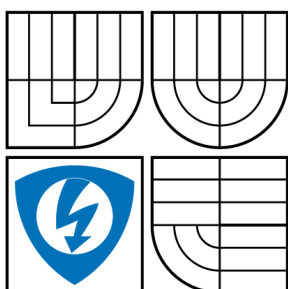


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# GPS NAVIGACE PRO VENKOVNÍ PRUŽKUMNÝ ROBOT

GPS NAVIGATION FOR OUTDOOR ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

IVO MACEČEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2008

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Maceček Ivo  
**Ročník:** 3

**ID:** 78527  
**Akademický rok:** 2007/08

**NÁZEV TÉMATU:**

## GPS navigace pro venkovní pruzkumný robot

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě znalostí získaných při práci na semestrálním projektu navrhnete a prakticky realizujete algoritmus pro pohyb mobilního robotu podle zadaných GPS souřadnic.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[www.robotika.cz](http://www.robotika.cz)

**Termín zadání:** 1.2.2008

**Termín odevzdání:** 2.6.2008

**Vedoucí projektu:** doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.  
*předseda oborové rady*



### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **ANOTACE**

Získání polohy objektu užitím systému diferenční GPS (DGPS). Popis principu metody DGPS, která je jednou z možností pro zpřesnění GPS. Teorie možných způsobů návrhů a detailní popis realizace zvoleného řešení. Způsoby určování orientace objektu v prostoru. Programové řešení navigačního algoritmu pro venkovního robota.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

GPS přijímač, diferenční GPS, navigace, robot

## **ANNOTATION**

Differential GPS (DGPS) is system for getting position of an object. Describe principles DGPS, which is one of options for improvement GPS. It's mentioning theory about several system design methods and detailed description of chosen solution. There are proposed some types of getting object bearing. These related topics are used in navigation software for outdoor robot.

## **KEY WORDS**

GPS receiver, differential GPS, navigation, robot

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MACEČEK, IVO GPS navigace pro venkovní průzkumný robot. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "GPS navigace pro venkovní průzkumný robot" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Luďkovi Žaludovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

V Brně dne :

Podpis:

## **OBSAH**

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2. DIFERENČNÍ GPS .....</b>	<b>9</b>
2.1 Princip diferenční GPS .....	9
2.2 Referenční stanice pro DGPS .....	10
2.2.1 Stanice pro korekce zdánlivé vzdálenosti .....	11
2.2.2 Stanice pro korekce souřadnic .....	12
2.3 Korekce a přesnost DGPS.....	12
<b>3. POROVNÁNÍ GPS PŘIJÍMAČŮ.....</b>	<b>14</b>
3.1 Podmínky a přístroje pro měření .....	14
3.2 Vyhodnocení měření pro navilock NL-303P .....	15
<b>4. REALIZACE REFERENČNÍ STANICE .....</b>	<b>18</b>
4.1 GPS přijímač stanice .....	19
4.2 Vysílač pro bezdrátovou komunikaci .....	19
4.3 Zdroj napájení pro referenční stanici.....	20
<b>5. ŘÍDÍCÍ SOFTWARE REFERENČNÍ STANICE .....</b>	<b>22</b>
5.1 Formáty uložených GPS dat .....	22
5.2 Dekódování zprávy z GPS přijímače .....	24
5.3 Zadání správné polohy referenční stanice .....	26
5.4 Generování korekcí pro DGPS.....	28
5.5 Zpřesnění souřadnic užitím korekcí .....	30
<b>6. MĚŘENÍ SOUŘADNIC POLOHY POMOCÍ SYSTÉMU DGPS.....</b>	<b>32</b>
6.1 Realizace a prostředky měření .....	32
6.2 Vyhodnocení výsledků měření.....	35
<b>7. NAVIGACE POMOCÍ GPS SOUŘADNIC.....</b>	<b>40</b>
7.1 Zadání souřadnic dráhy pro navigaci .....	40
7.2 Určení orientace objektu v prostoru .....	42
7.3 Popis algoritmu navigace.....	44
7.4 Použití navigačního algoritmu .....	47
<b>8. ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>

<b>9. POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>51</b>
<b>10. PŘÍLOHY .....</b>	<b>52</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 : Realizace principu diferenční GPS při navigaci vozidel.....	9
Obr. 2.2 : Diferenční GPS při použití doporučení RTCM SC-104 .....	10
Obr. 3.1 : Fotografie GPS přijímače Navilock NL-303P.....	15
Obr. 3.2 : Grafické zobrazení odchylek souřadnic přijímače Navilock NL-303P ....	16
Obr. 3.3 : Graf procentní četnosti výskytu měřených zeměpisných délek.....	16
Obr. 3.4 : Graf procentní četnosti výskytu měřených zeměpisných šířek .....	17
Obr. 4.1 : Blokové schéma referenční stanice pro DGPS .....	18
Obr. 4.2 : Fotografie bezdrátového modulu vysílače/přijímače ELPRO 805U .....	20
Obr. 4.3 : Fotografie baterie použité pro napájení zařízení referenční stanice .....	21
Obr. 5.1 : Interpretace přijatých dat od GPS přijímače bez signálu a se signálem....	25
Obr. 5.2 : Blok pro zadávání a editaci přesných souřadnic referenční stanice.....	28
Obr. 5.3 : Interpretace generovaných korekcí při vypnutém a zapnutém DGPS .....	30
Obr. 6.1 : Blokové schéma realizovaného systému DGPS .....	32
Obr. 6.2 : Blok programu umožňující konfiguraci DPGS a interpretaci dat.....	33
Obr. 6.3 : Vývojový diagram jednoho cyklu zpracování dat .....	34
Obr. 6.4 : Grafické zobrazení odchylek souřadnic GPS přijímače.....	35
Obr. 6.5 : Grafické zobrazení odchylek souřadnic při užití navrženého DGPS.....	36
Obr. 6.6 : Graf rozložení četností zeměpisných délek bez korekcí .....	37
Obr. 6.7 : Graf rozložení četností zeměpisných délek při DGPS .....	38
Obr. 6.8 : Graf rozložení četností zeměpisných šířek bez korekcí .....	39
Obr. 6.9 : Graf rozložení četností zeměpisných šířek při DGPS.....	39
Obr. 7.1 : Blok programu pro zadávání požadované dráhy objektu .....	40
Obr. 7.2 : Příklad zadané dráhy při spuštěné navigaci.....	41
Obr. 7.3 : Simulovaná orientace objektu v prostoru .....	43
Obr. 7.4 : Programové vyhodnocení simulované situace.....	43



Obr. 7.5 : Vývojový diagram jednoho cyklu navigace .....	44
Obr. 7.6 : Ovládání zásobníku zadaných cílů.....	46
Obr. 7.7 : Náhled programu na začátku navigace.....	47
Obr. 7.8 : Navigační parametry v kroku 1.....	48
Obr. 7.9 : Navigační parametry v kroku 2.....	48
Obr. 7.10 : Náhled programu po ukončení navigace .....	49

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 3.1 : Charakteristické parametry GPS přijímače Navilock NL-303P .....	14
Tab. 4.1 : Charakteristické parametry bezdrátového modulu ELPRO 805U .....	19

## 1. ÚVOD

Jedním z moderních postupů metod navigace objektů ve venkovním prostředí je užití GPS. První část je věnována základní charakteristice systému pro zpřesnění GPS, který se nazývá diferenční GPS. Teoretickému seznámení s principem práce a možnými způsoby realizace.

Dle zmíněné teorie systému DGPS je následně konzultováno nejvhodnější řešení pro navigaci venkovních robotů. Celá koncepce referenční stanice je detailně popsána a zahrnuje v sobě návrh struktury, volbu fyzických prostředků, způsob komunikace a programové vybavení.

Cílem je fyzicky sestavit navrženou strukturu DGPS a následně realizovat program, který umožňuje uživateli využívat tohoto systému v plném rozsahu pro navigaci objektů (robotů). Předpokladem je zpřesnění určené polohy získané pomocí přijímače GPS. Jeho volba tedy zásadně ovlivňuje dosažený výsledek, a proto je tento krok podmíněn srovnávacím měřením mezi několika dostupnými typy. Po realizaci systému je následně ověřeno měřením souřadnic polohy pomocí GPS a DGPS zpřesnění dle teoretických podkladů.

Ze získaných dat o poloze objektu vychází poslední kapitola práce, která se zabývá navigačním algoritmem. Tato část je věnována konzultaci možných způsobů určení orientace objektu v prostoru, zpracování zadané dráhy a samotnému vyhodnocení navigace na základě vstupů programu. Pro zajištění dostupnosti dat se předpokládá schéma, kde je používán systém DGPS jako nástavba GPS. Tedy při nedostupnosti zpřesněných souřadnic se používají alespoň základní.

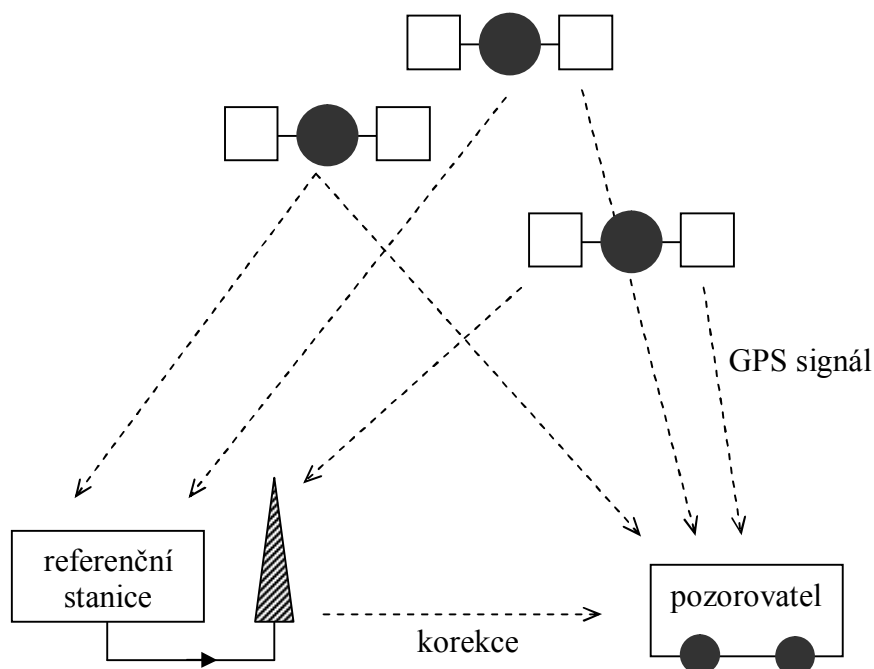
Realizovaný program, včetně celého systému DGPS pro určování polohy objektů, je určen jako vyšší řídicí blok v projektu autonomního robota. Některé informace jsou získávány od ostatních subsystémů (senzorický – elektronický kompas). Stejně tak slouží výstupy programu pro ovládání bloků jiných (mikroprocesorové algoritmy řízení). Další spolupráce například s kamerovým systémem celkovou funkčnost navigace nadále zvyšují.

## 2. DIFERENČNÍ GPS

Diferenční GPS je měření pomocí systému GPS (Global Positioning System), které vede ke zpřesnění určené pozice pozorovatele. Samotné použití vyžaduje mnohem složitější měřicí aparaturu než při užití jediného přijímače pro signál přijímaný z družic. Přes tuto skutečnost se jedná o kvalitní a často využívanou metodu pro vylepšení měření polohy.

### 2.1 PRINCIP DIFERENČNÍ GPS

Princip diferenční GPS vychází z vyhodnocování polohy neznámého místa, které představuje naváděný objekt, a referenční pozice. Realizace DGPS v praxi je zakreslena na obrázku 2.1.

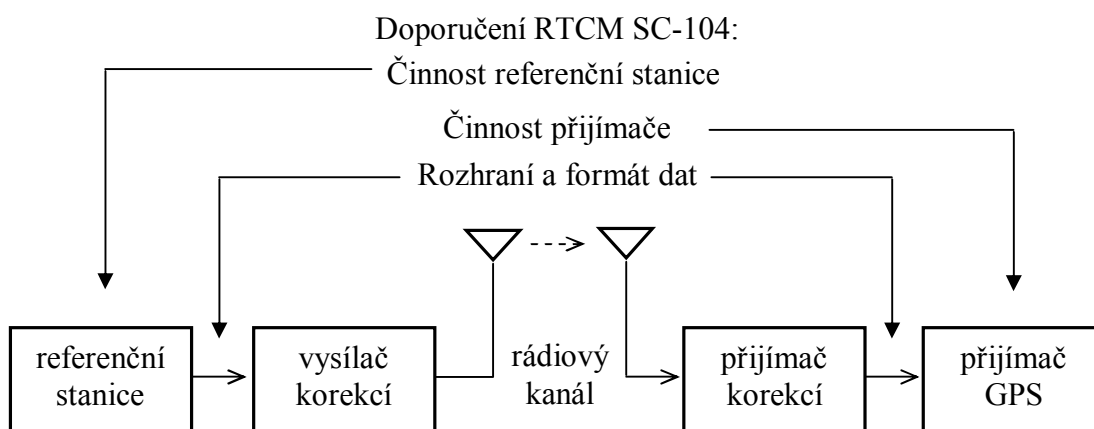


**Obr. 2.1 : Realizace principu diferenční GPS při navigaci vozidel**

Při měření nepříliš vzdálenými přijímači jsou výsledky zatíženy podobnou chybou. Nachází se totiž ve srovnatelných podmínkách měření a působí na ně stejné

nebo podobné rušivé vlivy. Jeden z těchto přijímačů je součástí referenční stanice s přesně stanovenou polohou. Z naměřených dat od družic a známé polohy lze poté vypočítat hodnotu korekce polohy. Popis referenční stanice je v kapitole 2.2.

Korekce je poté nutno přenést z referenční stanice k navigovanému pozorovateli. Ten má vlastní přijímač GPS signálu, který určuje jeho pozici na základě viditelných družic. K jejímu zpřesnění se použije přijatá korekce. Vzhledem k předpokladu působení stejné chyby u pozorovatele i referenční stanice dojde užitím korekce k jejich potlačení na straně navigovaného objektu. Použití a přenos korekcí je možný jen za určitých předpokladů, které jsou podrobně zmíněny v kapitole 2.3. Pro potřeby zajištění správné funkčnosti diferenčních systémů existuje doporučení RTCM SC-104. Zde je definován formát zprávy s korekcí, požadavky na referenční stanice i komunikační kanál. Na obrázku 2.2 je diferenční systém sestavený podle tohoto doporučení.



**Obr. 2.2 : Diferenční GPS při použití doporučení RTCM SC-104**

## 2.2 REFERENČNÍ STANICE PRO DGPS

Referenční stanice pro DGPS se liší podle zvolené realizace systému. Nezávisle na této volbě však vždy potřebuje pro určení korekcí znát přesnou geocentrickou polohu. V systému GPS se pro určení polohy užívá také časové informace. Z tohoto důvodu je nejdůležitější částí referenční stanice časová základna.

