

**UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

Pavel Chmelař

**UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Navigace robota pomocí akcelerometru a gyroskopu

Pavel Chmelař

Bakalářská práce

2009

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel CHMELAŘ**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**

Název tématu: **Navigace robota pomocí akcelerometru a gyroskopu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Teoretická část bude obsahovat principy činností akcelerometru a gyroskopu, dále popis jak je možné pomocí měření zrychlení a natočení určit polohu předmětu v prostoru. Popis dalších metod absolutního/relativního učení polohy. V praktické části by měla být realizována navigace na pojízdném robotu, který se za pomoci gyroskopu a akcelerometru bude schopný orientovat v prostoru, případně se sám vrátit na počátek. (Robotu je několik je možné si vybrat, robot determinuje programovací jazyk, podle dohody)

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Mobilní roboty Novák P.; BEN - technická literatura, 2005, ISBN: 80-7300-141-1

**<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?nodeId=0112691118>
www.analog.com**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Rozsival
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16.5. 2009

Pavel Chmelař

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Pavlu Rozsívalovi, za poskytnuté odborné rady a připomínky během zpracování této práce a všem ostatním lidem, kteří mě podporovali.

SOUHRN

Cílem této práce bylo navrhnout zařízení pro inerciální určování polohy, s pomocí akcelerometru a gyroskopu. Funkci celého obvodu řídí mikrokontroler, který tato data sbírá a na jejich základě navrženým algoritmem určí polohu zařízení v 2D prostoru. Plošný spoj inerciálního navigačního systému je upevněn na modelu robota, který přijímá data z mikrokontroleru po sériové lince. Na základě těchto dat se pohybuje a má za úkol se vrátit do výchozí pozice, odkud byl přesunut na libovolné místo.

KLÍČOVÁ SLOVA

akcelerometr; gyroskop; mikrokontroler

TITLE

Navigation robot using accelerometer and gyroscope

ABSTRACT

The aim of this work was to develop inertial navigation module, which includes the implementation of the accelerometer and gyroscope. Function of the entire circuit manages microcontroller, which collects the data and on the basis of the proposed algorithm determined the position of the device in 2D space. PCB inertial navigation module is mounted on the robot model, which receives data from the microcontroller through serial line. On the basis of these data moves, and is intended to return to the starting position from which has been moved to any location.

KEYWORDS

accelerometer; gyroscope; microcontroller

Seznam zkratek:

akcelerometr.....	senzor zrychlení
ASIC.....	(Application-Specific Integrated Circuit) – integrované obvody pro určité použití
Bd.....	(Baud) – jednotka modulační rychlosti
Coriolisova síla.....	zvláštní odstředivá síla uplatňující se při relativním pohybu hmotného bodu v nesetřvačné otáčející se soustavě
Coriolisovo zrychlení.....	složka celkového zrychlení hmotného bodu pohybujícího se v otáčející se soustavě
gyroskop.....	setřvačnick
GPS.....	(Global Position System) – systém pro určování polohy
MEMS.....	(Micro-Electro-Mechanical Systems) – integrace mechanických elementů, senzorů, akčních členů a elektroniky na křemíkový substrát
precese.....	fyzikální jev, při němž se působením vnější dvojice sil mění orientace osy setřvačnicku v prostoru
RISC.....	(Reduced Instruction Set Computer) – počítač s redukovanou instrukční sadou. Označuje jednu z architektur procesorů
TTL.....	(Transistor-Transistor-Logic) – standard používaný pro implementaci digitálních integrovaných obvodů. Běžné napájecí napětí je 5 V, z čehož vyplývá pro „log 1“ napětí přibližně 5 V
USART.....	(Universal Synchronous and Asynchronous Receiver/Transmitter) – přijímač, vysílač sériového přenosu dat

Úvod

Úkolem této bakalářské práce bylo navrhnout systém pro inerciální navigaci. Návrh systému spočíval ve výrobě plošného spoje s prvky umožňující navigaci v prostoru. Funkci celého obvodu řídí mikrokontroler. Zpracovává data ze senzorů a na základě navrhnutého algoritmu určí polohu senzorů vůči jeho relativní počáteční poloze. Data se posílají po sériové lince do prototypu robota, který se těmito daty řídí.

