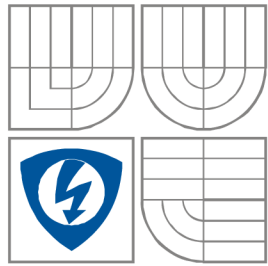


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SEBELOKALIZACE MOBILNÍHO ROBOTU VE VNĚJŠÍM PROSTŘEDÍ

OUTDOOR MOBILE ROBOT SELF-LOCALISATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

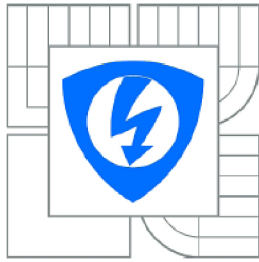
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. GABRIEL SÁRKÖZY

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Gabriel Sárközy

ID: 106758

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Sebelokalizace mobilního robotu ve vnějším prostředí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou kombinované automatické sebelokalizace ve vnějším prostředí, především GNSS, INS a odometrie. Navrhněte a realizujte vlastní systém sebelokalizace pomocí datové fúze z předložených snímačů. Kvalitu vlastního sebelokalizačního systému ověřte na testovacím polygonu Laboratoře teleprezence a robotiky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

HOLLAND, John. Designing Autonomous Mobile Robots. [s.l.] : Newnes, c2004. 335 s. ISBN 0-7506-7683-3.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cieľom projektu bolo vytvoriť jednotku, pre určenie polohy. Základom jednotky je platforma Netduino Plus, ku ktorej je pripojená meracia jednotka MTi-G a kamerový snímač, ktorý sa vytvoril špeciálne pre snímanie polohy bodov na školskom skúšobnom polygóne.

Pre konfiguráciu a testovanie meracej jednotky MTi-G sa použil modifikovaný program vyvinutú v predchádzajúcej semestrálnej práci.

Za účelom jednoduchej komunikácie platformy so snímačom sa vytvoril program schopný komunikovať so snímačom na nižšej úrovni rozhrania RS 232 bez použitia knižníc poskytovaných k snímaču.

Pre kontrolu polohy, ktorú udáva sebalokalizačná jednotka sa musel vytvoriť ďalší program pre prijímanie správ o polohe od presnejšieho lokalizačného systému, ktorý je umiestnený na robote. Základom presnejšieho lokalizačného systému sú prijímacie moduly Trimble DB982.

Kľúčové slová

Inerciálna navigácia, MTi-G, Xsense, Netduino, prevodník RS 232, počítačové videnie, Trimble, GPS

Abstract

The aim of this work was to create a self-localization unit. The basis of the unit is an electronic platform Netduino Plus, which is connected with a measurement unit MTi-G and a camera based sensor, which is able to detect the position of points on the schools testing polygon.

Configuration of the measurement unit MTi-G was done by a modified previously developed program.

The program of the platform uses lower level communication with the sensor without using predefined classes from the manufacturer. This should improve the speed of processing the data from the sensor.

To check the accuracy of the position provided by the self-localization unit another program was created. This program receives messages from a more accurate localization system that is mounted to the robot. The localization system is based on Trimble DB982 receiving modules.

Keywords

Inertial navigation, MTi-G, Xsense, Netduino, RS 232 converter, computer vision, Trimble, GPS

Bibliografická citácia:

SÁRKÖZY, G. *Sebelokalizace mobilního robotu ve vnějším prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 71 s. Vedúci diplomovej práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D..

Prehlásenie

„Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na téma *Sebelokalizace mobilního robotu ve vnějším prostředí* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zoznamu literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., spoločne s možnými trestnoprávnymi dôsledkami vyplývajúcich z ustanovení druhej časti, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: **17. mája 2012**

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Luďkovi Žaludovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: **17. mája 2012**

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod	10
2. Snímač Xsens MTi-G	11
2.1. Základná charakteristika snímača[1]	11
2.2. Použitelnosť snímača pre navigáciu robota	12
2.3. Použiteľné súradnicové systémy[1].....	13
2.4. Výstupné veličiny snímača.....	14
2.4.1. Orientácia[1]	14
2.4.2. Pozícia a rýchlosť	15
2.4.3. Kalibrované dáta	15
2.4.4. Nespracované dáta.....	16
2.4.5. Stavový register[1]	16
3. Popis modulu Netduino Plus	17
4. Program pre nastavenie MTi-G.....	19
4.1. Knížnica OpenGL	21
5. Komunikácia MTi-G s Netduinom.....	22
5.1. Prevodník RS 232.....	22
5.2. MT komunikačný protokol.....	23
5.3. Prepojenie Netduina so snímačom MTi-G.....	25
5.4. Popis programu pre Netduino	26
5.5. Microsoft .Net Micro Framework	28
6. Použitie meracej jednotky pre navigáciu	29
6.1. Inerciálna navigácia.....	29
6.2. Globálny družicový polohový systém	29
6.2.1. Použitie geodetické súradnicové systémy	31
6.3. Použitie Kalmanovho filtra XKF	33
7. Diferenčné zistenie polohy	35
7.1. Trimble BD982 GNSS prijímací Modul	35
7.2. Meracia zostava na robote	36
7.3. Program pre ukladanie meraní z Trimble.....	37
8. Program pre snímanie značky kamerou	38

8.1.	Použitá kamera.....	43
8.2.	Wrapper Emgu CV.....	44
8.2.1.	Knižnica OpenCV.....	44
8.3.	Houghova transformácia.....	45
8.4.	Testovací polygón Laboratória teleprezencie a robotiky.....	46
8.5.	UDP server a klient.....	46
9.	Vyhodnotenie presnosti polohy.....	48
9.1.	Výpočet vzdialenosti medzi dvoma súradnicami.....	48
9.2.	Príklad výpočtu.....	50
10.	Záver.....	53
	Literatúra.....	55
	Zoznamy.....	57
	Zoznam skratiek.....	57
	Zoznam obrázkov.....	59
	Zoznam tabuliek.....	60
	Zoznam príloh.....	60
	Obsah priloženého CD.....	60
	Prílohy:.....	61

1. ÚVOD

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvoriť sebelokalizačnú jednotku, ktorá používa meráciu jednotku MTi-G a kamerový snímač pre určenie polohy. Musel som vytvoriť kamerový snímač, ktorý vyhodnocuje snímané prostredie a v prípade detekcii bodu z testovacieho polygónu koriguje polohu získanú z meracej jednotky. Pre detekciu bodu sa vytvorila značka, ktorá je uložená nad bodom, pre efektívnejšie rozpoznanie. Kamerový snímač pozostáva z kamery pripojenej k počítaču. Počítač predstavuje výpočtovú jednotku kamerového snímača. Výstupom je korekcia v metroch od detekovanej značky.

Sebelokalizačnú jednotku som realizoval na platforme Netduino Plus. Bolo treba sa zoznámiť s platformou, vytvoriť návrh pre spojenie platformy so snímačom MTi-G a odskúšať komunikáciu medzi snímačom a platformou.

Snímač MTi-G je vybavený GPS anténou pre poskytovanie údajov o polohe a kurze snímača, ktoré sú potrebné pre navigáciu. Snímač dokáže merať zrýchlenie a uhlové natočenie v troch osách za pomoci MEMS snímačov. Taktiež je vybavený trojosím magnetometrom a senzorom statického tlaku. Počas meraní je snímač schopný poskytovať aj údaje o svojej teplote.

Platforma Netduino Plus je univerzálna a jednoducho programovateľná v C#. Využíva 32bitový mikrokontrolér s ARM7 architektúrou. Mikrokontrolér je na platforme rozšírený o ďalšie rozhranie ethernet a možnosť práce s micro SD kartou.

Pre nastavenie meraných údajov a overenie správnej komunikácie s počítačom som vytvoril aplikáciu, ktorá je schopná komunikovať s daným snímačom. Program bol realizovaný v programovacom jazyku C#. Umožňuje prístup k snímaču cez virtuálny sériový port. Snímač sa pri konfigurácii môže fyzicky pripojiť na USB rozhranie počítača. Vytvorený program sa použil pre nastavenie a overenie činnosti snímača pri testovaní prepojenia s platformou.

Za účelom prepojenia snímača s platformou sa musel vytvoriť prevodník z RS 232 na 5 V logiku. Keďže snímač komunikuje cez rozhranie RS 232 a platforma používa 3.3 V a toleruje 5 V logiku, použil sa MAX 3232.

Platforma je programovateľná v rovnakom programovacom prostredí v akom sa už v predchádzajúcej práci vytvoril program pre konfiguráciu a čítanie meraných údajov, avšak knižnica pre snímač nemohla byť použitá kvôli nepodporovaným komponentom. Preto som musel vytvoriť program pre komunikáciu na nižšej úrovni. Snahou bolo komunikovať čo najjednoduchším a efektívnym spôsobom, aby sa mikrokontrolér nezaťažoval.

Referenciou pri zisťovaní polohy bol lokalizačný systém školského robota založený na prijímacích moduloch Trimble BD982. Za účelom záznamu presnej polohy som musel vytvoriť ďalší program pre prijímanie GGA správ od prijímacieho modulu.

2. SNÍMAČ XSENS MTI-G

MTi-G[1] je snímač s integrovaným modulom GPS, s inerciálnou meracou jednotkou (IMU) a s procesorom pre navigačný, pozičný a kurzový referenčný systém (AHRS). MTi-G snímač sa skladá z MEMS inerciálnych senzorov a miniatúrneho GPS prijímača, taktiež obsahuje ďalšie pomocné snímače, ako aj trojosí magnetometer a snímač statického tlaku. Tento snímač sa vyznačuje relatívne vysokým výkonom vzhľadom k svojej veľkosti a hmotnosti je jednoducho použiteľný. MTi-G je určený pre relatívne robustné aplikácie a z hľadiska nastavenia je veľmi flexibilný, ponúka pokročilé nastavenia pre konkrétne scenérie použitia.

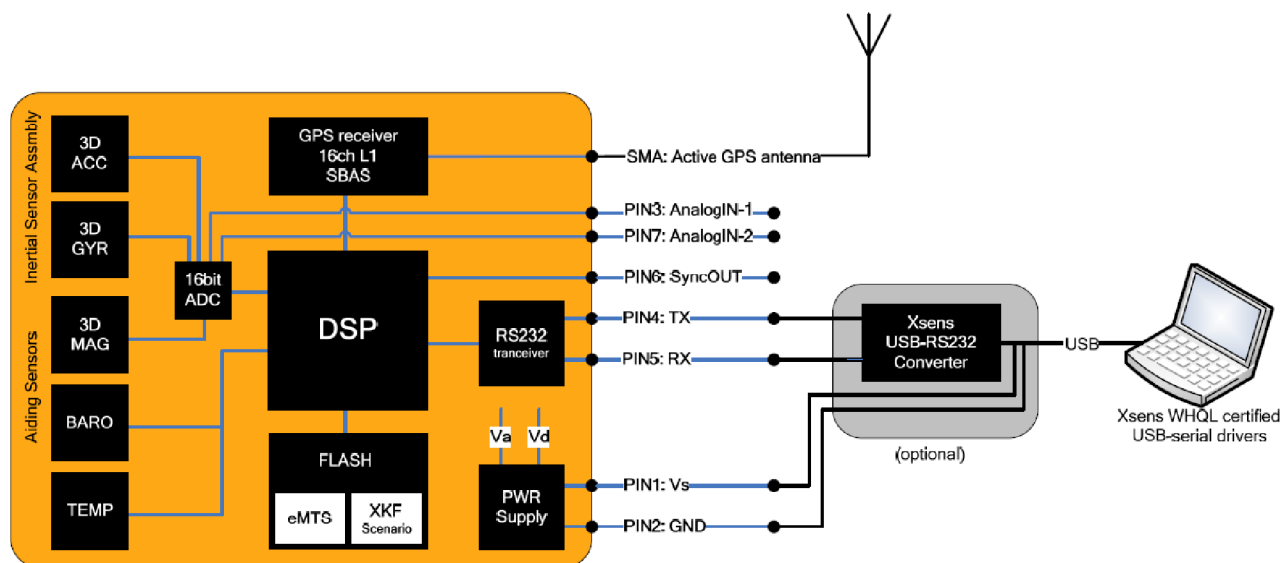
2.1. Základná charakteristika snímača[1]

MTi-G[1] je vybavený nízkovýkonovým signálnym procesorom, ktorý umožňuje beh Xsens Kalmanového filtra (XKF) v reálnom čase. Tým sa docíli lepší odhad inerciálnej 3D polohy a rýchlosti. MTi-G taktiež poskytuje GPS údaje polohy, trojosé odhady orientácie, rovnako ako kalibrované údaje akcelerácie v troch osách, rýchlosť otáčania v troch osách, hodnoty zemského magnetického pola taktiež v troch osách a hodnotu statického tlaku. MTi-G je vynikajúca merná jednotka pre navigáciu a ovládanie vozidiel a ďalších objektov.

Oblasti využitia zahŕňajú robotické aplikácie, vesmírny výskum, riadenie autonómnych zariadení, armádne použitie, ale taktiež sa dá použiť v automatizácii.

Základná charakteristika:

- vstavaný 50 kanálový GPS prijímač
- -160 dBm citlivosť sledovania
- vysoká odolnosť voči rušeniu GPS
- čas pre prvý GPS fix < 1s (hot start)
- GALILEO L1 kompatibilita
- výpočet pozície/rýchlosti pomocou DSP v reálnom čase
- orientačný výstup v rozsahu 360° v troch osách
- meranie zrýchlenia, uhlu natočenia a magnetického pola zeme v troch osách
- meranie statického tlaku (barometer)
- vysoká obnovovacia frekvencia(120 Hz DSP, 512 Hz len inerciálne údaje)
- výstup zodpovedá UTC
- nízka hmotnosť
- veľmi nízka energetická spotreba
- možnosť voľby z viacerých digitálnych výstupných módov
- funkcia vstavaný test (BIT)
- detekcia chyby antény
- detekcia pripojenia externej antény



Obr. 2.1: Blokovaná schéma snímača MTi-G [1]

2.2. Použitelnosť snímača pre navigáciu robota

Snímač MTi-G[1] využíva pri poskytovaní informácii o polohe kombináciu GPS navigačného systému a meraných údajov z MEMS snímačov. K dosiahnutiu vyššej presnosti sa využíva vstavaný Xsens Kalmanov filter pre šesť stupňov voľnosti a GPS (XKF-6G). Tento filter môžeme rozdeliť na dve časti a to predikčnú a kompenzačnú. Predikcia sa vypočítava pomocou nameraných údajov z gyroskopu a akcelerometru. Nevýhodou týchto údajov je, že sú zaťažené chybou, ktorá je relatívne malá, avšak pri dlhšej dobe integrácie spôsobuje výrazné nepresnosti. Z hodnôt uhlovej rýchlosti sa integráciou získava hodnota uhlového natočenia a z hodnôt zrýchlenia v jednotlivých osách sa dvojitou integráciou získa zmena pozície snímača. Nepresnosť predikovaných údajov narastá s časom. Pre časový interval pól minúty môže byť veľkosť chyby orientácie rádovo 1 – 2 stupne.

Pre korekciu predikovaných hodnôt sa využíva známa poloha z GPS prijímača. Hodnota polohy je však vždy určená pre GPS anténu preto je dôležité, aby bola známa a nemenná vzdialenosť medzi anténou a snímačom. Presnosť polohy získanej navigačným systémom závisí na okolnostiach, čiže na pozícii satelitov, časovej synchronizácii, dráhe urazenej signálom zo satelitov.

Hodnota nadmorskej výšky sa môže ďalej upresňovať meraním tlaku. Chyby vyplývajúce z merania tlaku súvisia hlavne so závislosťou tlaku a nadmorskej výšky.

Zemský magnetizmus je ďalšou meranou veličinou, ktorá môže pomôcť spresniť navigačné údaje zo snímača. Trojosí magnetometer však nie je vždy použiteľný, závisí na prostredí, v ktorom sa snímač nachádza. Magnetické pole zeme môže byť ľahko potlačené, alebo ovplyvnené. Pri použití údajov z magnetometru sa musí počítať s magnetickou deklináciou a následnou korekciou údajov.

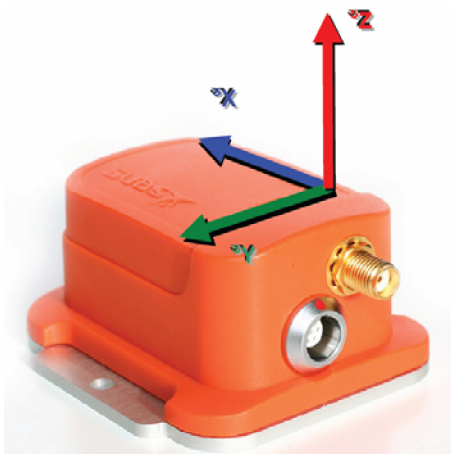
Snímač MTi-G umožňuje voľbu režimu použitého XKF. Jednotlivé režimy majú odlišné zdroje pre spresnenie meraných údajov. Napríklad podľa prostredia sa môže zvoliť režim s použitím, alebo bez použitia magnetometru či barometru.

XKF pracuje v reálnom čase a používa aktuálne namerané údaje a údaje z predchádzajúcich krokov. Preto pri zapnutí snímača je potrebná určitá doba pre zber dát a taktiež pre ustálenie gyroskopu. Minimálna doba ustálenia by mala byť jedna minúta.

2.3. Použiteľné súradnicové systémy[1]

Snímač MTi-G využíva viac súradnicových systémov, špecifikované pre určité typy meraných veličín.

Predvolený súradnicový systém viazaný na telo snímača je pravotočivý karteziánsky súradnicový systém, ktorý je priamo spätý s puzdrom snímača znázorneného na obrázku 2.2. Používa konvenciu NWU, kde jednotlivé osi X, Y a Z sú orientované na sever, západ a smerom hore. Všetky kalibrované údaje t.j. rýchlosť otáčania, zrýchlenie a magnetické pole sú vyjadrené v tomto súradnicovom systéme. Smer ôs súradnicového systému sa môže zmeniť na NED, kde X, Y a Z ukazujú smerom na sever východ a dole.



Obr. 2.2: Súradnicový systém snímača viazaný na puzdro MTi-G [1]

Pozícia snímača podľa GPS sa udáva vzhľadom k WGS-84 ako údaj zemepisnej šírky, zemepisnej dĺžky a výšky (LLA) na elipsoide.

Hodnota rýchlosti v troch osách sa vyjadruje vzhľadom k lokálnemu linearizovanému LLA tzv. miestna dotyková rovina (LTP).

Orientácia snímača sa udáva podľa rozdielu súradnicového systému viazaného na telo snímača a elipsoidom použitým pri polohovaní pomocou GPS.

Chyba kolmosti medzi skutočným súradnicovým systémom viazaným na snímač a ideálnym súradnicovým systémom je menšia pre snímač MTi-G ako $0,1^\circ$.

2.4. Výstupné veličiny snímača

2.4.1. Orientácia[1]

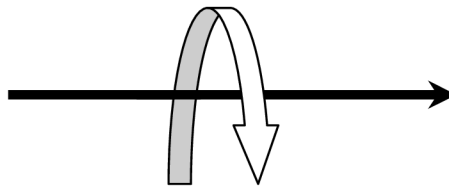
Reprezentácia orientačných údajov zo snímača je možná nasledujúcim spôsobom:

Kvaternióny (Eulerové parametre)

Eulerové uhly (roll, pitch, yaw)

Rotačná matica

Pozitívny smer rotácie je podľa pravidla pravej ruky v smere otáčania hodinových ručičiek pozdĺž osi rotácie (obrázok 2.3)



Obr. 2.3: Smer otáčania

Kvaternióny sú rozšírením komplexných čísel, sú vhodným matematickým zápisom pre reprezentáciu orientácie a rotácie objektov v troch osách. Hodnota rotácie sa môže vyjadriť pomocou vektoru kvaterniónov $q = (q_0, q_1, q_2, q_3)$, ktorá má jednotkovú veľkosť.

Eulerové uhly vyjadrujú rotáciu v osách X, Y a Z, tým môžu definovať ľubovoľnú orientáciu súradnicového systému a pre snímač MTi-G sú udávané v stupňoch.

- Φ – roll (od -180° do 180°) rotácia okolo osi X (bočný náklon)
- θ – pitch (od -90° do 90°) rotácia okolo osi Y (uhol zdvihu)
- Ψ – yaw (od -180° do 180°) rotácia okolo osi Z (uhol stočenia)

Matica rotácie sa využíva pre popis rotácie v euklidovskom priestore, pre trojrozmerný priestor má veľkosť 3×3 .

$$R = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}$$

Prevod[1] medzi jednotlivými výstupmi na reprezentáciu orientácie na uhol natočenia okolo jednotlivých ôs euklidovského priestoru.

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1}\left(\frac{R_{32}}{R_{33}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2q_2q_3 + 2q_0q_1}{2q_0^2 + 2q_3^2 - 1}\right) \\ \theta &= -\sin^{-1}(R_{31}) = -\sin^{-1}(2q_1q_3 - 2q_0q_2) \\ \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{R_{21}}{R_{11}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2q_1q_2 + 2q_0q_3}{2q_0^2 + 2q_1^2 - 1}\right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.4.2. Pozícia a rýchlosť

Údaje reprezentujúce pozíciu snímača sú vo formáte LLA, zemepisná šírka a zemepisná dĺžka sú udané v stupňoch a výška nad elipsoidom sa udáva v metroch.

Rýchlosť v troch osách sa udáva zvlášť pre každú os euklidovského priestoru X, Y a Z v metroch za sekundu.

2.4.3. Kalibrované dáta

Pre kompenzáciu tepelnej závislosti každého snímača MTi-G[1] na zisk a skreslenie a iné vlastnosti je vytvorený kalibračný model. Tento model zaisťuje spresnenie meraných údajov niektorých veličín. Merané veličiny zrýchlenie v troch osách, uhlová rýchlosť v troch osách a zemský magnetizmus meraný v troch osách sú priamo hodnoty zo 16bitového AD prevodu ďalej už nefiltrované len s použitím fyzikálneho modelu snímača.

Zrýchlenie v troch osách je reprezentované vektorom zrýchlení pre osy X, Y a Z v m/s^2 s rozsahom $\pm 50 m/s^2$ ($\pm 5 g$). Chyba linearity akcelerometru je 0.2 % z celého rozsahu. Zrýchlenie je merané kapacitným MEMS akcelerometrom, preto vektor zrýchlení obsahuje celkové zrýchlenie snímača spolu s gravitačným zrýchlením. Pre získanie čistého zrýchlenia len samostatného snímača je nutné zložku gravitačného zrýchlenia odčítať od zrýchlení v jednotlivých osách.

