

ANOTACE

Teoretické poznatky o možnostech měření magnetického pole Země. Popis systému pro práci s GPS přijímačem signálu systému. Určení polohy pomocí Dead Reckoning s následnou datovou fúzí kompasu a GPS. Návrh navigačního subsystému robotu včetně realizace.

KLÍČOVÁ SLOVA

GPS, elektronický kompas, navigace, robot

ANNOTATION

Theoretical information about sensor used for measuring earth's magnetic field. Description of software, that tend GPS receiver. Finding objects position by Dead Reckoning method. Design data fusion from compass and GPS. Proposal of complete navigation system for robot, which contain mentioned sensors.

KEY WORDS

GPS, electronic compass, navigation, robot

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACEČEK, I. *Datová fúze satelitní navigace a kompasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 46 s.
Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ	8
2.1 Princip existence geomagnetického pole	8
2.2 Parametry geomagnetického pole	11
3. PRINCIPY MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE	14
3.1 Historie kompasu	14
3.2 Elektronický kompas	15
3.2.1 Flux-gate magnetometry	17
3.2.2 Indukční magnetometry	19
3.2.3 Magnetometry s Hallovým jevem	19
3.2.4 AMR magnetometry	20
4. REALIZACE NAVIGAČNÍHO SUBSYSTÉMU	24
4.1 Popis hardwareové zapojení	24
4.2 Programové zpracování navigačních dat	27
5. NÁVRH A REALIZACE DATOVÉ FÚZE GPS A KOMPASU	33
5.1 Měření azimutu pomocí GPS	33
5.2 Algoritmus datové fúze	36
6. ZÁVĚR	40
7. POUŽITÁ LITERATURA	41
8. PŘÍLOHY	42
8.1 Měření azimutu pomocí GPS	43
8.2 Datová fúze GPS a kompasu	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 : Průběh siločar magnetického pole Země [11]	8
Obr. 2.2 : Mapa rozmístění magnetických pólů a rovníku na Zemi [11].....	9
Obr. 2.3 : Zobrazení vektoru geomagnetického pole [10]	10
Obr. 3.1 : Příklad ručního kompasu s možností určení azimutu [4]	15
Obr. 3.2 : Měřicí rozsahy různých principů magnetometrů [12].....	16
Obr. 3.3 : Náskres principu jednoosého Flux-gate magnetometru [12]	18
Obr. 3.4 : Náskres principu Hallova jevu [6].....	20
Obr. 3.5 : Změna orientace domén AMR senzoru při působení mag. pole [12]	21
Obr. 3.6 : Graf závislosti relativní změny odporu na úhlu θ [12].....	22
Obr. 4.1 : Moduly Magellan DG14 pro realizaci DGPS.....	24
Obr. 4.2 : Umístění modulu GPS na robotu	25
Obr. 4.3 : Elektronický kompas CMPS03 s popisem pinů [8]	26
Obr. 4.4 : Blokové schéma navigačního subsystému robotu	27
Obr. 4.5 : Základní struktura řídicího programu robotu	28
Obr. 4.6 : Vývojový diagram navigačního algoritmu	30
Obr. 5.1 : Porovnání měřených hodnot azimutu pro různé rychlosti pohybu	36
Obr. 5.2 : Grafické zobrazení modelu robotu.....	37
Obr. 5.3 : Určení polohy datovou fúzí GPS a kompasu.....	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 : Přehled prvků geomagnetického pole	12
Tab. 2.2 : Charakteristické hodnoty složek vektoru magnetického pole	13
Tab. 5.1 : Definice vybraných dynamických režimů přijímače DG14	33
Tab. 5.2 : Vyhodnocení měření azimutu pomocí GPS	34
Tab. 8.1 : Měření azimutu GPS při různých rychlostech	43
Tab. 8.2 : Datová fúze GPS a kompasu	44

1. ÚVOD

V současné době je pro určování polohy a navigace venkovních mobilních zařízení často využíváno družicových systémů. Především se jedná o nejrozšířenější systém GPS, ale funkční nebo ve vývoji jsou také další projekty. Při aplikaci systému v libovolné oblasti (zejména se zaměřením na mobilní robotiku) je podstatná znalost možností a omezení daného přístupu. V případě navigace je pak podstatnou informací azimut uživatele a znalost přesné polohy.

Při měření geomagnetického pole je užíváno několik principů snímání. Aplikací těchto snímačů jsou moderní elektronické kompas, které slouží v navigačních systémech pro určení směru objektu. Dalším přínosem je možnost určování polohy objektu na základě znalosti matematického modelu. Z navržených systémů je snaha dosáhnout datovou fúzí odstranění nedostatků GPS (určování azimutu, stínění signálu družic, ...).

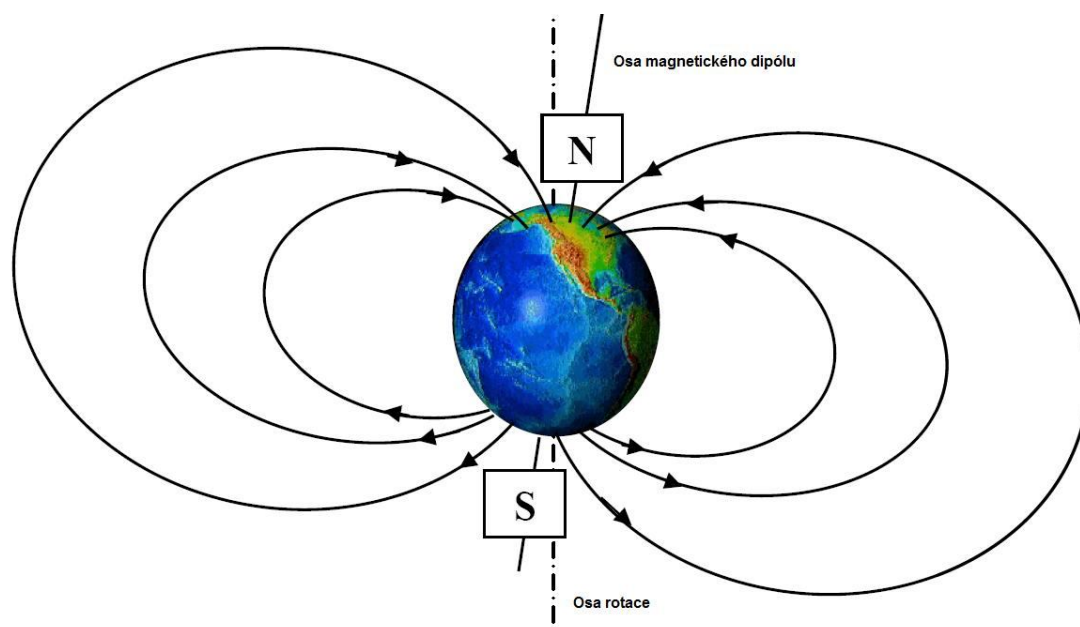
Navigační algoritmy jsou vyvíjeny pro nasazení na robotu, který vzniká v rámci diplomových prací čtyř-členného týmu. Základem je robotu Ackermannův podvozek. Na této platformě je umístěn senzorový subsystém, mikroprocesorová řídicí elektronika a PC s vyššími řídicími algoritmy.

2. MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ

Magnetické pole Země, které lze také nazývat geomagnetickým polem, je indukované magnetické pole v okolí Země. Toto pole sahá tisíce kilometrů od naší planety, kde je již tvarováno vlivem slunečního větru. Tím dochází ke stlačení pole na straně přilehlé ke Slunci. Naopak na odvrácené straně je pole unášeno, tedy protahováno. Mimo jiné je základem magnetosféry a slouží k ochraně živých organismů na Zemi. Tato kapitola je dále zaměřena na mechanismus vzniku geomagnetického pole a jeho charakteristické parametry, rozložení nebo změny v časových obdobích

2.1 PRINCIP EXISTENCE GEOMAGNETICKÉHO POLE

Na základě studie literatury [5] je geomagnetické pole indukované magnetické pole, ve kterém působí magnetická síla generovaná geodynamem uvnitř Země. K tomuto jevu dochází vlivem tření mezi polotekutým vnějším obalem jádra a vnitřním pevným jádrem Země. Celý proces tedy funguje na stejném principu jako hydrodynamické dynamo. Na obrázku obr. 2.1 je zobrazen průběh siločar popisovaného geomagnetického pole.



Obr. 2.1 : Průběh siločar magnetického pole Země [11]

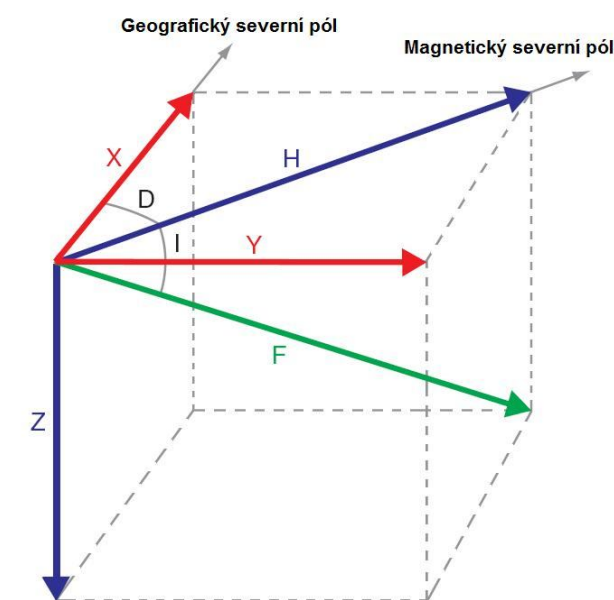
Magnetické pole Země má dipólový charakter, který je patrný z rozložení siločar na obrázku 2.1. Ty vycházejí z jižní polokoule a naopak zpět vstupují na polokouli severní. Tato místa, která mají největší intenzitu vertikálního magnetického pole, jsou označena jako magnetické póly. Osa symetrie pole není rovnoběžná s osou rotace Země, a proto se liší geografický jižní (severní) a geomagnetický jižní (severní) pól. Stejně jako existuje geografický rovník, je definován také magnetický rovník. Jedná se o křivku okolo Země, která spojuje místa s horizontálním magnetickým polem vzhledem k povrchu planety. Tato křivka není po obvodu hladkou křivkou jako geografický rovník, ale dochází k výkyvům její polohy. Na obrázku 2.2 je zobrazen její přesný průběh společně s umístěním magnetických pólů.



Obr. 2.2 : Mapa rozmístění magnetických pólů a rovníku na Zemi [11]

Přesná poloha severního a jižního magnetického pólu se v průběhu času nepatrně mění. Přibližná poloha v současnosti odpovídá blízkosti ostrova Ellesmere v kanadském souostroví (severního magnetický pól) a 1000km jižně od Austrálie (jižní magnetický pól).