### 2.2.1 Stanice pro korekce zdánlivé vzdálenosti

Při užití těchto korekcí jsou kladeny vysoké nároky na časovou základnu, která může využívat několika principů. Ideálním řešením je referenční stanice s časovým etalonem. Pokud nyní zná stanice své přesné souřadnice i čas, je schopna přesně určit dobu šíření signálu. Na základě těchto výsledků odhadne skutečnou vzdálenost mezi družicí a stanicí. Výsledná korekce se poté vypočítá jako rozdíl měřené zdánlivé vzdálenosti k družici a odhadu skutečné vzdálenosti. Nevýhodou těchto stanic je použitelnost korekce pouze v malé časové oblasti od vygenerování korekce. Pro její extrapolaci na delší časový úsek jsou proto obvykle vypočteny také derivace korekcí.

Referenční stanice s časovým etalonem je finančně nákladná, proto se častěji užívá jako časová základna nestabilní nebo stabilní oscilátor. Podmínkou pro použití stanice s nestabilním oscilátorem je přítomnost mnohokanálového přijímače GPS. Kdyby se neměřily všechny zdánlivé vzdálenosti k družicím ve stejném čase, došlo by ke vzniku různě velkých chyb měření. Takto použitá sada korekcí pro úpravu pozice pozorovatele naopak zhorší dosažené výsledky. Je tedy nutné, aby přijímač měřil ke všem družicím zároveň a v případě poruchy jediné korekce se nepoužila celá jejich sada. Příkladem je chyba v přenosu mezi referenční stanicí a pozorovatelem. Zajistit použití vždy celé a aktuální sady korekcí je poměrně složitý požadavek. K jeho odstranění se na realizaci časové základny používá stabilní oscilátor. Taková stanice se poté chová stejně jako by byl použit časový etalon.

Kromě časové základny obsahuje referenční stanice i další funkční bloky. Pro určení korekce zdánlivých vzdáleností je nutný přijímač GPS, který na svůj výstup zasílá data s jednotlivými vzdálenostmi k družicím. Výpočetní jednotka vyhodnotí data z přijímače a časové základny. Získáváme korekce polohy a případně i jejich derivace. Ideálním řešením výpočetní jednotky je mikroprocesor, který je schopen zajistit matematické i řídicí funkce pro celou referenční stanicí. Posledním prvkem je vstupně/výstupní rozhraní, které zajišťuje komunikaci s pozorovatelem.

### 2.2.2 Stanice pro korekce souřadnic

Referenční stanice pro korekce polohy jsou výrazně jednodušší a méně nákladné než stanice popsané v kapitole 2.2.1. Pro určení korekce je potřeba znát přesnou polohu referenční stanice a měřenou polohu přijímačem. Přijímače GPS s výstupem zeměpisných souřadnic jsou obvyklým zařízením. Jejich pořizovací cena je nižší vzhledem k přijímačům s výstupem zdánlivých vzdáleností. Určenou pozici zatěžují chybou měření, která je definována v manuálu přístroje a liší se volbou typu přístroje. Výpočetní jednotka a vstupně/výstupní obvody jsou pro všechny stanice prakticky totožné a odpovídají popisu z kapitoly 2.2.1

Při tomto principu stanice odpadá potřeba realizovat časovou základnu. Přijímač má pro určení souřadnic polohy vlastní generátor a výpočet korekcí nevyžaduje časový údaj. Pro rozlišení stárí korekcí je možné použít informace z komunikační věty GPRMC přijímače, která obsahuje čas příjmu polohy.

Výhodou tohoto typu stanic je jednoduchá konstrukce a nízká pořizovací cena dílčích bloků. Nevýhoda spočívá v nižším zpřesnění korekcemi. Ty nemají tak vysokou přesnost jako korekce zdánlivých vzdáleností.

## 2.3 KOREKCE A PŘESNOST DGPS

Korekce jsou data, která slouží ke zpřesnění měření. V případě GPS se jedná o zpřesnění údajů souřadnic polohy nebo zdánlivých vzdáleností družic. Podle doporučení RTCM SC-104 musí mít generovaná korekce vždy takové znaménko, aby je pozorovatel přičítal ke změřené hodnotě.

Přenos korekcí se provádí přes komunikační kanál mezi referenční stanicí a objektem jehož polohu korigujeme. Komunikačním kanálem se rozumí bezdrátový radiový přenos, který může být volně realizován na frekvencích 400 MHz nebo 800 MHz. Tyto frekvence jsou přístupné pro veřejné použití bez nutnosti zajistit oprávnění k vysílání. Pro zpřesnění zdánlivých vzdáleností se jedná o sadu korekcí pro měření k jednotlivým družicím. U úprav souřadnic polohy vysílána data obsahují korekce pro zeměpisnou šířku, délku a výšku. V obou případech je pak k těmto informacím doplněn záznam o čase generování a další informační údaje.

Přesnost diferenčního měření ovlivňuje několik faktorů. Diferenční metody se využívají k potlačení chyb, které působí na referenční stanici i pozorovatele stejnou měrou. Do této skupiny patří hlavně ionosferické zpoždění způsobené průchodem signálu ionosférou, troposferické zpoždění související s nadmořskou výškou snímačů, chyba efemerid nebo časové základny družic. K úplnému vykompenzování těchto nepřesností ve chvíli, kdy je pozorovatel velmi blízko referenční stanici a vysílané korekce prakticky okamžitě přijímá. Za takových podmínek je chyba metody nejmenší a jedná se o nejlepší dosažitelné zpřesnění. Se zvětšující se vzdáleností dochází ke vzniku nestejných podmínek, které nemohou být korekcí správně potlačeny.

Kromě vzdálenosti má na celkovou chybu měření vliv i stáří používané korekce. Při použití aktuálních dat jsou správně potlačeny vlivy působící nepřesnost. Starší korekce obsahuje hodnoty, které již v současnosti neodpovídají měřicím podmínkám. Nedochází tedy ke správnému potlačení chyby polohy. Pokud doba použití korekce přesáhne určitou mez, je pro výpočet nepoužitelná a naopak se již nesmí použít. Této době odpovídá časový úsek do 20s.

### 3. POROVNÁNÍ GPS PŘIJÍMAČŮ

Pro volbu GPS přijímačů na realizaci zapojení bylo provedeno kontrolní měření dostupných zařízení. Porovnány byly zařízení Navilock NL-303P, Garmin GPS18LVC 1Hz a 5Hz.

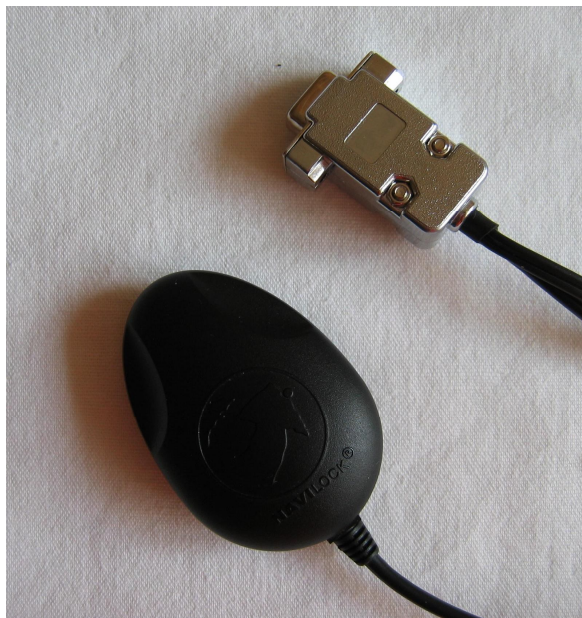
#### 3.1 PODMÍNKY A PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ

Přijímače byly umístěny na společném stanovišti, které se nacházelo ve volném prostoru. Tím bylo zajištěno působení shodných vlivů na všechny měřené objekty a kvalitní příjem signálů od družic. Na obsluhu přijímačů, sběr dat i vyhodnocení výsledků byl použit software U-Center v5.1 (freeware od firmy UBlox). Tento program po dobu 10 hodin ukládal měřená data a zpětně umožnil jejich grafické zpracování. Pro vyhodnocení z porovnávaných přístrojů byl zvolen Navilock NL-303P, jehož charakteristické parametry jsou zapsány v tabulce 3.1 a celkový náhled je na obrázku 3.1.

**Tab. 3.1 : Charakteristické parametry GPS přijímače Navilock NL-303P**

Název parametru	Hodnota parametru
Frekvence L1	1575,42 MHz
Počet kanálů	20
Citlivost	- 159 dB
Přesnost polohy	10 m
Cold start	42 s
Warm start	38 s
Hot start	1 s
Napájení	5 V ( 80 mA )
Výstupní port	RS232



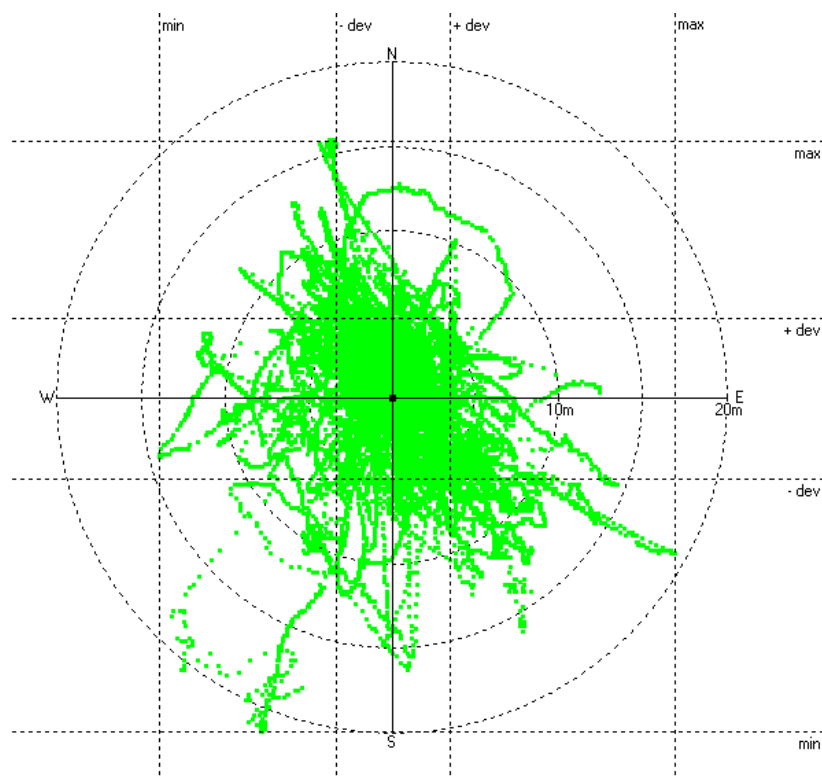


**Obr. 3.1 : Fotografie GPS přijímače  
 Navilock NL-303P**

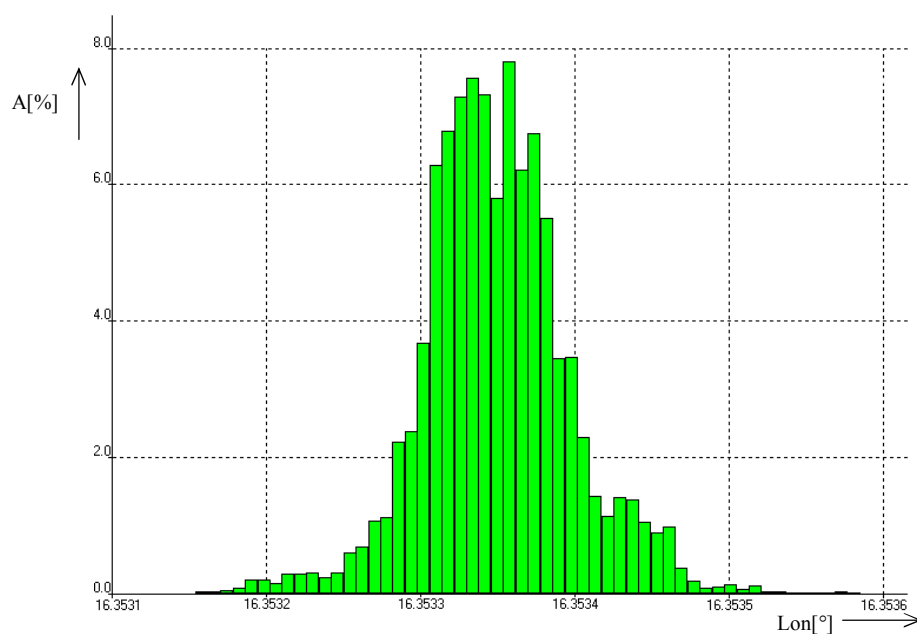
### 3.2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PRO NAVILOCK NL-303P

Základním kritériem pro rozhodování o vhodnosti přijímače pro aplikaci navigace byl rozptyl. Tedy změna zeměpisných souřadnic v určitém časovém úseku při nulové rychlosti pohybu. V takovém případě je potřeba, aby byly tyto odchylky co nejmenší. Rozptyl naměřený u přijímače Navilock je zobrazen v grafu na obrázku 3.2.

Jedná se o zobrazení odchylek měřených bodů v rovině udané osami zeměpisné délky a šířky. Střed systému je udán hodnotami získanými průměrováním po dobu měření (zeměpisná délka  $16,353349^\circ$  a šířka  $49,417139^\circ$ ). Z grafu lze odečíst maximální chybu přijímače 20m a hodnotu odchylky 10m (vyznačena "DEV"). Na obrázku 3.3 je graf s procentním rozložením hodnot zeměpisných délek získaných při měření.

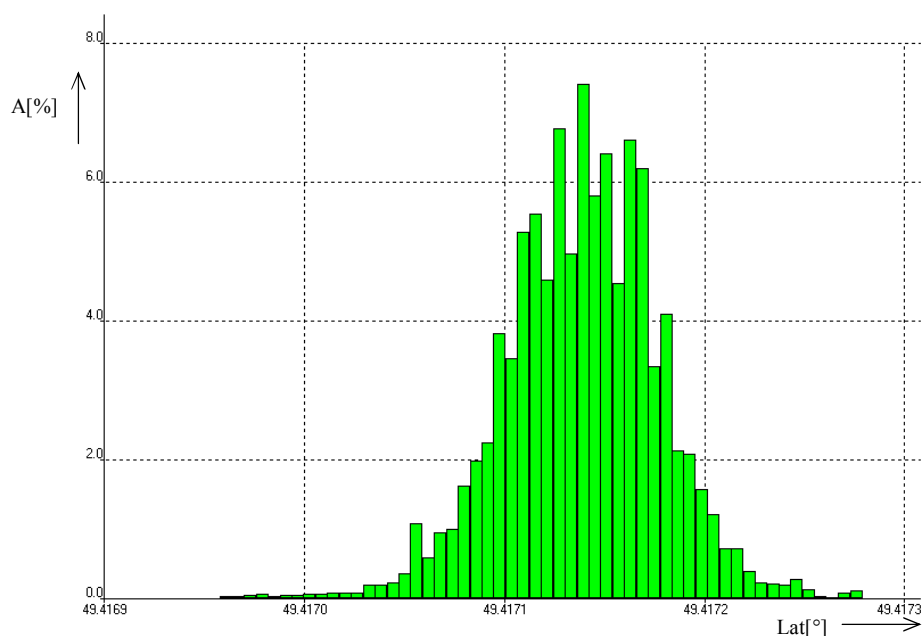


Obr. 3.2 : Grafické zobrazení odchylek souřadnic přijímače
   
 Navilock NL-303P



Obr. 3.3 : Graf procentní četnosti výskytu měřených zeměpisných délek

Jedná se o Gaussovské rozložení hodnot, kde hodnota s největší četností výskytu 7,8% odpovídá dle měření správné hodnotě zeměpisné délky. Obdobný průběh rozložení získáme při zobrazení hodnot zeměpisné šířky. Tento je zobrazen na následujícím obrázku 3.4.