Uhlová rýchlosť sa pre všetky tri osi udáva ako vektor uhlových rýchlostí reprezentovaný v rad/s. Rozsah je definovaný ako ± 300 °/s s chybou linearity z celého rozsahu 0.1 %.

Vektor magnetického poľa sa udáva pre všetky tri osi v jednotkách normalizovaných k magnetickému poľu zeme. Snímač magnetického poľa má rozsah ± 750 mGaus a chybu linearity z plného rozsahu 0.2 %.

2.4.4. Nespracované dáta

Pri potrebe čistých nespracovaných údajov zrýchlenia, uhlovej rýchlosti a magnetického poľa zeme v troch osiach sa používajú hodnoty priamo po AD prevode bez použitia fyzikálneho modelu snímača. Výstup v tomto prípade je podobný ako pri kalibrovaných dátach, čiže obsahuje vektor zrýchlenia, uhlovej rýchlosti aj magnetického poľa zeme, ale bez kompenzácie teploty. Pre kompenzáciu sa taktiež posiela údaj o teplote snímača s 12bitovým rozlíšením v rozsahu od -55 do 125 °C.

2.4.5. Stavový register[1]

Kontrola niektorých stavov snímača je možná testovaním bitov stavového registra[1]. Príznak *Self test* indikuje, či sa správne previedol posledný autotest. *XKF valid* je príznak správnosti XKF filtru, ak výsledky po aplikácii filtru sú mimo správny rozsah, alebo ak je GPS status neplatný po určitú dobu, tak sa príznak vynuluje a merané údaje nie sú spoľahlivé. *GPS fix* indikuje vhodnú opravu (fix) pre GPS. No rotation status je príznak rotácie.

Bit	Popis
0	<i>Self Test</i>
1	<i>XKF valid</i>
2	<i>GPS fix</i>
3	<i>No rotation status</i>
4	<i>No rotation status</i>
5	<i>Rezervované</i>
6	<i>Rezervované</i>
7	<i>Rezervované</i>

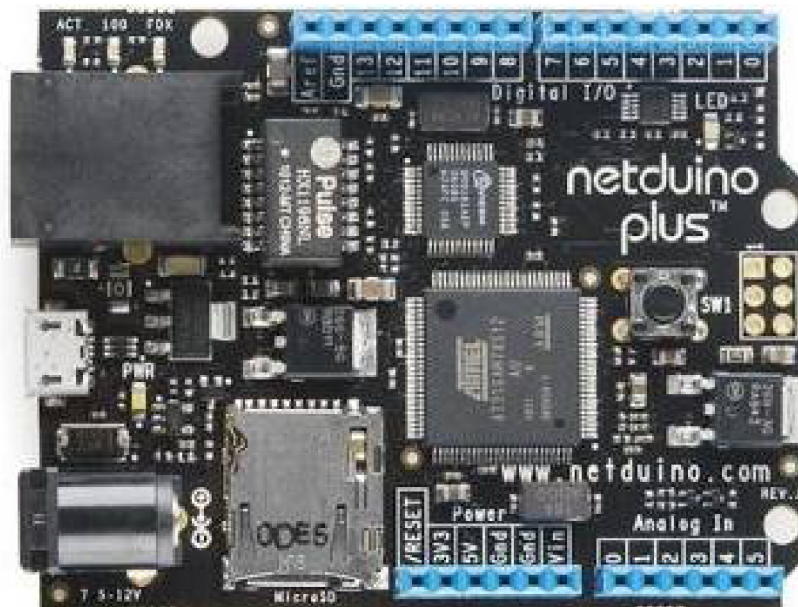
Tab. 2.1: Stavový register

3. POPIS MODULU NETDUINO PLUS

Netduino Plus[4] je otvorená elektronická platforma, ktorá používa .NET Micro Framework. Základom platformy je 32bitový procesor od firmy Atmel, ktorý je na platforme jednoducho programovateľný vo vyšších programovacích jazykoch, akým je C# alebo Visual Basic. Výrobca poskytuje SDK, použiteľný vo vývojom prostredí Microsoft Visual Studio. Platforma umožňuje programovanie na základe udalostí, podporuje využívanie vlákien a taktiež ladenie programu po riadkoch, rovnako ako aj prerušenie behu programu v mieste breakpointu.

Mikrokontrolér AT91SAM od firmy Atmel je založený na architektúre ARM7 a frekvenciu procesora má 48 MHz. Veľkosť vnútornej pamäte využiteľnej pre uskladnenie zdrojového kódu je závislá na použití sieťového pripojenia. Bez využitia ethernet rozhrania je veľkosť pamäte pre kód 128 kB a s využitím sieťového pripojenia len 64 kB. Podobne závislá na sieťovom pripojení je aj RAM pamäť, ktorá bez využitia sieťového rozhrania disponuje veľkosťou 60 kB a s využitím sieťového pripojenia 28 kB. Okrem už spomínaného ethernet rozhrania s rýchlosťou 100 Mb/s má platforma možnosť využiť SPI, I²C SDA, SCL a 2 krát UART.

Platforma má 20 digitálnych V/V portov, z ktorých 6 sa môže použiť ako analógový vstup 10bitového AD prevodníku a 4 porty umožňujú PWM výstup. Referenčné napätie AD prevodníku je možné použiť v rozsahu 2.6 až 3.3 V. Netduino Plus je schopné zapisovať a čítať z micro SD karty o veľkosti maximálne 2 GB. Pamäťová karta je automaticky detekovaná platformou.



Obr. 3.1: Netduino Plus

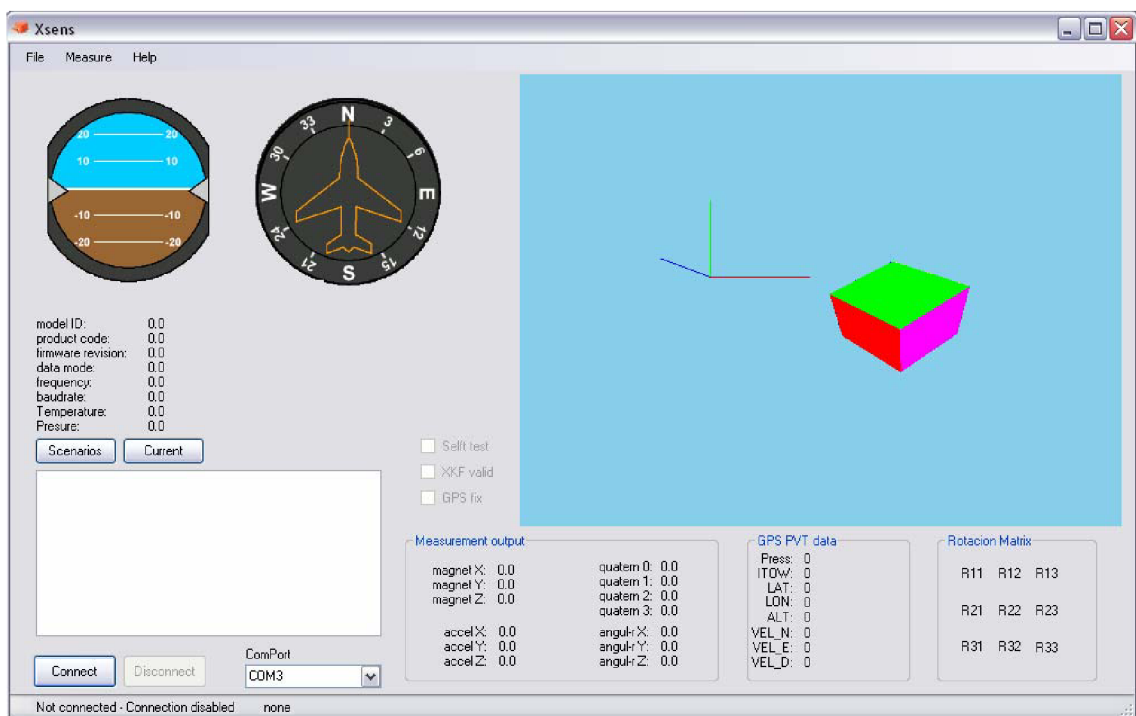
Pre programovanie a ladenie platformy slúži USB port, ale taktiež je možné použiť sériové rozhranie alebo TCP/IP. USB port slúži taktiež ako zdroj napájania ak nie je pripojený externý jednosmerný zdroj 7,5 – 12 V. Po pripojení externého zdroja sa napájanie automaticky prepne z USB na pripojené napätie zdroja. Platforma poskytuje stabilizované napätia pre možnosť napájania ďalších pripojených obvodov. Stabilizované napätia 5.0 V a 3.3 V majú maximálny prúdový odber 800 mA limitovaný stabilizátorom. Digitálne vstupy a výstupy platformy pracujú na 3.3 V logike, ale sú schopné pracovať aj so zariadeniami s 5 V logikou.

Ako indikácia stavov a spätná väzba užívateľovi slúžia LED indikátory. Po pripojení napájacieho napätia sa rozsvieti biela LED, signalizujúca správne pripojenie napätia a taktiež signalizuje, že platforma je zapnutá a spustí sa v nej nahraný program. Trojica LED v blízkosti ethernet konektoru slúži ako signalizácia činnosti ethernet rozhrania. Užívateľom definovateľná je modrá LED, ktorej stav sa môže definovať v programe platformy. Tlačítko na platforme slúži ako reset, ale taktiež môže byť použité pre vyvolanie rýchleho prerušenia.

Ethernet rozhranie je realizované pomocou oddelovacieho transformátoru HX1198NL a rýchleho ethernetového prevodníku fyzickej úrovne DM9161EP, ktorý využíva lwIP, odľahčenú verziu TCP/IP vytvorenú pre použitie v embeded zariadeniach s nízkymi nárokmi na výpočtový výkon a pamäť.

4. PROGRAM PRE NASTAVENIE MTI-G

Pre komunikáciu so snímačom MTi-G som vytvoril program, ktorý umožnil nastavenie a zobrazenie nameraných údajov. Pri vytváraní programu sa použila knižnica AccXsens.cs, preto sa zvolil programovací jazyk C# pre realizáciu programu. Objektovo orientovaná knižnica AccXsens.cs umožňuje komunikáciu so snímačom pomocou triedy AccXsense. Trieda umožňuje pripojenie pomocou sériovej linky, UDP a TCP. Komunikácia so snímačom je založená na správach posielaných snímaču, ktoré umožňujú meniť nastavenia snímača a taktiež voľbu výstupných údajov. Komunikácia je plne nastaviteľná, je možná voľba baudrate, rýchlosti vysielania výstupných údajov, je možná konfigurácia výstupných údajov a taktiež vstupná a výstupná synchronizácia.

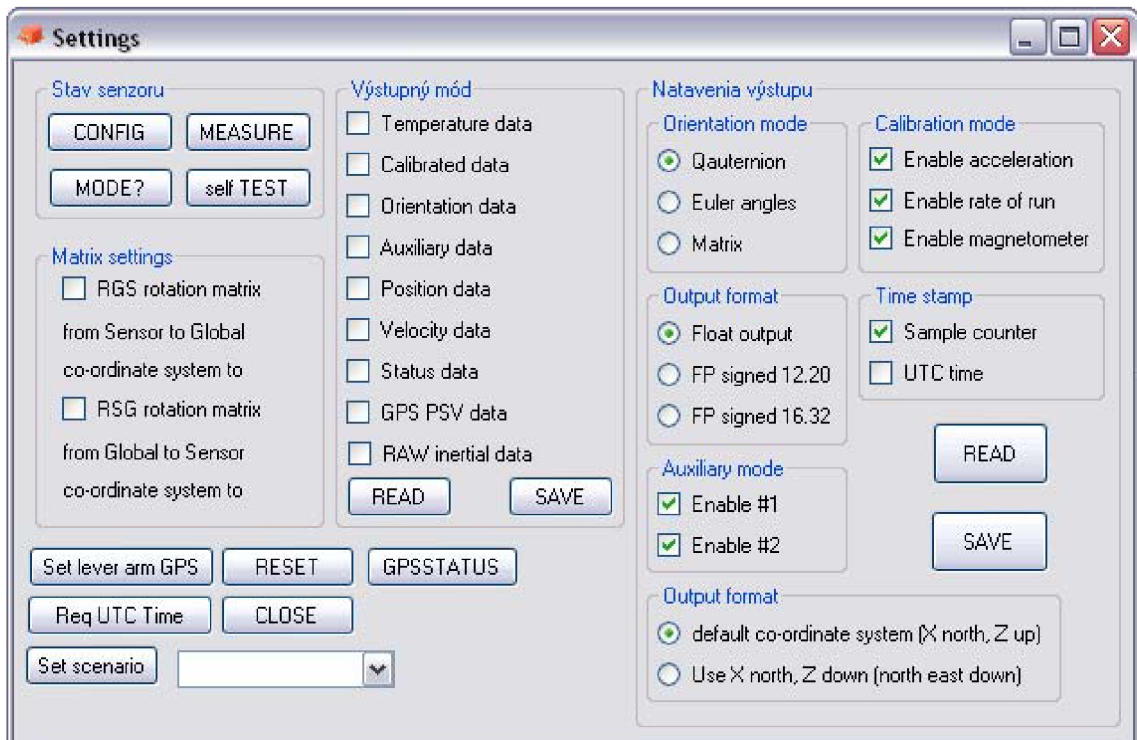


Obr. 4.1: Hlavné okno programu

Program pozostáva z niekoľkých častí pre plnenie jednotlivých funkcií. Hlavné okno umožňuje voľbu komunikačného portu, pripojenie a odpojenie snímača a zobrazuje základné namerané údaje a správy zo snímača. Pre overenie správneho zariadenia sú zobrazené informácie napr. o ID, produktovom kóde či verzii firmwaru. Číselne sa môžu zobraziť hodnoty vektorov zrýchlenia, uhlovej rýchlosti a magnetického poľa zeme, a hodnoty jednotlivých prvkov kvaterniónov či rotačnej matice. Pre názornejšie pochopenie orientácie a natočenia snímača sa implementovalo

zobrazenie známe z letectva, kde na dvoch indikátoroch, umelý horizont a kompas, sa zobrazuje hodnota roll, pitch a yaw. Umelý horizont znázorňuje natočenie pitch a roll. Kompas znázorňuje natočenie okolo osi Z čiže yaw. Tlačidlo *Scenarios* slúži na zistenie možných nastavených scenérií Kalmanovho filtru. Po stlačení sa odošle požiadavka na zistenie názvu a čísla scenérií uložených v pamäti meracej jednotky. MTi-G odpovie na požiadavku odoslaním aktuálnych scenérií, ktoré sa zobrazia v textovom poli pod tlačidlom. Pri stlačení tlačítka *Current* sa zistí aktuálne nastavenie scenérie v meracej jednotke. Aktuálna scenéria sa znova zobrazí v textovom poli. Textové pole slúži okrem vyššie popísaných funkcií pre zobrazovanie správ prijatých od meracej jednotky.

Pre znázornenie polohy a natočenia sa taktiež muselo vytvoriť prostredie, kde by sa mohla zobrazovať trojdimenzionálna poloha a natočenie snímača. K tomu sa musela implementovať knižnicu OpenGL pre podporu 3D zobrazenia. Visual studio 2010 na rozdiel od predchádzajúcich verzii už obsahuje knižnicu OpenGL obsiahnutú v Open Toolkit Library (OpenTK) určenú priamo pre programovací jazyk C#. Kde sa pomocou príkazov pre rotáciu a transláciu môže virtuálny objekt ľubovoľne umiestniť v 3D virtuálnom priestore. Pre znázornenie stavov snímaču sú medzi textovým polom a rámom 3D obrazu tri zaškrŕavacie políčka, ktoré užívateľ nevie meniť. Slúžia ako indikátor stavu snímača. *Self test* je zaškrŕnutý, ak snímač pracuje správne. *XKF valid* indikuje správny výpočet polohy pomocou vstavaného Kalmanovho filtru. *GPS fix* indikuje prístupnosť GPS spojenia so správnou opravou.



Obr. 4.2: Okno nastavenia snímača

Ďalšou súčasťou programu je okno nastavenia, ktoré umožňuje zistenie nastavení snímača a ich zmenu. Nastavovať sa môže stav snímača. Snímač môže mať po zapnutí dva stavy a to konfiguračný a merací. V móde merania sa na výstup snímača periodicky posielajú merané údaje podľa voľby výstupných údajov a zvolenej periódy. V tomto stave sa len meria a nedá sa snímač nastaviť. V konfiguračnom stave sa neposielajú merané údaje, ale je možná konfigurácia výstupného módu a jednotlivých výstupných meraných údajov snímača. Okno nastavenia taktiež umožňuje nastaviť scenérie Kalmanovho filtru. Po zistení prístupných scenérií v pamäti meracej jednotky pomocou tlačidla na hlavnom okne je možné v konfiguračnom režime nastaviť požadovanú scenériu. Konfiguračný režim sa zapne pomocou *CONFIG* tlačidla. Tlačidlo *MEASURE* slúži pre prepnutie do režimu merania. Po stlačení *Set scenario* sa načítajú scenérie do rozbalovacieho zoznamu. Po výbere scenérie a opätovnom stlačení tlačidla *Set scenario* sa nastavenie scenérie uloží do meracej jednotky. Level arm GPS udáva polohu antény vzhľadom k puzdru meracej jednotky. Pri stlačení tlačidla *Set level arm GPS* sa nastaví vopred definovaná konštantná poloha GPS antény udávaná súradnicami X, Y a Z. Tlačidlo *Reset* slúži pre vrátenie všetkých nastavení do pozície, v ktorej boli po výrobe. *GPSSTATUS* odošle požiadavok meracej jednotke pre zistenie či je správny *GPS fix*. *Req UTC time* pošle požiadavku meracej jednotke o zaslanie presného času podľa GPS. Pomocou *READ* sa načítajú jednotlivé nastavenia a ak je snímač v konfiguračnom režime môžu sa zmeny v nastavení uložiť pomocou *SAVE* tlačidla.

4.1. Knižnica OpenGL

OpenGL[5] je priemyselný štandard špecifikujúci multiplatformové rozhranie k akcelerovaným grafickým kartám, grafickým systémom. Používa sa hlavne pre tvorbu počítačovej grafiky v CAD systémoch, počítačových hrách, aplikáciu virtuálnej reality, alebo pre vedecko-technické vizualizácie.

Základnou funkciou OpenGL je vykresľovanie obrazového rámca (frame buffer). OpenGL k tvorbe 2D a 3D objektov používa základné primitíva akým sú napr.: body, úsečky a mnohouholníky. Knižnica volá jednotlivé funkcie a procedúry, nie je objektovo orientovaná. Primitívi sú definované pomocou vrcholov, každý z nich definuje bod, koncový bod hrany alebo vrchol mnohouholníka. Každý je definovaný súradnicami, farbou, normálou a niekedy texturovacími súradnicami.

Rozhranie OpenGL je založené na architektúre klient-server, kde klientom je riadiaci program, ktorý vydáva povely pre spracovanie grafickému adaptéru. Grafický adaptér je serverom v tejto architektúre.

5. KOMUNIKÁCIA MTI-G S NETDUINOM

5.1. Prevodník RS 232

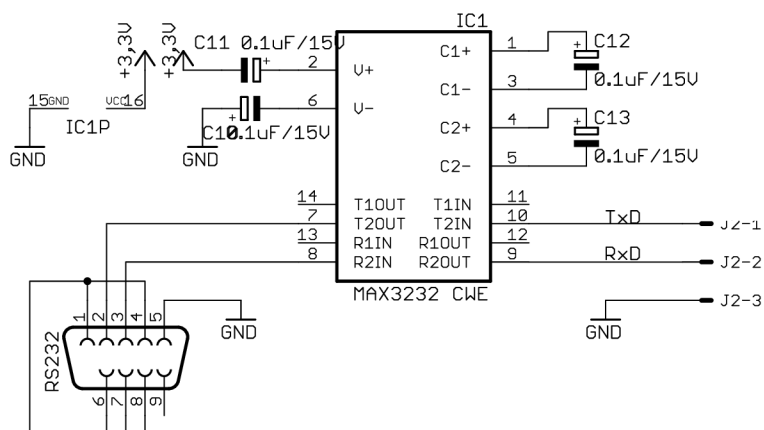
Platforma obsahuje viac rozhraní pre komunikáciu cez UART. Nasledujúca tabuľka zobrazuje spôsob pripojenia jednotlivých pinov:

RxD	Príjem	pin 0	RxD	Príjem	pin 2
TxD	Vysielanie	pin 1	TxD	Vysielanie	pin 3
Netduino Plus UART1			Netduino Plus UART2		

Tab. 5.1: Popis komunikačných pinov pre Netduino

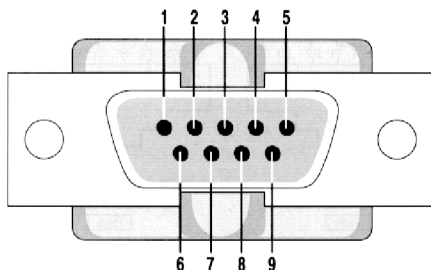
Najjednoduchší spôsob vzájomného preporenia dvoch sériových portov je privedením vysielacieho výstupu jedného zariadenia na prijímací vstup druhého zariadenia a naopak – krížovo. Ak sa použijú v zariadení TTL alebo CMOS obvody, je nutné ich logiku pred pripojením napäťovo upraviť.

Pre toto upravenie sa štandardne používali obvody 1488 a 1489, ktoré ale potrebovali napájanie +12 V a -12 V pre vytvorenie výstupných úrovní. Prelom v tomto smere učinila firma MAXIM svojím obvodom MAX 3232. [6]Využila totiž svojich znalostí vo vývoji spínaných nábojových meničov napätí a vyvinula obvod, ktorý si vystačí s +3,3 V. Potrebné napätie si samostatne vyrobí pomocou štyroch externých kondenzátorov.



Obr. 5.1: Zapojenie obvodu MAX 3232

Samotný komunikačný port v počítači je reprezentovaný rozhraním RS 232, ku ktorému sa periférie pripájajú konektorom CANNON 9. Tento konektor bol zvolený aj pre realizáciu prevodníku rozhrania RS 232.