Samotné geomagnetické pole lze popsat vektorem, který má určitou velikost a směr. Ve zvoleném souřadném systému je určen souřadnicemi X (směr ke geografickému severnímu pólu) a Z souřadnice totožná se směrem gravitační síly v daném bodě. Poslední souřadnice Y je definovaná tak, aby doplňovala pravoúhlý souřadný systém. Grafické zobrazení vektoru magnetického pole Země je na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 : Zobrazení vektoru geomagnetického pole [10]

V obrázku 2.3 je výsledný vektor geomagnetického pole F zobrazen zelenou barvou a jeho horizontální složka H barvou modrou. Úhel, který svírá vektor H s vektorem X se nazývá deklinace D (kladná hodnota odpovídá odklonu směrem k východu). Dalším parametrem je inklinace I , definovaná jako úhel mezi vektory H a F . Inklinace nabývá kladných hodnot pro sklon ke středu Země.

2.2 PARAMETRY GEOMAGNETICKÉHO POLE

V předchozí kapitole 2.1 je popsán princip generování geomagnetického pole a dále jsou zde popsány jeho základní zákonitosti společně s ukázkou definování vektoru pole v libovolném bodě na Zemi.

Na obrázku 2.1 je zobrazen dipólový charakter pole, jehož osa symetrie není totožná s osou rotace planety. Úhel odklonu mezi danými osami je přibližně roven hodnotě $11,5^\circ$. Mimo určitého odklonění je osa symetrie dipólu také posunutá mimo střed jádra Země. Hodnota posuvu odpovídá asi 700km ve směru k jihovýchodní Asii. Tento jev následně způsobuje, že je pole na vnějším povrchu planety nesymetrické. Dochází tak ke vzniku dvou anomálií v rozložení síly magnetického pole.

První z nich je SAA (*The south Atlantic anomaly*) anomálie, která označuje oblast jižního Atlantiku s velmi nízkou hodnotou intenzity pole vzhledem ke zbytku povrchu planety. Tento závěr odpovídá oddálení dipólové osy od středu Země, jak již bylo popsáno v předchozí části. Vlivem tohoto jevu došlo na druhé straně planety k přiblížení dipólové osy. To vedlo ke vzniku druhé anomálie SEAA (*The south east Asia anomaly*). Jedná se tedy o oblast na zemském povrchu, kde je intenzita geomagnetického pole vyšší než na odpovídajícím zbytku planety.

V kapitole 2.1 je popsán princip vzniku magnetického pole. Zmíněný postup generuje přibližně 90% celkové hodnoty intenzity pole. Dle hodnoty je patrné, že se jedná o hlavní složku a zbylých 10% je na něj superponováno ze sekundárních zdrojů. Mezi ty patří například ložiska kovové rudy vykazující magnetické vlastnosti, které se nacházejí v zemské kůře. Dále jsou to pak magnetická pole vznikající mimo zemský povrch. Zejména se jedná o generování vlivem tekoucích proudů v ionosféře a magnetosféře. Proudů samotné vznikají působením proudění iontů a elektronů. Významným prvkem jsou také pole způsobená proudy tekoucích v zemské slupce či vodními proudy v oceánech. V tabulce č. 2.1 jsou zapsány číselné hodnoty příspěvků jednotlivých zdrojů

Tab. 2.1 : Přehled prvků geomagnetického pole

Zdroj pole	B [nT]
Hlavní pole	25 000 – 65 000
Ložiska mag. rud	> 200
Ionosféra/magnetosféra	200 - 1000
Nejsilnější vyrobený magnet	$16 \cdot 10^9$

Poslední prvek tabulky 2.1 nepatří mezi zdroje geomagnetického pole. Nejsilnější vyrobený magnet je zde uveden pro porovnání hodnot indukcí vzhledem k magnetickému poli. Normálně vyrobené a dostupné magnety nedosahují takto vysokých hodnot jako uvedený příklad, přesto jsou stále řádově několikrát silnější než pole Země. To způsobuje velké problémy právě při jeho měření, ale tato problematika bude ještě diskutována v dalších kapitolách.

Podstatným faktorem je také časová stálost zmíněných parametrů. Zde není jednoduché pojmut veškeré jevy, protože časové měřítko, ve kterém dochází k určitým výkyvům, je značně široké. Například mikropulsy, které se vyskytují řádově v sekundách, způsobují změny o velikosti 1nT až 3nT. Ojedinele mohou pulsy dosahovat až k hodnotám 30nT. Na opačném konci časového měřítka se nachází intervaly v řádech milionů let. Do této kategorie lze zařadit reversaci orientace hlavního geomagnetického pole.

Obrázek 2.3 popisuje složky vektoru magnetického pole. V následující tabulce 2.2 jsou zapsány hodnoty jeho složek pro zajímavé lokality, mezi které patří póly a rovník. Připojeny jsou také data odpovídající oblasti České republiky. Pro vektorové složky F, H a Z jsou udávány velikosti magnetické indukce B a intenzity magnetického pole h. Parametr označený D poté odpovídá deklinaci a I udává hodnotu inklinace.

Tab. 2.2 : Charakteristické hodnoty složek vektoru magnetického pole

Složka		F	H	Z	D [°]	I [°]
Póly	B [μT]	70	0	70	-	± 90
	h [Am^{-1}]	50	0	50		
Rovník	B [μT]	30	30	0	-20 až -10	0
	h [Am^{-1}]	25	25	0		
Česká republika	B [μT]	47	20	43	0	65
	h [Am^{-1}]	38	16	35		

3. PRINCIPY KONSTRUKCE KOMPASU

Tato kapitola se věnuje celkovému přehledu možností měřit geomagnetické pole, jehož teoretický rozbor je v předchozí kapitole 2. Kromě přístupů k realizaci elektronických kompasů je konzultován také klasický kompas. Ten je i přes svoji nevhodnost pro použití v moderních měřicích systémech stále nedílnou součástí mnoha strojů a zařízení. Jedním z příkladů zůstává s nejčtetnějším zastoupením lodní doprava.

3.1 HISTORIE KOMPASU

Při pohledu na historický vývoj kompasu jako nástroje pro navigaci pochází první zmínky z Číny a to již z období 1000 let našeho letopočtu. Již dříve (400 let před naším letopočtem) používali vlastností kvádrů z magnetovce pro orientaci místností v budovách tak, aby byly v souznění se silami Země. Později sestrojili s pomocí zmíněného kvádrů první kompas pro navigační účely. Jednalo se o zařízení skládající se z nádoby s vodou, na jejíž hladině plula dřevěná destička. K této podložce byl připevněn magnetovec vhodného tvaru. Při rotaci s nádobkou se poté destička na hladině otáčela stále směrem k magnetickému severu.

V pozdější době došlo ke zdokonalení mechanismu kompasu, avšak základní princip je totožný s originálním návrhem. Vždy se jedná o těleso s magnetickými vlastnostmi (střelka kompasu), které má možnost se pohybovat (rotace na hrotu), uložené v definovaném prostředí. Dříve užívaná nádoba s vodou byla nahrazena uzavřeným prostředím, jenž bývá naplněno olejem (mezi další užívané patří například petrolej). Hlavní výhoda oproti dalším navigačním prvkům je, že jeho provoz nevyžaduje žádné přídatné napájení. Jeho ovládání je velmi jednoduché a není také omezován stíněním okolního prostředí jako systém GPS. Zde může docházet ke ztrátě signálu vlivem stromů, budov atd. Příklad současného přenosného kompasu je na obrázku 3.1.

Dnes jsou pro potřeby navigace využívány modernější postupy, které umožňují zapojení senzorů do složitějších měřicích systémů. Do této skupiny patří elektronické kompas, které poskytují měřená data v digitální nebo analogové

podobě. To umožňuje jejich další zpracování v komplexních navigačních produktech, které jsou používány v lodní (automobilové) dopravě a dalších odvětvích. I přesto se u lodní dopravy současně používá klasického kompasu jako záložního prvku vzhledem k jeho nezávislosti na napájení.



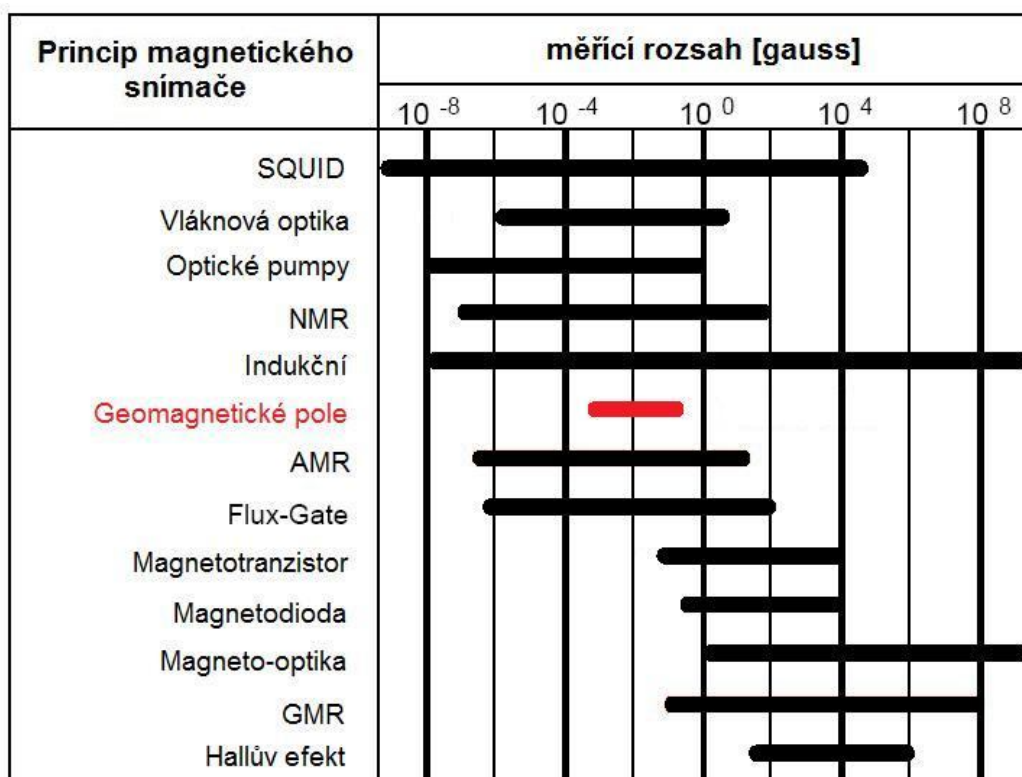
Obr. 3.1 : Příklad ručního kompasu s možností určení azimutu [4]

3.2 ELEKTRONICKÝ KOMPAS

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, je klasický kompas pro potřeby robotiky nepoužitelný. Při jeho užití by bylo potřeba realizovat vyhodnocení změny směru střelky tak, aby se data mohla dále použít ve výpočetních objektech (počítač, mikroprocesor) robota. Jedním z řešení je použít algoritmů pro zpracování obrazu ze snímací kamery, které by sledovaly pohyb střelky. Realizace takového zařízení by však byla velmi náročná a celková cena nepoměrně vysoká. Pro praktické aplikace v robotice jsou tedy nutné jiné postupy měření geomagnetického pole.

Vhodnějším řešením je využití elektronického kompasu. Jedná se o elektronické obvody, které jsou založeny na magnetometrech. Magnetometr je

určen pro měření magnetické indukce jedné nebo více složek daného magnetického pole. V závislosti na zvoleném principu konstrukce se mění jejich rozsahy měřené indukce. Na obrázku 3.2 je zobrazena tabulka s vybraným přehledem principů a k nim odpovídající rozsahy měřených indukcí.