**Obr. 3.4 : Graf procentní četnosti výskytu měřených zeměpisných šířek**

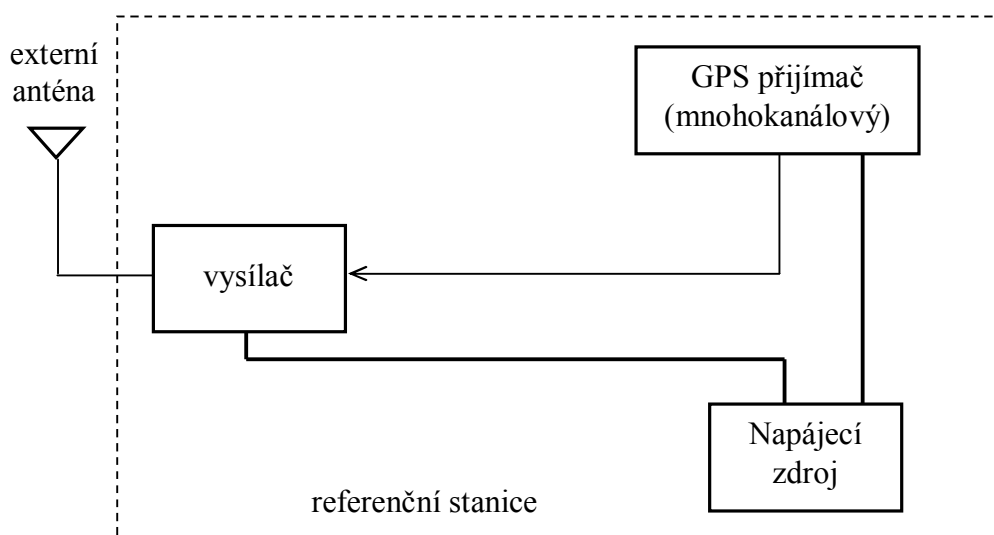
I v tomto případě vykazují hodnoty totožné rozložení jako na obrázku 3.3. Rozdílem je výrazně méně hodnot s četností A větší než 6%. Hodnotu zeměpisné šířky s největší výskytem lze s mnohem větší přesností prohlásit za správnou.

## 4. REALIZACE REFERENČNÍ STANICE

Pro vytvoření systému DGPS byla zvolena varianta, kdy jsou generovány korekce již výsledných zeměpisných souřadnic získaných z přijímače. Toto řešení nepřináší takovou míru zpřesnění přijímaných navigačních dat, ale proti principu korekcí dat družic má několik výhod.

Jednou z hlavních je výběr použitelných GPS přijímačů. Nejsou na ně kladeny speciální nároky, které lze splnit i běžně finančně dostupnými typy. Další výhodou je celková jednoduchost návrhu stanice. Velkou nevýhodou zůstává neschopnost ovlivnit data přijímaná od družic. Přesné teoretické poznatky možných řešení jsou popsány v kapitole 2.2.

Celý návrh referenční stanice je schematicky zobrazen na obrázku 4.1. GPS přijímač slouží pro příjem aktuálních souřadnic stanice, které jsou bez jakékoli úpravy vysílány bezdrátovým kanálem přímo k navigovanému objektu. Celá stanice je napájena z připojené baterie. Jednotlivé prvky jsou detailně popsány v následujících kapitolách 4.1 až 4.3.



**Obr. 4.1 : Blokové schéma referenční stanice pro DGPS**

#### 4.1 GPS PŘIJÍMAČ STANICE

Na přijímač použitý pro stanici jsou kladeny dva základní nároky. Musí být úplně stejný, jako je přijímač použit na zpřesňovaném objektu a jeho přesnost určení polohy co nejlepší. Námi zvolený typ je popsán v kapitole 3 a přesné charakteristické parametry jsou v tabulce 3.1. Volba typu připojení je omezena volbou vysílače, který nabízí jen možnost komunikace přes RS232. Při užití jiných typů rozhraní, například USB, je možné využít převodníků. Nejběžnější varianta obsahuje integrovaný obvod FTDI2232. Použití přijímače pro bezdrátovou komunikaci přes bluetooth nepřináší žádné výhody. Je nutné zajistit další napájení modulu a výhoda mobility takových zařízení se nijak neprojeví při napájení z baterie. V tomto případě je totiž přenosná kompletně celá stanice.

#### 4.2 VYSÍLAČ PRO BEZDRÁTOVOU KOMUNIKACI

Pro vysílání dat od stanice k pozorovateli, jehož poloha je korigována, jsou použity moduly ELPRO 805U. Dvojice modulů je schopna realizovat duplexní přenos dat, který je pro naše potřeby nadbytečný. U referenční stanice stačí funkce vysílače. Pro komunikaci umožňují připojení přes RS232 nebo RS485. Bezdrátový radiový přenos může být volně realizován na frekvencích 400 MHz nebo 800 MHz. Tyto frekvence jsou přístupné pro veřejné použití bez nutnosti zajistit oprávnění k vysílání. Přesná frekvence, kterou zařízení používají je 869 MHz. Další specifikace jsou zapsány v tabulce 4.1.

**Tab. 4.1 : Charakteristické parametry bezdrátového modulu ELPRO 805U**

Název parametru	Hodnota parametru
Frekvence [MHz]	869,4 - 869,65
Šířka kanálu [kHz]	250
Dosah (přímá viditelnost) [Km]	5
Vysílací výkon [mW]	500
Datový tok Serial [baud]	1200 – 115200
Datový tok Radio [baud]	19200, 38400, 76800
Rozhraní	RS232, RS485
Napájení [V]	10-30 DC, 10-24 AC

Na obrázku 4.2 je zobrazen bezdrátový modul zapojený do stanice. Připojení přes rozhraní RS232, přívod napájení realizován pomocí PC konektoru a všesměrová externí anténa na SMA koaxiálním konektoru.



**Obr. 4.2 : Fotografie bezdrátového modulu vysílače/přijímače  
 ELPRO 805U**

### 4.3 ZDROJ NAPÁJENÍ PRO REFERENČNÍ STANICI

Dle tabulky 3.1 a 4.1 je stejnosměrné napětí potřebné pro napájení GPS přijímače 5V a vysílací modul 10 až 30V. Vzhledem k nutnosti mobility stanice a její provozování i v oblastech bez elektrické sítě je ideálním řešením bateriové napájení.

Pro napájení vysílače je použita baterie 12V/26Ah. Jedná se o stejný typ, jako jsou použity pro napájení robota. Její dostatečně vysoká kapacita zaručuje dlouhou dobu použití stanice. Na obrázku 4.3 je fotografie použité baterie.

Napájení GPS přijímače lze realizovat další baterií (napětí 4,5V). Odběr přijímače je mnohem menší než u vysílače, a proto i obyčejná baterie postačí na dlouhý provoz. Jinou možností je použít stabilizátor napětí na 5V v podobě integrovaného obvodu 7805, který pracuje s napájením ze stanice. Toto řešení bylo

zvoleno jako zdroj přijímače na referenční stanici, protože odpadá nutnost kontroly stavu dvou baterií a po vybití lze daný typ snadno dobít.



**Obr. 4.3 : Fotografie baterie použité pro napájení  
zařízení referenční stanice**

Pokud by byla referenční stanice v dosahu přípojky k elektrické síti, lze velmi dobře použít jako zdroj napětí PC zdroj. Ten poskytuje výstupní napětí 5V i 12V společně s dostatečným výkonem pro napájení bezdrátového modulu.

## 5. ŘÍDÍCÍ SOFTWARE REFERENČNÍ STANICE

Řídící software pro referenční stanici nevznikl jako samotný program, ale jeho funkce jsou implementovány v jednotném bloku společně s navigací. Pro tvorbu bylo využito vývojové prostředí MS Visual Studio, které nabízí jako jeden z nástrojů jazyk C++.

Přestože výsledný program poskytuje uživateli grafické rozhraní, nebude v tomto formátu využit. Jeho použití bylo zvoleno pro ukázkou výstupních dat realizovaných funkcí pro navigaci a referenční stanici. Ty budou ve výsledné podobě využívány na platformě Linux, která je základem pro robota, jako podpůrné prvky pro navigaci. Samotné grafické prostředí je v naší aplikaci nevhodné, protože nadměrně zatěžuje výpočetní prostředky a nepřináší žádné výhody při navigování objektu.

Tato forma programu by byla vhodnou pro obory, kde se o řízení stará člověk (příkladem je navigace pro automobil). Zde naopak vyžadujeme co nejjednodušší a nejpřehlednější informování o požadovaném směru, zeměpisných souřadnicích nebo vzdálenosti k cíli. V aplikacích, jako je řízení robota, dostačují operátorovi pouze informativní zprávy o stavu. Pro takové případy je tedy mnohem vhodnější použít konsolových aplikací.

### 5.1 FORMÁTY ULOŽENÝCH GPS DAT

Pro potřebu dále pracovat s přijatými souřadnicemi polohy byly vytvořeny dvě různé struktury obsahující jednotlivé proměnné. Další možností je použití samotných proměnných, které nejsou nijak provázány. Takové řešení je však velice nepřehledné a výrazně snižuje programátorský komfort. Při užití struktur jsou vždy odpovídající proměnné ve společném bloku, který tak nabízí veškeré uložené informace. Další výhodou oproti práci s jednotlivými proměnnými je výrazné zrychlení operací s celými bloky (kopírování, přesuny) spolu s výrazným zkrácením zápisu kódu programu.



První struktura byla nazvána strcGPS. Slouží k uložení právě přijatých dat z přijímače GPS signálu nebo jakékoliv polohy popsané danými souřadnicemi. Obsah struktury je následující:

#### **struct strcGPS**

```
{
    bool bValid;           // správnost dat
    int iTimeH;            // hodiny času uložení dat
    int iTimeM;            // minuty času uložení dat
    int iTimeS;            // sekundy času uložení dat
    int iLonDeg;           // stupně zem. délky
    double dLonMin;        // minuty zem. délky
    double dLongitude;     // zem. délka ve stupních
    int iLatDeg;           // stupně zem. šířky
    double dLatMin;        // minuty zem. šířky
    double dLatitude;      // zem. šířka ve stupních
    double dSpeed;         // rychlost v uzlech
    double dAngle;         // natočení 0-360°
    char cNthSth;          // severní/jižní polokoule
    char cEasWes;          // východní/západní polokoule
    double dUTMEast;       // x-sová souřadnice UTM
    double dUTMNorth;     // y-nová souřadnice UTM
    int iUTMZone;          // zóna UTM
};
```

V této struktuře jsou ukládány informace o čase měření (iTimeH:iTimeM:iTimeS). Dále hodnota zeměpisné délky ve stupních iLonDeg a minutách dLonMin. Na převod do tvaru vyjádření hodnoty pouze ve stupních slouží dLongitude. Pro zeměpisnou šířku jsou přítomny odpovídající proměnné (iLatDeg, dLatMin a dLatitude). Následují informace o rychlosti a natočení pozorovatele společně s určením světových stran. O správnosti dat nebo povolení jejich užití lze rozhodnout na základě hodnoty logické proměnné bValid.

Pro další zpracování, jakým je například určení vzdálenosti, jsou zde navíc přidána data ve formátu UTM. Jedná se o [8] univerzální transversní Mercatorův systém určování polohy založený na mřížkách. Ty tvoří 60 zón, které jsou zobrazením části elipsoidu do roviny. Tak lze pro výpočet vzdálenosti využít Pythagorovy věty. Střed souřadnic zóny tvoří průsečík středového poledníku zóny s rovníkem. Od tohoto středu se měří vzdálenosti v metrech po osách x (y) a rostoucí

hodnoty jsou směrem k východu (severu). Převodní funkce jsou implementovány z přidáných knihoven [9].

Druhá struktura `strcKOR` slouží k ukládání vygenerovaných korekcí, které jsou užity při DGPS. Její skladba je odvozena od `strcGPS`, ale obsahuje pouze proměnné nesoucí informaci o poloze a čase. Ten určuje dobu vzniku korekce a lze jej tedy využít ke kontrole stáří dat. Jednotlivé proměnné zastupují totožné parametry polohy popsané u předchozího příkladu a přesná definice je následující:

#### **struct strcKOR**

```
{
    bool bValid;           // správnost dat
    int iTimeH;            // hodiny času generování korekce
    int iTimeM;            // minuty času generování korekce
    int iTimeS;            // sekundy času generování korekce
    int iLonDeg;           // korekce stupňů zem. délky
    double dLonMin;        // korekce minut zem. délky
    double dLongitude;     // korekce zem. délky ve stupních
    int iLatDeg;           // korekce stupňů zem. šířky
    double dLatMin;        // korekce minut zem. šířky
    double dLatitude;      // korekce zem. šířky ve stupních
};
```

## **5.2 DEKÓDOVÁNÍ ZPRÁVY Z GPS PŘIJÍMAČE**

Použitý GPS přijímač vysílá data dle protokolu NMEA v definovaných větách, které obsahují jednotlivé informace. Věta GPRMC obsahuje souhrn základních navigačních parametrů (čas, poloha, rychlost, natočení), a proto byla zvolena jako vstup programu. Přesnou definici věty lze najít v literatuře [2]. Nevýhodou je ztráta dílčích zpráv v ostatních větách (např. síla signálu družic), které ale nejsou nutné pro naši aplikaci. Omezením se na výhradně potřebná data zrychlíme průběh dekódování a zamezíme zahlcení vstupního bufferu sériové linky.

Ovládání sériového portu je zajištěno přes komponentu vývojového prostředí, která definuje objekt spravující zadaný COM port. Ten umožňuje uživateli nastavovat formát dat (počet start/stop bitů, paritu), povolení/zakázání přístupu a rychlost komunikace. Všechna zařízení v systému DGPS mají nastaven tento

parametr na hodnotu 19200 baud (případně 4800 baud). Taková rychlost byla zvolena s ohledem na bezdrátový přenos, který s rostoucí hodnou vykazuje větší chybovost. Objekt má vlastní buffer přijatých dat čtený přes odpovídající funkce. Pro další zpracování je výhodou návratová hodnota v typu String.