Obr. 5.2: Popis konektoru RS 232

Číslo pinu	Signál	Číslo pinu	Signál
1	Detekovaný dátový prenos	6	Súbor dát pripravený
2	Príjem dát	7	Žiadosť na odoslanie
3	Odosielanie dát	8	Pripravený na odoslanie
4	Dátový terminál pripravený	9	Indikátor zvonenia
5	Signálová zem GND		

Tab. 5.2: Popis komunikačných pinov prevodníku

5.2. MT komunikačný protokol

Snímač MTi-G[3] môže nadobúdať dvoch vnútorných stavov, jedným z nich je meranie – Measurement a druhým je konfiguračný režim - Config. V Measurement režime snímač posieľa cez komunikačné rozhranie dopredu nastavené dáta. V Config režime je možné voliť dáta, ktoré sa majú odosielať, alebo vyčítavať aktuálne nastavenia. Do Config režimu sa môžeme dostať dvomi spôsobmi. Prvým je, že do 500 ms po privedení napájania na snímač pošleme WakeUpAck správa, čím sa dostaneme do konfiguračného režimu. V prípade keď sa neodošle potrebná správa v danom časovom intervale dostaneme sa do stavu merania. Ak sme v stave merania a chceme sa dostať do konfiguračného režimu môžeme poslať GoToConfig správu snímaču, alebo v opačnom prípade ak sme v konfiguračnom režime a potrebujeme nastaviť stav merania je potrebné snímaču odoslať správu GoToMeasurement.

V prípade ak po zapnutí nepošleme žiadnu správu snímaču dostaneme sa do stavu merania. V tomto stave sa vo vopred definovaných intervaloch posielajú nastavené

výstupné dáta zo snímača. Ako prvá je však poslaná jednorazová správa, ktorá obsahuje konfiguračné nastavenia potrebné k dekódovaniu meraných údajov.

V konfiguračnom móde je možné nastaviť výstupné veličiny snímača, ktoré boli popisované v kapitole 2.4, ďalej sa môže nastaviť formát dát, vzorkovaciu frekvenciu, prenosovú rýchlosť a iné nastavenia komunikácie.

Preambula	BID	MID	LEN	DATA	CHECKSUM
-----------	-----	-----	-----	------	----------

Obr. 5.3: Štandardná správa

V stave merania je v pravidelných intervaloch posielaná správa s nameranými údajmi. Správa[3] pozostáva okrem nameraných údajov z ďalších častí potrebných na zaistenie správnej komunikácie. Konštrukciu jednej správy so štandardnou dĺžkou vidíme na obrázku 5.3.

Správa štandardnej veľkosti pozostáva z Preambule, ktorá indikuje začiatok novej správy. Veľkosť Preambule je jeden bajt a jej hodnota je vždy 250 (0xFA).

Po nej nasleduje BID pre identifikáciu zbernice alebo taktiež adresy. Jej veľkosť je jeden bajt a hodnota udáva adresu konkrétneho snímača pri použití Xbus s viacerými MT snímačmi. V prípade ak je snímač použitý samostatne môže mať adresu jedna indikujúcu prvé zariadenie alebo 255 ako master pri komunikácii. V prípade jednoduchého prenosu meraných dát pri priamom prepojení snímača s vyhodnocovacím zariadením je hodnota BID 255, lebo správa je automaticky vytváraná snímačom a nie je odpoveďou na žiadosť.

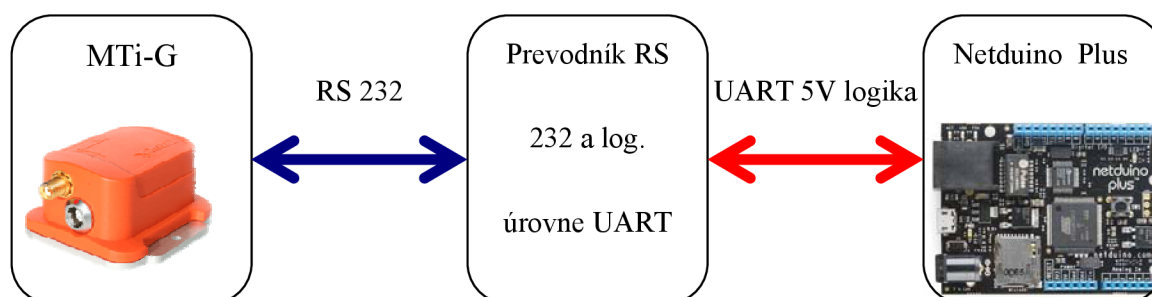
Nasledujúcou časťou je MID identifikátor správy, ktorý má rovnako ako predchádzajúce časti veľkosť jeden bajt. Slúži na identifikáciu typu správy. Pre každé nastavenie žiadosť, alebo odpoveď na žiadosť sa používa príslušný identifikátor.

LEN udáva dĺžku štandardnej správy v bajtoch jej maximálna hodnota je 254 čo vyplýva z veľkosti tejto časti, ktorá je jeden bajt. Ak správa obsahuje viac ako 254 bajtov dát už to nie je správa štandardnej veľkosti, ale rozšírená správa. V to prípade by LEN nadobudlo hodnotu 255 a po nej by nasledovala v dvoch bajtoch dĺžka rozšírenej správy EXT LEN.

V štandardnej správe sa za LEN posielajú DATA, ktoré sú nastavené alebo boli vyžiadané špeciálnou správou. Dáta v štandardnej správe majú maximálne 254 bajtov. V rozšírenej správe Dáta majú maximálnu dĺžku 2048 bajtov. Prenesené dáta sú vždy prenášané vo formáte Big Endian.

Pre overenie správneho prenosu dát sa počíta kontrolný súčet - CHECKSUM, pri spočítaní všetkých bajtov správy okrem Preambule sa najnižší bit výsledku bude rovnáť nule ak sa započíta aj hodnota kontrolného súčtu.

5.3. Prepojenie Netduino so snímačom MTi-G

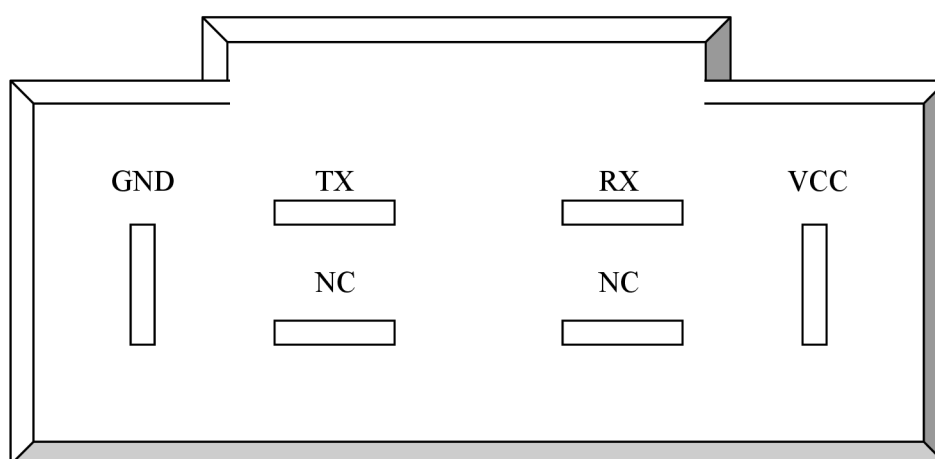


Obr. 5.4: Prepojenie Netduino a MTi-G

Za účelom jednoduchšej realizácie komunikácie na platforme Netduino som vytvoril program, ktorý dokáže čítať merané dáta zo správ posielených zo snímača a priradzuje ich premenným v triede, ktorá reprezentuje MTi-G, jeho zrýchlenie, naklonenie, GPS polohu a ostatné nastavené výstupné dáta snímača.

Za účelom overenia sa jednotlivé hodnoty počas vývoja programu posielali formou debugovacích správ z platformy na počítač. Konfiguračné nastavenia a overenie činnosti snímača po uložení nastavení sa dejú pomocou programu na počítači. Po pripojení na platformu sa naviaže komunikácia a načítavajú sa najaktuálnejšie merania.

Pre prepojenie platformy a snímača bol použitý už popisovaný prevodník RS 232, ku ktorému sa priamo pripojilo sériové rozhranie snímača MTi-G. Konektor je popísaný na obrázku 5.5. Výstupná 5 V logika z prevodníku je priamo pripojená na UART platformy. Komunikácia prebiehala s nastavením baudratom na 57600.



Obr. 5.5: Konektor snímača MTi-G na strane prevodníku RS 232

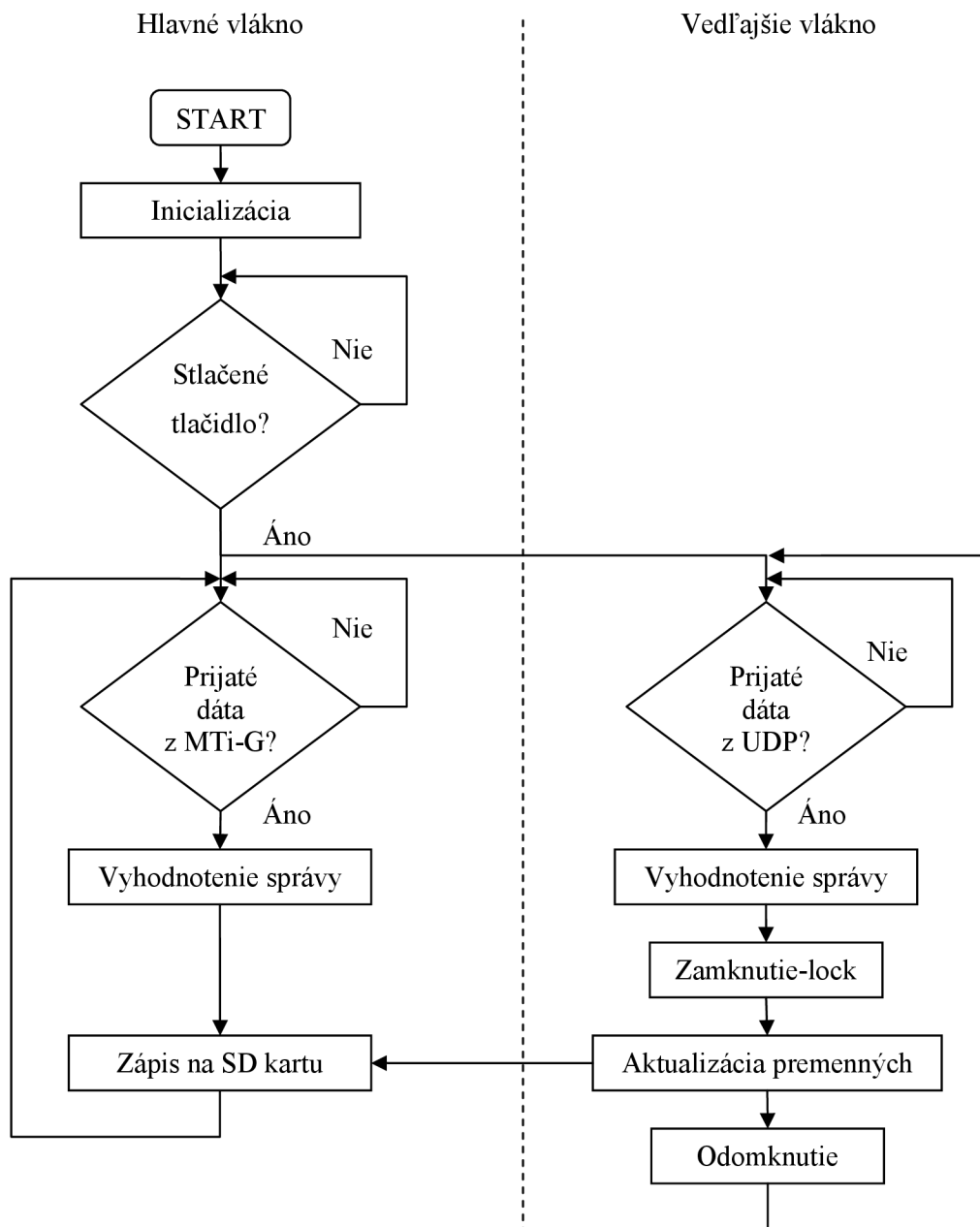
5.4. Popis programu pre Netduino

Program pre Netduino som vyvinul v C# vo Visual Studiu 2010 na platforme Microsoft .NET Micro Framework 4.1. Program slúži pre komunikáciu a spracovanie údajov z meracej jednotky MTi-G, záznam nameraných hodnôt na SD kartu v Netduninu a prijímanie korekčných správ z UDP servera. Program je rozdelený do dvoch vlákien, aby sa zaistila kontinuálnosť komunikácie ako s meracou jednotkou tak so serverom. Jedno vlákno slúži pre komunikáciu, spracovanie a uloženie údajov z meracej jednotky, kým v druhom vlákne sa prijímajú dáta cez vopred definovaný port z IP adresy servera.

Namerané hodnoty sa ukladajú do textového súboru za účelom ďalšieho spracovania. Pre možnosť porovnania hodnoty polohy z meracej jednotky MTi-G s údajom o polohe z iného zdroja v konkrétnom čase sa do textového súboru pri každom zápise zaznamenáva aj aktuálny čas týždňa v milisekundách ITOW a prevedená hodnota na formát HH:MM:SS:MS. Počítadlo pre ITOW sa nuluje vždy v nedeľu o polnoci. Okrem hodnoty polohy formou zemepisnej šírky, zemepisnej dĺžky a výšky nad elipsoidou sa zaznamenáva taktiež zrýchlenie v jednotlivých osách a hodnoty korekcie posielané zo servera spolu s číslom bodu, ku ktorému sa korekcie vzťahujú. Aby sa predišlo strate meraných dát v textovom súbore pri výpadku niektorého z pripojených zariadení, alebo samotného Netduina, vždy sa zapisuje na koniec súboru. Pre lepšiu rozlíšiteľnosť jednotlivých meraní a ako záznam výpadku sa pri každom novom spustení ako prvé zapíše hlavička aktuálneho merania. Ako spätná väzba užívateľovi slúžia debugovacie správy pri spustení v debug móde.

Po privedení napájania sa prevedie inicializácia a kontrola prítomnosti SD karty. Po stlačení tlačítka sa vytvorí socket pre UDP komunikáciu a nastaví sa predpokladaný mód výstupných dát. Ako indikácia stlačenia tlačítka slúži rozsvietenie modrej LED. Po stlačení tlačítka sa cyklicky zo sériovej linky čítavajú merané údaje. V ďalšom vlákne UDP klient čaká na prijatie paketov od servera. Pre zamedzenie súčasného prístupu k premenným medzi vláknami sa použil zámok lock pri prístupe k premenným.

Keďže platforma nepodporovala niektoré súčasti triedy vytvorenej pre komunikáciu s meracou jednotkou MTi-G, musela sa trieda prispôsobiť požiadavkám. Netduino má možnosť ovládať bežiaci program len cez jedno tlačítko, preto je ťažko realizovateľný prehľadný a jednoduchý spôsob nastavenia vlastností. Z toho dôvodu sa nastavenia meracej jednotky dejú cez ďalší program popisovaný v kapitole 4. Program v Netduine je vytvorený hlavne pre komunikáciu s meracou jednotkou, keď je meracia jednotka v režime merania. Program ešte môže zisťovať nastavenia výstupných údajov z meracej jednotky.



Obr. 5.6: Vývojový diagram programu pre Netduino

5.5. Microsoft .Net Micro Framework

Microsoft .NET Micro Framework[10] je malé a efektívne .NET runtime prostredie slúži k spúšťaniu spravovaného kódu na zariadeniach, ktoré sú príliš malé a majú obmedzené možnosti pre použitie Windows CE a NET Compact Framework.

Nástroj .NET Micro Framework umožňuje vývoj aplikácií pre malé embedded zariadenia vo vývojom prostredí akým je Visual Studio v jazyku C#. Tým sa zjednoduší vývoj aplikácií pre mikroprocesory, lebo sa môžu použiť rovnaké vývojové nástroje a jazyky ako pri vytváraní aplikácií pre inteligentné zariadenia (PDA a chytré telefóny). Microsoft .NET Micro Framework obsahuje rozšíriteľný hardwarový emulátor pre rýchly vývoj prototypov a ladenie aplikácií.

Pri použití .NET Micro Framework nie je potrebné, aby sa vykonával operačný systém na pozadí. Hardware obsahuje odľahčenú verziu Common Language Runtime (TinyCLR), ktorá sa automaticky spúšťa pri bootovaní. Runtime je málo náročný na pamäť, používa len niekoľko sto kilobajtov pamäte RAM a nevyžaduje procesor s jednotkou správy pamäte (MMU). Preto je možné .NET Micro Framework používať na malých a lacných 32bitových procesoroch s nízkou spotrebou.

6. POUŽITIE MERACEJ JEDNOTKY PRE NAVIGÁCIU

6.1. Inerciálna navigácia

Inerciálna navigácia[2] je spôsob určenia polohy na základe známej počiatočnej polohy. S pomocou známeho natočenia a známej rýchlosti sme schopný určiť presnú polohu. Pre určenie polohy sa používajú hlavne inerciálne snímače ako gyroskopy a akcelerometre. Základnou meranou jednotkou pre inerciálnu navigáciu je zrýchlenie v troch osách. Zo známej hodnoty zrýchlenia môžeme dvojitou integráciou získať hodnotu polohy. Nevýhodou je, že pri integrácii sa integruje aj chyba, čo spôsobuje relatívne veľké chyby aj pri veľmi presných snímačoch. Z hodnoty uhlového natočenia gyroskopu sa integráciou získa hodnota uhlu natočenia. Metóda má nevýhodu v potrebe viacnásobnej integrácii čo spôsobuje narastanie nepresnosti s časom.

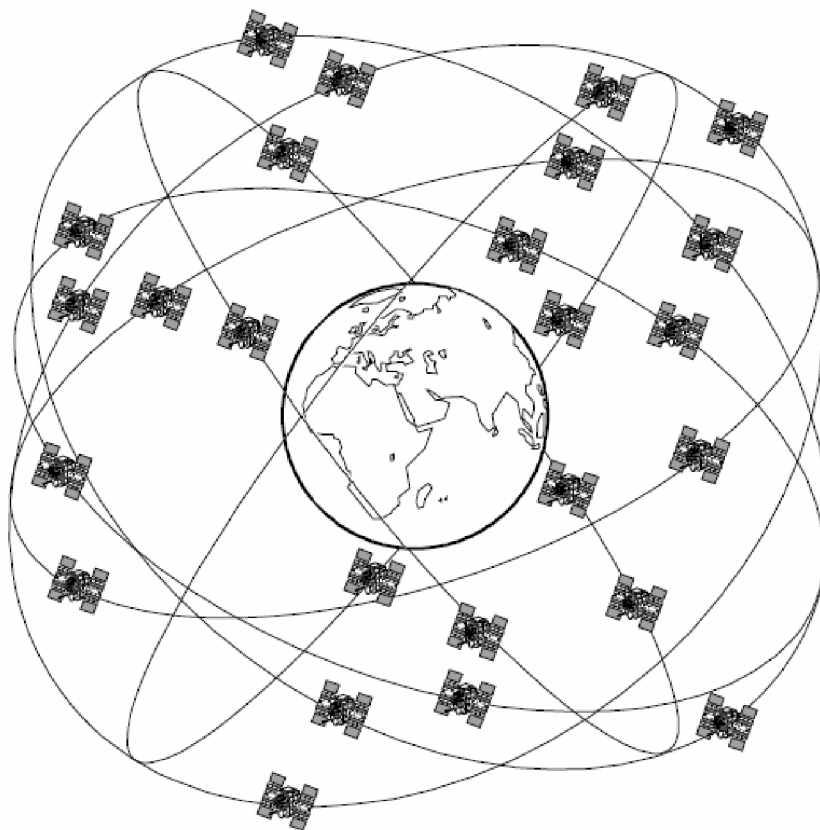
Poznáme dva druhy inerciálnej navigácie. Jedna z nich sa nazýva kardanová, lebo používa k stabilizácii snímača gyroskopickú platformu so známou dĺžkou ramena, tým sa zaistí menšie pôsobenie menších uhlových síl. Druhý prístup sa nazýva bezkardanový, lebo snímač je priamo spojený s meraným objektom. Bezkardanový prístup je výhodnejší z hľadiska rozmerov, spotreby energie a mechanickej konštrukcie.

6.2. Globálny družicový polohový systém

Tento systém slúži na určenie polohy na zemskom povrchu pomocou družíc aj bez znalosti počiatočnej polohy. Najznámejším funkčným systémom je NAVSTAR GPS, ktorý využíva trianguláciu na určenie polohy. Každý satelit vysiela presný čas a je známa jeho poloha. Satelit vysiela správy, ktoré obsahujú čas vyslania s vysokou presnosťou. Správa sa šíri až sa zachytí prijímačom, kde sa čas odoslania porovná s aktuálnym časom. Z rozdielu času odoslania a prijatia správy sa zistí, akú dobu trvá kým sa správa dostala k prijímaču, z čoho sa dá vypočítať vzdialenosť od satelitu. Ak poznáme vzdialenosti od troch rôznych satelitov dokážeme trianguláciou zistiť polohu prijímača. Aby prijímač dokázal vypočítať svoju polohu potrebuje mať v dosahu aspoň štyri satelity, tri pre zistenie polohy a štvrtú pre znalosť presného času.

Družice nie sú geostacionárne tzn. že sa pohybujú po svojich trajektóriách 20200 km nad zemským povrchom na šiestich kruhových dráhach so sklonom 55° . Dráhy sú vzájomne posunuté o 60° za účelom čo najlepšieho pokrytia celého zemského povrchu. Na každej dráhe pôvodne obiehali 4 rovnomerne rozostúpené satelity, v súčasnosti je ich 5 – 6, niektoré slúžia ako záloha pri výpadku. Doba obehu jednej družice je 11

hodín a 58 minút. Kozmický segment bol pôvodne plánovaný pre 24 družíc v súčasnosti je ich 32.



Obr. 6.1: Rozloženie satelitov okolo Zeme[2]

Z každého miesta by mali byť viditeľné za ideálnych podmienok aspoň 4 satelity. V každej správe sa okrem času odosielania posiela aj presná poloha satelitu – efemerida, a približné orbity ostatných satelitov – almanac. NAVSTAR GPS pozostáva z troch segmentov. Už spomínaný kozmický segment zahŕňa satelity. Pod užívateľský segment patria prijímače, ktoré na základe signálov prístupných satelitov vypočítajú polohu a poskytujú užívateľovi taktiež presný čas. GPS prijímače sú pasívne to znamená, že len prijímajú signál zo satelitov a neposielajú družiciam informácie o svojej polohe. Riadiacim segmentom sú pozemné stanice slúžiace na monitorovanie kozmického segmentu a manévrowanie s družicami taktiež ako na údržbu atómových hodín. Monitorované údaje sú neskôr zverejnené podobne ako odstávky a poruchy družíc.