Obr. 3.2 : Měřicí rozsahy různých principů magnetometrů [12]

Rozsahy měřených hodnot jsou v tabulce uvedeny s jednotkami *gauss*. Pro přepočet lze vyjádřit rovnici, kde 1gauss je roven 10^{-4} T. Z obrázku 3.2 je patrné, že vzhledem k přesně definovanému rozpětí hodnot odpovídajících geomagnetickému poli nelze aplikovat jakékoliv z řešení. Některé z možných návrhů jsou tyto:

- Flux-Gate magnetometry
- Indukční magnetometry
- AMR magnetometry
- GMR magnetometry

- Magnetometry s Hallovým jevem

V Následujících podkapitolách jsou podrobně popsány principy, parametry a aplikace zmíněných magnetometrů. Základní myšlenka využití magnetometrů v elektronickém kompasu je založena na použití alespoň dvou snímačů. Ty jsou připevněny na podkladu a svírají spolu pravý úhel. Tím je zajištěno měření jednotlivých složek výsledného vektoru B magnetické indukce geomagnetického pole. Výsledný úhel se poté vypočítá za pomoci trigonometrických funkcí dle vzorce 3.1.

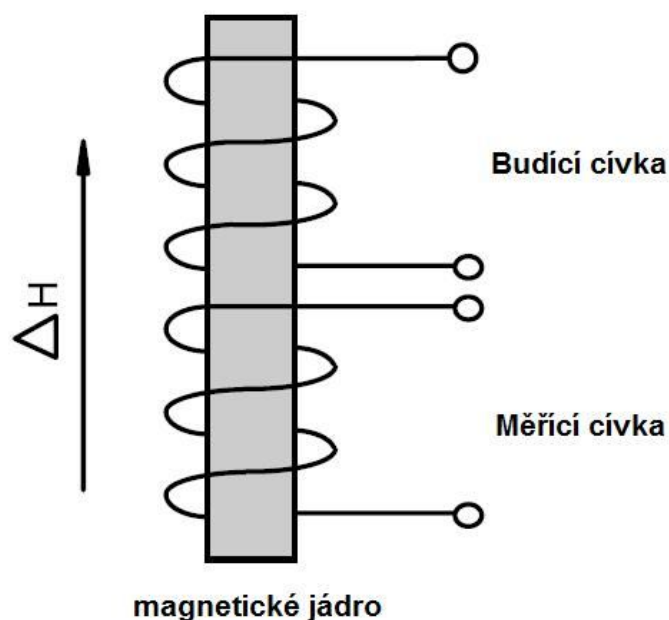
$$\psi = \arctan\left(\frac{B_y}{B_x}\right) \quad (3.2)$$

Hodnoty B_y , B_x odpovídají změřeným hodnotám magnetometrů v osách roviny. Vypočítaný úhel ψ svírá osa x se spojnicí středu souřadnic a magnetického severního pólu. Vzhledem k možnosti rotace objektu v prostoru po uzavřené kružnici nabývá hodnot 0° až $359,9^\circ$. Kde 0° je přímý směr k severnímu pólu a dále narůstá ve směru hodinových ručiček. Směr na východ je tedy indikován 90° , jih 180° a pro západ je to 270° .

3.2.1 Flux-gate magnetometry

Flux-gate magnetometry jsou jedny z nejběžnějších magnetometrů, které jsou používány v navigační technice – kompasech. Byly vyvinuty již kolem roku 1928 pro vojenské účely. Jednalo se o přístroje pro vyhledávání ponorek, které byly hrozbou spojeneckým lodím.

Princip snímače využívá dvojice cívek, jež jsou navinuty na feromagnetickém jádře. Grafické zobrazení jednoosého flux-gate snímače je na obrázku obr. 3.3. Materiálem vhodným pro tento typ jádra je například permalloy. Řídící signál je přiváděn na budící cívku a vyhodnocení probíhá na základě signálu z měřicí cívky. Jak již bylo řečeno, jedná se o jednoosý snímač, který je citlivý na změny pole ve směru šipky ΔH .



Obr. 3.3 : Nákres principu jednoosého Flux-gate

magnetometru [12]

Snímač je buzen signálem obdélníkového průběhu s definovanou frekvencí, která je nejčastěji 10kHz. Tento signál způsobuje oscilace jádra mezi body saturace. Vlivem změn vnějšího magnetického pole dochází ke změnám magnetické indukce jádra snímače. Signál výstupní (měřicí) cívky je přes jádro svázán s budícím signálem. Popsané jevy v jádře způsobí změny amplitudy ve vyhodnocovaném průběhu. Pro získání hodnoty magnetické indukce je signál dále zpracováván ve fázovém detektoru a filtrován přes dolní propust.

Konstrukce kompasu vyžaduje snímání složek pole alespoň ve dvou osách celkového vektoru. Snímač navržený na obrázku 3.3 je tedy nutné použít dvakrát a jejich směry citlivosti nastavit kolmo na sebe. Výhodnějším řešením je použití toroidového jádra místo zmíněného tyčového tvaru. Tato varianta umožňuje namotat přímo dvě snímací cívky v požadovaném natočení. Po získání dat z jednotlivých magnetometrů je již aplikován vzorec 3.1. Další možností práce s flux-gate magnetometry je vyhodnocování změny odporu nasyceného jádra. Tyto změny jsou opět ovlivňovány vnějším magnetickým polem v okolí snímače.

Z hlediska frekvenčního rozsahu změn jsou tyto magnetometry schopny měřit od statických polí (neměnných) až po frekvence 1kHz (ovlivněno volbou frekvence budícího signálu 10kHz). Odpovídající měřicí rozsahy jsou zobrazeny v tabulce na obrázku 3.2. Nevýhodou při nasazování v praktických aplikacích je velikost těchto zařízení vzhledem k ostatním integrovaným snímačům.

3.2.2 Indukční magnetometry

Na rozdíl od předchozího principu jsou indukční magnetometry používány až od roku 1990. Základním prvkem senzoru je cívka namotána na feromagnetickém jádře, ve kterém vlivem okolního geomagnetického pole dochází ke změnám permeability. Při vyhodnocování signálu se využívá L/R oscilátoru, kde je prvek indukčnosti L zastoupen popsanou měřicí cívkou. K udržení lineární oblasti se využívá posuvu vlivem připojeného stejnosměrného napětí na cívce. Při změně magnetického pole pak dochází k změně výstupní frekvence oscilátoru. Její vyhodnocení je již poměrně snadné například pomocí čítače v mikroprocesoru.

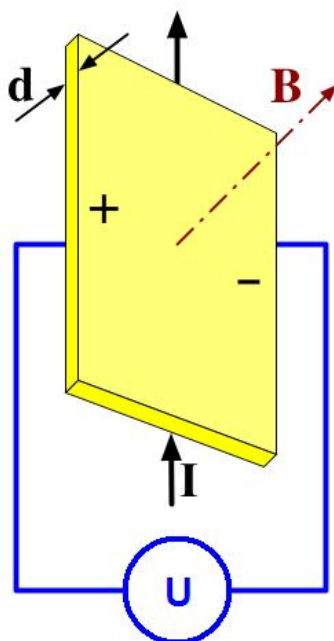
Výhodou indukčních magnetometrů je jejich jednoduchá konstrukce a nízká cena a také spotřeba. Oproti flux-gate snímačům mají navíc podstatně širší měřicí rozsah, jak plyne z obrázku 3.2.

Popsaný princip umožňuje měření opět pouze jedné osy výsledného vektoru magnetického pole. Pro použití ke konstrukci kompasu je nutné, stejně jako v kapitole 3.2.1, aplikovat alespoň dva snímáčí prvky v definovaném rozložení. V tomto případě musí být výsledný snímač mechanickou konstrukcí udržován nezávislý na náklonu robota (v současnosti se již používá ojediněle) nebo je nutné využít trojosého magnetometru s korekcí náklonu.

3.2.3 Magnetometry s Hallovyým jevem

Jak již z názvu vyplývá, je základem těchto snímačů aplikace Hallova jevu. Pokud polovodičovou (nejčastěji monokrystalickou) destičkou a určité tloušťce d protéká proud I , dochází vlivem působení vnějšího magnetického pole B k vychylování nosičů ve směru kolmém na směr pohybu. Vzniká tak potenciálový rozdíl U na příčných vývodech desky. Toto napětí je přímo úměrné protékajícímu

proudu, magnetické indukci a nepřímo úměrné tloušťce desky. Grafický popis principu je na následujícím obrázku 3.4.



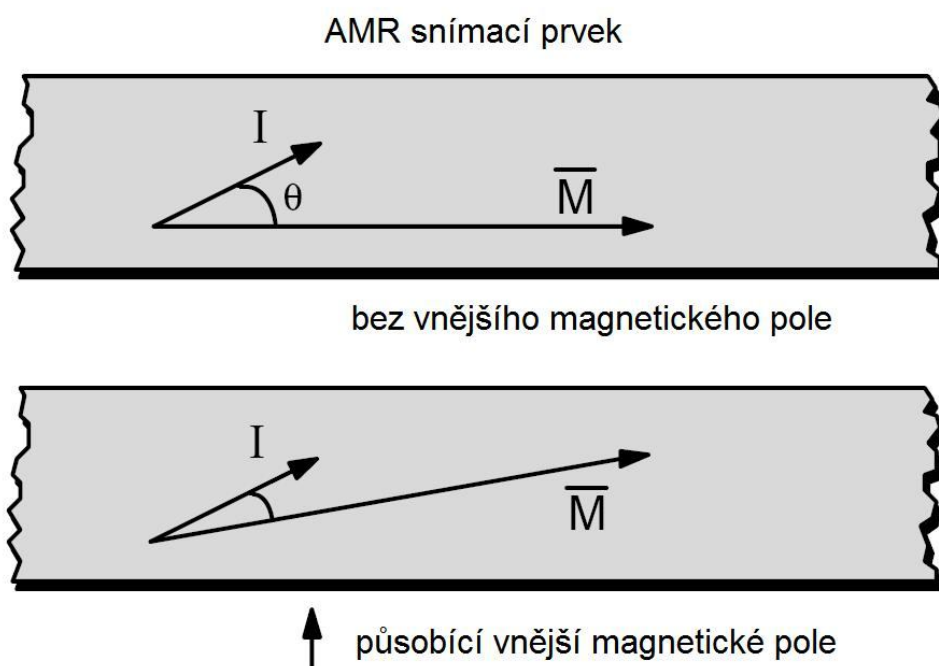
Obr. 3.4 : Nákres principu Hallova jevu [6]

Tohoto principu lze využít pro měření magnetických polí a následné realizaci spínačů, snímačů otáček nebo posunutí a také kompasů. Nejčastěji se jedná o obdélníkové destičky s tloušťkou 5 – 8 μm , které jsou vyráběny z křemíku, GaAS nebo InSb. V závislosti na kvalitě dosahují přesností 0,7 až 5% a rozsahy pracovních teplot jsou řádově 100°C. Celkové výstupní napětí snímače je mimo jiné závislé na Hallově součiniteli pro daný materiál. Ten vykazuje určitou teplotní závislost a je tedy nutné zajistit její kompenzaci.