Zpracování takto získaného řetězce provádí vytvořená funkce decodeGPS. Její přesná definice vychází z hlavičky funkce:

**void decodeGPS(String^ Source, strcGPS &data);**

Funkce nemá žádnou návratovou hodnotu. Získaná data jsou uložena do struktury strcGPS v daném paměťovém prostoru. Jako vstup funkce je řetězec Source. Ten je na základě znalosti předpisu věty GPRMC, kde jsou jednotlivé veličiny odděleny čárkou, rozdělen do odpovídajících proměnných struktury. V případě nekorektnosti dat je zakázáno jejich použití negováním logické proměnné bValid.

Takto uložená data jsou uživateli podána způsobem, který je zobrazen na obrázku 5.1. Dolní část ukazuje správná data a na horní polovině je varianta ztráty signálu u přijímače.



**Obr. 5.1 : Interpretace přijatých dat od GPS přijímače bez signálu a se signálem**

### 5.3 ZADÁNÍ SPRÁVNÉ POLOHY REFERENČNÍ STANICE

Princip činnosti systému DGPS vyžaduje, aby referenční stanice znala svou přesnou (správnou) zeměpisnou polohu. V případě neznalosti této informace není systém schopný generovat korekce a referenční stanice zůstává nevyužita. Pro uložení a práci s přesnou polohou slouží proměnná typu `strcGPS` z kapitoly 5.2.

Uživatel má pro zadání polohy v programu dvě možnosti. V případě, že je přesná poloha známá, může provést její načtení z přiloženého souboru. Uložená data musí splňovat přesný formát, který zajistí správné přiřazení do proměnných struktury. Jednotlivé hodnoty odpovídají veličinám typu `strcGPS` a jsou odděleny středníkem. Soubor musí mít název “`staniceGPS.txt`” a obsahovat pouze jediný řádek s daty. Příklad zápisu dat ve formátu je následující:

**130716;A;49;46,23704;49,77061;N;17;7,05428;17,11757;E;0;0;0;0;**

Obecně pro potřeby načítání dat ze souborů v programu je vytvořena funkce `loadGPS`. Opět nemá žádný výstupní parametr. Vstupem je název souboru, který bude čten, a paměťový prostor struktury pro uložení. Na začátku je na základě názvu vytvořen stream pro přístup k datům a následně jsou ukládány proměnné vždy k nejbližšímu oddělovači. Předpis hlavičky funkce `loadGPS` je zapsán takto:

**`void loadGPS(String^ FileName, strcGPS &data)`**

Druhá varianta vychází z předpokladu, že uživatel přesnou polohu referenční stanice nezná. Poté lze její zeměpisné souřadnice určit měřením. Po jeho spuštění nelze odpojit přijímač a nejsou generovány žádné korekce. Každá příchozí data jsou zpracována a aktuální správná referenční hodnota je zobrazena uživateli. Současně je uložena v popsaném formátu do souboru “`staniceGPS.txt`”.

**`void saveGPS(String^ FileName, strcGPS data, bool WriteOnlDat, bool Append)`**

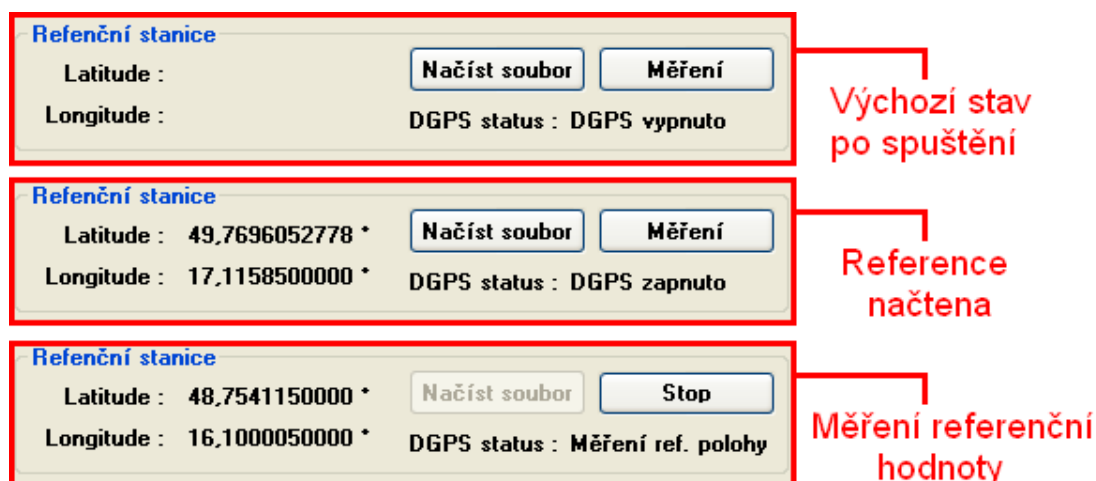
Funkce saveGPS umožňuje ukládání struktur strcGPS dle dříve zmíněného předpisu. Opět je zadán název výstupního souboru a data určená k uložení. Pro potřeby následného grafického zpracování v programu Ublox byla přidána logická proměnná WriteOnlyData. Při logické hodnotě True je pro zápis použit formát s oddělením pomocí středníku. V opačném případě jsou data zapsána do tvaru odpovídající větě GPRMC. Proměnná Append určuje, zda jsou nová data k již uloženým přidána nebo je přepíše. Samotný výpočet aktuální správné polohy referenční stanice provádí funkce measureGPS.

**void measureGPS(strcGPS &data, strcGPS &source)**

Vstupem je aktuální a výsledná poloha stanice. Nejprve je zkontrolována správnost dat, která jsou následně použita při výpočtu. V případě ztráty signálu přijímače není daná souřadnice do výpočtu zahrnuta. Samotná funkce nijak nedefinuje minimální nebo maximální počet měření. Výpočet je prováděn po dobu určenou uživatelem. Algoritmus pro získání souřadnic z naměřených hodnot využívá klouzavého průměru, který je popsán vzorcem 5.1. Velikost chyby této matematické metody klesá přibližně exponenciálně s dobou měření, takže pro dostatečnou přesnost je potřeba nechat program průměrovat alespoň 3 minuty.

$$S_{n+1} = \frac{S_n + X}{2} \quad (5.1)$$

Ve vzorci odpovídá  $S_{n+1}$  vektoru souřadnic nové průměrné zeměpisné poloze,  $S_n$  je předchozí hodnota průměru a  $X$  je vektor aktuálně přijatých souřadnic pomocí GPS. Na závěr každého výpočetního cyklu jsou nejnovější informace o poloze stanice uloženy do souboru "staniceGPS.txt". Lze tak při dalším použití data nahrát bez nutnosti opakovat měření. Na obrázku 5.2 je blok programu vytvořený pro práci s přesnými souřadnicemi referenční stanice.



The figure shows three sequential screenshots of a software interface for a reference station, each enclosed in a red box. Red arrows point from descriptive text to the corresponding screenshots.

- Top screenshot:** Titled "Referenční stanice". It shows "Latitude :" and "Longitude :" fields. To the right are buttons "Načíst soubor" and "Měření". Below the fields, it says "DGPS status : DGPS vypnuto". A red arrow points from the text "Výchozí stav po spuštění" to this screenshot.
- Middle screenshot:** Also titled "Referenční stanice". The "Latitude" field now contains "49,7696052778 °" and the "Longitude" field contains "17,1158500000 °". The "DGPS status" is now "DGPS zapnuto". The "Načíst soubor" button is still present, but the "Měření" button is disabled. A red arrow points from the text "Reference načtena" to this screenshot.
- Bottom screenshot:** Also titled "Referenční stanice". The "Latitude" field contains "48,7541150000 °" and the "Longitude" field contains "16,1000050000 °". The "DGPS status" is "Měření ref. polohy". The "Načíst soubor" button is disabled, and a new "Stop" button has appeared. A red arrow points from the text "Měření referenční hodnoty" to this screenshot.

Obr. 5.2 : Blok pro zadávání a editaci přesných souřadnic  
 referenční stanice

Blok programu "Referenční stanice" umožňuje uživateli pracovat s výše popsanými funkcemi. Stiskem tlačítka "Načíst" jsou nahrána data ze souboru "staniceGPS.txt" pomocí funkce loadGPS. Tlačítko "Měření" spouští funkci measureGPS a zároveň slouží k jejímu ukončení. O právě uložených souřadnicích stanice informují popisy zeměpisné délky (Longitude) a šířky (Latitude). Aktuální stav programu je signalizován pomocí statusu, který popisuje právě prováděnou operaci nebo nastavení programu.

## 5.4 GENEROVÁNÍ KOREKCÍ PRO DGPS

Korekce pro DGPS jsou, jak již bylo řečeno v kapitole 4, generovány pro úpravy výsledných souřadnic polohy navigovaného objektu. Pro jejich uložení a další zpracování slouží struktura strcKOR popsaná v kapitole 5.1. Jejich výpočet je realizován pomocí vzorce 5.2. Vzorec v tomto tvaru splňuje doporučení, aby výsledné korekce měly takové znaménko, že se ke zpřesňované poloze budou přičítat.

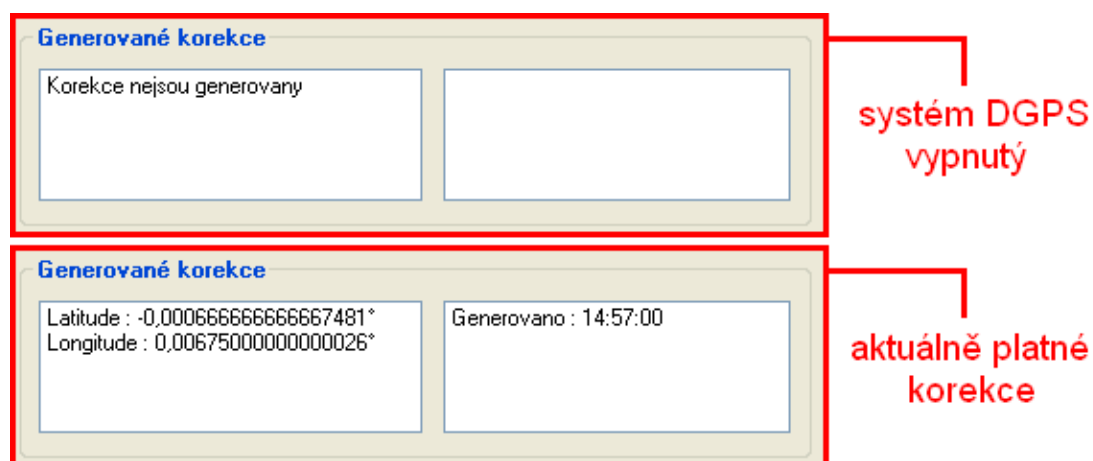
$$\mathbf{K} = \mathbf{S} - \mathbf{M} \quad (5.2)$$

Ve vzorci 5.2 je  $\mathbf{K}$  vektor generovaných korekcí souřadnic polohy,  $\mathbf{S}$  jsou známé souřadnice referenční stanice a  $\mathbf{M}$  udává právě změřenou polohu pomocí GPS přijímače. Programové řešení daného vzorce realizuje vytvořená funkce `generateKOR`, která má tři vstupní proměnné odpovídající vektorům souřadnic užitých při výpočtu. Zápis hlavičky funkce a její průběh je popsán dále.

**`void generateKOR(strcKOR &data, strcGPS &stanice, strcGPS &reference)`**

Funkce je v programu volána automaticky s příchodem dat z GPS přijímače referenční stanice. Opět je kontrolována správnost dat na základě logické proměnné `bValid`, která je součástí každé zpracovávané struktury. V případě, že není v programu k dispozici správná poloha stanice, je funkce ukončena bez provedení výpočtu. V opačném případě jsou generovány korekce pro jednotlivé souřadnice. Jejich uložení je provedeno v proměnné typu `strcKOR` a do odpovídajících proměnných zapsán čas vygenerování.

Při dalším přijetí nových souřadnic jsou stávající data přepsána. Pokud GPS přijímač přestane udávat souřadnice polohy (ztráta signálu, odpojení přijímače) zůstávají uloženy poslední korekce, které lze nadále využívat pro zpřesnění polohy objektu. Na obrázku 5.3 je zobrazeno informační okno korekcí pro uživatele. Vrchní část obrázku je pro případ, kdy nelze korekce generovat, a spodní část ukazuje zápis posledně vytvořených odpovídajících hodnot.



**Obr. 5.3 : Interpretace generovaných korekcí při vypnutém a zapnutém DGPS**

## 5.5 ZPŘESNĚNÍ SOUŘADNIC UŽITÍM KOREKCÍ

Po získání hodnot korekcí, popsanych v kapitole 5.4, lze provést zpřesnění souřadnic u požadovaného objektu. Dle doporučení RTCM SC-104 z kapitoly 2 je jejich aplikace provedena přičtením odpovídajících si hodnot souřadnic korekcí a aktuální polohy navigovaného robota. To odpovídá matematickému zápisu dle vzorce 5.3.

$$\mathbf{P} = \mathbf{M} + \mathbf{K} \quad (5.3)$$

Kde  $\mathbf{P}$  je vektor výsledných korigovaných souřadnic polohy objektu,  $\mathbf{K}$  jsou použité vygenerované korekce a  $\mathbf{M}$  udává právě změřenou polohu robota pomocí GPS přijímače, který je na něm umístěn. Řešení daného vzorce realizuje napsaná funkce `applyKOR`, která má dvě vstupní proměnné odpovídající vektorům souřadnic užitých při výpočtu. Hlavičky funkce je následující:

```
void applyKOR(strcGPS &data, strcKOR &korekce)
```



I tato funkce je volána automaticky, ale nyní po přijetí nové polohy navigovaného objektu. Po kontrole použitelnosti dat, použitím proměnné `bValid` a způsobu již dříve popsaného, je zjištěna uplynulá doba od posledního generování korekce. Tento algoritmus je proveden porovnáním časů uložených společně s daty. Z kapitoly 2 je největší přípustné stáří korekčních dat stanoveno na 20s. Nyní je velmi výhodné, že jsou jednotlivé časové úseky (hodiny H, minuty M a sekundy S) zaznamenány v oddělených proměnných. Pro povolení aplikace korekcí musí být H obou vstupních datových struktur rovny a rozdíl sekund, získaných výpočtem z M a S, menší než 20.