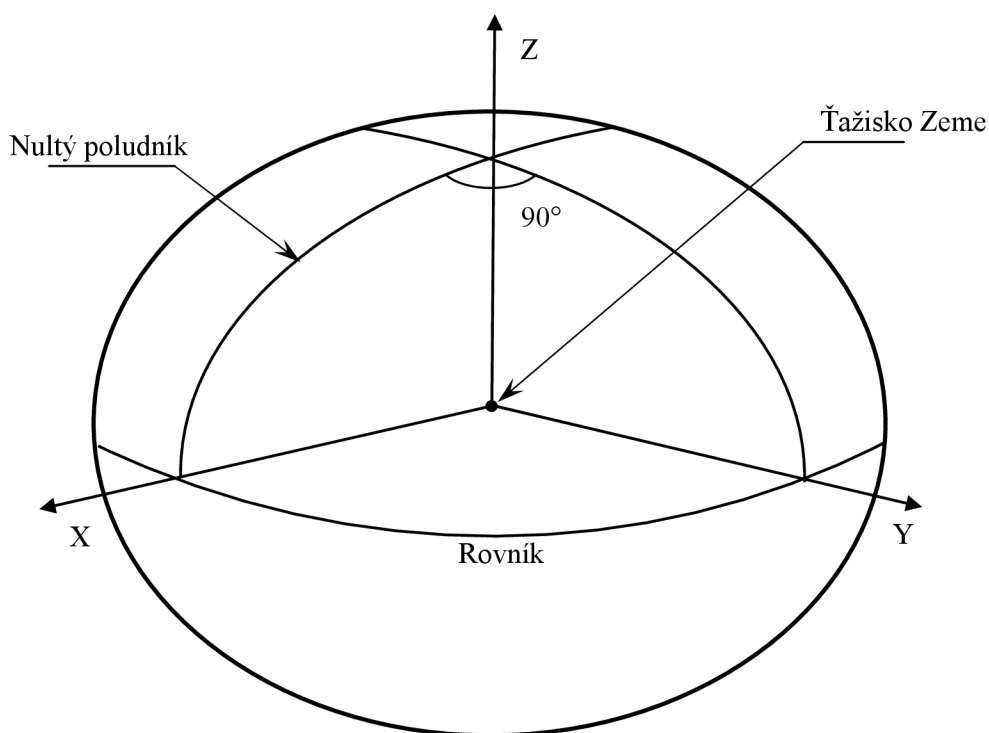
Problémy pri určovaní polohy spôsobuje aproximácia zemského povrchu. Naproti komplikovanému, ale presnejšiemu geoidu, ktorého povrch vždy pretína gravitačné pole v pravých uhloch sa používa jednoduchšia predstava zemského povrchu a to rotačný elipsoid. Rotačný elipsoid je definovaný dvoma polomerami rovníkom a osou od

severného k južnému pólu. Výška je vzťahovaná k povrchu rotačného elipsoidu. Poloha sa okrem výšky udáva zemepisnou šírkou a dĺžkou. Výška sa udáva v metroch, ale zemepisná šírka a dĺžka v stupňoch.

Ďalšími zdrojmi chýb sú chyby plynúce z nepresnosti atómových hodín na satelitoch, rôzna rýchlosť šírenia signálu v troposfére a ionosfére, odrazy signálu spôsobujúce rozdielne dráhy k prijímaču a taktiež aj šum prijímača.

6.2.1. Použité geodetické súradnicové systémy

Súradnicové systémy slúžia pre popis polohy bodu na zemskom povrchu. V navigácii je jednou z najčastejšie použitých metód identifikácie bodu uvedenie zemepisných súradníc. Tieto súradnice sú latitude – zemepisná šírka, longitude – zemepisná dĺžka a nadmorská výška. Hodnota zemepisnej šírky a dĺžky je väčšinou udaná v stupňoch kým hodnota nadmorskej výšky sa udáva v metroch nad morom. Okrem týchto súradníc môže byť bod na zemskom povrchu určený aj pomocou priestorových pravouhlých súradníc X, Y a Z. Bázou týchto súradníc je ťažisko rotačného elipsoidu a ich hodnota sa udáva v metroch. Jednotlivé súradnice v zemepisných a pravouhlých súradniciach je možné prevádzať medzi sebou, za určitých predpokladov. Pri súradnicových systémoch ktoré ako aproximáciu zemského povrchu uvažujú elipsoidu je nutné poznať dĺžku hlavnej a dĺžku vedľajšej poloosy elipsoidu. Jednotlivé súradnicové systémy môžu mať rozdielne aproximácie zemského povrchu rozdielnymi rotačnými elipsoidmi.



Obr. 6.2: Rotačný elipsoid WGS-84

Elipsoida	Veľká poloosa a [m]	Vedľajšia poloosa b [m]
WGS-84	6378137,0	6356752,31425
GRS-80	6378137,0	6356752,31414

Tab. 6.1: Parametre Elipsoid

Svetový geodetický referenčný systém WGS-84 (World Geodetic System 1984)[23] je geodetický geocentrický systém armády USA, v tomto systéme pracuje aj GPS. Elipsoida pre aproximáciu zemského povrchu sa tiež označuje WGS-84. Poloha bodu na zemskom povrchu sa udáva ako hodnota zemepisnej šírky a zemepisnej dĺžky v stupňoch a ako hodnota výšky nad elipsoidou v metroch. Hodnota nadmorskej výšky a hodnota výšky nad elipsoidou nie je totožná. Pri zemepisnej šírke sa ďalej ešte udáva či ide o severnú alebo južnú šírku a pri zemepisnej dĺžke či je to západná alebo východná dĺžka. Súradnicový rámec je súhlasný so svetovým terestriálnym referenčným rámcom ITRF (International Terrestrial Reference Frame)[22][23]. Rozdiely medzi WGS-84 a ITRF sú v radoch desiatok centimetrov.

Okrem svetového systému IERS a jeho rámca ITRF sa často hlavne v Európe používa európsky ETRS (European Terrestrial Reference System)[8] a rámec ETRF. ETRS je definovaný ako systém konštant a referenčných rámcov ETRF (European Terrestrial Reference Frame), ktorý je realizovaný súradnicami stabilizovaných bodov na zemskom povrchu. Výhodou oproti svetovému systému je spojenie s euroázijskou doskou. Táto výhoda sa prejavuje ako malý ročný posun stacionárneho bodu na povrchu euroázijskej dosky, rádovo milimetre. Pri pohľade z celosvetového systému na stacionárny bod na povrchu kontinentu sa tento bod pohybuje s kontinentom rádovo o centimetre ročne. Systém ETRS je založený na elipsoide GRS-80, ktorý je veľmi podobný WGS-84.

Prepočet zemepisných súradníc na pravouhlé súradnice je možný nasledujúcimi vzorcami[9]:

$$\begin{aligned}
 X &= (\rho + H) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\lambda) \\
 Y &= (\rho + H) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda) \\
 Z &= ((1 - e^2) \cdot \rho + H) \cdot \sin(\varphi)
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

kde φ je zemepisná šírka a λ je zemepisná dĺžka a H je výška nad elipsoidou uvedená v metroch. Ďalej ρ je priečný polomer krivosti a počíta sa podľa vzorca (6.2) a e je excentricita elipsoidy, ktorá sa počíta podľa vzorca (6.3)

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (6.2)$$

$$\rho = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (6.3)$$

Hodnoty a veľká poloosa, b je vedľajšia poloosa, ich hodnoty nájdeme v tabuľke 6.1 pre konkrétnu elipsoidu.

Pre prevod medzi celosvetovým a európskym systémom pravouhlých súradníc existujú prevodné algoritmy, cieľom tejto práce však nie je skúmať a popisovať tieto algoritmy. Pre prevod sa použili už existujúce aplikácie, ktoré sú verejne prístupné.

6.3. Použitie Kalmanovho filtra XKF

Okrem vyššie popísanej metódy, keď sa celkový výpočet polohy deje v mikrokontroléri je možné použiť výrobcom vstavaný Kalmanov filter, ktorý je použiteľný v rôznych scenériách závislých na konkrétnej aplikácii snímača.

Kalmanov filter[3][7] je štatistická matematická metóda, ktorá na základe niekoľkých menej presných meraní z rôznych snímačov dokáže odhadnúť správny výsledok. Pri správnom nastavení použitie Kalmanovho filtra zvyšuje pravdepodobnosť, správneho výsledku. Kalmanov filter sa používa napríklad pri zistení polohy použitím viacerých zašumených snímačov. V ideálnom prípade na presnosť merania vplyva len šum. Nastavenie Kalmanovho filtra len s uvažovaním šumu by bolo v celku jednoduché. Potrebovali by sme niekoľko meraní v rovnovážnom stave, z ktorých by sa dala určiť smerodajná odchýlka. V skutočnosti sú okrem šumu aj iné chyby, ktoré sa musia uvažovať pri nastavovaní filtra. Takými chybami sú nesprávne matematické predpoklady, nepresný matematický model snímača, nesprávne alebo časovo premenné kalibračné parametre.

XKF – xsense kalman filter[1] pre MTi-G koriguje hodnoty orientácie a pozície pri šiestich stupňoch voľnosti s použitím GPS navigačných dát. Filter je rozdelený na predikčný krok a korekčný krok. V predikčnom kroku sa časovo integrujú hodnoty inerciálnych snímačov a tým sa získavajú informácie o pozícii a orientácii. V korekčnom kroku sa za pomoci GPS navigačných informácií a v závislosti na scenérii pomocou barometru, magnetometru alebo neholonomnými obmedzeniami korigujú údaje získané v predikčnom kroku.

Snímač MTi-G má dopredu definovaných niekoľko scenérií pre použitie Kalmanovho filtra. Pri nastavení na všeobecné použitie - *General* sa hodnoty inerciálnych snímačov korigujú pomocou GPS navigačných údajov a barometrom. Doporučuje sa použiť v prostredí, ktoré môže vplyvať na okolité magnetické pole a taktiež v situáciách keď sa nemôžu využiť neholonomné obmedzenia. Toto nastavenie

je vhodné použiť v prípadoch ak často dochádza k zmenám rýchlosti. Pri zastavení, alebo konštantnej rýchlosti trvajúcich viac ako 10 sekúnd dôjde k pomalej degradácii údajov. Pri ďalšej zmene rýchlosti sa však údaje znova upresnia. Existuje aj rovnaké nastavenie pre prostredie bez prístupu k vonkajšiemu vzduchu, preto sa v ňom nepoužíva barometer.

Nastavenie pre letectvo - *Aerospace* zahrňuje použitie inerciálnych snímačov, GPS ale aj magnetického snímača pre určenie smeru. Pri využití magnetického poľa zeme sa aj bez zmeny rýchlosti môže pozorovať orientácia. Dôležité pri danom nastavení je správna kalibrácia magnetického snímača v prípade ak sú v blízkosti materiály ktoré ovplyvňujú magnetické pole. Existuje nastavenie s a bez použitia barometru pre spresnenie zmeny výšky.

Automobilové nastavenie - *Automotive* je vhodné pre vozidlá, u ktorých sa pri pohybe nepredpokladá bočný preklz. Predpokladá sa, že snímač bude pripevnený tak, aby mal x-ovú osu v smere pohybu vozidla. Krátky bočný preklz by nemal vo veľkej miere ovplyvniť presnosť merania. Neholonómne obmedzenia sa uplatňujú iba pri rýchlostiach vyšších než 2 m/s. Aj pre toto nastavenie filtru existuje možnosť výberu použitia barometru.

Námorné nastavenie - *Marine* podobne ako letecké používa magnetometer pre spresnenie informácií o orientácii snímača. Preto je znova dôležitá kalibrácia tohto snímača. Dané nastavenie vyhovuje zariadeniam, ktoré sa značnou rýchlosťou pohybujú po hladne.

7. DIFERENČNÉ ZISTENIE POLOHY

7.1. Trimble BD982 GNSS prijímací Modul

Prijímací modul[20] využíva pokročilé navigačné architektúry pre zistenie polohy s centimetrovou presnosťou a to v reálnom čase. Prijímač sa používa v rôznych navigačných aplikáciách, kde je potrebná vysoká presnosť a krátke časové oneskorenie. Automatická inicializácia a prepínanie medzi polohovacími režimami umožňujú zistiť čo najpresnejšiu možnú pozíciu. Veľkou výhodou je krátke časové oneskorenie, väčšinou menej ako 20 ms, a vysoká miera aktualizácie polohy. Prijímací modul bol skonštruovaný tak, aby vyhovel vo všetkých prostrediach. Môže byť pripojený ku kancelárskemu počítaču, k externému zariadeniu alebo k riadiacemu systému. Prijímač sa môže ovládať cez sériovú linku, ethernet, USB alebo CAN. Prijímač sa môže nastaviť ako autonómna bázo­vá stanica, alebo ako mobilný prijímač na vozidle.



Obr. 7.1: Trimble BD982 GNSS prijímací modul

Výstupom zariadenia je presný čas, poloha, smer, počet viditeľných satelitov a taktiež synchronizačný impulz pre ďalšie zariadenia. Pozičná anténa zariadenia je schopná prijímať signál z niekoľkých systémov satelitnej navigácie. Okrem GPS môže prijímať signál aj od systému GLONASS, SBAS, GIOVE-A, GIOVE-B a GALILEO. Podporuje množstvo sieťových protokolov ako napríklad HTTP, NTP, UDP, DNS,

TCP/IP. Zariadenie má širokú škálu možností nastavenia výstupných dát pri rôznych frekvenciách 1 – 50 Hz. Zariadenie sa dá konfigurovať z rôznych webových prehliadačov, čo zjednodušuje prácu s prijímacím modulom. O aktuálnom stave zariadenia poskytujú informácie užívateľovi LED indikátory. Nevýhodou zariadenia je, že zariadenie nemusí vždy pracovať správne v blízkosti výkonnejších rádiových vysielateľov alebo radarov. Z hľadiska bezpečnosti proti zneužitiu zariadenia pre výrobu zbrane sa limituje maximálna rýchlosť, ktorou sa zariadenie môže pohybovať a maximálna výška. Pri prekročení týchto limitov zariadenie prestane pracovať po dobu, kým sa rýchlosť alebo výška nezníži na požadovanú hodnotu.

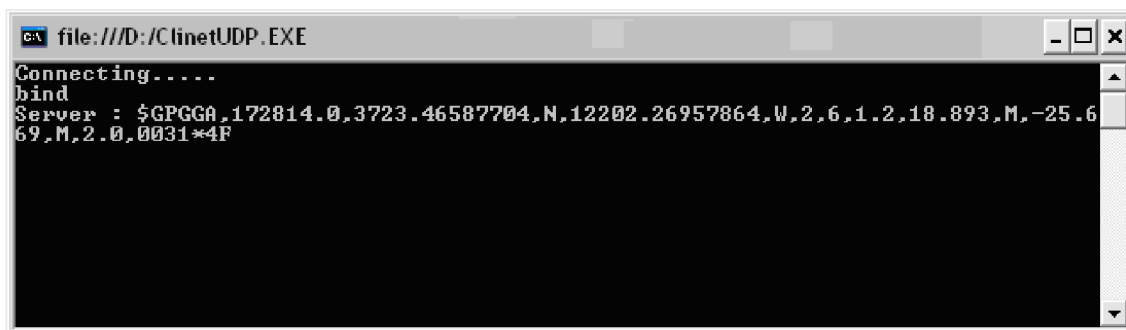
Jednou z možných nastavení výstupnej správy je GGA[20][21]. Pri tomto nastavení sa na výstup posielajú dáta o čase, pozícii a kvalite, presnosti pozičných údajov. NMEA štandard definuje GGA správy. Tieto správy poskytujú dôležitú opravu dát. Väčšina ostatných správ definovaných v NMEA často opakuje rovnaké údaje, ale zároveň poskytuje aj nové informácie. Strana, ktorá prijíma správy musí rozhodovať, ktoré údaje sú z jeho hľadiska dôležité a ktoré sa môžu ignorovať. GGA správa vždy začína sekvenciou „\$GPGGA“ a končí kontrolným súčtom oddeleným od zvyšku správy znakom „* “. Jednotlivé časti správy sú oddeľované čiarkou. Prvá obsahuje koordinačný univerzálny čas UTC pozičnej opravy, ďalej nasleduje zemepisná šírka udaná v stupňoch a minútach. Pre spresnenie zemepisnej šírky sa udáva či ide o severnú, alebo južnú šírku. V našom prípade je severná šírka značená N. Zemepisná dĺžka je vyjadrená podobne ako zemepisná šírka pomocou stupňov a minút, ale tu sa udáva či ide o západnú W alebo východnú E dĺžku. Dôležitým údajom je aj indikátor kvality, ktorý nadobúda hodnoty od 0 do 5 pre prijímací modul Trimble. Hodnota 4 odpovedá Real Time Kinematic – označuje správne prijatie korekcie v reálnom čase od referenčnej stanice. Referenčná stanica má stabilnú polohu, poskytuje korekcie polohy pre prijímací modul v reálnom čase. Správa poskytuje ešte údaje o počte viditeľných satelitov, o výške prijímacieho modulu a o identifikačnom čísle referenčnej stanice.

7.2. Meracia zostava na robote

Meracia zostava pre presné určenie polohy bola vytvorená pracovníkmi VUT. Na tele robota sú pripevnené dve ramená pre uchytenie antén prijímacieho modulu Trimble. Poloha antény na prednom ramene je spresňovaná pomocou dát z antény na zadnom ramene a pomocou ďalšieho prijímacieho modulu s jednou anténou uchytenou na streche budovy školy. Komunikácia medzi robotom a referenčnou stanicou na streche budovy školy sa deje pomocou bezdrôtového WiFi spojenia. Údaje o polohe z tohto zariadenia slúžia pre porovnanie polohy určenej z Netduina. Pri porovnávaní sa poloha z meracieho modulu považuje za presnú.

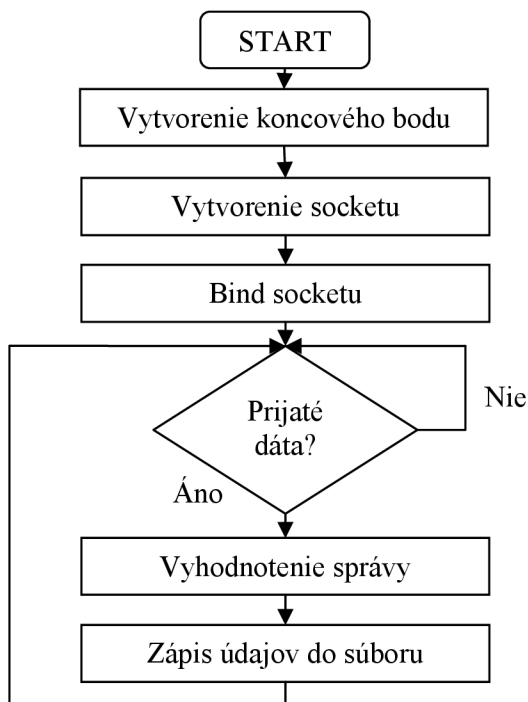
7.3. Program pre ukladanie meraní z Trimble

Za účelom uložiť hodnoty polohy v určitom čase som vytvoril program pre ukladanie GGA správ z prijímacieho modulu Trimble DB982. Komunikácia medzi počítačom a zariadením prebieha po ethernet. Zariadenie sa správa ako UDP server a cyklicky posiela GGA správy UDP klientovi na počítači. Konzolová aplikácia zobrazuje vždy prijatú správu na konzolu a v prípade validných dát sa čas a poloha zaznamenajú do textového súboru. Tieto dáta poslúžia ako referenčné údaje o polohe pre porovnanie s údajmi o polohe z meracej jednotky MTi-G. Obe polohy sú zaznamenané v presnom čase podľa satelitnej navigácie.



```
file:///D:/C:\inetUDP.EXE
Connecting....
bind
Server : $GPGGA,172814.0,3723.46587704,N,12202.26957864,W,2.6,1.2,18.893,M,-25.6
69,M,2.0,0031*4F
```

Obr. 7.2: Program UDP klient Trimble

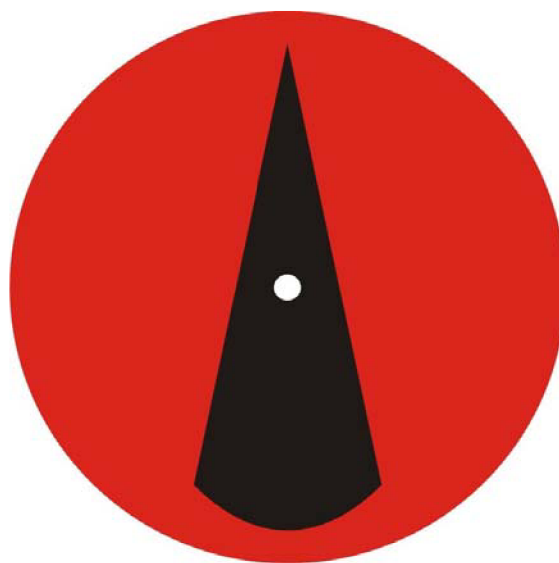


Obr. 7.3: Vývojový diagram UDP klientu

8. PROGRAM PRE SNÍMANIE ZNAČKY KAMEROU

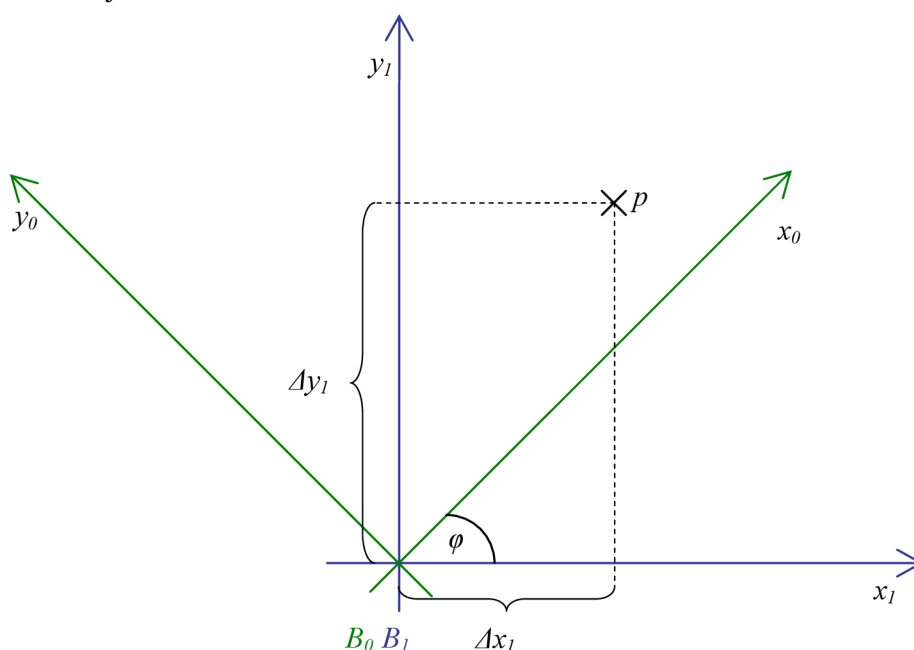
Presnosť polohy, ktorá sa získava z meracej jednotky MTi-G sa pri detekcii značky koriguje podľa polohy značky v obraze. Jednotlivé značky majú určenú svoju polohu s vysokou presnosťou v súradnicovom systéme ETRS. V okolí školy je 6 takýchto presných značiek, ktoré sa môžu použiť pre korekciu polohy. V ostatných prípadoch, keď kamera nemá v dohľade žiadnu značku musí sa poloha robota určiť len na základe dát z meracej jednotky MTi-G. Meracia jednotka určuje polohu v systéme WGS-84. Značky v okolí školy sú reprezentované klincom v chodníku, sú veľmi malé a ťažko detekovateľné. Preto som vytvoril značku, ktorá je jednoducho detekovateľná vo vonkajšom prostredí a dokáže určiť nielen polohu, ale slúži aj pre indikáciu severu. Podľa polohy značky a znalosti severu je možné určiť vzdialenosť medzi aktuálnou pozíciou a značkou a podľa rotácie je taktiež možné dopočítať polohu robota.