3.2.4 AMR magnetometry

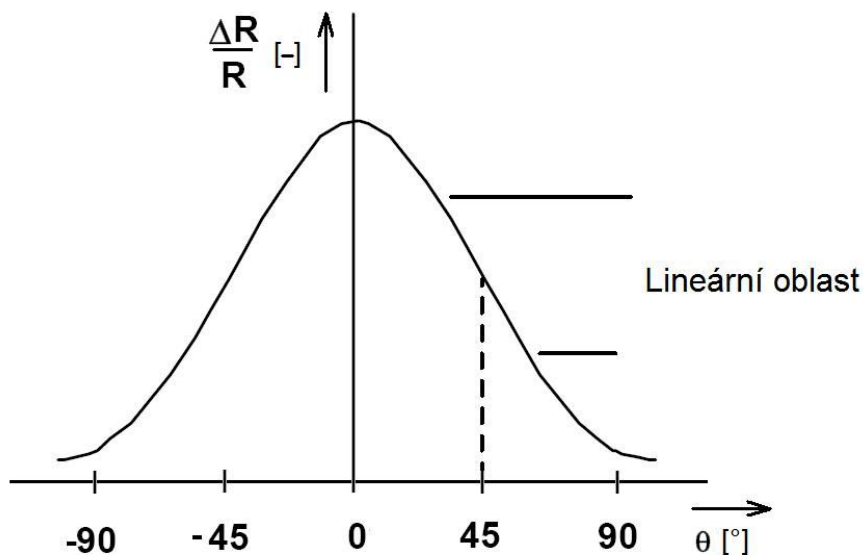
Další skupinou jsou AMR (*Anisotropic magnetoresistive*) magnetometry, které patří do skupiny senzorů založených na magnetorezistivním jevu. Ten byl poprvé pozorován v roce 1856 Williamem Thomsonem. Společně s technologií tenkých vrstev je tak umožněno vytvářet snímače využívající daný jev, které jsou lehce aplikovatelné v širokém spektru úloh.

AMR senzory jsou vyrobeny z tenkého permalloyového filmu na křemíkovém substrátu ve formě odporového prvku. Pro zajištění správné funkce je potřeba již při výrobě senzoru dosáhnout jednotného směru magnetických domén vrstvy. Toho je docíleno působením velmi silného magnetického pole, které nastaví všechny domény do směru M . Protékající proud poté svírá s tímto vektorem určitý úhel θ . Při působení vnějšího magnetického pole dochází k vychýlení vektoru M a tím i ke změně velikosti úhlu θ . Popsaný jev je zobrazen na obrázku 3.5.



Obr. 3.5 : Změna orientace domén AMR senzoru při působení mag. pole [12]

Hodnota odporu tenkého filmu se mění právě v závislosti na hodnotě definovaného úhlu θ , který je závislý na zjišťovaném působícím poli v jeho okolí. K vyhodnocení se užívá standardních metod pro měření odporu. AMR senzory se zapojují do mostů a nejčastěji bývá použit Wheastonův most. Popsaná závislost je zobrazena v grafu na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 : Graf závislosti relativní změny odporu na úhlu θ [12]

Z průběhu charakteristiky je patrné, že v relativní změna hodnoty odporu AMR snímače má pro rostoucí hodnotu úhlu θ od 0° do 90° klesající nelineární průběh. Maximální hodnota $\Delta R/R$ se rovná 2 – 3% v závislosti na kvalitě výroby. Pro záporné hodnoty je průběh souměrný podle osy hodnot změn odporu. Vzhledem ke zmíněné nelinearitě průběhu je pracovní oblast snímacího prvku posunuta jen do určité části charakteristiky, kterou lze považovat za lineární. Z obrázku 3.5 je patrné, že při nepůsobícím vnějším poli svírají vektory proudu a magnetické orientace domén úhel $\theta = 45^\circ$. Tím je nastaven pracovní bod snímače do středu lineární části charakteristiky a při vychýlení vektoru M jsou tak potlačeny vlivy nelinearity závislosti.

Magnetometry AMR jsou schopny měřit od statických polí až po frekvence řádově 1MHz. Jejich přesnost je velmi dobrá a s širokým pracovním rozsahem (porovnání na obrázku 3.2). Další výhodou je nízká spotřeba energie a možnost snadné integrace vzhledem k jejich malým rozměrům. Velký počet aplikací pro různá odvětví (automobilový průmysl, detekce předmětů, měření proudu, navigace, ...) společně s možností hromadné výroby způsobili prudký pokles ceny

oproti ostatním principů. V současnosti jsou těmito magnetometry nahrazovány dříve často používané snímače s Hallovou sondou.

Do skupiny snímačů využívající magnetoresistenční jev spadají také GMR magnetometry (*giant magnetoresistance*). Jejich struktura je složitější než u AMR prvků. Jedná se o dvě tenké vrstvy feromagnetické látky oddělené nemagnetickým materiálem. Vlivem vnějšího pole poté dochází ke změně odporu v rozsazích až 70%. Z obrázku 3.2 je patrné, že hodnoty měřených polí jsou podstatně vyšší než u snímačů s anizotropní magnetorezistencí.

4. REALIZACE NAVIGAČNÍHO SUBSYSTÉMU

V předchozí kapitole 3 byl popsán teoretický princip měření magnetických polí včetně různých koncepcí řešení elektronického kompasu. Tato část je zaměřena na popis navigačního systému robotu, který je primárně určen pro vnější použití.

4.1 POPIS HARDWAREOVÉ ZAPOJENÍ

Hardwareová část navigačního subsystému robotu se zakládá na GPS přijímači v referenční stanici a na straně pozorovatele. Jedná se o zařízení od firmy Magellan s typovým označením DG14. Na obrázku 4.1 jsou zobrazeny zmíněné GPS moduly včetně mechanického zabezpečení pro aplikaci v terénu.

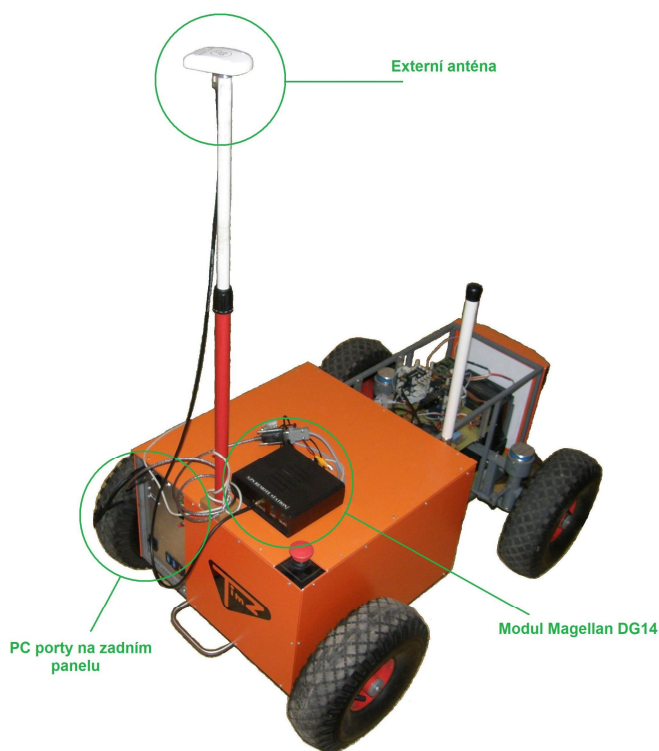


Obr. 4.1 : Moduly Magellan DG14 pro realizaci DGPS

Každý z modulů je vybaven rozhraním pro připojení napájení 5V DC. Přijímač umístěný na robotu využívá pro napájení rozhraní USB přímo ze základní desky zabudovaného počítače. Dále jsou zde dvě komunikační rozhraní RS 232 označeny jako *PortA* a *PortB*. *PortA* je využíván pro připojení GPS k robotu (připojen je do jednoho z COM portů počítače). Další možností je využití převodníku RS232-USB a následné využití komunikace přes USB rozhraní. Taková varianta je vhodná například při využití notebooku jako výpočetní jednotky. Při nastavení parametrů komunikace se používá defaultní nastavení výrobce:

- komunikační rychlost 9600 baud
- stop bitů 1
- datových bitů 8
- bez paritního bitu

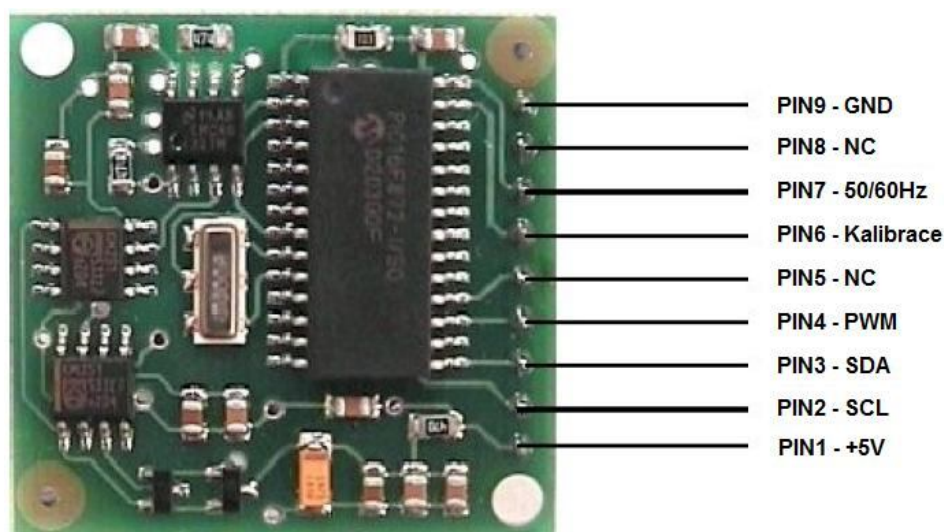
Druhý *PortB* se používá pro připojení bezdrátového modulu ELPRO 805U, který se stará o bezdrátovou komunikaci s referenční stanicí. Ta je vybavena totožným přijímačem. Oba přijímače jsou vybaveny externí anténou, která je připojena přes koaxiální kabel a SMA koncovkou. Tato anténa by měla být umístěna co nejvýše, aby nebyla kryta okolním prostředím. Zmíněnou podmínku lze při aplikaci navigace robotu splnit pouze částečně. V jeho zadní části je připraven speciální „stožár“, který slouží pro uchycení kamery. S výhodou bylo využito tohoto konstrukčního prvku a anténa byla umístěna na jeho vrchol. Popsané uspořádání je zobrazeno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 : Umístění modulu GPS na robotu

Definovaná přesnost určení polohy horizontálních souřadnic je 0,9m a pro určení výšky je to 1,6m. Z pohledu provozu ve venkovních podmínkách je důležitý teplotní rozsah pro funkci zařízení. Moduly DG14 je možné provozovat v rozmezí teplot od -30°C do 70°C. Další parametry lze nalézt v dokumentaci výrobce [7].

Dalším snímačem, který tvoří navigační subsystém robotu je elektronický kompas CMPS03. Daný kompas je vytvořen speciálně pro účely robotiky. Měření magnetického pole Země se provádí pouze ve dvou osách, proto je celé zařízení velmi náchylné na jakékoli náklony z vodorovné polohy. Na obrázku 4.3 je zobrazen magnetometr společně s popisem vývodů.