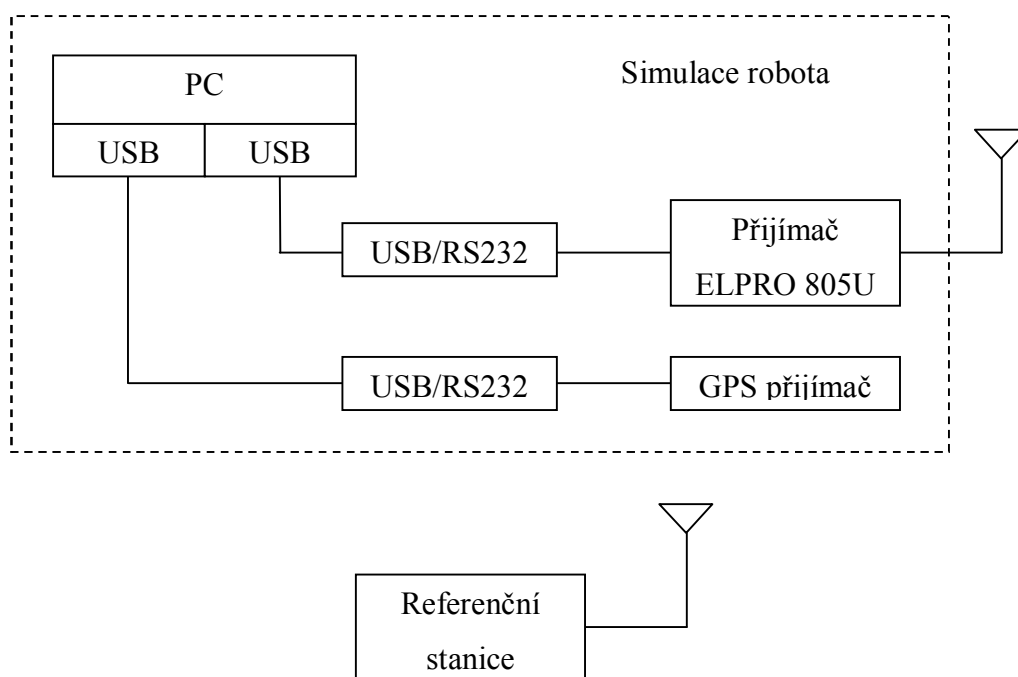
Po splnění této podmínky je realizován vzorec 5.3 a zpřesněná data přímo nahrazují hodnoty vstupní proměnné polohy objektu. V opačném případě nesmí být korekce použity a funkce je ukončena. Souřadnice robota jsou nekorigovány, ale stále mohou být použité pro navigaci. Tímto je zajištěna správná funkčnost navigace robota i přes případnou ztrátu spojení s referenční stanicí.

## 6. MĚŘENÍ SOUŘADNIC POLOHY POMOCÍ SYSTÉMU DGPS

Pro ověření správné funkce navrženého systému bylo provedeno kontrolní měření. Principem bylo určování polohy pomocí snímače GPS a následně byly na stejné hodnoty souřadnic aplikovány korekce systému DGPS. Popis měřicí aparatury, postup měření a vyhodnocení je uvedeno v následujících kapitolách.

### 6.1 REALIZACE A PROSTŘEDKY MĚŘENÍ

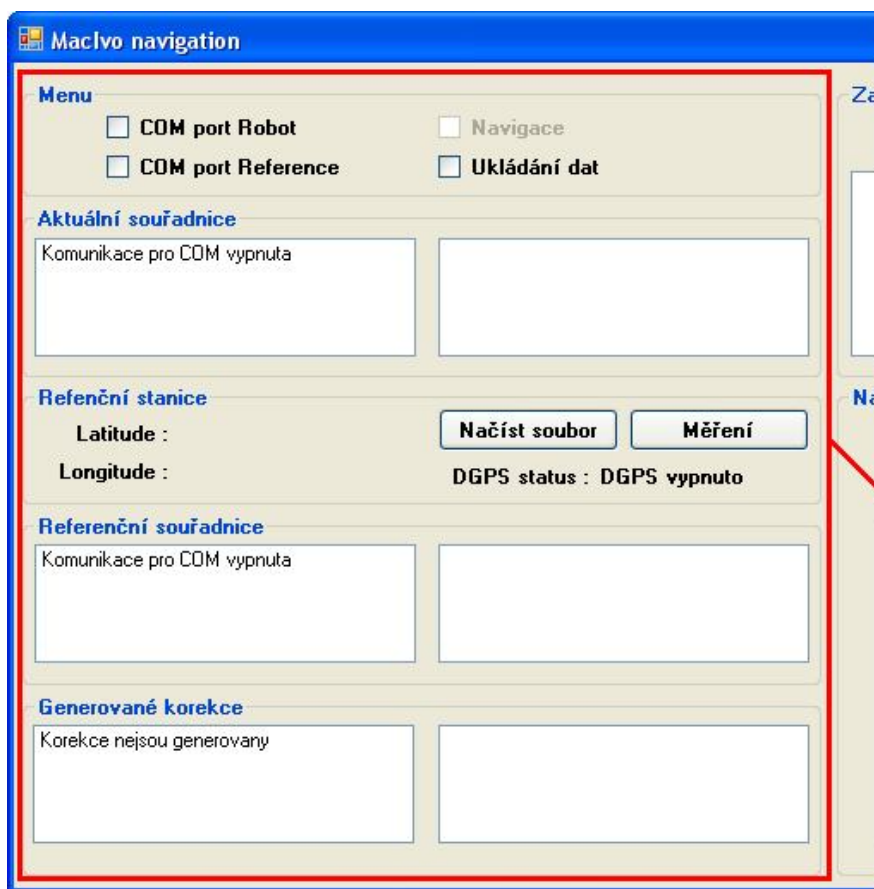
Referenční stanice pro práci DGPS byla popsána v kapitole 4 a dle daného popisu byla také použita. Příjem souřadnic a jejich vyhodnocení bylo prováděno přes počítač, který sloužil jako simulace výpočetního výkonu robota. Celkové schéma měřicí aparatury je na obrázku 6.1.



**Obr. 6.1 : Blokové schéma realizovaného systému DGPS**

Jako GPS přijímače byly použity výrobky firmy Garmin. Jednalo se o totožné typy, které byly součástí měření popsaného v kapitole 3. Přijímače GPS i bezdrátové moduly ELPRO 805U používají ke komunikaci rozhraní RS232. Vzhledem k nedostatku těchto portů na počítači byly použity převodníky USB/RS232. Přenosová rychlost veškerých zařízení byla nastavena na hodnotu 19200 baud. Oba přijímače byly umístěny na vyvýšeném místě s minimálním krytím od okolních stromů. Vzdálenost referenční stanice od simulovaného robota byla 30m.

Pro zpracování dat dle principu funkce DGPS byl použit program popsáný v kapitole 5. V jednotlivých kapitolách byly zobrazeny obrázky odpovídající dílčím částem programu. Na obrázku 6.2 je zobrazen kompletní náhled na software spojující potřeby DGPS a navigace robota. Červeně vyznačená oblast se týká výhradně práce s daty souřadnic tak, jak to umožňují výše popsané funkce.

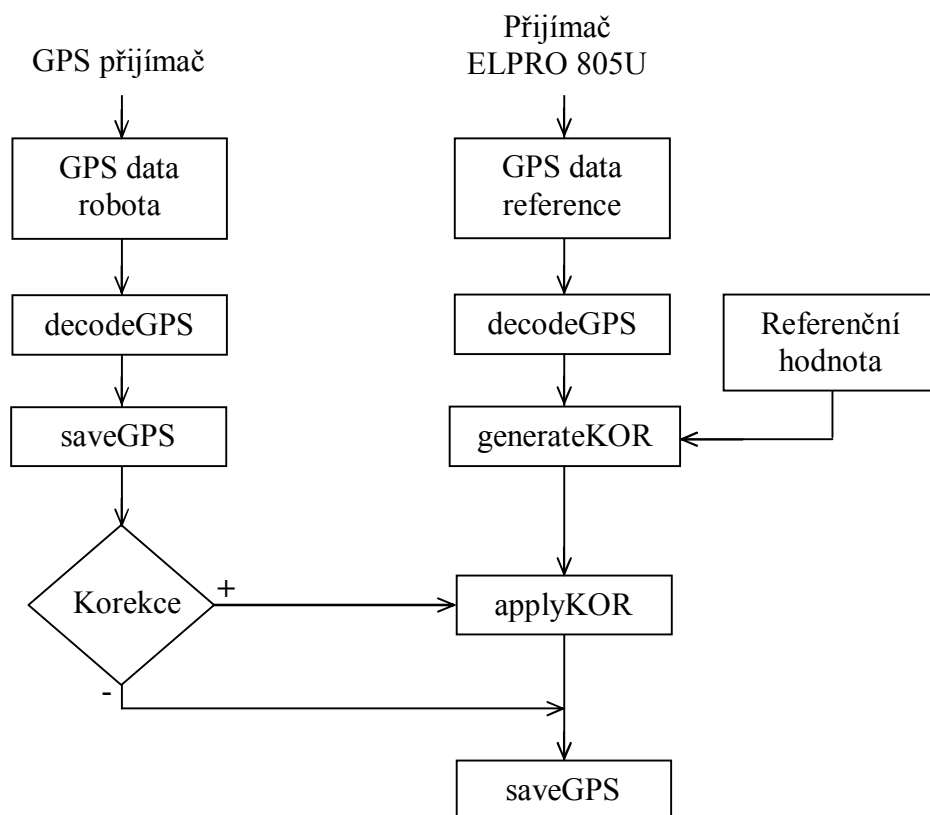


Blok systému  
DGPS

Obr. 6.2 : Blok programu umožňující konfiguraci DPGS a interpretaci dat

Daný program se obsluhuje pomocí oddílu “Menu“, který je na obrázku 6.2 vlevo nahoře. Zde se otevírá komunikace s jednotlivými porty, spouští navigace a volitelně lze povolit ukládání přijímaných dat. Při měření byly zapnuty všechny funkce mimo navigace.

Na obrázku 6.3 je ve vývojovém diagramu zobrazen jeden měřicí cyklus systému. Vstupem jsou data od GPS přijímače robota a přijatá informace od referenční stanice. Výstupem jsou uložená data v souborech “dataGPS.txt“ (před použitím korekcí) a “dataKOR.txt“ (po aplikaci korekcí).

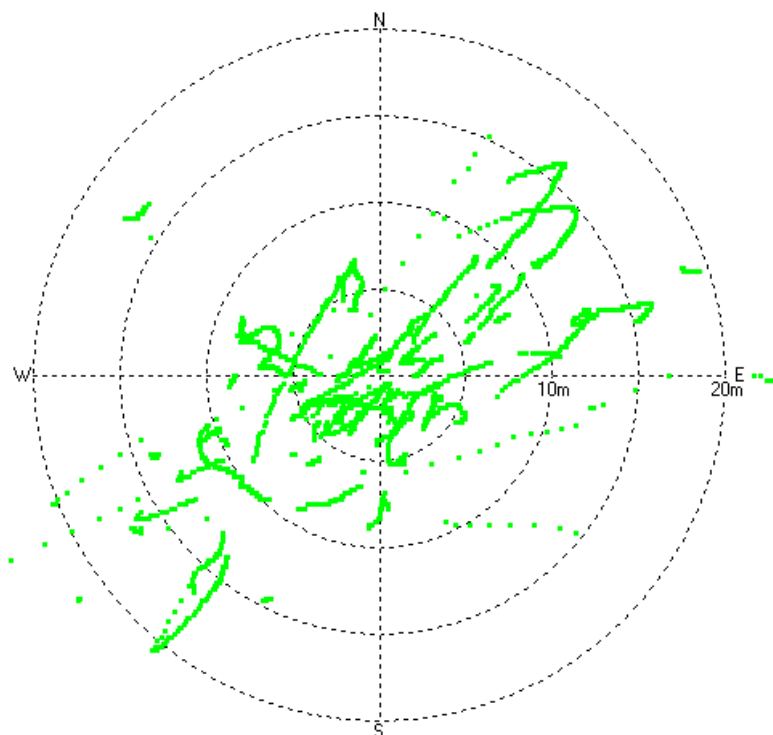


**Obr. 6.3 : Vývojový diagram jednoho cyklu zpracování dat**

Každá z větví cyklu na obrázku 6.3 běží nezávisle na sobě a je spouštěna příchodem validních dat na odpovídajícím vstupu. Měření trvalo přibližně 6 hodin a snímače byly po celou dobu statické. Očekávaným výsledkem je tedy možnost porovnání opakovatelnosti určení pozice systému GPS a DGPS. Pro zpětné grafické vyhodnocení výsledků byl opět použit program U-Center v5.1 zmíněný v kapitole 3.1.

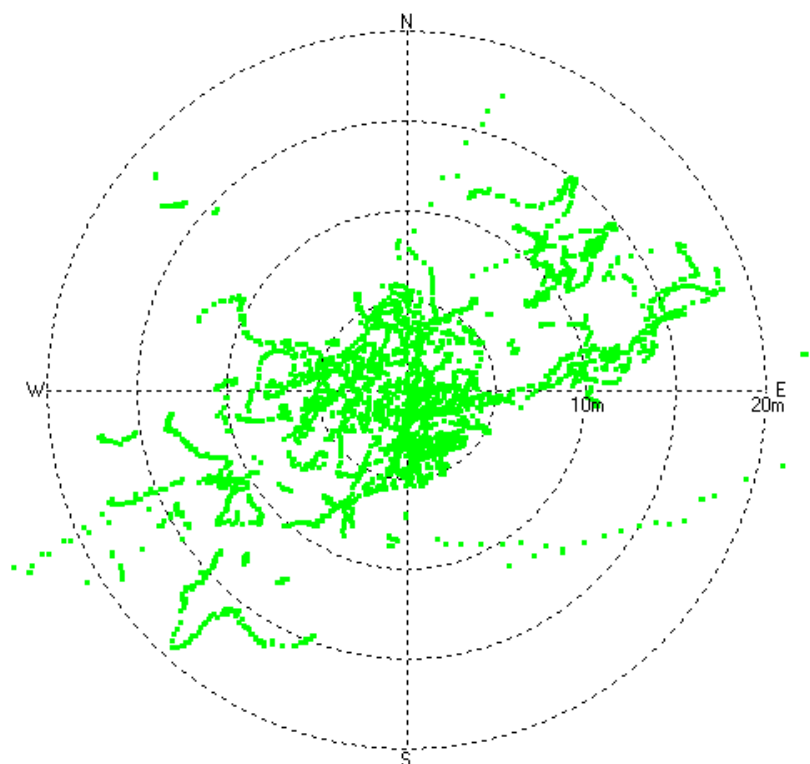
## 6.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Určení správné funkčnosti DGPS je založeno na stejném kritériu jako v kapitole 3. Opět je pro naše potřeby důležité zajistit co největší opakovatelnost určení polohy. V ideálním případě je tedy průběh měření takový, že při nulové rychlosti jsou určeny neměnné souřadnice polohy. Se zhoršujícími se vlastnostmi pak roste okolí, ve kterém se měřené pozice pohybují. Tyto průběhy jsou zachyceny v grafech na obrázcích 6.4 a 6.5. Střed souřadného systému odpovídá souřadnicím umístěného GPS přijímače robota. Osy poté udávají vzdálenosti měřených souřadnic bodů od středu. Na obrázku 6.4 je zachyceno měření bez užití korekcí.



**Obr. 6.4 : Grafické zobrazení odchylek souřadnic GPS přijímače**

Z grafu na obrázku 6.4 je patrné, že při užití daného přijímače se určená poloha pohybuje v okruhu 15m s téměř stejnou četností výskytu v daných vzdálenostech. Na obrázku 6.5 následuje stejný princip vyhodnocení dat měření s užitím korekcí.