Pre detekciu značky kamerou som vytvoril program, ktorý okrem detekcie umožňuje aj kalibrovať polohu kamery a smer natočenia značky. Na základe konštrukcie robota je možné určiť bod na povrchu chodníku, ktorý odpovedá polohe GPS antény. Podľa určeného bodu na chodníku je nutné nakalibrovať polohu kamery tak, aby stred obrazu ukazoval na miesto vertikálne odpovedajúcej polohe GPS antény. Zo znalosti azimutu robota z prijímacieho modulu Trimble je možné nastaviť natočenie značky tak, aby ukazovala na sever. Značka má kruhový obrys o priemeru 125 mm a je červená. Na značke je obrazec, ktorý umožňuje zistiť smer a uhol natočenia.



Obr. 8.1: Značka pre detekciu

Pri detekcii značky sa v programe použil wrapper Emgu CV pre možnosť práce s knižnicou OpenCV v jazyku C#. V zábere kamery je vždy chodník, kde sa hľadá značka. Pri hľadaní sa predpokladá, že v obraze bude len jeden predmet s kruhovým obrysom s daným priemerom a s danou farbou. Obraz sa pri detekcii rozloží na zložky BGR - modrú, zelenú a červenú. Z týchto dielčích obrazov sa vytvorí binárny obraz, ktorý hodnotou 1 reprezentuje červenú farbu a hodnotou 0 všetky ostatné. V prípade ak je vysoká hodnota jasu v červenej zložke a nízke hodnoty jasu rovnakého pixelu v ostatných zložkách tak sa môže s istotou tvrdiť, že v obraze je daný pixel červený. V prípade, ak by sa testovala len červená zložka mohlo by dôjsť k detekcii bielej farby ako červenej, lebo biela má maximálnu hodnotu jasu vo všetkých zložkách tým pádom aj v červenej. V binárnom obraze sa pomocou Houghovho priestoru hľadá kruhový obrys s daným priemerom a s danou dokonalosťou. Dokonalosťou sa rozumie pravidelnosť obrysu, alebo ako veľmi je obrys v skutočnosti kruhový. Táto vlastnosť je dôležitá z hľadiska chybného vyhodnotenia farby pixelov z dôvodu odleskov, alebo iných chýb. Po nájdení kruhového obrysu a stredu kružnice z Houghovho priestoru sa v okolí stredu určí oblasť záujmu ROI, v ktorom sa ďalej hľadá trojuholníkový obrazec určujúci smer severu. Tento obrazec má ostrú hranu ukazujúcu na sever. Podstava je krátka a zaoblená, aby sa nedetekovala pri hľadaní rovných hrán v oblasti záujmu. Rovné hrany sa znova hľadajú pomocou Houghovho priestoru. Hrany musia mať určitú minimálnu dĺžku, aby sa zamedzilo rozpoznaní nepotrebných hrán. Hrany sú reprezentované dvoma bodmi v obraze. Ak je jeden z bodov rovnaký pre obe hrany znamená to, že tento bod určuje smer severu. Ak sa vytvorí nová myslená čiara od stredu kružnice smerom k bodu určujúcemu smer severu, získame uhol náklonu obrazu vzhľadom k súradnej sústave.



Obr. 8.2: Rotácia súradníc okolo osy z

Uvažujme bázu B_1 súradnicového systému v strede obrazu, táto báza má osu x_1 rovnobežnú s vodorovnou hranou obrazu, osa y_1 rovnobežnú so zvislou hranou obrazu. Hodnoty osy x_1 sú kladné smerom doprava a osy y_1 smerom hore od stredu obrazu. Uvažujme bázu B_0 rovnako ako bázu B_1 v strede obrazu, s tým rozdielom, že jednotlivé osy sú posunuté o uhol zistený podľa náklonu značky k obrazu. Polohu značky môžeme aproximovať hodnotou stredu kružnice p . V takom prípade sa dá poloha bodu p previesť z báze B_1 do báze B_0 ako rotácia okolo osy z , ktorá sa uvažuje kolmo na osy x a y , smerom do obrazu.

Výpočet polohy bodu p vzhľadom k bázi B_0 je možný previesť pomocou rotačnej matice R_{01} [2], pre rotáciu okolo osy z . Bod p má v bázi B_1 polohu popísanú súradnicami Δx_1 a Δy_1 . V skutočnom obraze z kamery je počiatok súradného systému v hornom ľavom rohu, preto sa súradnice pixelov musia prepočítavať na bázu B_1 . Súradnice bodu p podľa bázy B_0 sú podľa nasledujúcich rovníc rovné Δx_0 , Δy_0 a Δz_0 .

$$p_0 = R_{01}(\varphi) \cdot p_1 \quad (8.1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

$$\Delta x_0 = \cos(\varphi) \cdot \Delta x_1 - \sin(\varphi) \cdot \Delta y_1 + 0 \quad (8.3)$$

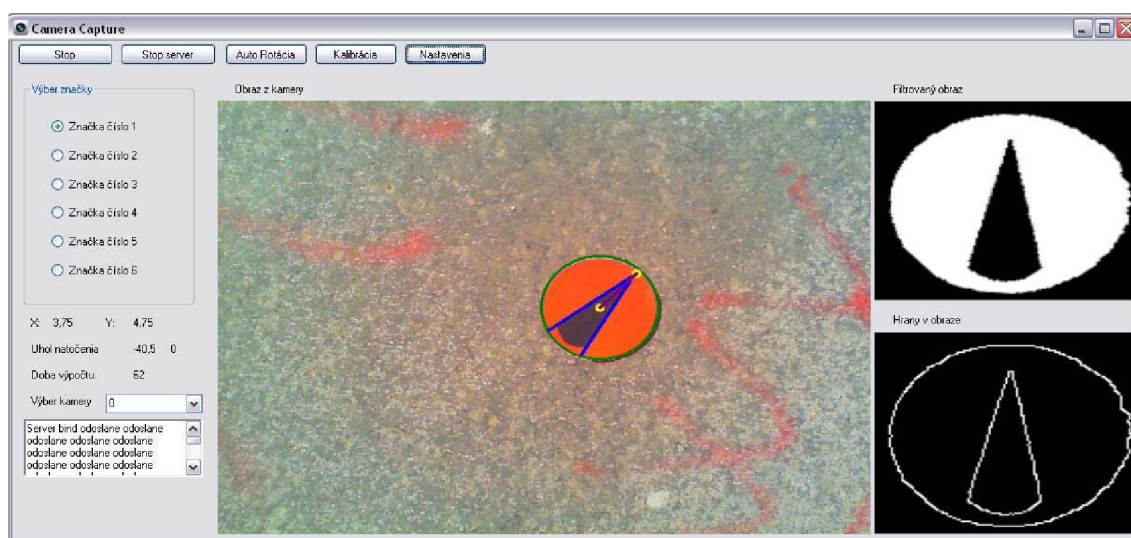
$$\Delta y_0 = \sin(\varphi) \cdot \Delta x_1 + \cos(\varphi) \cdot \Delta y_1 + 0 \quad (8.4)$$

$$\Delta z_0 = \Delta z_1 \quad (8.5)$$

Hodnoty súradníc sú pri výpočte uvedené v pixeloch, aby sme mohli získať korekciu v stupňoch pre zemepisnú šírku a pre zemepisnú dĺžku, najprv sa hodnoty prevedú z pixelov na milimetre. Prevodný pomer medzi pixelami a milimetrami závisí na upevnení kamery, konkrétne na vzdialenosti snímača od snímaného povrchu. Pre uchytenie kamery na robote bol experimentálne zistený tento prevodný pomer na 1,1172. Zo znalosti vzdialeností v jednotlivých smeroch od počiatku k bodu p je možné zistiť korekciu v stupňoch. Pre zemepisnú šírku a zemepisnú dĺžku sú pomery medzi vzdialenosťou v milimetroch a stupňami odlišné. Jeden stupeň zemepisnej šírky v oblasti výskytu bodov v okolí školy odpovedá 111214,175 metrom[19]. Jeden stupeň zemepisnej dĺžky odpovedá v tejto oblasti 72832,5 metrom[19]. Osa x_0 reprezentuje zemepisnú šírku a osa y_0 zemepisnú dĺžku. Takto určená korekcia spresňuje údaj o polohe robotu v prípade viditeľnosti antény.

Číslo korigovaného bodu a korekcia sa posielajú cez UDP server v aplikácii do Netduina, aby sa ďalej mohlo pracovať s presnejšou hodnotou. UDP server posiela dáta na IP adresu Netduina na konkrétny port. Jednoduchosť UDP spojenia spočíva v tom, že sa nemusí naväzovať spojenie a posiela sa bez potvrdzovania.

Po spustení programu má užívateľ možnosť voľby kamery, pre prípad ak by bolo k zariadeniu pripojených viac kamier. Výber sa deje pomocou rozbaľovacieho zoznamu *Výber kamery*. Kde si užívateľ môže vybrať číslo pripojenej kamery. V prípade ak je k počítaču pripojená len jedna kamera jej číslo je väčšinou 0. Ak si užívateľ nezvolí žiadnu kameru, potom sa automaticky načítavajú obrázky z kamery 0. Po stlačení tlačidla *Start* sa začne načítavať obraz z kamery a začne sa vyhodnocovať. Tlačidlo sa premenuje na *Stop* a pri stlačení sa prestane vyhodnocovať a načítavať obraz. Tlačidlo *Start Server* slúži na spustenie UDP serveru ak je pripojené Netduino do siete počítača.



Obr. 8.3: Program pre detekciu značky

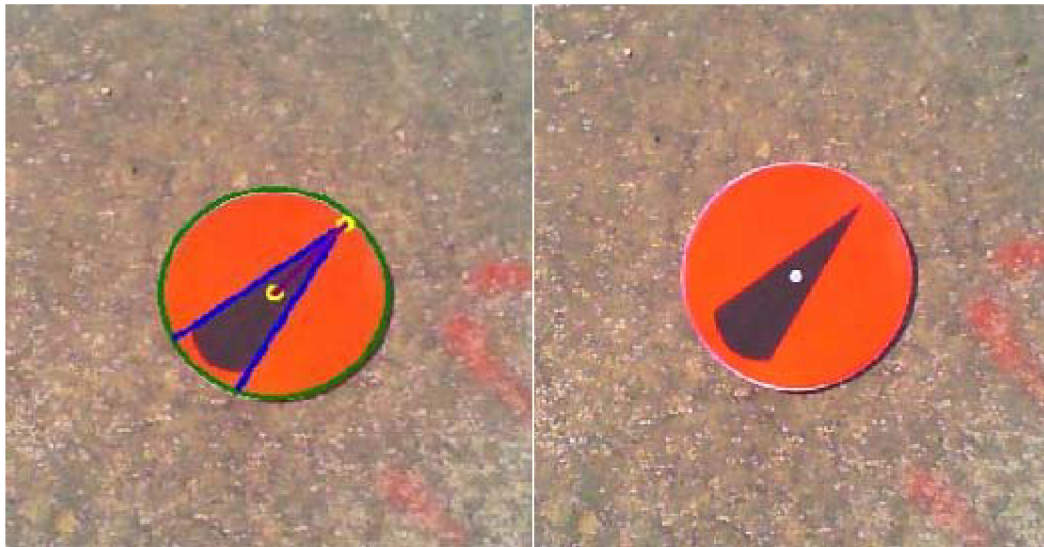
Podobne ako u predošlého tlačidla aj tu sa server zastavuje pomocou *Stop Server*. Po správnom vyhodnotení značky v obraze je možné spustiť tlačidlom *Auto Rotácia*, prepočet rotácie bodu okolo stredu podľa vyššie popisovaného algoritmu výpočtu. V prípade ak je spustená auto rotácia a aj server, posielajú sa korekčné údaje na Netduino. Tlačidlo *Kalibrácia* vykreslí zelený kríž cez celý obraz so stredom v strede obrazu. Pomocou tohto kríža je možné nastaviť správnu polohu kamery pri inštalácii na rameno robota. Ak sa anténa nastaví napríklad nad jednu zo značiek je možné napolohovať kameru tak aby stred obrazu ukazoval na značku. Po spustení programu a stlačení tlačidla *Start* sa nám zobrazia do troch rámov tri obrázky. Najväčší z nich, v strede, je obraz z kamery. V prípade stlačenia tlačidla *Nastavenia* sa obraz presunie na pravý horný roh a miesto pôvodného veľkého obrazu sa zobrazí pole nastavení.

Obraz z kamery zobrazuje priamo obraz zachytený kamerou vo farebnom prevedení, rozšírený o označenie značky na obraze zelenou kružnicou s priemerom rovnakým ako detekovaná značka a so stredom vyznačeným žltým bodom. Po nájdení značky v obraze

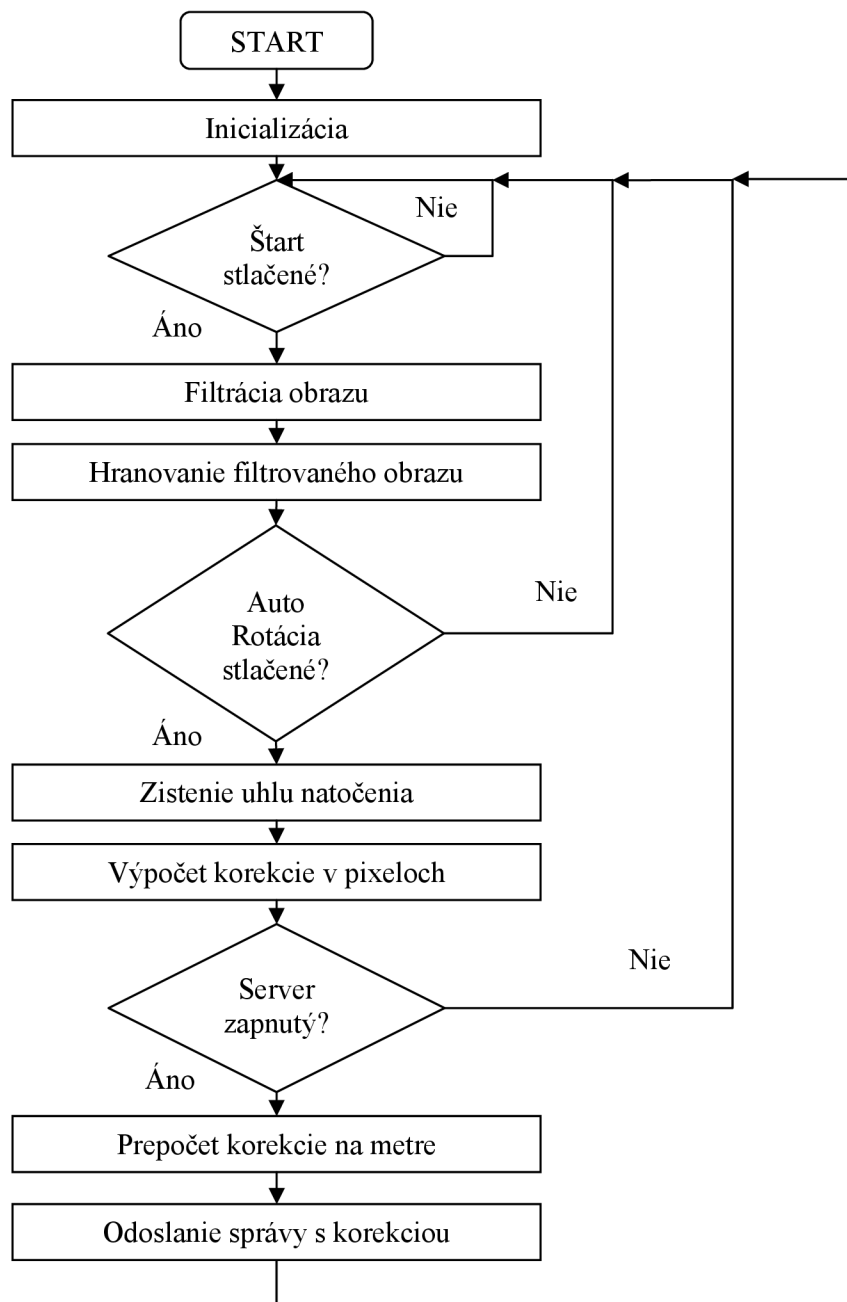
sa nastaví oblasť záujmu na okolie stredu značky a hľadá sa obrazec udávajúci smer severu. Hrany obrazca sú vykreslené modrou čiarou a smer severu je znova znázornený žltým bodom. Spojnica žltých bodov udáva uhol náklonu vyčíslený pre užívateľa ako *Uhol natočenia*. V pravom hornom rohu sa zobrazuje filtrovaný obraz. Oblasti červenej farby sú znázornené bielo, ostatné čierno. Pod filtrovaným obrazom sú zobrazené hrany v obraze. Tieto dve zobrazenia slúžia hlavne pri nastavovaní filtrácie a hľadani obrysov a hrán v Houghovo priestore.



Obr. 8.4: Nastavenia programu



Obr. 8.5: Rozpoznanie značky na obraze z kamery



Obr. 8.6: Vývojový diagram programu pre kameru

8.1. Použitá kamera

Kamera, ktorá bola použitá pre detekciu značky mála nastavené rozlíšenie 640x480 pixelov. Kamera je označovaná ako Microsoft LifeCam HD-3000 a umožňuje snímať video až s rozlíšením až 1280x720. Nižšie rozlíšenie bolo zvolené kvôli náročnosti spracovania obrazu a dlhým časovým oneskoreniam videa. Obraz má pomer 16:9 a jeho

širšia strana je priečne k pohybu robota, aby zaznamenala značku v čo najväčšej vzdialenosti. Kamera automaticky prispôsobuje jas svetelným podmienkam, čo je výhodné pri zmene osvetlenia na voľnom priestranstve. Kamera bola dodatočne vybavená LED osvetlením, ktoré sa pri vonkajších testoch ukázalo ako nadbytočné. Podstavec kamery bol zmodifikovaný pre jednoduchšie uchytienie a kalibráciu na ramene robota.



Obr. 8.7: Microsoft LifeCam HD-3000

8.2. Wrapper Emgu CV

Emgu CV[18] je multiplatformový .NET wrapper pre knižnicu OpenCV pre spracovanie obrazu. Pomocou Emgu CV je možné volať funkcie OpenCV v programovacích jazykoch založených na .NET, ako napríklad C#, Visual Basic, C++ a iné. Wrapper sa môže taktiež kompilovať pomocou Mono a použiť na operačných systémoch Linux a Mac OS X.

Práca s obrazom v Emgu CV je podobná ako v OpenCV, s tým rozdielom, že niektoré funkcie majú odlišné parametre. Veľa funkcií je o niečo špecifickejších pre konkrétnu úlohu než to bolo u OpenCV. Wrapper tým, že umožňuje použiť už hotové funkcie pre prácu s obrazmi z OpenCV urýchľuje prácu a zjednodušuje vývoj aplikácií.

8.2.1. Knižnica OpenCV

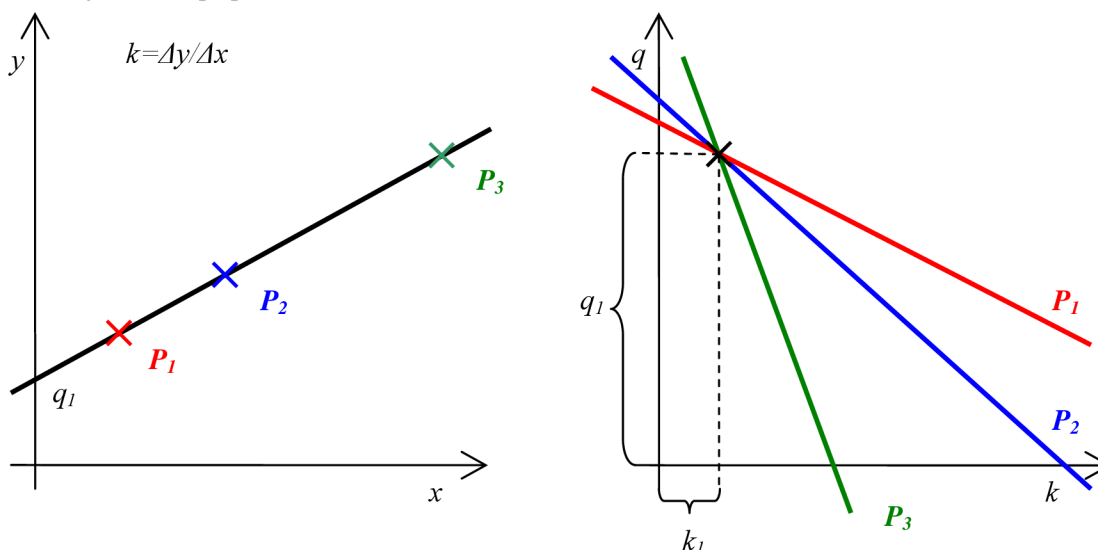
Otvorená knižnica počítačového videnia[17] slúži k spracovaniu obrazu v reálnom čase. Táto knižnica sa môže používať pre akademické aj komerčné účely. OpenCV obsahuje 2500 optimalizovaných algoritmov pre manipuláciu s obrazom. Pôvodne bola vyvinutá firmou Intel. Knižnica dokáže urýchliť aj prácu s IPP - Integrated Performance Primitives. Prvá verzia bola oficiálne sprístupnená v roku 1999 a slúžila ako ukážka výkonnosti procesorov. Pri vytváraní aplikácií v tomto projekte sa použila verzia 2.1 knižnice.