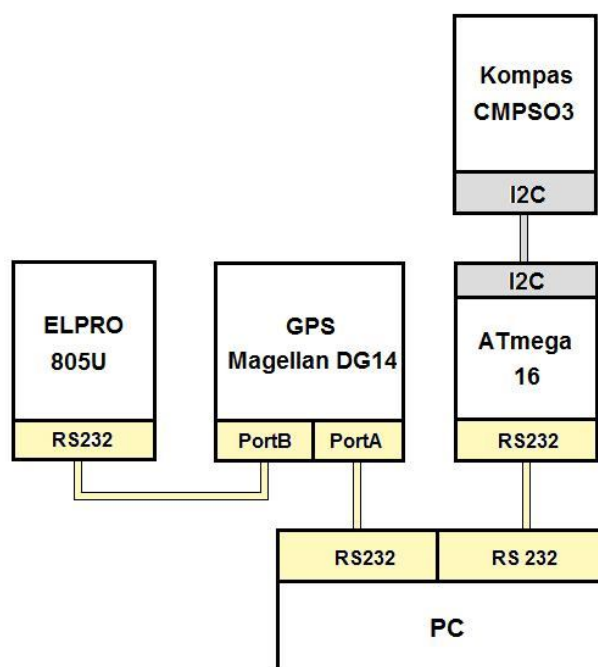


Obr. 4.3 : Elektronický kompas CMPS03 s popisem pinů [8]

Z obrázku 4.3 je patrné, že snímač umožňuje podávat informace o měřeném azimutu na PWM výstup (PIN4). Časová délka pulsu se na stupňovou míru přepočítává na základě rovnice $100\mu s = 1^\circ$ (od měřené hodnoty je nutné odečíst offset 1ms). Druhým způsobem je komunikace přes sběrnici I2C (PIN3,2) s připojeným mikroprocesorem (tato varianta je realizována v našem robotu, kde je využito ATmegy16). Ten slouží jako převodník I2C na sériové rozhraní RS232, přes které je již připojen k výpočetní jednotce robotu. Samotný magnetometr je dále

napájen 5V DC (PIN1, zem na PIN9) a umožňuje uživateli provádět kalibraci (PIN6), případně zapnout filtraci 50/60Hz (PIN7). Zbylé piny zůstávají nevyužity. Popis komunikace po I2C a algoritmy práce mikroprocesoru nejsou dále konzultovány, protože nejsou předmětem zadání. Jedná se o přehledový popis realizace s konstatováním, že výsledkem jsou výstupní hodnoty azimutu v rozsahu 0° - $359,9^{\circ}$. Tato data jsou zpracovávána navigačním algoritmem.

Popsané hardwarové uspořádání snímačů navigačního systému robotu je základem pro realizaci programového vybavení vyšších řídicích algoritmů. Ty jsou popsány v následující kapitole 4.2. Na obrázku 4.4 je blokové schéma popsáno uspořádání senzorů.

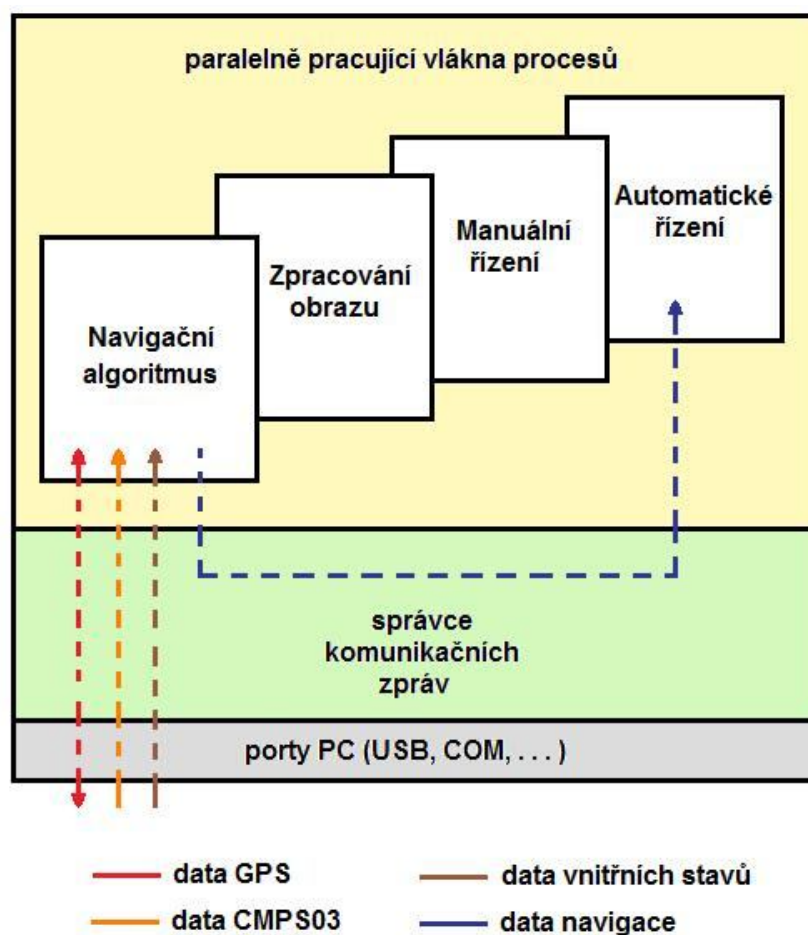


Obr. 4.4 : Blokové schéma navigačního subsystému robotu

4.2 PROGRAMOVÉ ZPRACOVÁNÍ NAVIGAČNÍCH DAT

V předchozí kapitole 4.1 je popsáno fyzické uspořádání a zapojení navigačních snímačů, které je poté blokově naznačeno na obrázku 4.4. Následující kapitola popisuje programovou nastavbu pro zpracování a vyhodnocení dat

získaných z GPS a kompasu. Robot je vybaven zabudovaným PC, které slouží jako jeho hlavní výpočetní jednotka. Na počítači je používán operační systém ArchLinux (jak již z názvu vyplývá, jedná se o jednu z distribucí Linuxu). Dále popsané algoritmy jsou realizovány v objektově orientovaném programovacím jazyce C++. Na obrázku 4.5 je naznačena základní struktura řídicího programu robotu.



Obr. 4.5 : Základní struktura řídicího programu robotu

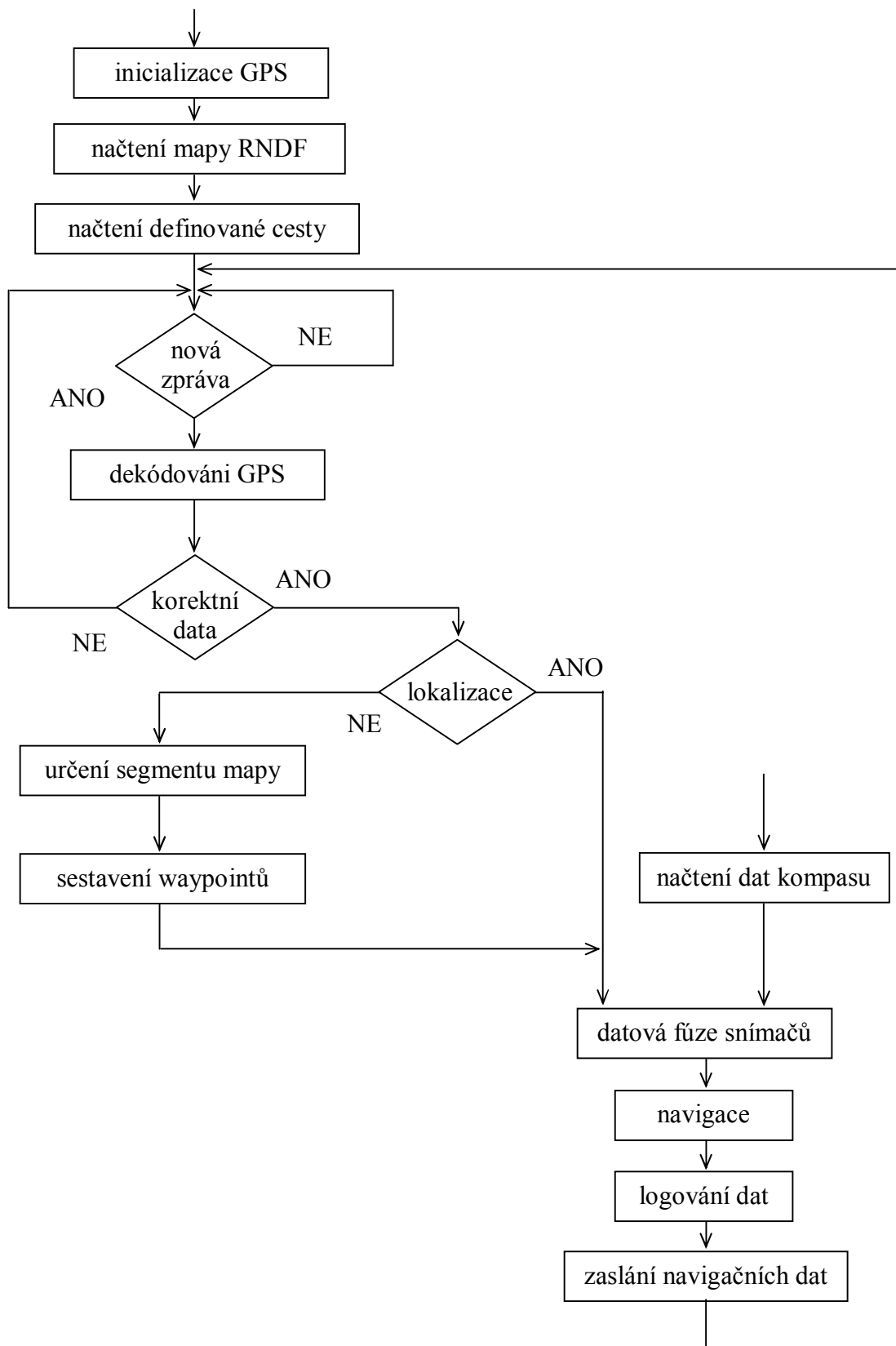
Základní řídicí program se skládá ze dvou vrstev, které jsou nástavbou hardwarového vybavení počítače. Prostřední vrstva “*správce komunikačních zpráv*” zajišťuje komunikaci mezi touto vrstvou a vrstvou paralelně pracujících vláken procesů. Nejvyšší vrstva obsahuje vlákna, která řeší dílčí problémy (navigace, zpracování obrazu, ...). Při předávání dat mezi vlákny nebo mezi vláknem a porty se

definují komunikační zprávy. Ty obsahují identifikátor, určení adresy (definice adresáta zprávy) a samotná data. Vytvořené zprávy jsou pravidelně kontrolovány a *správce zpráv* se stará o jejich automatické směrování. Popsaný princip slouží pouze pro popis umístění navigačního algoritmu v celkovém řídicím programu. Podrobná analýza realizace je podstatně složitější, ale její řešení opět není předmětem práce. Dále bude konzultována pouze část věnovaná navigační sekci robotu.