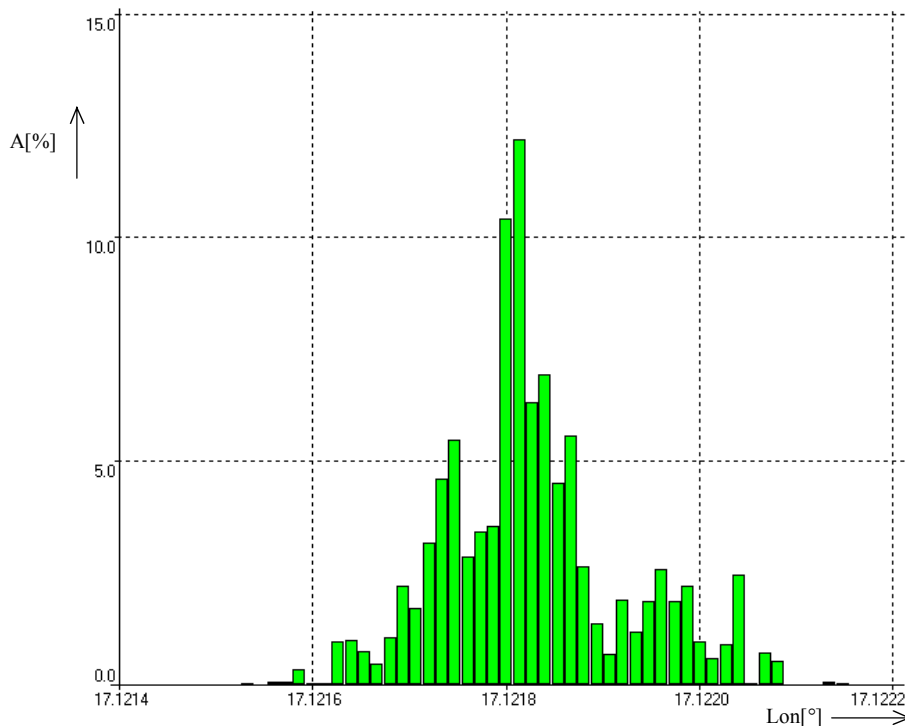
**Obr. 6.5 : Grafické zobrazení odchylek souřadnic při užití navrženého DGPS**

Po aplikaci generovaných korekcí výrazně vzrostla četnost bodů v okruhu 5m od středu os. Přesto stále existují určené polohy, které překračují vzdálenost 10m. V porovnání s obrázkem 6.4 je patrné, že se při použití DGPS zlepšila opakovatelnost určení souřadnic robota a tím i přesnost určení jeho aktuální polohy. Daná navigace robota bude mnohem lépe realizovatelná než při užití samotného GPS přijímače.

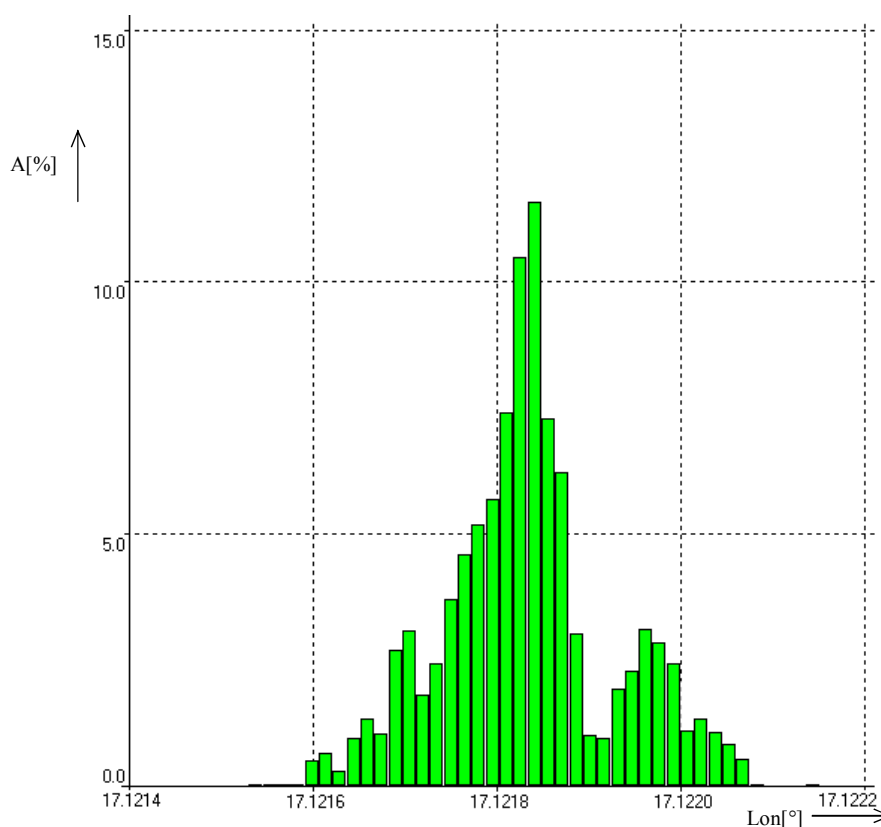
Vytvořený systém DGPS je realizován pomocí naprosto totožných přijímačů a splňuje také podmínku nepoužívat pro zpřesnění korekce starší než 20s. Třetím požadavkem metody bylo užití stejných stanic při určování souřadnic. Tento bod byl

velmi obtížně realizovatelný, protože neexistoval způsob jak ovlivnit data družic pro výpočet v přijímači. Jedinou možností je kontrolovat z přijatých komunikačních vět shodu v užitých družicích. Pokud se tyto informace liší, neměly by se korekce použít. Při zkušebním měření byly používané družice kontrolovány, ale prakticky vůbec nedocházelo ke shodě. Ta by měla nastat při ideální viditelnosti přijímačů, která však není nijak častá kvůli užití robota v různém terénu nízko nad zemí. Z tohoto důvodu není kontrola stejných použitých družic v programu implementována. Možnost ovlivňovat tato data by vedla k dalšímu zvýšení zpřesnění systému DGPS.

Další variantou interpretace výsledků měření je použitím histogramů. Na obrázku 6.6 je zobrazena závislost četnosti výskytu zeměpisných délek bez korekcí. Aplikování korekcí změní rozložení hodnot histogramu podle obrázku 6.7.



**Obr. 6.6 : Graf rozložení četností zeměpisných délek  
 bez korekcí**

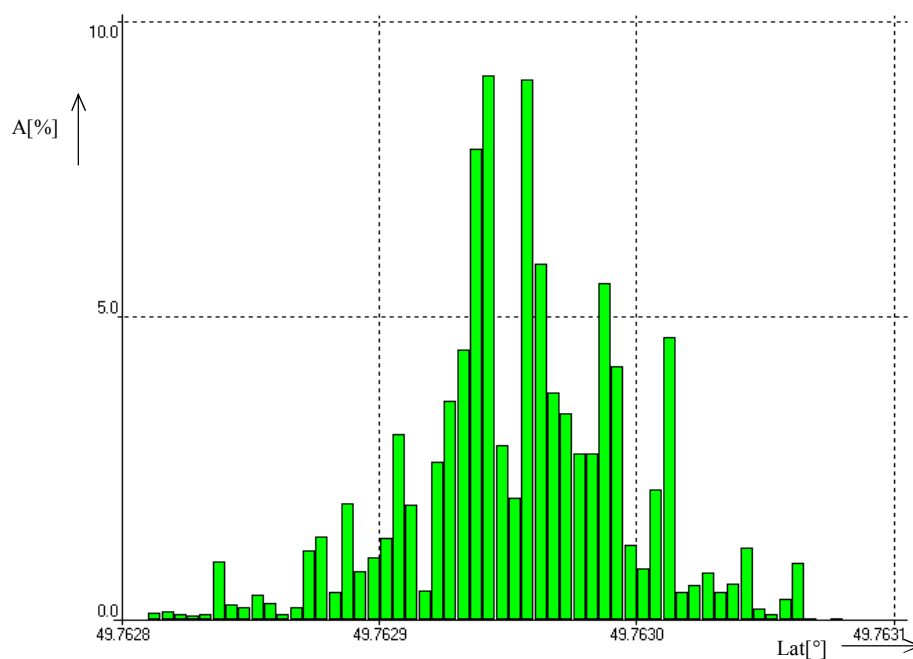


**Obr. 6.7 : Graf rozložení četností zeměpisných délek  
při DGPS**

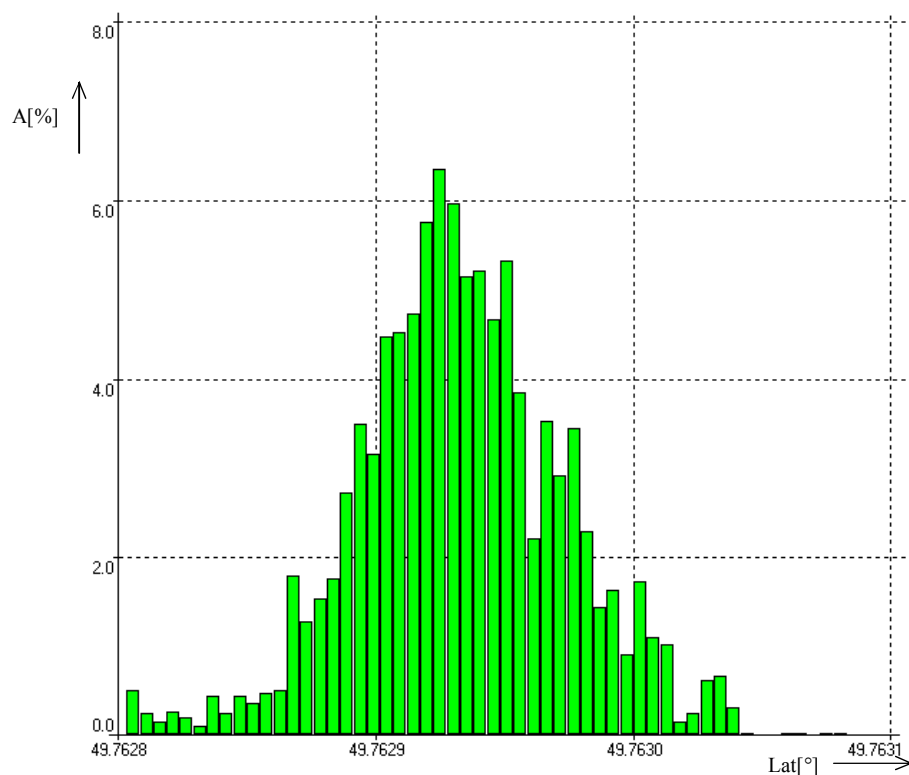
Dříve popsané ideální měření opakovatelnosti polohy má na histogramu zeměpisných délek jedinou hodnotu dosahující četnosti 100%. Z tohoto stavu vychází dva požadavky na kvalitu měření systémem. Hodnoty kolem středu musí dosahovat co nejvyšších četností. Druhým kritériem je, aby šířka intervalu měřených zeměpisných délek byla naopak co nejmenší.

Z obrázků 6.6 lze určit interval hodnot zeměpisných délek a jejich počet s četností  $A$  vyšší než 5%. Totožné parametry vyčteme i u měření z grafu na obrázku 6.7. Porovnáním lze zjistit, že po aplikaci korekcí došlo ke zvýšení počtu délek s vysokou hodnotou četnosti. Stejně tak byla zmenšena šířka intervalu měřených hodnot. Na základě teorie popsané v předchozím odstavci lze prohlásit data z DGPS přesnějšími než při užití jediného GPS přijímače. Stejný závěr je získán z vyhodnocení grafů na obrázcích 6.8 a 6.9, které zobrazují závislost četnosti  $A$  na zeměpisné šířce.





**Obr. 6.8 : Graf rozložení četností zeměpisných šířek  
 bez korekcí**



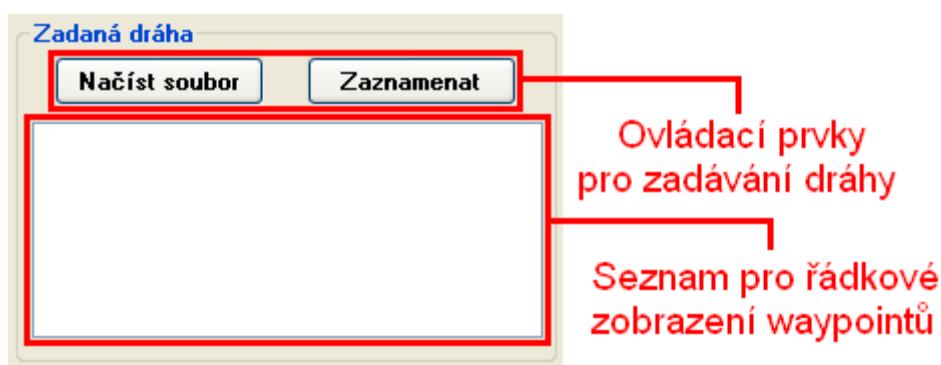
**Obr. 6.9 : Graf rozložení četností zeměpisných šířek  
 při DGPS**

## 7. NAVIGACE POMOCÍ GPS SOUŘADNIC

V této kapitole je podrobně popsán vytvořený algoritmus pro pohyb robota dle zadaných GPS souřadnic plánované dráhy. Jsou zmíněny jednotlivé návrhy variant určení orientace v prostoru a zvolený způsob vyhodnocení daných informací. Součástí programu je i grafická interpretace navigace společně s prostředky pro práci se zadanými waypointy (označení pro kontrolní stanoviště určující dráhu).

### 7.1 ZADÁNÍ SOUŘADNIC DRÁHY PRO NAVIGACI

Cílem navigačního algoritmu je provést ovládaný objekt požadovaným sledem předem známých waypointů. Tyto jednotlivé souřadnice jsou v programu ukládány do pole tvořeného proměnnými typu `stcGPS`. Počet kontrolních stanovišť byl zvolen na maximální hodnotu 200. Taková hodnota odpovídá i při vzdálenosti 5m po sobě následujících bodů celkové délce trasy přibližně 1km (požadovaný dojezd robota při návrhu). Na obrázku 7.1 je ukázka bloku programu určeného pro práci s waypointy.



**Obr. 7.1 : Blok programu pro zadávání požadované dráhy objektu**

Uživatel má pro zadání dráhy do programu dvě možnosti. První z nich je načtením již známých souřadnic ze souboru. Jedná se o postup, kdy jsou použity stejné funkce a tedy i formáty uložených dat z kapitoly 5.3. Soubor s daty je nazván "dráha.txt" a každý řádek odpovídá jednomu kontrolnímu bodu. Tento postup zadání

dráhy je proveden po stisku tlačítka “Načíst soubor“ z obrázku 7.1. Současně s tím jsou zobrazeny všechny body trasy v pořadí od prvního k poslednímu. V datovém poli programu jsou však uloženy v opačném pořadí. Je tak výrazně zjednodušeno vyřazení vždy posledního dosaženého waypointu bez nutnosti přeskupení dat. Nevýhodou je delší zpracování při zadávání posloupnosti cílových bodů, ale na tuto operaci jsou kladeny menší časové nároky z hlediska prodlevy než při průběhu navigace. Jinou variantou by bylo ze souboru načíst vždy jen aktuálně dobývaný cíl. Při tomto postupu je šetřena systémová paměť, ale v krátkých cyklech jsou prováděny práce s diskovými periferiemi. Ty jsou časově mnohem náročnější, proto je tento způsob s ohledem na rychlost nevhodný.