8.3. Houghova transformácia

Houghova transformácia[15][16] sa používa na detekciu objektov, ktorých kontúry sa dajú jednoducho analyticky popísať. Takými objektmi sú napríklad priamky, kružnice a elipsy. Táto transformácia nachádza parametrický popis objektu v obraze. Pri hľadaní je nutná znalosť analytického popisu krivky obrysu. Táto metóda je odolná voči nerovnostiam a poruchám na obryse objektu a má dobrú úspešnosť v nachádzaní objektov aj pri čiastočnom zakrytí alebo pri zašumení obrazu. Dá sa použiť zobecnená Houghova transformácia aj pri detekcii zložitejších objektov, ktoré sa nedajú popísať jednoduchým analytickým popisom. Aplikácia tejto transformácie je najvýhodnejšia pre binárne hranované obrazy. Nevýhodami je okrem výpočetnej a časovej náročnosti aj nepresné určenie hrany pri hrubej, alebo zakrivenej hrane v obraze a namiesto úsečky detekuje priamky, na ktorých nemôžeme určiť začiatok a koniec. Priamku môžeme popísať rovnicou (8.6), kde x a y sú súradnicami bodu, k je smernica priamky a q udáva bod, kde sa pretína y -ová os.

$$y = k \cdot x + q \quad (8.6)$$

Body P_1 , P_2 a P_3 ležia na priamke v originálnej oblasti priestoru xy , ak ich prevedieme do Houghovho priestoru, priestoru kq stanú sa z nich priamky, ktoré sa pretínajú v jednom bode. Tento bod reprezentuje priamku v originálnej oblasti. Pri hľadaní priamok v obraze by v Houghovom priestore priamky predstavovali body, kde sa pretína najväčšie množstvo priamok. Pre iné analytické popisy by sa vytvorili iné Houghové priestory, počet dimenzií priestorov by udával počet premenných v analytickom popise.



Obr. 8.8: Houghov priestor

8.4. Testovací polygón Laboratória teleprezencie a robotiky

Poloha robotu bola určovaná pomocou presne známych bodov v okolí školy, na ktoré sa uložili vytvorené značky pre efektívnejšie snímanie kamerou. Tieto body slúžia jednak pre korekciu údajov z meracej jednotky MTi-G a jednak ako referenčné body, s ktorými sa môžu porovnávať údaje z MTi-G. Na testovacom polygóne je 6 bodov, ktorých poloha je známa. Tieto body sú zakreslené na mape okolí školy v prílohe číslo 1. Poloha bodov je určená v súradnicovom systéme ETRS-89 a v súradnicovom systéme jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej S-JTSK. Pre určovanie polohy sa použili polohy vyjadrené v ETRS-89, ktoré sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Číslo bodu.	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Výška
1	49° 13' 51.57316" N	16° 34' 17.41968" E	325.496
2	49° 13' 51.99926" N	16° 34' 18.77828" E	324.825
3	49° 13' 52.72314" N	16° 34' 21.03657" E	322.979
4	49° 13' 51.08163" N	16° 34' 21.55961" E	323.486
5	49° 13' 50.33275" N	16° 34' 19.21946" E	326.309
6	49° 13' 50.74764" N	16° 34' 18.62832" E	325.908

Tab. 8.1: Zoznam súradníc ETRS-89

Pri práci s jednotlivými súradnicami bolo potrebné vyjadriť súradnice ako jedno desatinné číslo. Prevod medzi stupňami a minútami a sekundami je podobný ako v čase.

Jeden stupeň sa skladá zo 60 minút a jedna minúta zo 60 sekúnd.

$$1^{\circ} = 60' = 3600'' \quad (8.7)$$

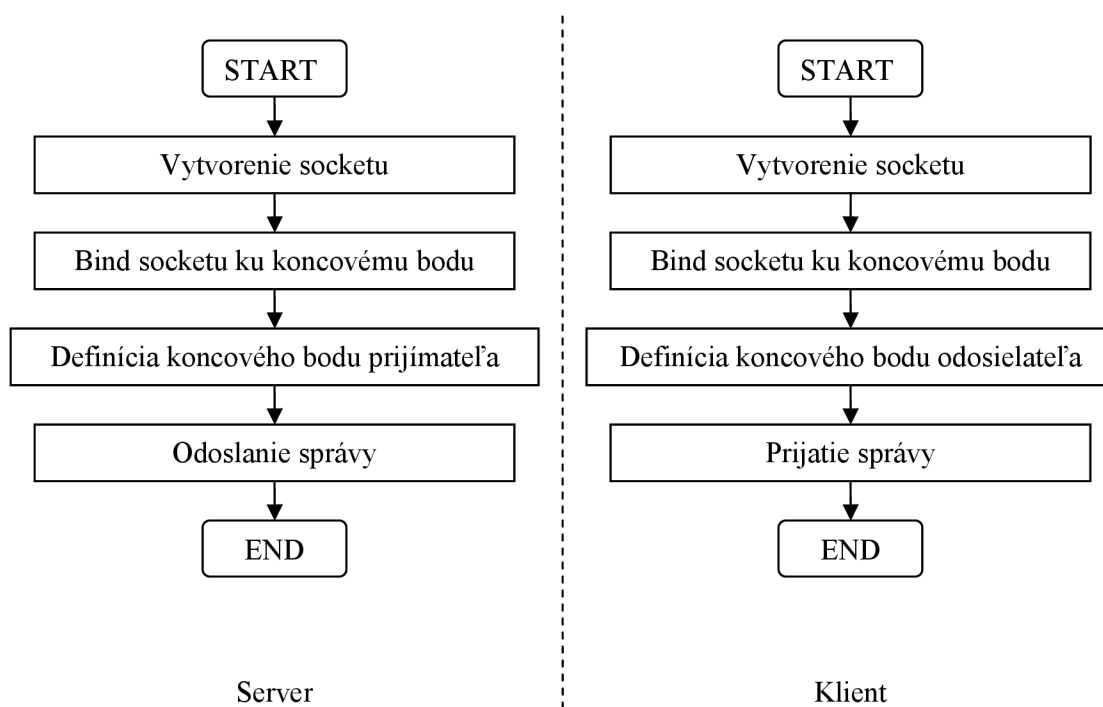
8.5. UDP server a klient

UDP alebo taktiež User Datagram Protocol je jedným zo sady protokolov internetu. Tento protokol sa často označuje ako nespoľahlivý, pretože na rozdiel od TCP nezaručuje bezchybný prenos datagramov, a ani ich opravu v prípade chyby. Datagramy môžu byť doručené v zlom poradí, so zmenou obsahu alebo môže dôjsť k viacnásobnému doručeniu. Tento protokol je vhodný pre komunikáciu na princípe otázka odpoveď, alebo pre aplikácie, ktoré majú obmedzený výpočetný výkon.

Základom serveru je vytvorený socket[14], ktorý plní úlohu koncového komunikačného uzlu. Socket je v skutočnosti len abstrakcia, ktorá reprezentuje dátovú štruktúru, v ktorej sú definované potrebné údaje pre komunikáciu. Pri vytváraní socketu je definovaná rodina adries, typ komunikácie a komunikačný protokol. Definujú sa koncové body pomocou IP adresy a portu, pre prijímanie a odosielanie dát. Socketu sa

pomocou bind príkazu priradí IP adresa a socket. Potom sa môžu dáta posielat' vzdialenému koncovému bodu, klientovi.

Klient podobne ako server musí mať definovaný koncový bod s IP adresou a portom komunikácie, ktorý sa priradí socketu. Klient sa pripojí k socketu a čaká na prijatie dát od serveru. Je často výhodnejšie umiestniť klienta do samostatného vlákna, alebo testovať dostupnosť prijatých dát ak je program vytvorený ako jedna supersmyčka. V opačnom prípade sa vždy musí čakať na prijatie dát od serveru a až potom sa môžu previesť ostatné operácie.



Obr. 8.9: Vývojový diagram – UDP komunikácia

9. VYHODNOTENIE PRESNOSTI POLOHY

Hodnota polohy z meracej jednotky MTi-G je reprezentovaná pomocou zemepisnej šírky a dĺžky udávanej v stupňoch a výškou udávanej v metroch nad elipsoidou. Tieto údaje sú vzťahované k svetovému geodetickému referenčnému systému WGS-84. Údaje o polohe jednotlivých bodov na školskom testovacom polygóne sú udávané rovnako zemepisnou šírkou a dĺžkou a výškou nad elipsoidou, ale v európskom terestriálnom referenčnom systéme ETRS. Preto sa jednotlivé merania nemôžu priamo porovnávať medzi sebou. Hodnoty korekcie pre Netduino poskytované kamerovým snímačom sú udávané priamo pre polohy v ETRS, preto v prípade ak kamera zaznamená značku a je vypočítaná platná korekcia výsledkom je pozícia v systéme ETRS. V prípade ak nie je možné spresniť polohu podľa značky, musí sa spoliehať na údaje, ktoré sú získavané z meracej jednotky MTi-G udávané v systéme WGS-84.

Za presné meranie polohy sa považujú údaje získané z prijímacieho modulu Trimble. Modul poskytuje údaje o pole v systéme ETRS.

Pri porovnaní polohy je potrebné mať k dispozícii všetky hodnoty o polohe v systéme ETRS. Jediným prípadom ak sa udáva poloha v systéme WGS-84 je ak sa nezaznamená značka kamerovým snímačom. Pre tento prípad je potrebné previesť merané údaje do systému ETRS. Pre prevod je nutný prepočet na pravouhlé súradnice. Prevod na pravouhlé súradnice je bližšie popísaný v kapitole 6.2.1. Na prevod pravouhlých súradníc medzi ETRS a ITRS existujú voľne dostupné aplikácie[13]. Cieľom tejto práce nebolo vytvoriť aplikáciu, ktorá by prevádzala hodnoty o polohe medzi jednotlivými súradnicovými systémami, preto sa pre prevod použila už existujúca webová aplikácia[13]. ITRS a WGS-84 sú popisované v kapitole 6.2.1.

Jednotlivé merania polohy boli realizované robotom zobrazeným v prílohe 2. Súčasne s týmto meraním prebiehalo na robote aj ďalšie meranie, pri ktorom bolo potrebné dlhšiu dobu, rádovo minúty, stáť na jednom mieste.

Pri meraní pomocou meracej jednotky MTi-G sa použilo nastavenie *General*, toto nastavenie nevyužíva magnetické pole k zlepšeniu výsledku preto je menej ovplyvnené okolitou zmenou magnetického pola. V prípade ak je zariadenie viac ako 10 sekúnd bez pohybu, hodnoty polohy pomaly začnú degradovať, ale ak sa zariadenie znovu pohne tak sa chyba spôsobená nehybnosťou opraví. Ďalšie možnosti nastavenia XKF sú uvedené v kapitole 6.3.

9.1. Výpočet vzdialenosti medzi dvoma súradnicami

Pre porovnanie rôznych meraní polohy rovnakého bodu sa využil výpočet vzdialenosti medzi dvoma súradnicami. Za presnejšiu hodnotu polohy bola považovaná poloha určená pomocou meracieho modulu Trimble. Vzdialenosť sa počíta pomocou

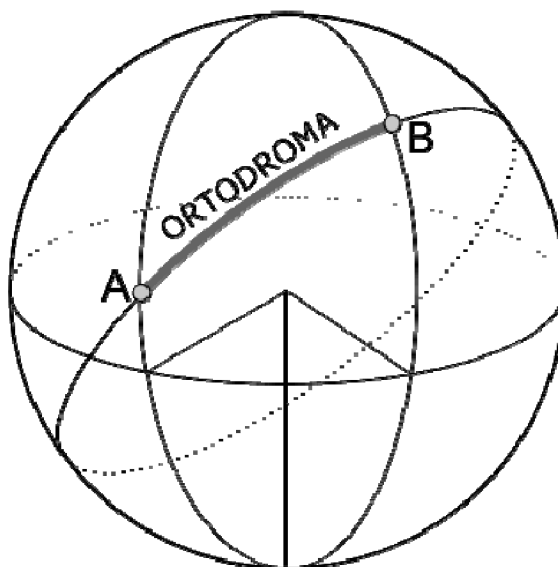
Haversinovej rovnice[11]. Haversinová rovnica je špeciálnym prípadom sférickej trigonometrie. Rovnicou (9.3) sa môže zistiť najkratšia vzdialenosť medzi dvoma bodmi na guľatej ploche, táto vzdialenosť sa nazýva Ortodroma[12]. Vypočítaná vzdialenosť je bez uváženia nerovností na zemskom povrchu. Tvar Zeme sa väčšinou aproximuje geoidom, alebo rotačným elipsoidom, ale vzhľadom na to, že vzdialenosti medzi dvoma bodmi sa pohybujú rádovo v metroch, nemala by mať na presnosť veľký vplyv aproximácia guľovým objektom.

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (9.1)$$

$$c = 2 \cdot \arctan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (9.2)$$

$$d = R \cdot c \quad (9.3)$$

Uhol φ udáva zemepisnú šírku a λ zemepisnú dĺžku. Pri výpočte sú známe dva body definované dvojicou zemepisných súradníc φ_1, λ_1 a φ_2, λ_2 . Rozdiel zemepisných šírok sa označuje ako $\Delta\varphi$ a rozdiel zemepisných dĺžok ako $\Delta\lambda$. Hodnota c je uhlová vzdialenosť a a je polovica dĺžky tetivy. Tetiva je úsečka spájajúca dva body na kružnici. R udáva polomer kružnice, na ktorej sa hľadá vzdialenosť medzi bodmi. Pre tento prípad sa použije priemerný polomer Zeme 6371 km. Funkcia $\arctan 2(x,y)$ udáva uhol zovretý osou x a polohovým vektorom, ktorý prechádza bodom x,y .



Obr. 9.1: Ortodroma[12]

9.2. Príklad výpočtu

Pre porovnanie sú k dispozícii údaje o polohe z Trimble v systéme ETRS v konkrétnom čase, údaje o polohe z MTi-G vo WGS-84 pre konkrétne časy a hodnoty korekcie z kamerového snímača pre zemepisnú šírku a dĺžku v metroch.

Príklad výpočtu je pre značku číslo štyri, ktorá je v prílohe jedna na obrázku označená číslom 4. Hodnoty meraní sú uvedené v prílohe číslo šesť. Bod 3 označuje tretiu polohu v blízkosti značky 4.

Bod 3	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Rozdiel [m]
Trimble [°]	49,23085577	16,57265289	0
Netduino WGS [°]	49,23086929	16,57266617	1,785
Netduino ETRS [°]	49,23086772	16,57266305	1,52
Korekcia [m]	-0,19	-0,2	
Kamera [°]	49,2308543	16,5726527	0,1640

Tab. 9.1: Merané údaje

Hodnoty v tabuľke pre polohu z prijímacieho modulu Trimble, pre polohu z Netduina vo WGS-84 a pre korekciu boli určené priemerom z väčšieho počtu meraní, ktoré trvalo vždy minimálne jednu minútu. Hodnoty sú udávané pre rovnaké časové intervaly porovnané podľa presných časových údajov poskytovaných satelitným polohovacím systémom.

Korekcia je prepočítaná na stupne a pripočítaná k polohe značky. Pre tento prípad je poloha značky podľa tabuľky 10.1 $49^{\circ} 13' 51.08163''$ N zemepisnej šírky a $16^{\circ} 34' 21.55961''$ E zemepisnej dĺžky. Po prepočte podľa rovnice (8.7) dostaneme tieto hodnoty vyjadrené ako desatinné čísla v stupňoch.

$$49^{\circ} 13' 51.08163'' \text{ N} = 49,2308560083333^{\circ} \text{ N}$$

$$16^{\circ} 34' 21.55961'' \text{ E} = 16,5726554472222^{\circ} \text{ E}$$

Hodnoty korekcie sa podľa kapitoly 8 prepočítajú na stupne podľa pomeru udávaného pre zemepisnú dĺžku a pre zemepisnú šírku.

$$\text{latitude} = \frac{\text{korekcia}}{\text{pomer}} + \text{poloha} = \frac{-0,19}{111214,175} + 49,2308560083333 = 49,2308543^{\circ}$$

$$\text{longitude} = \frac{\text{korekcia}}{\text{pomer}} + \text{poloha} = \frac{-0,2}{72832,5} + 16,5726554472222 = 16,5726527^{\circ}$$

Pre výpočet vzdialenosti medzi určenými polohami sa použili vzorce popisované v kapitole 9.1. Vzdialenosť medzi bodom určeným pomocou Trimble a bodom vypočítaným z korekcie snímača s kamerou je nasledujúci.

$$\Delta\varphi = |49,2308543 - 49,23085577| = 0,00000147$$

$$\Delta\lambda = |16,5726527 - 16,57265289| = 0,00000019$$

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$$

$$a = \sin^2\left(\frac{0,00000147}{2}\right) + \cos(49,2308543) \cdot \cos(49,2308557) \cdot \sin^2\left(\frac{0,00000019}{2}\right)$$

$$a = 1,65734271 \times 10^{-16}$$

$$c = 2 \cdot \arctan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})$$

$$c = 2 \cdot \arctan 2\left(\sqrt{1,65734271 \times 10^{-16}}, \sqrt{1-1,65734271 \times 10^{-16}}\right)$$

$$c = 2,5748 \times 10^{-8}$$

$$d = R \cdot c = 6371 \cdot 2,5748 \times 10^{-8} = 0,0001640 \text{ km} = 0,164 \text{ m}$$

Pre prevod polohových súradníc z Netduina, ktoré meracia jednotka MTi-G poskytuje v systéme WGS-84 ako zemepisnú šírku, zemepisnú dĺžku v stupňoch a výšku nad elipsoidou v metroch, sa použila aplikácia[13], ktorá vyžaduje súradnice v systéme priestorových pravouhlých súradníc v metroch. Tento prevod do priestorových pravouhlých súradníc je realizovaný vzorcom 6.1 popisovaným v kapitole 6.2.1. Hodnoty a a b sú uvedené v tabuľke 6.1. Výška sa uvažuje rovnaká ako pre značku 4 podľa tabuľky 9.1 $H = 323.486 \text{ m}$.

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = \sqrt{1 - \frac{6356752,31425^2}{6378137,0^2}} = 0,08181919083$$

$$\rho = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi)}} = \frac{6378137,0}{\sqrt{1 - 0,08181919083^2 \cdot \sin^2(49,23086929)}} = 6390417,5241$$

$$X = (\rho + H) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\lambda)$$

$$X = (6390417,5241 + 323,486) \cdot \cos(49,23086929) \cdot \cos(16,57266617)$$

$$X = 399873.4423 \text{ m}$$

$$Y = (\rho + H) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda)$$

$$Y = (6390417,5241 + 323,486) \cdot \cos(49,23086929) \cdot \sin(16,57266617)$$

$$Y = 1190336.5718 \text{ m}$$

$$Z = ((1 - e^2) \cdot \rho + H) \cdot \sin(\varphi)$$

$$Z = ((1 - 0,08181919083^2) \cdot 6390417,5241 + 323,486) \cdot \sin(49,23086929)$$

$$Z = 4807609,2500$$

10. ZÁVER

Výsledkom tejto práce je sebalokalizačný systém realizovaný na platforme Netduino Plus. S využitím meracej jednotky MTi-G a vytvoreného snímača s kamerou pre sledovanie značiek na testovacom polygóne sa môže určiť poloha zariadenia.

Vytvorený snímač s kamerou bol testovaný na testovacom polygóne, hľadané body sa zvýraznili značkami, ktoré je efektívnejšie hľadať v obraze snímanej kamerou. Snímač detekoval značky pri rôznych svetelných podmienkach počas testovania. Verziu programu pomocou, ktorého pracuje snímač s kamerou som vytvoril pre 32bitový a aj v 64bitový operačný systém. Program využíva za pomoci wrapperu EmguCV funkcie knižnice OpenCV.

Ďalej som úspešne realizoval prepojenie elektronickej platformy Netduino Plus so snímačom MTi-G. Vytvoril som program, ktorý dokáže zaznamenávať aktuálne merané dáta spolu s korekciami od snímača s kamerou do textového súboru na SD kartu pripojenej k elektronickej platforme. Program v elektronickej platforme komunikuje na základe protokolu popisovaného v kapitole 5.2. Pre spojenie rozhrania platformy a rozhrania snímača som navrhol a realizoval prevodník logickej úrovne UART na RS 232.

Pre možnosť porovnania meranej polohy s presnejšou hodnotou som vytvoril program pre komunikáciu s prijímacím modulom Trimble BD982. Z modulu sa každú sekundu prijíma GGA správa obsahujúca aktuálnu polohu. Hodnoty polohy a čas merania som úspešne zaznamenával do textového súboru pre ďalšie spracovanie.

Vytvoril som program pre kalibráciu a kontrolu výstupných dát z meracej jednotky. Pri komunikácii je MTi-G pripojené k počítaču cez USB prevodník dodaný výrobcom.

Po porovnaní polohy zo sebalokalizačného systému s hodnotami považovanými za presné z prijímacieho modulu sa zistilo, že pri detekcii značky pomocou snímača s kamerou sa chyba polohy pohybovala priemerne okolo 8,5 cm. Pri zistení polohy bez korekcie od značky sa chyby pohybovali v priemere okolo 1,91 m. Je vidieť výrazné zlepšenie určenia polohy pri detekcii značky. Problémom v skutočnosti je, že sa musí pre presnejšie určenie polohy modifikovať prostredie známymi polohami značiek.