Součástí obrázku 4.5 jsou také naznačené směry a typy dat, které souvisejí s navigačním algoritmem. Jednotlivé cesty zpráv jsou určeny čerchovanou čarou zakončenou šipkou, která definuje směr komunikace. Typ zprávy je rozlišen barevným značením. Vstupní data algoritmu tvoří informace z GPS, kompasu a vnitřní stavové informace robotu (rychlosti poháněné nápravy, natočení předních kol, celková ujetá vzdálenost,...). Výstupní data zastupují zprávy pro GPS (inicializace, vyžádání zprávy, změna nastavení,...) a zpracovávané navigační informace. Ty jsou směrovány do vlákna "*Automatické řízení*", kde je na jejich základě rozhodnuto o dalším chování robotu.

Kompletní navigační algoritmus je umístěn v jednom z vláken programu, jak ukazuje obrázek 4.5. Vnitřní struktura vlákna je zobrazena vývojovým diagramem, který je na obrázku 4.6. Při spuštění programu dojde k vytvoření daného vlákna a provede se několik inicializačních kroků. Následně je vždy po příchodu nových dat z GPS přijímače provedena sekvence úkolů, na jejichž konci jsou zpracovaná data zaslána řídicímu vláknu. Program se poté vrací zpět na začátek nekonečné smyčky a čeká na příchod nové zprávy.

Inicializační bloky programu jsou provedeny pouze jednou a to ihned po vytvoření vlákna. Prvním krokem je zaslání nastavení GPS přijímače. Komunikaci lze realizovat dvěma typy zpráv. Nastavovací zprávy jsou určeny pro dlouhodobé definování funkce (periodické posílání NME zpráv, ...), naopak tázací zprávy slouží pro jednorázové získání informace z přijímače. Soupis všech zpráv přijímače včetně popisu jednotlivých parametrů příkazu je součástí dokumentace [7].



Obr. 4.6 : Vývojový diagram navigačního algoritmu

Po inicializaci GPS následuje načtení mapy prostředí robotu a požadované sekvence sektorů, kterými má projet. Zadaná mapa je uložena ve formátu RNDF, který definuje přesný protokol k tvorbě prostředí. Popis jednotlivých prvků souboru s tímto formátováním je v literatuře [9]. Podle této definice jsou všechny cesty v reálném prostředí rozděleny do dílčích virtuálních segmentů, které jsou pojmenovány jedním znakem abecedy a nesou také číselný identifikátor. Pro uložení segmentu v programu je připraven objekt, který jej zastupuje a má následující vlastnosti (v závorce je uveden příklad):

- Jméno segmentu (*D*)
- Index segmentu (*4*)
- Počet vstupů do segmentu (*3*)
- Pole se vstupními segmenty – segmenty, ze kterých do popisovaného segmentu lze vstoupit (*12, 3, 24*)
- Počet výstupů ze segmentu (*5*)
- Pole se výstupními segmenty – segmenty, do kterých lze z popisovaného segmentu vstoupit (*7, 11, 8, 19, 2*)
- Počet waypointů v segmentu (*3*)
- Pole s waypointy seřazenými od vstupu k výstupu (*[X₁, Y₁] [X₂, Y₂] [X₃, Y₃]*)

Celková mapa je poté vytvořena z kompletního listu všech segmentů, které jsou uspořádány do pole dle hodnoty svého indexu. Načtení požadované trasy je provedeno ze souboru, který obsahuje pořadí segmentů, jenž mají být projety. Následující částí vývojového diagramu na obrázku 4.6 je čekání na přijetí zprávy od GPS přijímače. Pro získání dat je využívána zpráva RMC, jenž je součástí komunikačního protokolu NMEA. Zapnutí opakovaného posílání zprávy na PortA s periodou opakování 1s se provede příkazem

\$PASHS,NME,RMC,A,ON,1

Z popsané zprávy jsou poté dekodována jednotlivá data. Ta jsou ukládána do programové proměnné a obsahují následující informace:

- UTC čas
- Příznak validních dat
- UTM souřadnice objektu X,Y
- Rychlost objektu
- Azimut objektu

Samotná RMC zpráva udává pozici objektu pomocí zeměpisné šířky a délky. Tato data jsou však dále obtížně zpracovatelná, protože například pro výpočet vzdálenosti dvou bodů nelze užít klasického výpočtu pomocí Pythagorovy věty. Proto se používá převod do souřadného systému UTM (universální transversální Mercatorův systém souřadnic). V tomto systému je určování polohy na povrchu Země založeno na jejím rozdělení do 60 zón. Každá z nich má vlastní střed souřadnic tvořený průsečíkem rovníku a středového poledníku zóny. Od tohoto bodu jsou měřeny vzdálenosti v metrech pro osu x (kladné hodnoty směrem k východu) a osu y (kladné hodnoty směrem k severu). Určitým omezením je, že výpočty vzdáleností bodů lze provádět pouze v případě, kdy oba náleží do stejné zóny.

Po provedení dekodování zprávy následuje kontrola korektnosti dat. A pokud jsou data konzistentní, mohou být dále zpracovávána. Pokud nebyla provedena lokalizace, dojde na základě zjištěné polohy k určení souřadnic v mapě. Na základě zjištěného segmentu a znalosti požadované trasy je sestavena sekvence waypointů, které jsou postupně voleny jako dílčí cíle robotu. Tento proces je proveden pouze při prvním určení polohy a následně je rovnou přistoupeno k datové fúzi s kompasem. Této části je věnována samostatná kapitola 5.

Dalším krokem je výpočet navigačních dat (vzdálenost k cíli, odchylka od požadovaného směru, kontrola dosažení cíle) a jejich zaslání do vlákna *Automatické řízení* pro další zpracování - rozhodování o chování robotu. Po dokončení popsané sekvence úkonů se celý program vrací na začátek a čeká na příchod další zprávy, která jej opětovně spouští.

5. NÁVRH A REALIZACE DATOVÉ FÚZE GPS A KOMPASU

V předcházející kapitole 4 byl realizovaný navigační subsystém robotu. Jedním z podstatných prvků celého systému je určení směru, kterým se objekt pohybuje (azimutu). Samotné GPS přijímače zprostředkovávají uživateli tento druh informace, ale jeho přesnost je velmi závislá na rychlosti objektu. Případným řešením je poté kooperace s elektronickým kompasem. V následujícím textu je proveden rozbor kvality měření azimutu pomocí GPS a na základě zjištěných výsledků je navržena datová fúze z představených snímačů.

5.1 MĚŘENÍ AZIMUTU POMOCÍ GPS

Prvním předpokladem je využití výhradně systému GPS, který poskytuje všechny navigační informace. Mimo polohy pozorovatele tak dále informuje o rychlosti pohybu a azimutu. Při provedeném experimentu byl přijímač GPS používán v jednotlivých dynamických režimech dle tabulky 5.1. Každý z režimů odpovídá určitému rozsahu povolených rychlostí a zrychlení (jak v horizontálním, tak vertikálním směru). Kompletní výpis všech voleb a jejich parametrů lze nalézt v [7]. K nastavení se používá následující komunikační zpráva (parametr *d1* je nahrazen dle tabulky 5.1):

\$PASHS,DYN,d1

Tab. 5.1 : Definice vybraných dynamických režimů přijímače DG14

Popis režimu	d1	$v_{HorMax} [m \cdot s^{-1}]$	$v_{VerMax} [m \cdot s^{-1}]$	$a_{HorMax} [m \cdot s^{-2}]$	$a_{VerMax} [m \cdot s^{-2}]$
Statický	1	0	0	0	0
Chůze	3	2	0.5	1	0.5
Automobil	5	50	3	10	1

Experiment probíhal vždy pro jednotlivě nastavené režimy s definovanou rychlostí objektu v dle tabulky 5.2 a neměnnou orientací v prostoru. Správný azimut objektu (robotu, automobilu) byl zjištěn ručním kompasem a je zastoupen parametrem A_{SP} . Z celkové sady naměřených dat byla vždy určena průměrná hodnota A_{AVG} (aplikace vzorce 5.1) a k ní odpovídající nejistota měření u_A (pomocí vzorce 5.2). Dále byla vzorcem 5.3 vypočítána rozšířená nejistota u s koeficientem rozšíření $k_r = 3$. Posledními parametry tabulky jsou absolutní Δ_A a relativní δ_A chyba měření (definovány rovnicemi 5.4 a 5.5)

Tab. 5.2 : Vyhodnocení měření azimutu pomocí GPS

dynamický režim	1	3	5
$v \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,00	0,68	11,27
$A_{SP} [^\circ]$	184	230	312
$A_{AVG} [^\circ]$	339,50	236,25	313,10
$u_A [^\circ]$	11,74	2,04	0,09
$u [^\circ]$	35,21	6,12	0,27
$\Delta_A [^\circ]$	155,50	6,25	1,10
$\delta_A [\%]$	85,52	2,72	0,68

Hodnoty parametrů pro jednotlivé režimy byly pro celkový počet n dat vypočítány následujícím postupem:

$$A_{SP} = \frac{\sum_{i=0}^n A_i}{n} \quad (5.1)$$

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (A_i - A_{SP})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (5.2)$$

$$u = k_r \cdot u_A \quad (5.3)$$

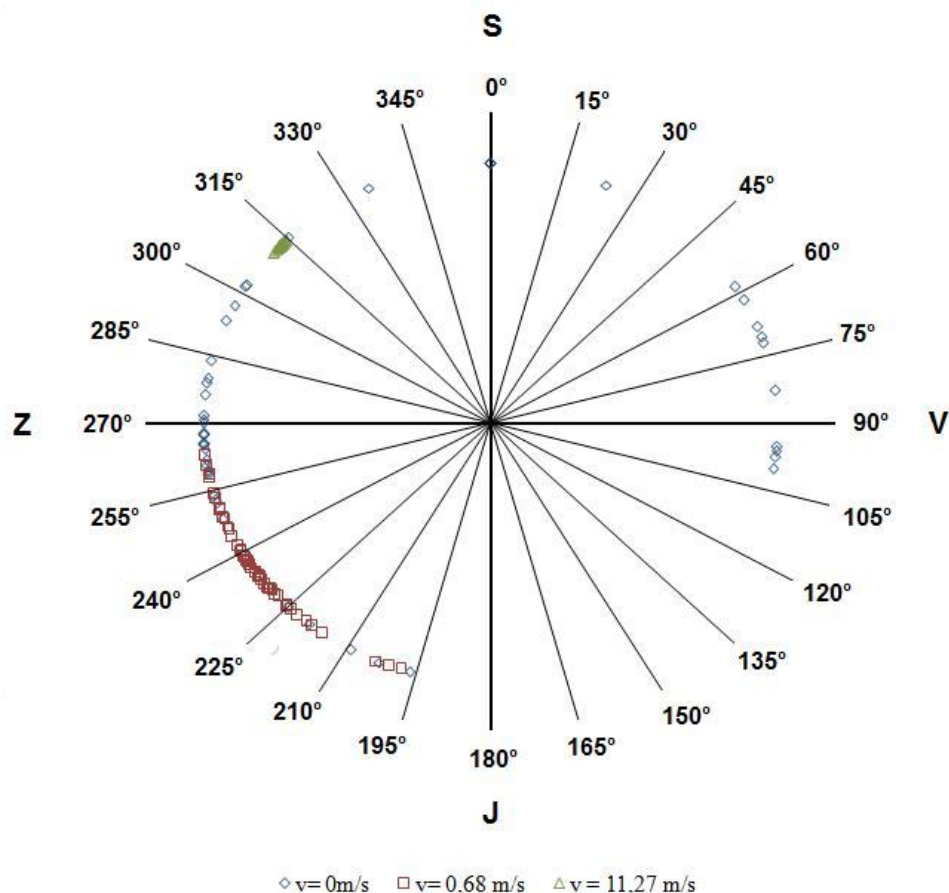
Vypočtená nejistota typu A dle vzorce 5.2 odpovídá svou hodnotou polovině intervalu, ve kterém se může správná hodnota azimutu vyskytovat s pravděpodobností 68%. Aplikací koeficientu rozšíření ve vzorci 5.3 je tato hodnota zvýšena na 99,7%. Výpočet absolutní a relativní chyby je definován:

$$\Delta_A = A_{AVG} - A_{SP} \quad (5.4)$$

$$\delta_A = \frac{A_{AVG} - A_{SP}}{A_{SP}} \cdot 100 \quad (5.5)$$

Z tabulky 5.2 je patrné, že přesnost měření azimutu pomocí GPS je silně závislá na rychlosti objektu, čímž byl potvrzen teoretický předpoklad. Ve statickém režimu byla hodnota azimutu určena s chybou 85% a z nejistoty měření je zřetelný velký rozptyl hodnot. Při zvýšení rychlosti dochází ke zlepšení vlastností měření. V dynamickém režimu 3 byla chyba měření snížena na 3% a nejistota měření byla určena na $\pm 6,12^\circ$. Dalším zrychlením (měření provedeno v automobilu) již klesla chyba azimutu pod 1%.

Na obrázku 5.1 jsou zobrazeny všechny změřené hodnoty experimentu. Z rozložení hodnot lze potvrdit vypočítané závěry. Statické měření je zastoupeno modrými značkami a z obrázku je patrné, že jejich rozložení je téměř nahodilé. Značky červených čtverců reprezentují měření při 3 dynamickém režimu jejich rozložení má podstatně menší rozptyl kolem správné hodnoty odpovídající 230° . Poslední měření udává výsledky získané jízdou automobilem (značeny zelenými trojúhelníky) v 5 dynamickém režimu. Zde je již rozptyl minimální a měření azimutu je velmi přesné.



Obr. 5.1 : Porovnání měřených hodnot azimutu pro různé rychlosti
 pohybu

5.2 ALGORITMUS DATOVÉ FÚZE

Na základě výsledků experimentu, který byl popsán v předchozí kapitole 5.1, je patrné omezení samotného systému GPS pro účely navigace. Pro realizaci plánování trasy je mimo polohy pozorovatele potřeba určit také jeho aktuální směr. Ten lze získat přímo z datové zprávy GPS přijímače, ale jeho přesnost podstatně souvisí s rychlostí objektu. Minimální limit lze stanovit na hodnotu přibližně $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

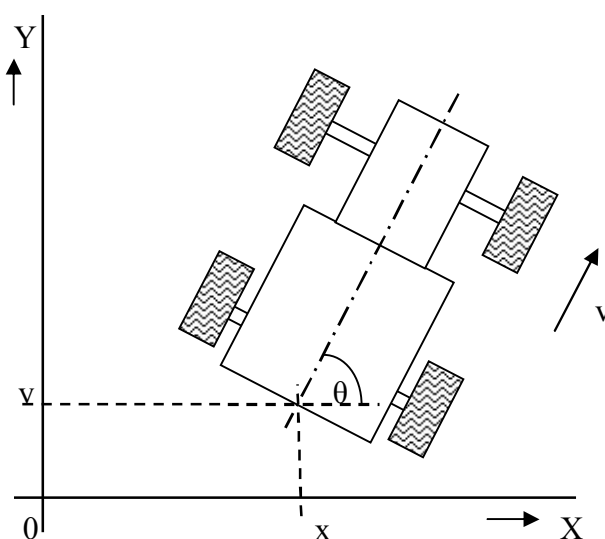
Vzhledem ke konstrukčním proporcím robotu nelze tuto hranici nikdy přesáhnout. Maximální rychlost, kterou se lze s robotem pohybovat je $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a proto je nutné využít kooperace systému GPS s daty získanými z elektrického kompasu. Datová fúze těchto snímačů probíhá ve 2 hlavních oblastech. První z nich je samotná navigace objektu. Ta probíhá na základě vyhodnocení difference mezi

požadovaným směrem a aktuálním kurzem robotu. Ten je vzhledem k nízké přesnosti GPS systému při daných rychlostech určován výhradně na základě informací od kompasu. Požadovaný směr je poté určován na základě vektoru v souřadném systému UTM, který je tvořen body aktuální polohy (určené na základě GPS) a waypointu. Rozdíl těchto úhlů, společně se zbývajícím vzdáleností k cíli, slouží jako základní navigační údaje pro plánování chování robotu.

Druhá oblast kooperace zmíněných snímačů probíhá při určování polohy. Mimo přesného natočení robotu v prostoru je možné získat také další informace týkající se jeho rychlosti. Tyto data lze aplikovat u navigační metody *Dead Reckoning*. Při znalosti rychlosti hnané nápravy v a natočení θ robotu lze určit rychlosti v jednotlivých osách Δx , Δy pomocí vzorců 5.6 a 5.7. Postupnou integrací těchto přírůstků k počáteční poloze je vypočítána vždy nová, aktuální poloha. Pro vzorkování dat s periodou 1s odpovídají vypočítané hodnoty přímo změně hodnot souřadnic v prostoru. Na obrázku 5.2 je zobrazen grafický popis modelu.

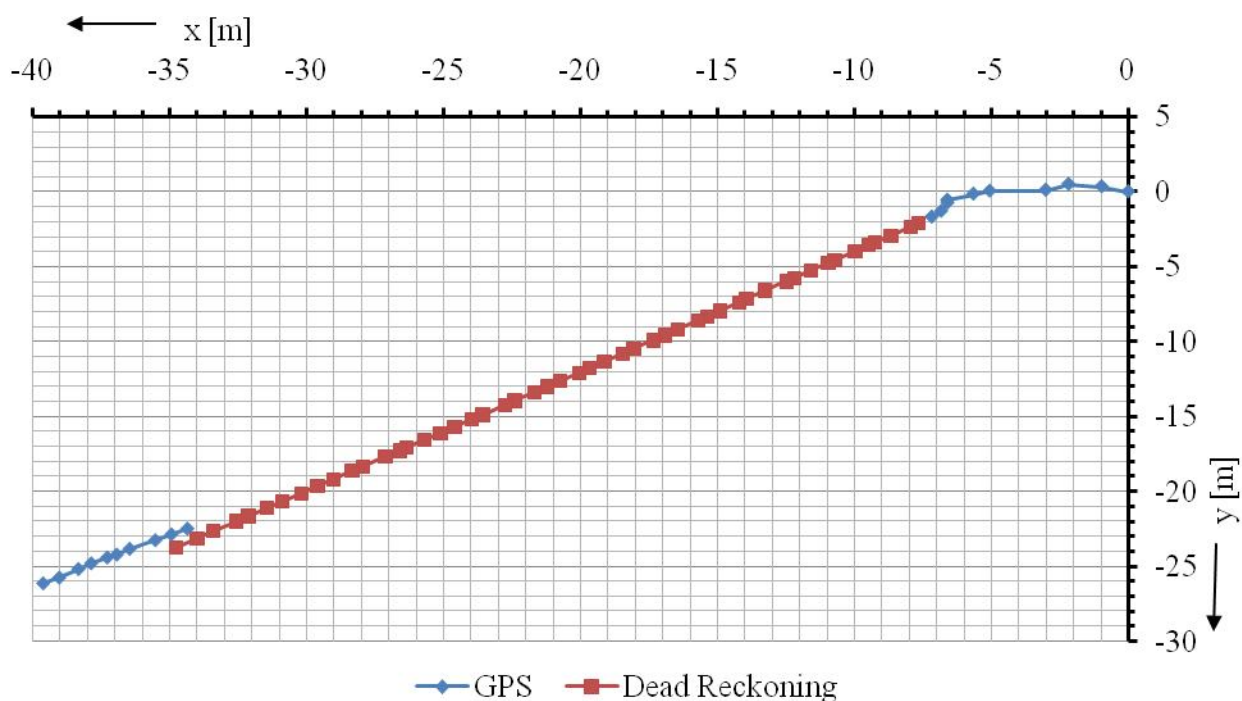
$$\Delta x = v \cdot \cos \theta \quad (5.6)$$

$$\Delta y = v \cdot \sin \theta \quad (5.7)$$



Obr. 5.2 : Grafické zobrazení modelu robotu

Popsaný princip určení polohy je využíván jako podpora systému GPS. Signál od družic může být v průběhu cesty stíněn různými objekty nebo je jednoduše nedostupný (příkladem může být jízda tunelem). V takových případech nelze určit polohu přijímače. Poslední známá poloha se tedy stává počáteční polohou pro implementovaný Dead Reckoning systém, který následně nahrazuje GPS systém do doby, než je signál opět přístupný. Popsaný algoritmus byl integrován do bloku *datová fúze snímačů* řídicího algoritmu na obrázku 4.6. Na obrázku 5.3 je zobrazen průběh určených souřadnic robotu při simulaci výpadku signálu GPS.



Obr. 5.3 : Určení polohy datovou fúzí GPS a kompasu

Na obrázku 5.3 je zobrazen průběh polohy robotu při jízdě z bodu [0,0] do cílového prvku [-40,-26]. V průběhu cesty došlo na úseku dlouhém 35m k výpadku signálu GPS (modrá křivka) a přepnutí na systém Dead Reckoning (červená křivka). Nevýhoda daného systému určení polohy spočívá v neustálém integrování přírůstků, které mimo užité informace obsahují také nepřesnosti způsobené snímači proměnných a vzorkováním dat. Dochází tak k postupnému

nárůstu chyby určení polohy robotu. Tento efekt se projevil při opětovném zapnutí GPS, který ukázal správnou polohu robotu posunutou o přibližně 1m zpět proti směru pohybu. V průběhu výpadku je však odchylka zvětšována postupně a vzhledem k předpokladu užití metody jen na krátké úseky, lze považovat dané nepřesnosti za akceptovatelné. Datovou fúzí GPS s elektronickým kompasem se podařilo docílit zlepšení navigačního systému robotu s ohledem na principiální omezení samotné družicové navigace (stínění signálu, měření azimutu ovlivněné rychlostí pohybu).

6. ZÁVĚR

V kapitole 2 jsou představeny základní parametry a charakteristické vlastnosti magnetického pole Země. V následující kapitole jsou představeny některé principy měření magnetických polí. Celkový přehled snímačů je zobrazen na obrázku 3.2 společně s udávanými měřicími rozsahy. Podrobně jsou poté konzultovány ty přístupy, které umožňují snímaná pole Země. Teoretický rozbor zmíněné problematiky vedl ke konstrukcím elektronických kompasů užívaným v navigačních systémech. Jako nejvhodnější varianta se v současnosti používají AMR magnetometry, zvláště pro svou nízké energetické nároky, cenu a hmotnost.