Druhým způsobem je přímé zadávání dráhy. Operátor s objektem projíždí požadovanou trasu a v místech, kde uváží potřebnost, provede uložení do souboru stiskem tlačítka “Zaznamenat“ dle obrázku 7.1. Tato varianta je mu zpřístupněna až po zapnutí přijímače GPS. Data jsou opět v souboru “drahaGPS.txt“ a nové body jsou připojovány ke stávajícím. Proto je potřeba vždy před novou trasou odstranit předchozí záznamy, jinak dojde k jejich propojení. Výhodou je možnost navázat na rozpracovanou dráhu, jejíž plánování bylo přerušeno například vybitím baterií nebo změnou povětrnostních podmínek. Hned po zaznamenání bodu je aktualizován seznam waypointů a operátor tak má přehled o dosavadním průběhu trasy.

Práce se zadáváním cílových bodů dráhy objektu je možno provádět jen před aktivací navigace. Po jejím spuštění jsou tlačítka uživateli znepřístupněna. Takový stav programu je ukázán na obrázku 7.2.



**Obr. 7.2 : Příklad zadané dráhy při spuštění navigaci**

Je tak zamezeno nepřipustné editaci právě zpracovávané posloupnosti zadaných souřadnic. Algoritmus již sám odstraňuje dosažené kontrolní body (pouze v načtených datech, soubor zůstává nezměněn) a obnovuje právě aktuální seznam waypointů, který tak slouží k informování operátora o zbývajícím trase.

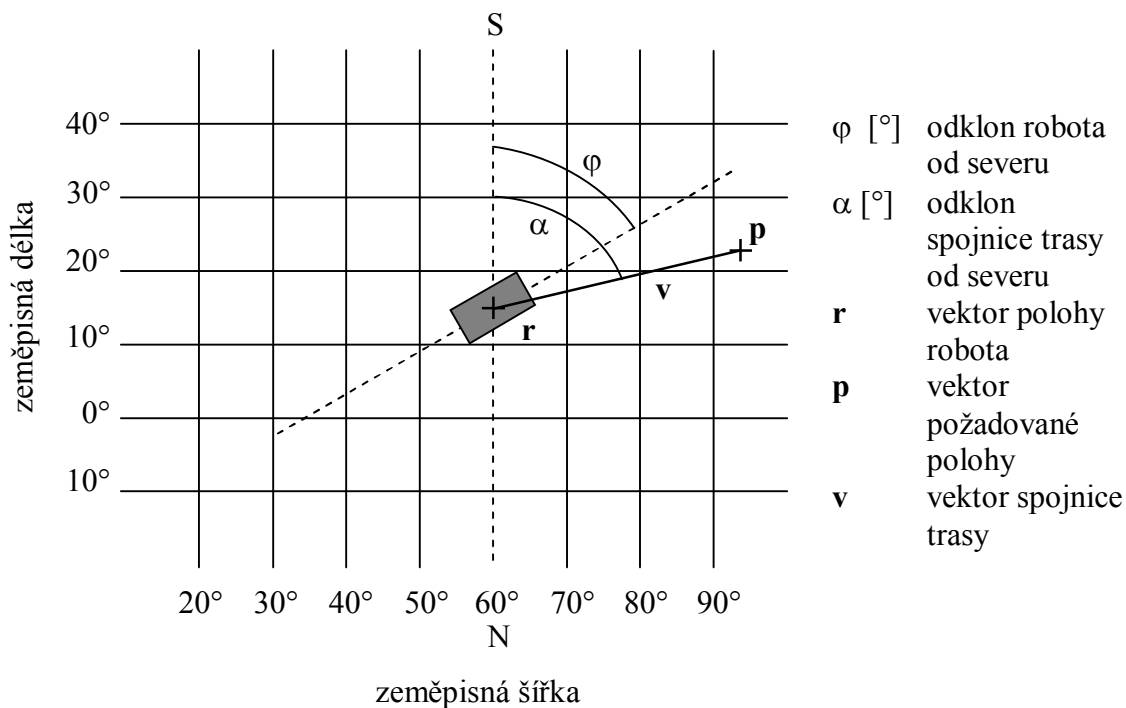
## 7.2 URČENÍ ORIENTACE OBJEKTU V PROSTORU

Orientace objektu v prostoru je udávána ve stupních, které určují odklon směru od magnetického severu. Vyhodnocením aktuálního a požadovaného směru lze určit potřebnou změnu řízení pro dosažení zadaného cíle.

Při známých souřadnicích kontrolních bodů dráhy a příjmu současné polohy od GPS přijímače lze využít goniometrických funkcí pro určení žádané orientace. Stejně tak je možné určit pomocí vět o pravoúhlém trojúhelníku vzdálenost k cíli. Pro tyto operace jsou použity hodnoty polohy ve formátu UTM.

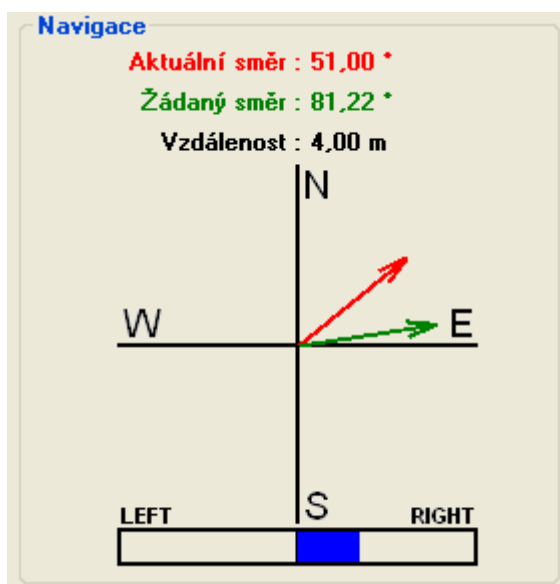
Druhým údajem pro orientaci je současné natočení samotného objektu. Na zjištění této hodnoty existuje několik variant. V případě, že je robot v pohybu s určitou minimální rychlostí, lze použít informaci o odklonu přímo z dekodované zprávy GPRMC z přijímače GPS. Je tedy použita vždy aktuální hodnota uložená společně se souřadnicemi v datové struktuře strcGPS. Pokud je však robot zastaven, nelze tímto způsobem jeho natočení získat. Pak je potřeba využít například elektronického nebo GPS kompasu. Jedná se o použití dvou přijímačů GPS umístěných na přední a zadní části objektu. Na základě jejich rozdílných souřadnic dochází k určení odklonu. Navržený senzorický systém aplikovaný na robotu zahrnuje elektronický kompas. Podmínkou použití dat získaných z tohoto obvodu je, aby objekt nebyl nakloněn v žádném z možných směrů. Výhodou je přímý výstup bez potřeby dalších náročných výpočetních operací.

Na obrázku 7.3 je simulovaný příklad natočení robota v prostoru (hodnoty zeměpisných šířek a délek jsou pouze orientační a neodpovídají zvolenému měřítku). Požadovaný cíl udává poloha bodu **p** a současná pozice je definována vektorem souřadnic **r**. Jednotlivé hodnoty odklonů jsou zastoupeny proměnnými  $\alpha$ ,  $\varphi$ .



Obr. 7.3 : Simulovaná orientace objektu v prostoru

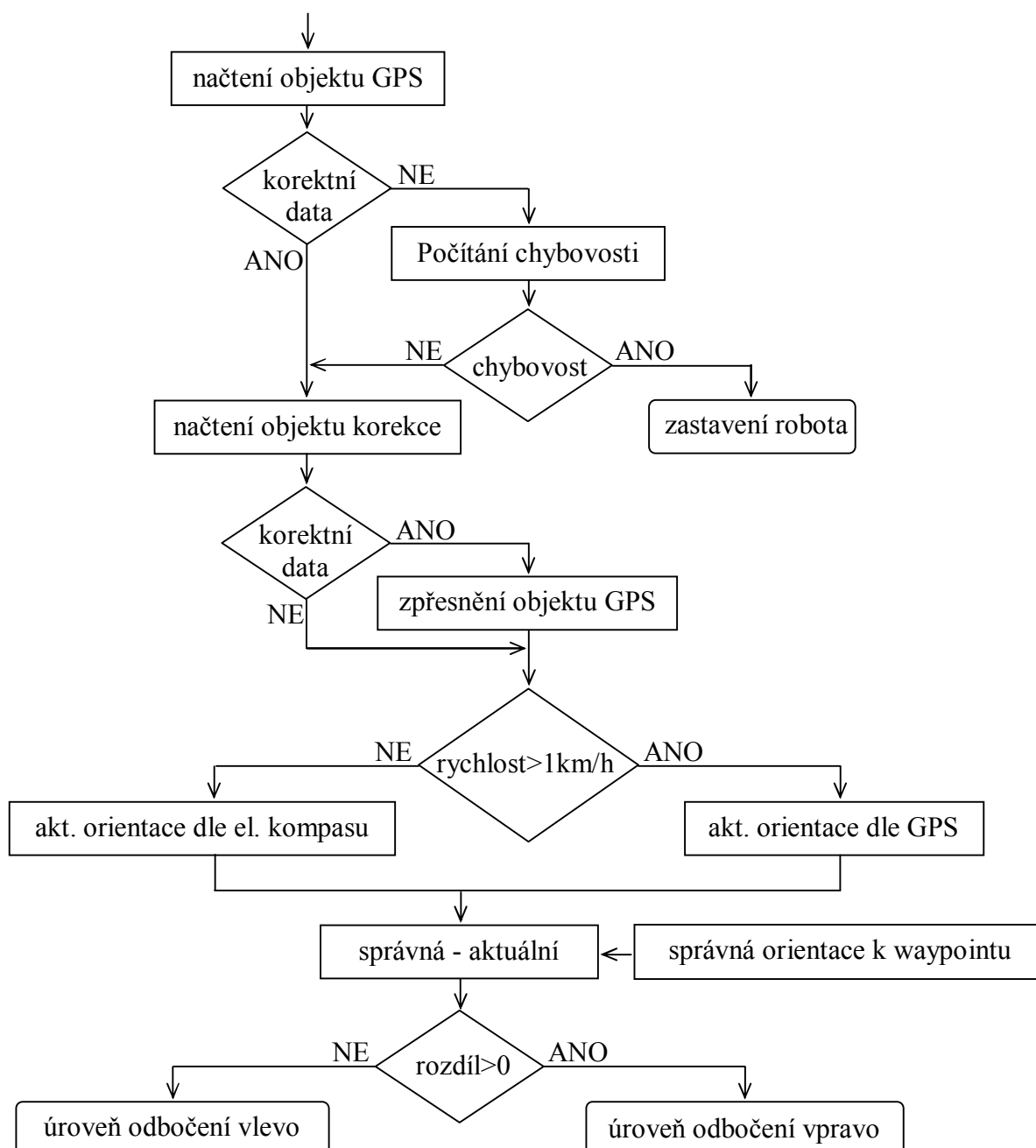
Obrázek 7.4 zobrazuje způsob vyhodnocení této situace navrženým programem, který vytváří grafické údaje současně s přesným numerickým vyjádřením.



Obr. 7.4 : Programové vyhodnocení simulované situace

### 7.3 POPIS ALGORITMU NAVIGACE

V kapitolách 7.1 a 7.2 jsou popsány postupy získání všech vstupních dat potřebných pro realizaci navigace. Vývojový digram průběhu algoritmu je na obrázku 7.5.



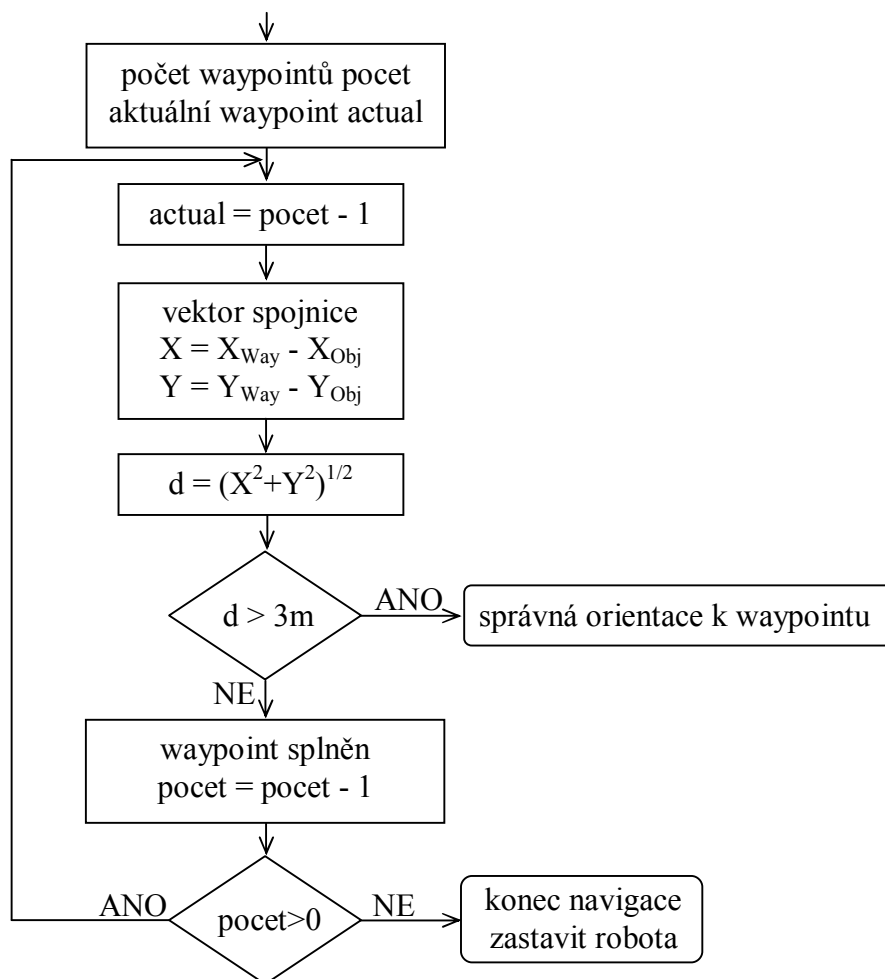
Obr. 7.5 : Vývojový diagram jednoho cyklu navigace

Na obrázku 7.5 je zobrazen jeden cyklus navigačního algoritmu, který je spouštěn automaticky každou nově přijatou zprávou z GPS přijímače. Na počátku se provádí načtení (funkce decodeGPS) a kontrola souřadnic. Pokud nejsou získaná data validní, dochází k inkrementaci chybovosti a jejímu vyhodnocení. Po překročení je objekt zastaven, protože nezná svou polohu. V druhém případě jsou použity poslední známé údaje. Aktuální nastavení chyby je takové, že jediná ztráta pozice okamžitě zastaví robota a vyčká se na další přijetí souřadnic.