Detekcia značky by sa ďalej ešte mohla vylepšiť ako na strane softvéru tak na strane hardvéru. Problémy boli už s presným nastavením polohy a orientácie značky. Smer značky sa nastavoval pomocou azimutu určeného pomocou prijímacieho modulu a programovým natočením obrazu z kamery pod správny uhol. Značka na programovo natočenom obraze po správnom umiestnení ukazovala v smere osi Y natočeného obrazu. Mohli vzniknúť chyby vplyvom nepresného natočenia značky, alebo vplyvom nepresného uloženia kamery na ramene robota. Ďalšou chybou bolo uvažovať vzdialenosť medzi kamerou a značkou za konštantnú. Nerovnosti povrchu spôsobovali mierne vychýlenie robota z vodorovnej polohy, toto vychýlenie sa ešte zvyšovalo

vplyvom dĺžky ramena na konci, ktorej bola kamera pripevnená. Kamera nebola priamo navrhnutá na použitie na pohybujúcom sa objekte. Pružnosť podstavy kamery spôsobovala mierne chvenie kamery počas pohybu robota, čím sa kamera mohla vychýliť počas pohybu. Robot sa vplyvom nerovností povrchu mohol vychýľovať nielen v smere pohybu tj. v smere rovnobežne s ramenami, ale aj kolmo na ramená. Kolmý náklon spôsobí rozdiel vzdialeností na pravej a ľavej strane obrazu. Chyby mohli ešte nastať pri výpočte korekcií nepresným uložením značky a nepresným určením uhlu natočenia. Ďalším zdrojom chyby bolo meranie z modulu Trimble. Merania z modulu Trimble sa považovali za presné, v skutočnosti sa poloha mohla líšiť rádovo o desiatky milimetrov v závislosti na počte viditeľných satelitov .

Pre vylepšenie detekcie by sa mohol použiť iný algoritmus detekcie, iný tvar, veľkosť a možno farba značky. Pre spresnenie vzdialenosti značky od kamery by sa mohol snímač s kamerou doplniť o laserový, alebo iný diaľkomer, pre korekciu vzdialenosti snímača kamery a snímaného povrchu. Tým by sa opravila chyba vnášaná do merania pri uvážení konštantnej vzdialenosti medzi kamerou a snímaným povrchom.

Literatúra

- [1] *MTi-G Users Manual and Technical Dokumentation*. Xsens Technologies B.V., Document MT0137P.H
- [2] ŠOLC, F., ŽALUD, L.: *Robotika*. Skriptum. VUT Brno 2002
- [3] *MT Low-Level Communication Protocol Documentation*. Xsens Technologies B.V., Document MT0101P.L
- [4] *Netduino Plus: Technical Specifications* [online]. 2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://www.netduino.com/netduinoplus/specs.htm>>
- [5] *The Industry's Foundation for High Performance Graphics* [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://www.opengl.org>>
- [6] *The I²C-Bus Specification V2.1* [datasheet]. California :PHILIPS, 2000. Dostupné z: <http://www.nxp.com/acrobat_download2/literature/9398/39340011.pdf>
- [7] *AN001 Application Note, Filter Tuning Guide*. VectorNav Technologies, AN001 Application Notr. Dostupné z: <<http://www.vectornav.com/Downloads/Support/AN001.pdf>>
- [8] ALTAMIMI, Z. *ETRS89: EUROPEAN TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM 89* [online]. 2011 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://etrs89.ensg.ign.fr/en/>>
- [9] JEŽEK, J.: *Vývoj programového modulu pro převod souřadnic mezi kartografickými zobrazeními*. Praha, 2003. Dostupné z: <<http://geo2.fsv.cvut.cz/~soukup/dip/jezek/prilohy/dip.pdf>>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Petr Soukup, Ph.D.
- [10] KÜHNER, J.: *Expert .NET Micro Framework: Embedded programming of microcontrollers with C# and Visual Studio*. Second Edition. USA: Apress, 2009. ISBN 978-1-4302-2387-0.
- [11] HAN, J. a KAMBER M. *Data Mining: Concepts and Techniques*. USA: Academic Press, 2001. ISBN ISBN:1-55860-489-8.
- [12] Ortodroma. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 - [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Ortodroma>>
- [13] ETRS89/ITRS TRANSFORMATION. [online]. 19.4. 2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.epncb.oma.be/_dataproducs/coord_trans/index.php>
- [14] MACHO, T.: *Operační systémy a sítě(MOSS)*. Skriptum. VUT Brno 2010
- [15] FISHER, R., S. PERKINS, A. WALKER a E. WOLFART.: *Image Transforms: Hough Transform*. [online]. 2003 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hough.htm>>
- [16] Hledání parametrického popisu objektů pomocí Houghovy transformace. [online]. CVUT, 2008 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ZS1/Cviceni/cv5/hough.htm>>

- [17] BRADSKI, G.: *OpenCV Wiki*. [online]. 2008 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://opencv.willowgarage.com/wiki/>>
- [18] *Emgu CV: OpenCV in .NET (C#, VB, C++ and more)*. [online]. 2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: http://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page
- [19] *Length Of A Degree Of Latitude And Longitude Calculator*. [online]. 6/29. 2011 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://www.csghnetwork.com/degreeenllavcalc.html>>
- [20] *Trimble® BD982 GNSS Receiver Module: USER GUIDE*. [online]. 2011, s. 212 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.pacificcrest.com/library/User_Guide_BD982.pdf>
- [21] DEPRIEST, D.: *NMEA data*. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>>
- [22] *The International Terrestrial Reference Frame* [online]. 2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://itrf.ensg.ign.fr/>>
- [23] CIMBÁLNÍK, M., MERVART, L.: *Vyšší geodézie 1*. Skriptum CVUT Praha, 1999

Zoznamy

Zoznam skratiek

AD	Analog to Digital
AHRS	Attitude and Heading Reference System
ARM7	Advanced RISC Machine
BGR	Blue, Green, Red
BIT	Built-in test – vstavany test
CAN	Controller Area Network
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor, doplňujúci sa kov -oxid-polovodič
COM	Standard definujúci asynchrónnu sériovú komunikáciu pre prenos dát
DNS	Domain Name System - hierarchický systém doménových názvov
DSP	Digital Signal Processor
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
ETRS	European Terrestrial Reference System
GALILEO	European Global Satellite Navigation System
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GLONAS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GRS-80	Geodetic Reference System 1980
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I ² C	Inter – Integrated Circuit
ID	Identification
IMU	Inertial Measurement Unit
IPP	Integrated Performance Primitives
lwIP	lightweight IP
ITOW	Interval Time of the Week
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LED	Light Emitting Diode, elektroluminiscentná dioda
LLA	Longitude, Latitude, Altitude
LTP	Local Tangent Plane
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MMU	Memory management unit – jednotka správy pamäte
NED	North, East, Down
NMEA	National Marine Electronics Association
NTP	Network Time Protocol
NWU	North, West, UP
OpenGL	Open Graphics Library
PWM	Pulse – Width modulation
RAM	Random-access memory – pamäť s priamym prístupom
RISC	Reduced Instruction Set Computer, počítač s redukovanou inštrukčnou sadou
ROI	Region Of Interest
SBAS	Satellite Based Augmentation Systems
SD	Secure Digital

SDA	Serial data line
SDK	Software development kit
SCL	Serial Clock
SCK	Serial Clock, sériové hodiny na synchronizáciu prenosu dát
SPI	Serial Programming Interface, rozhranie na sériové programovanie
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TTL	Transistor-Transistor-Logic, tranzistorovo-tranzistorová logika
TWI	Two-wire serial interface – dvojvodičové sériové rozhranie
UART	Addressable Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
USART	Addressable universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UTC	Coordinated Universal Time – celosvetový časový štandard
V/V	Vstupne/výstupný
WGS-84	World Geodetic System – navrhnutý špeciálne pre GPS
WiFi	Wireless Fidelity – bezdrátová vernosť
Xbus	Xsens digital data bus system
XKF	Xsens Kalman Filter

Zoznam obrázkov

Obr. 2.1: Bloková schéma snímača MTi-G [1]	12
Obr. 2.2: Súradnicový systém snímača viazaný na puzdro MTi-G [1]	13
Obr. 2.3: Smer otáčania	14
Obr. 3.1: Netduino Plus	17
Obr. 4.1: Hlavné okno programu	19
Obr. 4.2: Okno nastavenia snímača	20
Obr. 5.1: Zapojenie obvodu MAX 3232	22
Obr. 5.2: Popis konektoru RS 232	23
Obr. 5.3: Štandardná správa	24
Obr. 5.4: Prepojenie Netduina a MTi-G	25
Obr. 5.5: Konektor snímača MTi-G na strane prevodníku RS 232	25
Obr. 5.6: Vývojový diagram programu pre Netduino	27
Obr. 6.1: Rozloženie satelitov okolo Zeme[2]	30
Obr. 6.2: Rotačný elipsoid WGS-84	31
Obr. 7.1: Trimble BD982 GNSS prijímací modul	35
Obr. 7.2: Program UDP klient Trimble	37
Obr. 7.3: Vývojový diagram UDP klientu	37
Obr. 8.1: Značka pre detekciu	38
Obr. 8.2: Rotácia súradníc okolo osy z	39
Obr. 8.3: Program pre detekciu značky	41
Obr. 8.4: Nastavenia programu	42
Obr. 8.5: Rozpoznanie značky na obraze z kamery	42
Obr. 8.6: Vývojový diagram programu pre kameru	43
Obr. 8.7: Microsoft LifeCam HD-3000	44
Obr. 8.8: Houghov priestor	45
Obr. 8.9: Vývojový diagram – UDP komunikácia	47
Obr. 9.1: Ortodroma[12]	49

Zoznam tabuliek

Tab. 2.1: Stavový register	16
Tab. 5.1: Popis komunikačných pinov pre Netduino.....	22
Tab. 5.2: Popis komunikačných pinov prevodníku	23
Tab. 6.1: Parametre Elipsoid.....	32
Tab. 8.1: Zoznam súradníc ETRS-89	46
Tab. 9.1: Merané údaje	50

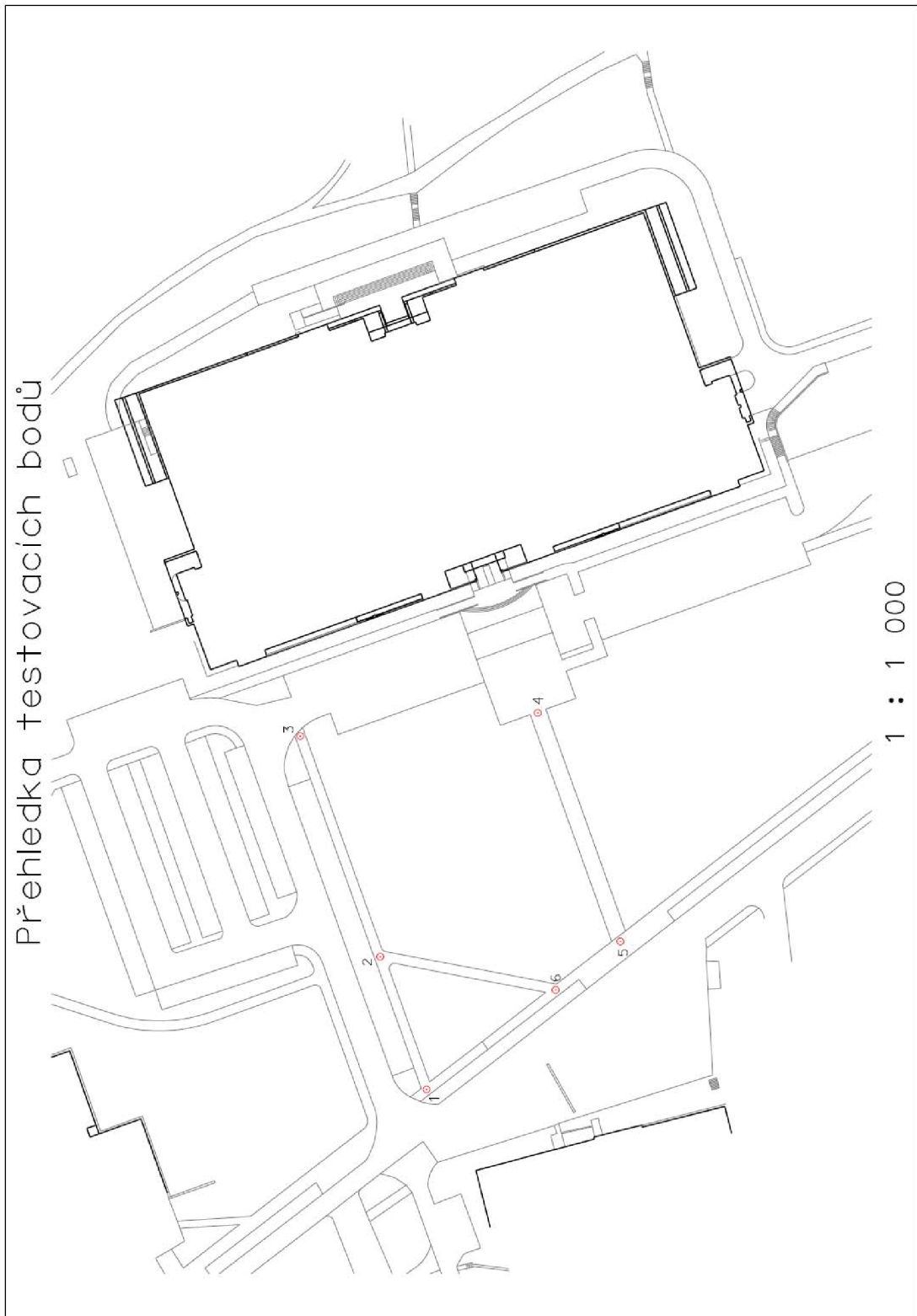
Zoznam príloh

Príloha číslo 1: Mapa testovacieho polygónu laboratória teleprezencie a robotiky
Príloha číslo 2: Obrázok robota
Príloha číslo 3: Meranie polohy v okolí značky číslo 1 v systéme ETRS
Príloha číslo 4: Meranie polohy v okolí značky číslo 2 v systéme ETRS
Príloha číslo 5: Meranie polohy v okolí značky číslo 3 v systéme ETRS
Príloha číslo 6: Meranie polohy v okolí značky číslo 4 v systéme ETRS
Príloha číslo 7: Meranie polohy v okolí značky číslo 5 v systéme ETRS
Príloha číslo 8: Meranie polohy v okolí značky číslo 6 v systéme ETRS
Príloha číslo 9: Tabuľky nameraných hodnôt

Obsah priloženého CD

\\Applications.....	EXE soubory aplikácií
\\DATASHEET.....	katalógové listy
\\Camera_prog	zdrojový kód pre snímanie značky
\\MERANIA.....	namerané údaje
\\MTi_G.....	zdrojový kód pre konfiguráciu MTi-G
\\Netduino	zdrojový kód pre Netduino
\\PRACE_DOC.....	elektronická forma diplomovej práce v DOC
\\PRACE_PDF.....	elektronická forma diplomovej práce v PDF
\\Trimble.....	zdrojový kód pre komunikáciu s Trimble

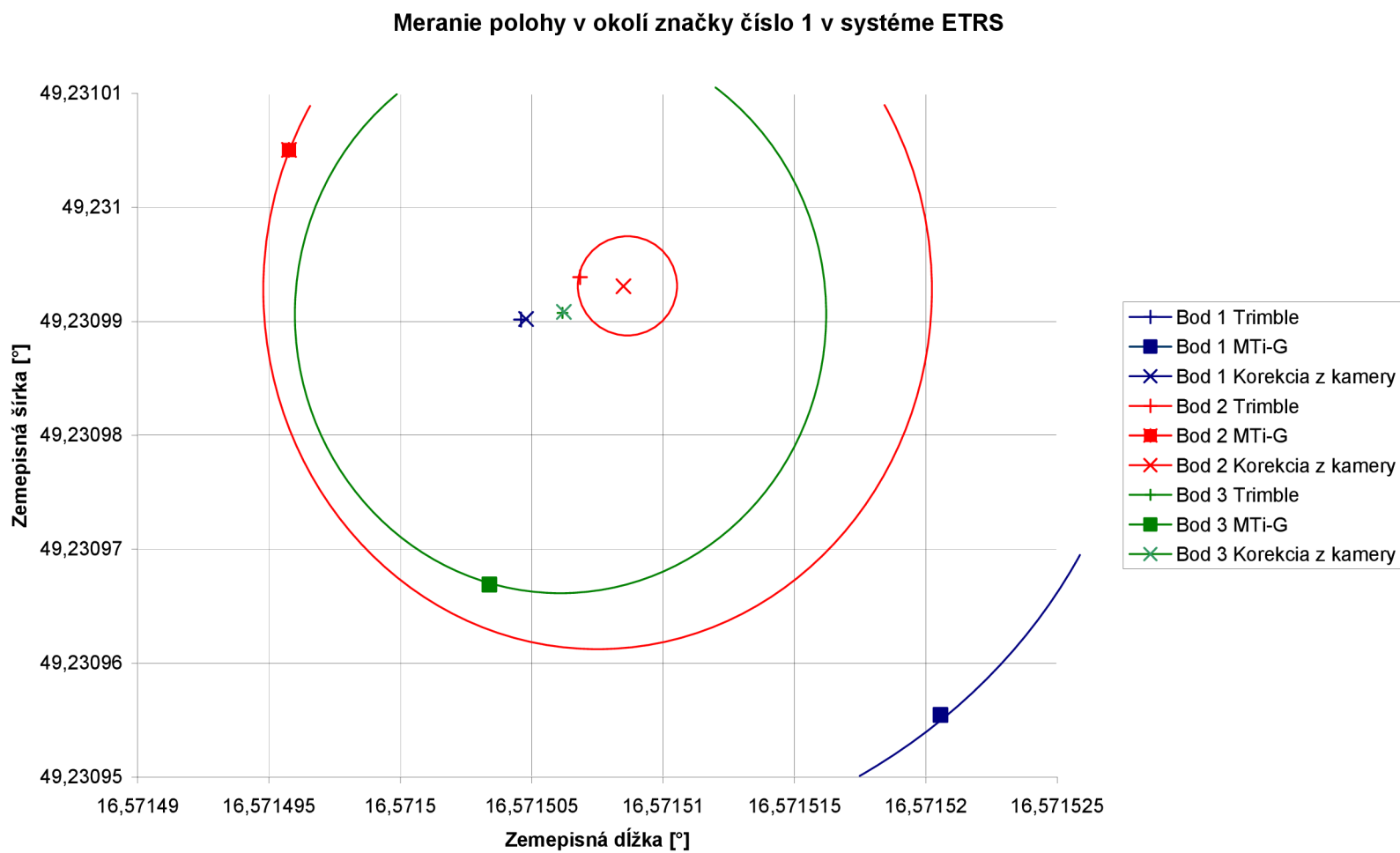
Prílohy:



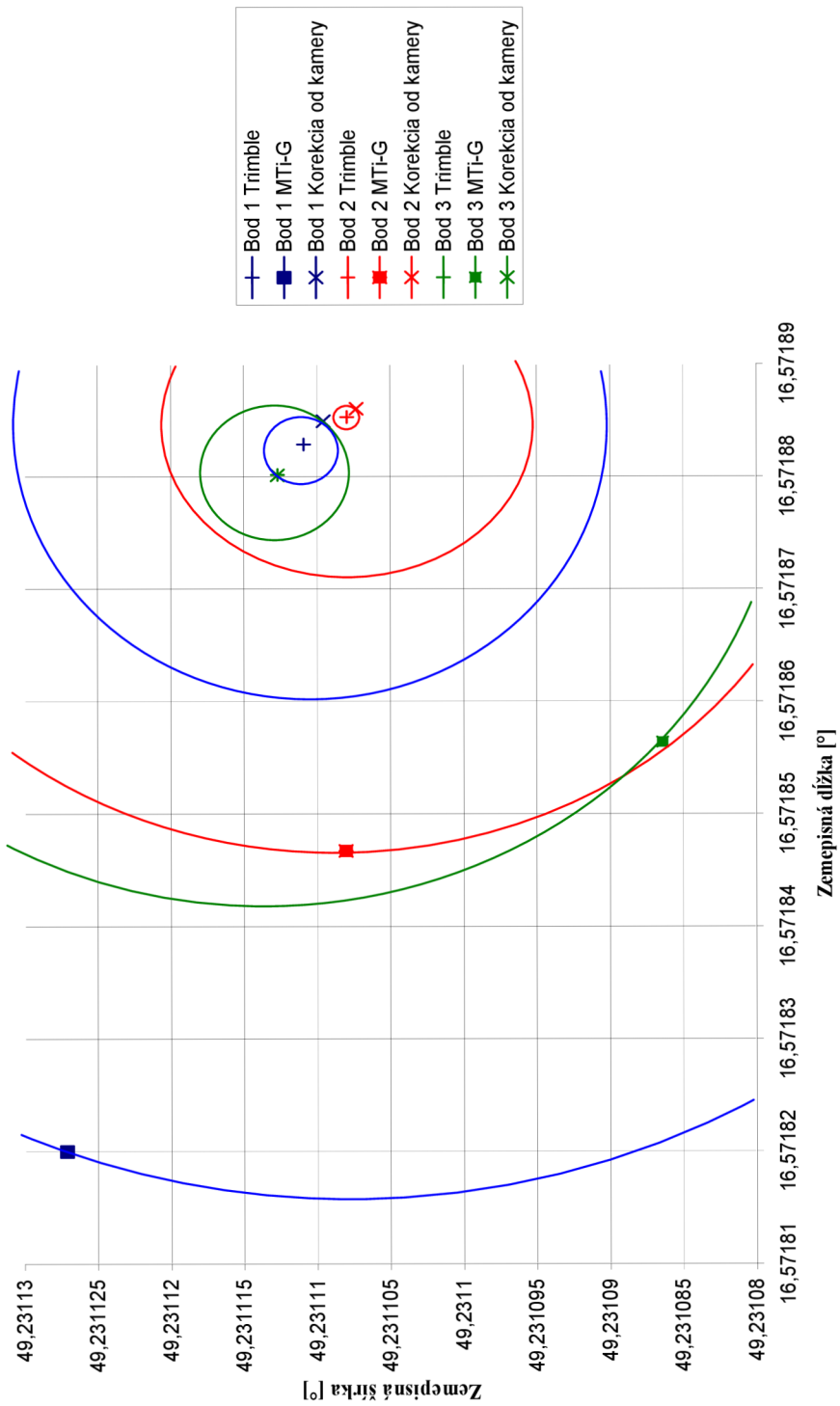
Príloha číslo 1: Mapa testovacieho polygónu laboratória teleprezencie a robotiky