Pro realizaci navigace robotů ve venkovním prostředí byl navržen vyšší řídicí algoritmus, který je podrobně popsán v kapitole 4. Práce programu je naznačena vývojovým digramem na obrázku 4.6 a náskres kooperace dílčích řídicích programů je na obrázku 4.5. Celý systém je založen na využití GPS, který je podporován datovou fúzí s daty od kompasu. Hardwareové zapojení jednotlivých součástí ukazuje obrázek 4.4.

Samotný systém GPS není schopen dostatečně přesného určení azimutu objektu, pokud se nepohybuje rychlostí vyšší než 10m s^{-1} . Tento závěr byl vytvořen na základě experimentu z kapitoly 5.1. Výsledky nejistot určení azimutu při daných rychlostech jsou shrnuty v tabulce 5.2 a jednotlivá měření jsou vynesena do grafu 5.1. Vzhledem ke konstrukčním omezením robotu (nelze dosáhnout dané rychlosti), je nutné využít kooperace GPS s kompasem při samotné navigaci. Dalším přístupem je potlačení ztráty signálu GPS aplikací jiných metod na určení polohy při znalosti modelu robotu. Této části je věnována kapitola 5.2 a jako záložní systém určení polohy objektu byl zvolen algoritmus Dead Reckoning. Simulované použití kompletní realizace je na obrázku 5.3.

Dalšími úkoly práce na projektu navigace venkovního robotu bude ověření parametrů systému a jeho aplikační schopnosti v praxi. Dále je pak nutné se zaměřit na možnosti zlepšení určení přesné aktuální polohy robotu v daném prostředí.

7. 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] Přehled historie vynálezu kompasu
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Compass>>
[cit. 2009-11-21]
- [5] Teorie geomagnetického pole
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetické_pole_Země>
[cit. 2009-11-14]
- [6] Teoretický rozbor Hallova jevu
<http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect>
[cit. 2009-11-25]
- [7] Oficiální podklady pro GPS Magellan DG14
<<http://pro.magellangps.com/en/products/product.asp?PRODID=174>>
[cit. 2009-04-26]
- [8] Oficiální podklady pro CMPS03
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/M/P/S/CMPS03.shtml>
[cit. 2009-12-04]
- [9] Formátování RNDF souboru – mapy prostředí
<http://www.darpa.mil/GRANDCHALLENGE/docs/RNDF_MDF_Formats_031407.pdf>
[cit. 2009-10-08]

- [10] RICHARD B. LANGLEY, The magnetic compass and GPS
GPS World, září 2003, č.9, s.70-76
- [11] Přehled parametrů geomagnetického pole
<http://www.bu.edu/cism/cismdx/ref/Labs/2005_AFWA_ShortCourse/Lab03/refs/EarthMagneticField.pdf>
[cit. 2009-10-12]
- [12] CARUSO M. J., BRALAND T., SMITH C.H., SCHNEIDER R.,
A new perspective on Magnetic field sensing *Honeywell Inc.*, květen
1998

8. PŘÍLOHY

8.1 MĚŘENÍ AZIMUTU POMOCÍ GPS

Tab. 8.1 : Měření azimutu GPS při různých rychlostech

Měření	$\varphi_{v=0}$ [°]	$\varphi_{v=0.68}$ [°]	$\varphi_{v=11.3}$ [°]
1	23,65	233,53	313,17
2	239,56	233,71	312,87
3	265,50	248,13	313,12
4	265,43	225,04	313,03
5	219,27	198,23	313,30
6	296,88	239,18	313,70
7	269,90	228,50	313,19
8	293,10	236,79	313,40
9	0,00	241,68	313,30
10	259,23	223,95	313,32
11	261,83	260,59	313,13
12	58,28	218,50	312,80
13	278,79	237,91	312,78
14	251,99	238,76	312,63
15	301,97	237,63	313,10
16	248,29	222,12	312,72
17	264,25	250,20	310,80
18	271,62	240,33	311,47
19	283,75	220,11	313,52
20	202,75	262,73	314,68
21	72,13	215,67	314,53
22	0,00	227,91	314,16
23	253,92	203,59	313,88
24	259,34	234,86	313,77
25	279,81	231,63	312,81
26	267,57	243,86	313,05
27	224,84	244,04	312,50
28	265,24	233,40	312,07
29	258,65	243,94	312,74

Měření	$\varphi_{v=0}$ [°]	$\varphi_{v=0.68}$ [°]	$\varphi_{v=11.3}$ [°]
30	0,00	258,52	313,05
31	270,71	237,48	313,16
32	260,45	232,71	313,25
33	196,41	253,16	312,86
34	267,36	229,66	313,23
35	95,32	230,89	313,25
36	334,87	236,16	313,56
37	82,87	230,43	313,29
38	0,00	234,92	313,95
39	70,64	245,80	313,00
40	100,30	246,63	312,99
41	315,36	230,05	313,02
42	267,42	258,43	312,99
43	61,85	240,58	313,05
44	96,30	234,02	312,56
45	276,16	225,34	312,79
46	301,58	257,68	313,04
47	209,01	200,71	312,96
48	68,19	248,47	313,23
49	252,77	250,65	313,85
50	97,43	254,00	312,49

8.2 DATOVÁ FÚZE GPS A KOMPASU

Tab. 8.2 : Datová fúze GPS a kompasu

Měření	v [m.s-1]	azimut [°]	GPS		Dead Reckoning	
			x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
1	0,69	219,4	0,0000	0,0000	-	-
2	0,95	219,4	-0,9706	0,3405	-	-
3	0,69	218,0	-2,1759	0,4976	-	-
4	0,37	219,4	-3,0054	0,0994	-	-
5	0,39	219,4	-5,0455	0,0420	-	-
6	0,71	219,4	-5,6406	-0,1586	-	-
7	0,80	219,4	-6,5903	-0,5602	-	-
8	0,39	218,0	-6,5851	-0,7440	-	-

Měření	v [m.s ⁻¹]	azimut [°]	GPS		Dead Reckoning	
			x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
9	0,52	219,4	-6,8094	-1,3020	-	-
10	0,92	219,4	-7,1588	-1,6867		
11	0,66	219,4	-7,8689	-2,0745	-7,6724	-2,1086
12	0,34	219,4	-8,4581	-2,4660	-7,9352	-2,3245
13	0,95	219,4	-9,0532	-2,6666	-8,6718	-2,9295
14	0,73	218,0	-9,6426	-3,0510	-9,2484	-3,3800
15	0,29	219,4	-10,1122	-3,4391	-9,4754	-3,5664
16	0,64	219,4	-10,5819	-3,8201	-9,9691	-3,9720
17	0,96	218,0	-11,1717	-4,2116	-10,7284	-4,5652
18	0,29	219,4	-12,0014	-4,6027	-10,9514	-4,7484
19	0,81	218,0	-12,9559	-4,8135	-11,5889	-5,2465
20	0,78	219,4	-10,6447	-5,8661	-12,1941	-5,7436
21	0,38	219,4	-11,2341	-6,2505	-12,4848	-5,9823
22	1,00	218,0	-11,7090	-6,4478	-13,2725	-6,5978
23	0,87	219,4	-12,2936	-7,0230	-13,9454	-7,1505
24	0,35	219,4	-12,6432	-7,4006	-14,2122	-7,3697
25	0,89	219,4	-13,1128	-7,7887	-14,8970	-7,9322
26	0,61	219,4	-13,7073	-7,9894	-15,3669	-8,3181
27	0,44	219,4	-14,1771	-8,3704	-15,7093	-8,5994
28	0,95	219,4	-14,6467	-8,7585	-16,4459	-9,2045
29	0,60	219,4	-15,2366	-9,1429	-16,9078	-9,5839
30	0,55	218,0	-15,7056	-9,5310	-17,3382	-9,9201
31	0,93	218,0	-16,2956	-9,9154	-18,0691	-10,4912
32	0,52	219,4	-16,7705	-10,1126	-18,4673	-10,8182
33	0,84	218,0	-17,3597	-10,5041	-19,1291	-11,3353
34	0,68	218,0	-17,8346	-10,7013	-19,6651	-11,7541
35	0,51	219,4	-18,4246	-11,0858	-20,0593	-12,0779
36	0,87	218,0	-18,8942	-11,4738	-20,7415	-12,6108
37	0,60	219,4	-19,3588	-12,0386	-21,2033	-12,9902
38	0,61	218,0	-19,9480	-12,4301	-21,6825	-13,3646
39	0,91	218,0	-20,6524	-13,0016	-22,3971	-13,9229
40	0,47	218,0	-21,2421	-13,3931	-22,7666	-14,2116
41	1,05	219,4	-21,8267	-13,9683	-23,5749	-14,8755
42	0,52	218,0	-22,4212	-14,1690	-23,9850	-15,1959
43	0,79	219,4	-23,1256	-14,7405	-24,5942	-15,6963
44	0,66	218,0	-23,5952	-15,1286	-25,1180	-16,1056
45	0,75	218,0	-24,1852	-15,5130	-25,7068	-16,5656

Měření	v [m.s ⁻¹]	azimut [°]	GPS		Dead Reckoning	
			x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
46	0,81	218,0	-24,7743	-15,9044	-26,3443	-17,0636
47	0,31	218,0	-25,1245	-16,2821	-26,5919	-17,2571
48	0,68	218,0	-25,7137	-16,6736	-27,1239	-17,6727
49	1,06	218,0	-26,4238	-17,0613	-27,9562	-18,3230
50	0,48	218,0	-27,0078	-17,6366	-28,3339	-18,6181
51	0,90	219,4	-27,6029	-17,8372	-29,0307	-19,1904
52	0,74	218,0	-28,3125	-18,2250	-29,6113	-19,6441
53	0,76	219,4	-28,8971	-18,8002	-30,2006	-20,1281
54	0,88	218,0	-29,6066	-19,1880	-30,8950	-20,6706
55	0,70	218,0	-30,1958	-19,5794	-31,4472	-21,1021
56	0,86	218,0	-31,0255	-19,9706	-32,1253	-21,6318
57	0,56	218,0	-31,6101	-20,5458	-32,5679	-21,9776
58	1,07	218,0	-32,3197	-20,9336	-33,4084	-22,6343
59	0,75	219,4	-33,0244	-21,5122	-33,9897	-23,1118
60	0,97	218,0	-33,6138	-21,8966	-34,7571	-23,7114
61	0,66	218,0	-34,3180	-22,4752	-	-
62	1,04	219,4	-34,9080	-22,8596	-	-
63	0,63	218,0	-35,4977	-23,2511	-	-
64	0,84	218,0	-36,4419	-23,8293	-	-
65	0,29	218,0	-36,9114	-24,2174	-	-
66	0,81	218,0	-37,2662	-24,4113	-	-
67	0,86	219,4	-37,8560	-24,8028	-	-
68	0,45	218,0	-38,3258	-25,1838	-	-
69	1,12	218,0	-39,0299	-25,7624	-	-
70	0,56	218,0	-39,6199	-26,1468	-	-