Dalším krokem je vytvoření (generateKOR) a případné aplikování (applyKOR) korekcí podle jejich dostupnosti. Následuje blok určení orientace robota v prostoru dle kapitoly 7.2. Minimální rychlost zvolená pro povolení užití odklonu z GPS je 1 km/h. Správný směr je určen pomocí goniometrických funkcí z vektoru, který je spojnici aktuální a požadované polohy. Z rozdílu odklonů je vyhodnocena míra zatočení vpravo pro hodnoty  $0^\circ$  až  $180^\circ$ . Nebo naopak vlevo, kterým odpovídá  $-180^\circ$  až  $0^\circ$ .

Blok “správná orientace k waypointu” v sobě zahrnuje i volbu cíle a případný přechod na další. Tento krok se provádí na základě určení vzdáleností robota od waypointu a je podrobně popsán na obrázku 7.6. Aktuální cílový bod je vždy poslední v pořadí, a proto jeho index získáme zmenšením celkového počtu o 1. Následně se provede výpočet jednotlivých složek spojnicového vektoru. Z nich je poté určena vzdálenost robota od kontrolního stanoviště. Mez pro splnění bodu byla stanovena na okruh o poloměru 3m. Pokud je vzdálenost větší, pokračuje navigační algoritmus z obrázku 7.5. V opačném případě považujeme waypoint za splněný a celkový počet se zmenší o 1.

Nakonec je zkontrolováno, jestli zbývají další naplánované cíle. Když zůstává v pořadí jiný waypoint, vrací se algoritmus na začátek smyčky. Je-li již splněn i poslední cíl, dojde k zastavení robota a navigační algoritmus je zastaven. Uživatel je o konci navigace informován vyprázdněným zásobníkem naplánovaných bodů v bloku programu pro zadávání dráhy.



**Obr. 7.6 : Ovládání zásobníku zadaných cílů**

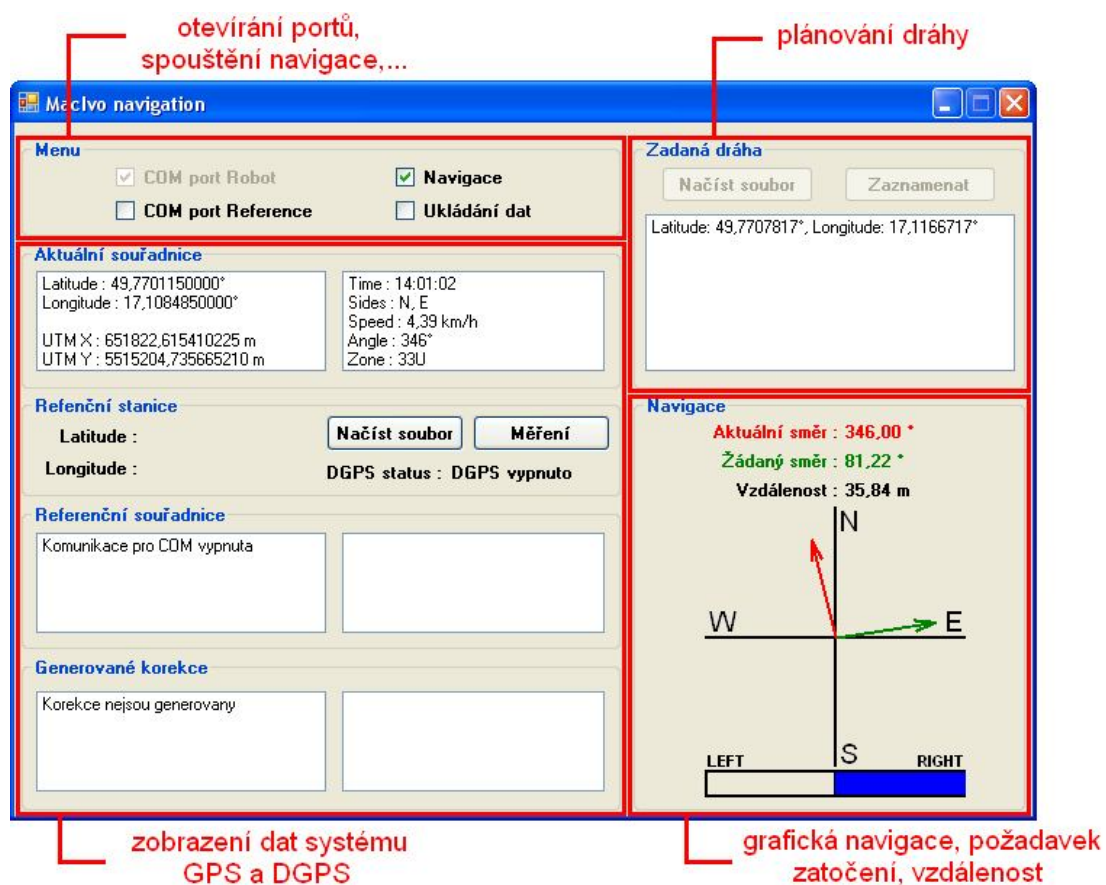
Popsané algoritmy a postupy jsou v programu shrnuty do jediné funkce, která obsluhuje navigaci. Její volání se provádí dle dále zmíněné hlavičky. Nemá žádné výstupní proměnné a jediným vstupem je aktuální poloha proměnné typu strcGPS.

**void navigate(strcGPS &data)**



## 7.4 POUŽITÍ NAVIGAČNÍHO ALGORITMU

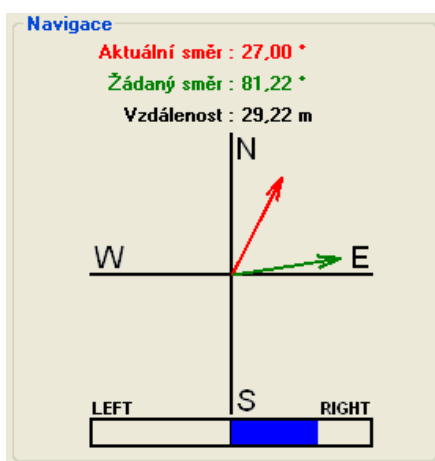
Pro příklad vyhodnocování a práce algoritmů byl zvolen pojezd objektu ze startovací pozice do cílové na volné ploše. Celkový pohled na vytvořený program je na obrázku 7.7. Pro určení pozice je využit pouze systému GPS a je zadán jediný kontrolní bod v naplánované dráze.



Obr. 7.7 : Náhled programu na začátku navigace

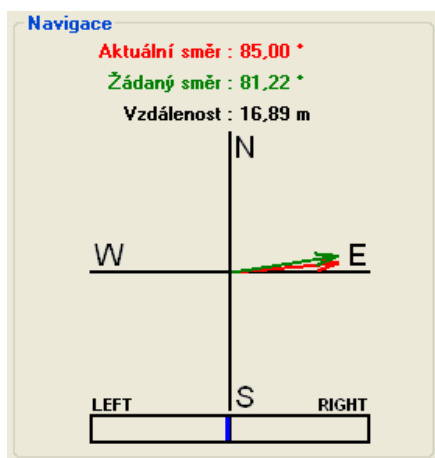
V bloku "Menu" je povolena komunikace portu na robotovi a spuštěná navigace. Dále je možné požadovat ukládání do souboru a práci s portem pro DGPS. Část pro zobrazení dat ukazuje jen aktuální souřadnice, protože je využit pouze systému GPS. Zbylé oddíly slouží k určování polohy pomocí navržené diferenční GPS. Zadaná dráha obsahuje jediný bod a při spuštěné navigaci

neumožňuje žádnou editaci. Poslední blok ukazuje navigační informace. Jedná se o číselné vyjádření aktuálního, požadovaného směru a vzdálenosti k bodu. První dva parametry jsou následně uživateli zprostředkovány také graficky. Spodní stupnice udává míru zatočení vlevo/vpravo v závislosti na rozdílech směrů. Na obrázku 7.8 je blok “Navigace” v dalším časovém okamžiku zmíněného příkladu.



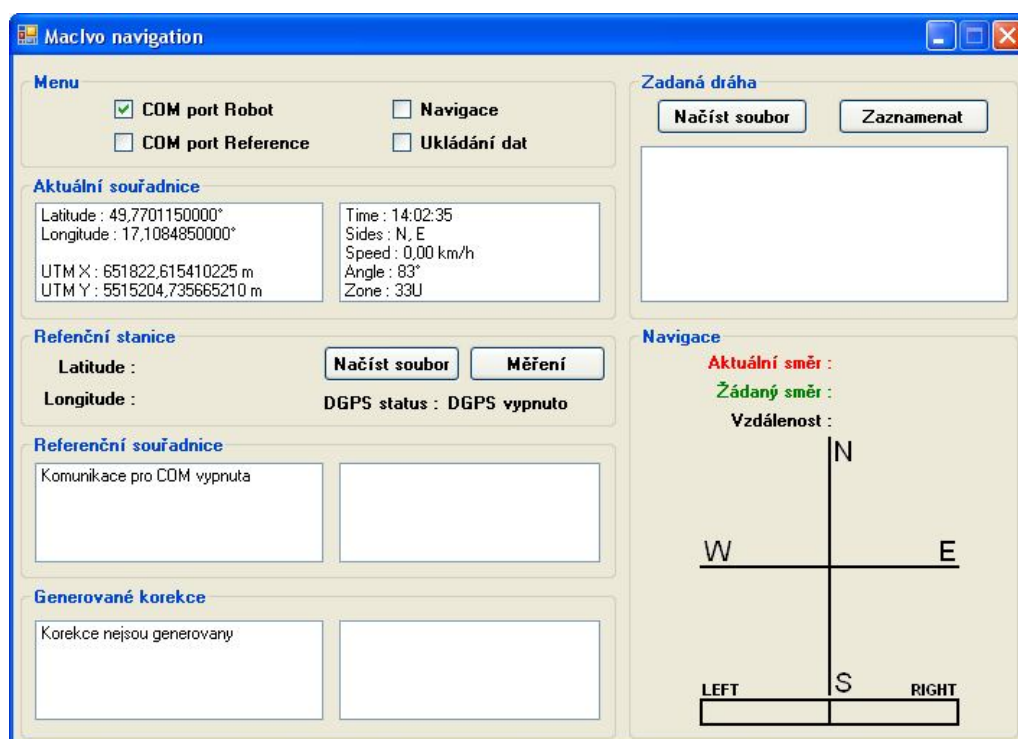
Obr. 7.8 : Navigační parametry v kroku 1

V dalším kroku je vidět přiblížení ke shodě směrů. Na základě zmenšení tohoto rozdílu je také upravena hodnota zatočení. Na obrázku 7.9 je zobrazen další postup navigace.



Obr. 7.9 : Navigační parametry v kroku 2

Obrázek 7.9 ukazuje situaci, kdy již došlo k natočení objektu do požadovaného směru. Podle toho je také na stupnici doporučeno pouze mírné zatočení vlevo. Nyní tedy zbývá, aby robot urazil zbývající vzdálenost (16,89m) a dostal se do okruhu 3m okolo cílového bodu pro splnění naplánované dráhy. Obrázek 7.10 zobrazuje náhled programu po dokončení navigace.



**Obr. 7.10 : Náhled programu po ukončení navigace**

Po uražení zbývající vzdálenosti je navigační algoritmus zastaven. Takový stav programu zachycuje obrázek 7.10. Navigace je vypnuta, ale zůstává připojen GPS přijímač. Zásobník cílových bodů je prázdný a umožňuje uživateli nové zadání. Blok “Navigace” je uveden do inicializačního vzhledu.

## 8. ZÁVĚR

Na základě teorie systému DGPS popsané v kapitole 2 byly zvoleny nejvhodnější typy přijímačů, které byly součástí srovnávacího měření. Dílčí výsledky pro přijímač Navilock NL-303P jsou zmíněny v kapitole 3. Ze zobrazených grafických závislostí můžeme určit přesnost zařízení 10m. Vzhledem k potřebě řídit robota i na velmi úzkých komunikacích je dosahovaná přesnost určení souřadnic polohy nedostatečná. Přesto byl tento typ přijímače pro svoji nejmenší základní chybu zvolen k aplikaci v DGPS.

Návrh a fyzickou realizaci referenční stanice robota popisuje kapitola 4. Zvolený princip generování korekcí pozice je méně přesný než korekce zdánlivých vzdáleností. Jejich využití však vede ke zpřesnění výsledků při výrazně jednodušší koncepci měřicího řetězce a nižších pořizovacích nákladech. Pro práci se systémem bylo navrženo několik řídicích funkcí, které jsou součástí celkového navigačního programu. Slouží k zadávání hodnot referenční stanice, ukládání výsledků, interpretaci aktuálních dat, generování a aplikaci korekcí.

Měření polohy v systému GPS a realizovaném DGPS je popsáno v kapitole 6. Grafické vyhodnocení využívá histogramů zeměpisných délek a šířek nebo rozložení bodů v závislosti na vzdálenosti od středu os (umístěný přijímač). Porovnáním těchto průběhů lze zjistit, že při DGPS je výrazně vyšší četnost bodů v okruhu 5m. Na rozdíl od GPS, který pro vzdálenost 10 až 15m vykazuje přibližně stejný výskyt měřených souřadnic (obrázky 6.4 a 6.5). Z histogramů lze vyčíst zúžení pásma délky/šířky, které mají alespoň minimální četnost, a naopak nárůst četnosti středových hodnot délek nebo šířek (obrázky 6.6 a 6.7, 6.8 a 6.9). Na základě těchto závěrů lze podpořit teoretické poznatky o zpřesnění užitím korekcí, i když míra zlepšení určení polohy stále nedosahuje potřeb navigace.

Navigační algoritmy jsou popsány v kapitole 7, kde je podrobně konzultována možnost použít GPS pro orientaci v prostoru (natočení objektu). Vzhledem k chybějícím součástem vyšších řídicích algoritmů nebylo možno navržený software zkoušet na robotovi. Proto byly zmíněné výstupy navigace (otáčení a směr pohybu) simulovány člověkem za účelem ověření správné funkčnosti programu.

## 9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HRDINA Z., PÁNEK P., VEJRAŽKA F., *Rádiové určování polohy*, Praha, 1995, 259s, ISBN 80-01-01386-3
- [2] STEINER I., ČERNÝ J., *GPS od A do Z*, Praha:eNav, 2006, 259s, ISBN 80-239-7516-1
- [3] FARRELL J., BARTH M., *The global positioning system and inertial navigation*, The McGraw-Hill companies, 1999, 340s, ISBN-0-07-022045-X
- [4] [www.robotika.cz](http://www.robotika.cz)
- [5] [www.aurelwireless.com](http://www.aurelwireless.com)
- [6] [www.navilock.de](http://www.navilock.de)
- [7] [www.elpro.com](http://www.elpro.com)
- [8] [www.cs.wikipedia.org/wiki/UTM](http://www.cs.wikipedia.org/wiki/UTM)
- [9] [www.gpsy.com/gpsinfo/geotoutm](http://www.gpsy.com/gpsinfo/geotoutm)

## **10. PŘÍLOHY**

Na přiloženém CD jsou zmíněné programové funkce, včetně zdrojových kódů, a kompletní navigační software.