Príloha číslo 2: Obrázok robota

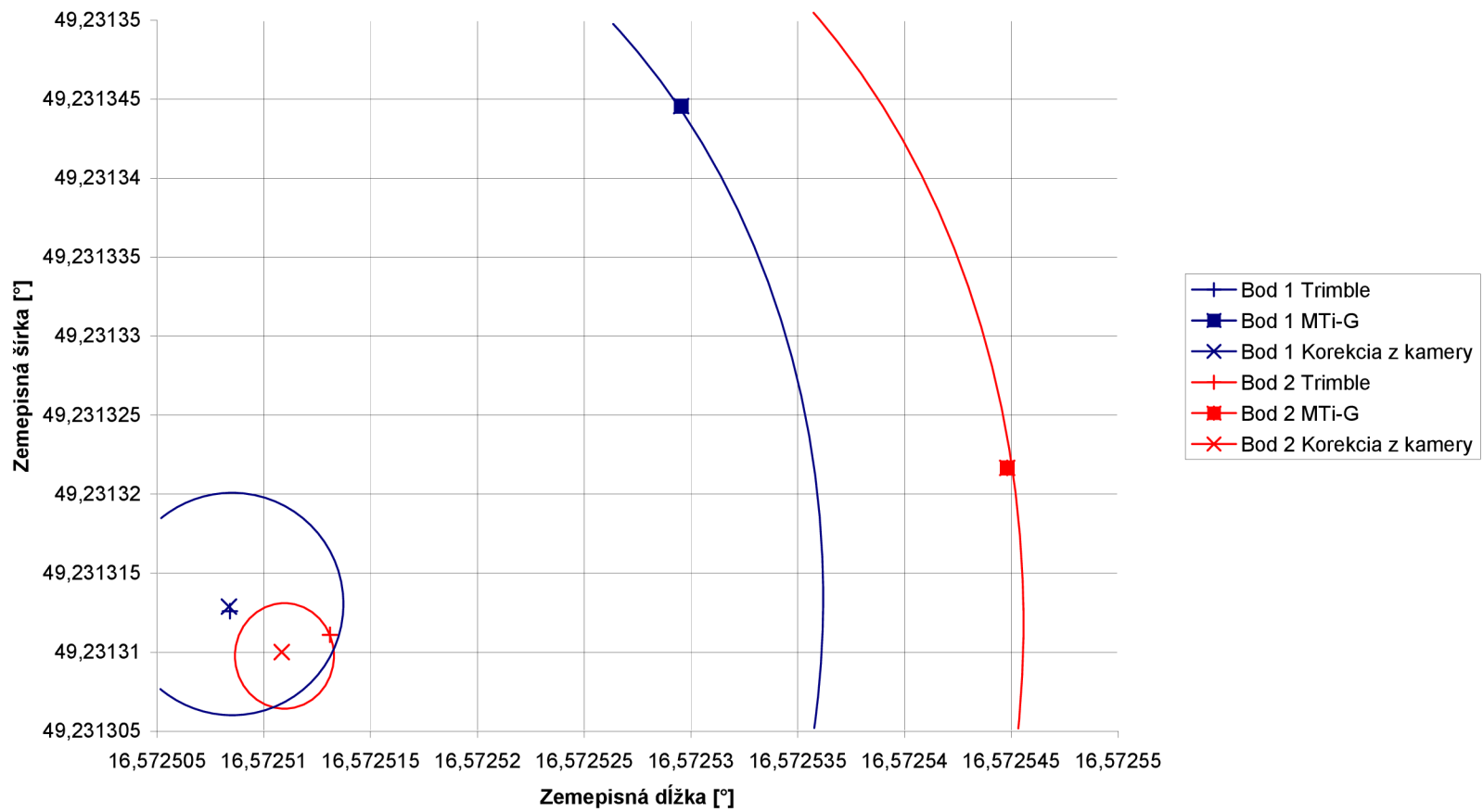


Meranie polohy v okolí značky číslo 2 v systéme ETRS

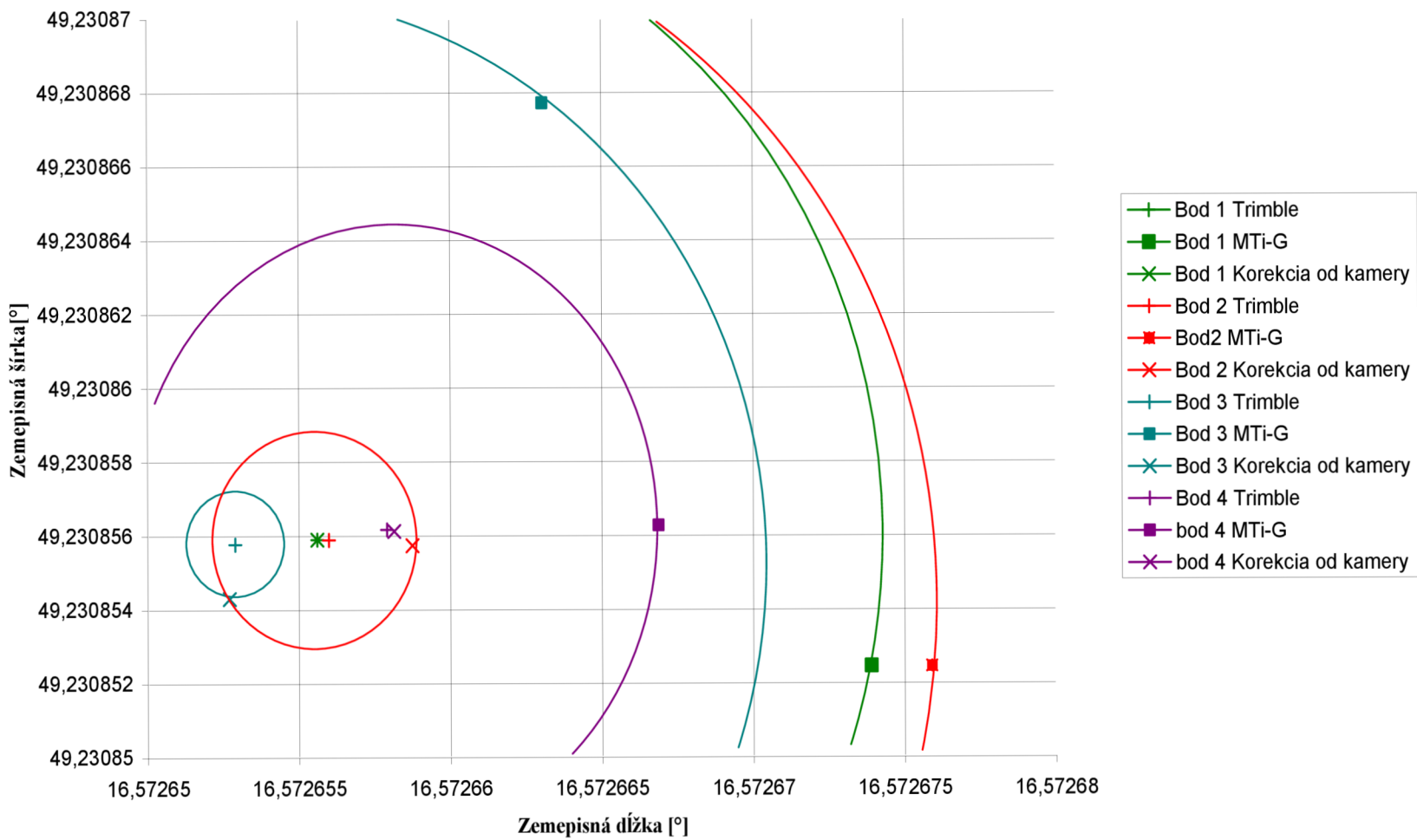


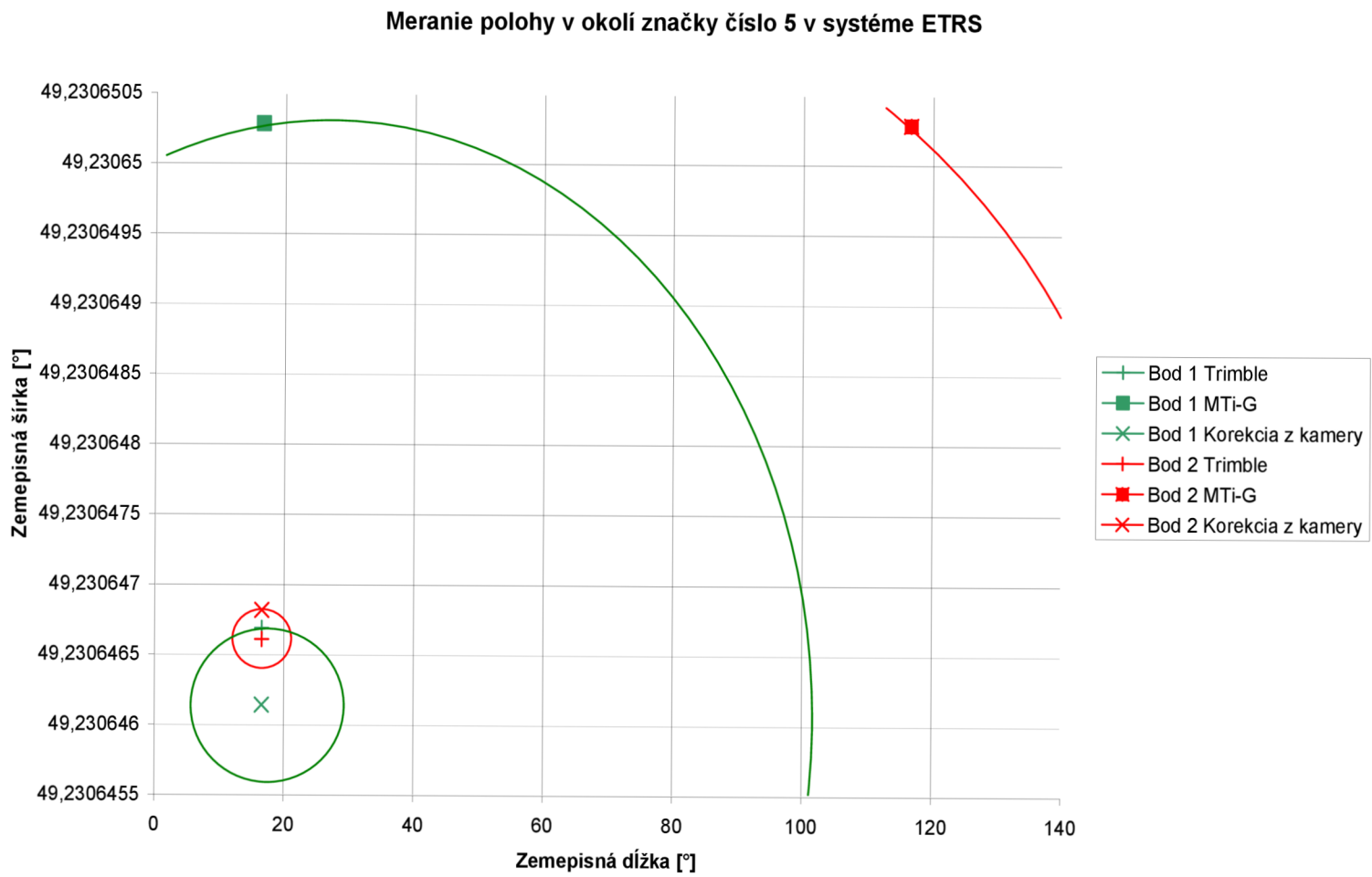
Príloha číslo 4: Meranie polohy v okolí značky číslo 2 v systéme ETRS

Meranie polohy v okolí značky číslo 3 v systéme ETRS

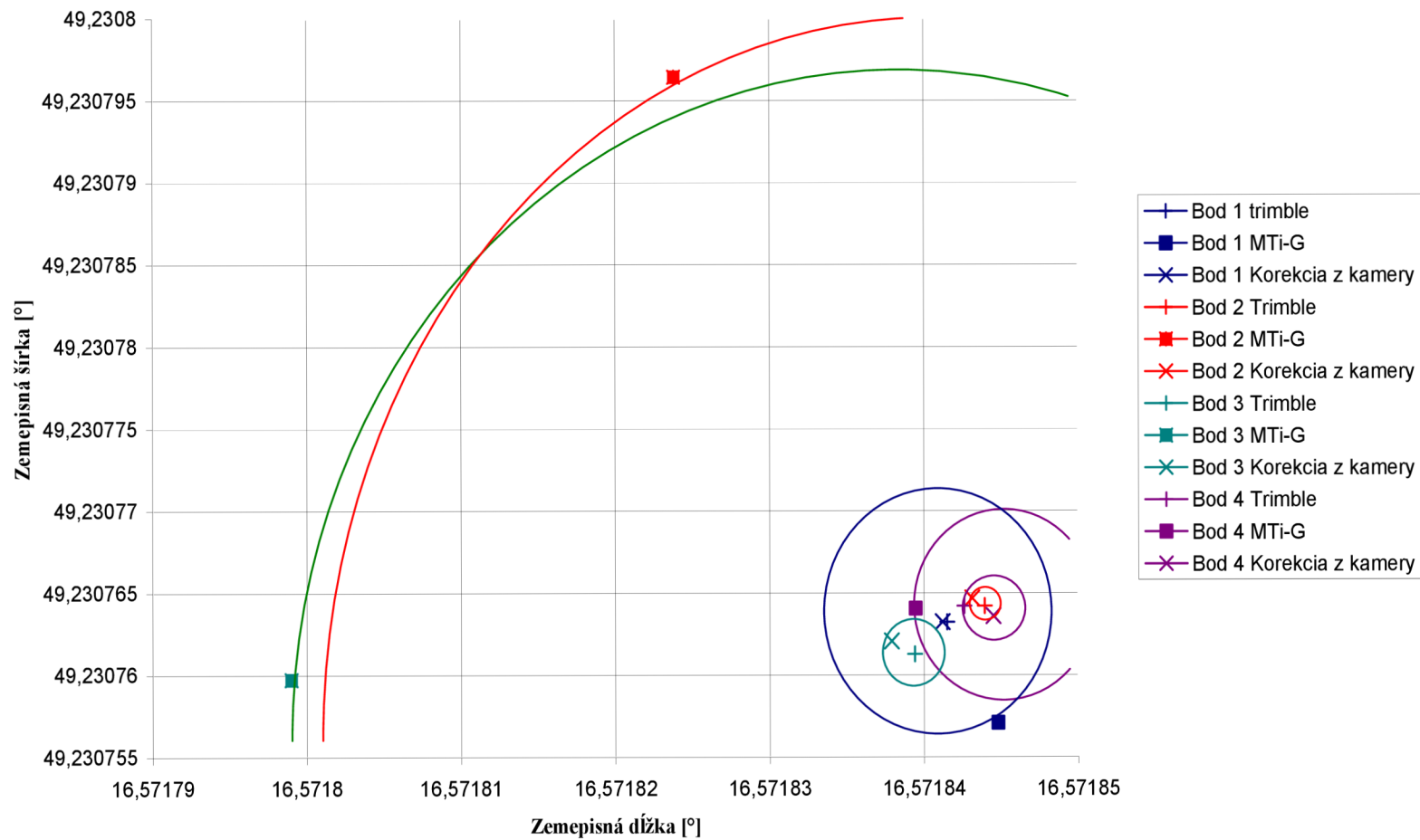


Meranie polohy v okolí značky číslo 4 v systéme ETRS





Meranie polohy v okolí značky číslo 6 v systéme ETRS



	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Rozdiel [m]
Značka 1	49,23099254	16,57150547	
bod 1			
Trimble [°]	49,23099016	16,57150459	0
Netduino WGS [°]	49,23095703	16,57152367	3,936
Netduino ETRS [°]	49,23095546	16,57152055	4,029
Korekcia [m]	-0,26	-0,05	
Kamera [°]	49,23099021	16,57150478	0,01487
bod 2			
Trimble [°]	49,23099389	16,57150684	0
Netduino WGS [°]	49,2309761	16,57151031	1,994
Netduino ETRS [°]	49,23097453	16,5715072	1,978
Korekcia [m]	0,06	0,22	
Kamera [°]	49,23099308	16,57150849	0,09007
bod 3			
Trimble [°]	49,23099389	16,57150684	0
Netduino WGS [°]	49,23100662	16,57149887	1,529
Netduino ETRS [°]	49,23100505	16,57149576	1,479
Korekcia [m]	0,06	0,22	
Kamera [°]	49,23099308	16,57150849	0,1501
bod 4			
Trimble [°]	49,23099074	16,57150617	0
Netduino WGS [°]	49,23096848	16,5715065	2,476
Netduino ETRS [°]	49,2309669	16,57150339	2,659
Korekcia [m]	-0,19	0,055	
Kamera [°]	49,23099084	16,57150622	0,01137

	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Rozdiel [m]
Značka 2	49,23111091	16,57188286	
Bod 1			
Trimble [°]	49,23110961	16,5718852	0
Netduino WGS [°]	49,23112869	16,57182312	2,132
Netduino ETRS [°]	49,23112712	16,57182001	5,119
Korekcia [m]	-0,15	0,15	
Kamera [°]	49,23110956	16,57188492	0,0211
Bod 2			
Trimble [°]	49,23110795	16,57188528	0
Netduino WGS [°]	49,23110962	16,57184982	2,581
Netduino ETRS [°]	49,23110805	16,57184671	2,801
Korekcia [m]	-0,4	0,23	
Kamera [°]	49,23110731	16,57188601	0,2775
Bod 3			
Trimble [°]	49,2311127	16,57188015	0
Netduino WGS [°]	49,231088	16,5718595	3,032
Netduino ETRS [°]	49,23108642	16,57185639	3,39
Korekcia [m]	0,2	-0,2	
Kamera [°]	49,2311127	16,57188011	0,0029

	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Rozdiel [m]
Značka 3	49,23131198	16,57251016	
bod 1			
Trimble [°]	49,23131259	16,57250842	0
Netduino WGS [°]	49,23134613	16,57252312	3,879
Netduino ETRS [°]	49,23134456	16,57252954	3,871
Korekcia [m]	0,1	-0,13	
Kamera [°]	49,23131288	16,57250837	0,03246
bod 2			
Trimble [°]	49,2313111	16,5725131	0
Netduino WGS [°]	49,23132324	16,57254791	2,866
Netduino ETRS [°]	49,23132167	16,5725448	2,668
Korekcia [m]	-0,22	0,05	
Kamera [°]	49,23131001	16,57251084	0,2042
bod 3			
Trimble [°]	49,23130964	16,57250939	
Netduino WGS [°]	49,23132706	16,57253265	2,57
Netduino ETRS [°]	49,23132548	16,57252954	2,29
Korekcia [m]	-0,24	-0,06	
Kamera [°]	49,23130983	16,57250933	0,02157

	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Rozdiel [m]
Značka 4	49,23085601	16,57265545	
Bod 1			
Trimble [°]	49,2308559	16,5726556	0,01792
Netduino WGS [°]	49,23085403	16,572677	1,566
Netduino ETRS [°]	49,23085246	16,57267389	1,382
Korekcia [m]	0	0	
Kamera [°]	49,2308559	16,5726556	0,01792
Bod 2			
Trimble [°]	49,23085589	16,57265598	0
Netduino WGS [°]	49,23085403	16,572679	1,699
Netduino ETRS [°]	49,23085246	16,57267589	1,495
Korekcia [m]	-0,03	0,24	
Kamera [°]	49,23085574	16,57265874	0,2008
Bod 3			
Trimble [°]	49,23085577	16,57265289	0
Netduino WGS [°]	49,23086929	16,57266617	1,785
Netduino ETRS [°]	49,23086772	16,57266305	1,52
Korekcia [m]	-0,19	-0,2	
Kamera [°]	49,2308543	16,5726527	0,1640

	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Rozdiel [m]
Značka 5	49,23064799	16,57200541	
bod 1			
Trimble [°]	49,23064669	16,57200334	0

Netduino WGS [°]	49,23065186	16,57200654	0,06195
Netduino ETRS [°]	49,23065028	16,57203744	0,3997
Korekcia [m]	-0,205	-0,13	
Kamera [°]	49,23064614	16,57200362	0,06441
bod 2			
Trimble [°]	49,23064661	16,57200309	
Netduino WGS [°]	49,23063278	16,57203102	2,545
Netduino ETRS [°]	49,23065028	116,5720034	2,486
Korekcia [m]	-0,13	-0,2	
Kamera [°]	49,23064682	16,57200266	0,03893
bod 3			
Trimble [°]	49,23064962	16,57200783	
Netduino WGS [°]	49,23062897	16,57207489	2,551
Netduino ETRS [°]	49,2306274	16,57207178	2,472
Korekcia [m]	0,17	0,17	
Kamera [°]	49,23064951	16,57200774	0,01387

	Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Rozdiel [m]
Značka 6	49,23076323	16,5718412	
bod 1			
Trimble [°]	49,23076323	16,57184149	0,021
Netduino WGS [°]	49,23075867	16,57184792	0,704
Netduino ETRS [°]	49,2307571	16,5718448	0,7228
Korekcia [m]	0	0	
Kamera [°]	49,23076323	16,5718412	0,021
bod 2			
Trimble [°]	49,2307642	16,57184393	0
Netduino WGS [°]	49,230798	16,57182693	3,957
Netduino ETRS [°]	49,23079643	16,57182382	3,909
Korekcia [m]	0,16	0,14	
Kamera [°]	49,23076467	16,57184312	0,078
bod 3			
Trimble [°]	49,23076127	16,5718394	0
Netduino WGS [°]	49,23076131	16,5718021	0,9055
Netduino ETRS [°]	49,23075974	16,57179899	2,939
Korekcia [m]	-0,13	-0,24	
Kamera [°]	49,23076206	16,5718379	0,139
bod 4			
Trimble [°]	49,2307642	16,5718426	0
Netduino WGS [°]	49,23076563	16,57184257	0,1585
Netduino ETRS [°]	49,23076405	16,57183946	0,2288
Korekcia [m]	0,04	0,24	
Kamera [°]	49,23076359	16,5718445	0,153

Príloha číslo 9: Tabuľky nameraných hodnôt