4*. Mnichov. Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, TU München. Dostupné také z: <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex14.txt>
- [15] NOHEJL, M. *Relativní kalibrace GPS antén*. Brno, 2006. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Prof. Ing. Otakar Švábenský, CSc.
- [16] KRATOCHVÍL, Radim, Jiří BUREŠ a Otakar ŠVÁBENSKÝ. *Kalibrace GPS antén na Ústavu geodézie VUT v Brně*. Brno: ECON Publishing, 2005. ISBN 80-86433-32-3. Dostupné také z: http://tubo.fce.vutbr.cz/new/souboryPublikace/KR_SV_BU_semGPS2005.pdf
- [17] BRÁTOVÁ, Kateřina. *Geometrické parametry zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.
- [18] HYNČICOVÁ, Tereza. *Plánování a analýza pohybu zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.
- [19] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [20] ZAJÍC, Jan. *Momenty setrvačnosti geometricky pravidelných homogenních těles*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta Chemicko-technologická, Ústav aplikované fyziky a matematiky, 2010. Dostupné také z: http://kf.upce.cz/dfjp/Momenty_setrvačnosti.pdf
- [21] KERNIGHAN, Brian W. a Dennis M. RITCHIE. *Programovací jazyk C*. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 80-251-0897-X.
- [22] *Cplusplus.com - The C++ Resources Network* [online]. ©2000-2016. Dostupné z: <http://www.cplusplus.com/>

- [23] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C. 4.*, přeprac. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004. ISBN 80-723-2220-6.
- [24] *ImageMagick: Convert, Edit, Or Compose Bitmap Images* [online]. ImageMagick Studio LLC, ©1999-2016. Dostupné z: <http://www.imagemagick.org/>
- [25] *OpenCV / OpenCV* [online]. ©2016. Dostupné z: <http://www.opencv.org/>
- [26] Hough transform. *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2016. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform
- [27] WALEK, Petr, Martin LAMOŠ a Jiří JAN. *Analýza biomedicínských obrazů: Počítačová cvičení*. První. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství, 2013, 138 s. ISBN 978-80-214-4792-9. Dostupné také z: <http://www.dbme.feec.vutbr.cz/sites/default/files/news/fabo.pdf>
- [28] ŠVÁBENSKÝ, Otakar. *Stavební a průmyslová geodézie II*. Přednáška. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav geodézie, letní semestr 2016.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 2.1 Schématické zobrazení hodnot zjišťovaných při absolutní kalibraci (s využitím [2])	12
Obr. 2.2 Schéma staničního uspořádání relativní kalibrace.....	13
Obr. 2.3 Polohovací zařízení využívané Geo++ v průběhu vývoje [7]	15
Obr. 2.4 Základna pro absolutní kalibraci v NGS [1].....	15
Obr. 2.5 Absolutní kalibrace na univerzitě ve Wu-chanu [8]	16
Obr. 2.6 Anechoická komora pro kalibraci GNSS antén na univerzitě v Bonnu [10].....	17
Obr. 3.1 Zařízení StAnCa při testovacím měření 29. 4. 2016	22
Obr. 4.1 Ukázka snímku se značkou, jejíž poloha je předmětem vyhodnocení	23
Obr. 4.2 Schéma pohybu hmotného bodu při kruhovém pohybu.....	25
Obr. 4.3 Moment setrvačnosti vůči rovnoběžné ose neprocházející těžištěm	26
Obr. 5.1 Schéma zpracování programu v C/C++	28
Obr. 5.2 Průběh zpracování hledané značky.....	30
Obr. 5.3 Průchod masky snímkem.....	31
Obr. 5.4 Postup zpracování snímku	32
Obr. 5.5 Výchozí snímek s hledanou oblastí	33
Obr. 5.6 Část snímku s nalezenou oblastí.....	33
Obr. 5.7 Parametrické vyjádření kružnice	35
Obr. 5.8 Princip Houghovy transformace při známém poloměru.....	35
Obr. 5.9 Kalibrační pole se znázorněním orientace snímkového a objektového souřadnicového systému	37
Obr. 6.1 Pohyb zařízení při měření.....	41
Obr. 6.2 Průběh měření (autor Radim Kratochvíl)	41
Tab. 6.1 Hmotnosti použitých závaží a antén.....	42
Obr. 6.3 Vážení antény Leica AT504 (autor Radim Kratochvíl)	42
Obr. 7.1 Konverze videosouboru na jednotlivé snímky v programu ffmpeg	43
Obr. 7.2 Vyrovnání MNČ v programu Scilab	45
Obr. 7.3 Rozdělení ramene pro výpočet momentu setrvačnosti, nezatížený stav	46
Tab. 7.1 Vyhodnocení pohybu bez přidané zátěže	47
Obr. 7.4 Doba strávená v klidové pozici, nezatížený stav	48
Graf 7.1 Pohyb polohovacího ramene v nezatíženém stavu.....	48
Obr. 7.5 Rozdělení ramene pro výpočet momentu setrvačnosti, zatížený stav	49
Obr. 7.6 Doba strávená v klidové pozici, zatížený stav.....	49
Tab. 7.2 Vyhodnocení pohybu s přidanou zátěží.....	50
Graf 7.2 Pohyb polohovacího ramene při zatíženém stavu	51
Graf 7.3 Porovnání průběhu obou stavů	51

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

GNSS	Globální navigační satelitní systémy
NAVSTAR GPS	Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System
GLONASS	Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Systéma
ARP.....	Antenna Reference Point
APC.....	Antenna Phase Center
PCO.....	Phase Center Offset / mean phase center
PCV(s)	Phase Center Variation(s)
ANTINFO.....	Antenna Information Format
ANTEX.....	The Antenna Exchange Format

12 SEZNAM PŘÍLOH

Všechny zde uvedené přílohy jsou přiloženy v plném rozsahu na CD v elektronické podobě.

1. Vytvořené programy
2. Snímkové souřadnice
3. Souřadnice identických bodů
4. Objektové souřadnice
5. Transformační klíč a protokol projektivní transformace
6. Proložení kružnice a výpočet klidových pozic
7. Výpočet momentu setrvačnosti
8. Graf chodu