První dvě kapitoly se zabývají akcelerometry a gyroskopy, několik slov na úvod do problematiky, principy jejich funkce, obzvláště zaměřené na konkrétní typy použité na desce plošného spoje, popis jejich základních vlastností a možnosti využití. Třetí kapitola je zaměřená na osvětlení problémů spočívajících v určení polohy akcelerometrem a gyroskopem. Obsahuje fyzikální podstatu určení polohy a způsob získání dat z akcelerometru s patřičnými funkcemi pro získání reálných dat. Ve čtvrté kapitole je popsána praktická část. Na začátek kapitoly je umístěn popis prototypu robota, který je určen pro navigování pozičním senzorem, popis jeho konstrukce se základními vlastnostmi použití, výkonnou jednotkou a zařazením cílové skupiny uživatelů pro které je určen. Další část této kapitoly popisuje vlastní modul pozičního senzoru. Popisuje návrh celého systému a výrobu plošného spoje, způsob řízení mikrokontrolerem, napájení, zapojení a funkci celého obvodu. Zaměřuje se i na A/D převodník. Ve zbytku kapitoly jsou popsány algoritmy použité v mikrokontroleru včetně algoritmu pro určení polohy ze znalosti zrychlení. Obsahuje vývojový diagram s ukázkou zdrojového kódu získání pozice z hodnoty zrychlení. Na konci je několik slov k programu, kterým se řídí robot a vysvětlen způsob pohybu robota z principu funkce servomotorů. Poslední kapitole je shrnutí celé práce a závěr.

Obsah:

1.	Akcelerometry.....	12
1.1.	Akcelerometr MMA7260QT.....	12
1.1.1.	Hlavní vlastnosti MMA7260QT:.....	13
1.1.	Možnosti nastavení akcelerometru.....	14
1.1.1.	Volba - g.....	14
1.1.2.	Režim spánku (Sleep Mode).....	14
1.1.3.	Filtrace.....	14
1.1.4.	Přesnost hodnot.....	14
1.2.	Příklady snímání zrychlení.....	15
1.2.1.	Možnosti použití 3D MEMS akcelerometrů.....	16
1.3.	Základní dělení akcelerometrů.....	17
1.4.	Princip kapacitního akcelerometru.....	17
1.4.1.	Mechanická struktura.....	17
1.4.2.	Elektrická struktura.....	20
2.	Gyroskopy.....	21
2.1.	Princip funkce klasického rotačního gyroskopu.....	22
2.2.	Dělení gyroskopů.....	24
2.3.	Princip vibračního gyroskopu.....	24
3.	Určování polohy.....	26
3.1.	Získání polohy akcelerometrem.....	26
3.2.	Získání polohy gyroskopem.....	30
4.	Praktické řešení.....	31
4.1.	Boe-Bot robot.....	31
4.1.1.	Základní vlastnosti:.....	31
4.1.2.	Mikroprocesorový modul BASIC Stamp 2.....	32
4.1.3.	Hlavní specifikace mikrokontroleru BASIC Stamp 2.....	33
4.1.4.	Klíčové specifikace:.....	33
4.2.	Modul pro navigaci.....	34
4.2.1.	Návrh plošného spoje.....	34
4.2.2.	Výsledná deska.....	36
4.2.3.	Ovládání akcelometru a gyroskopu:.....	36
4.3.	Softwarové řešení:.....	37
4.3.1.	Vývojový diagram.....	38
4.3.2.	Popis funkcí software v mikrokontroleru ATmega32.....	39
4.3.3.	Kalibrace.....	39
4.3.4.	Určování pozice:.....	39
4.3.5.	Vývoj aplikace.....	40
4.3.1.	Posílání dat.....	41
4.4.	Software robota:.....	42
4.4.1.	Ovládání servomotorů robota.....	42
5.	Závěr.....	43

Seznam obrázků:

Obr. 1 – Schéma zapojení s mikrokontrolerem – (2).....	13
Obr. 2 – Příklady snímání zrychlení – (2).....	15
Obr. 3 – Ukázka akcelerometru – (3).....	16
Obr. 4 – Použití akcelerometrů dle snímacího rozsahu – (3).....	16
Obr. 5 – Základní princip MEMS akcelerometru – (2).....	17
Obr. 6 – Znázornění mechanické MEMS struktury akcelerometru – (3)	18
Obr. 7 – Detailní záběry na reálné provedení jednotlivých částí struktury - pevných a pohyblivých elektrod (electrodes), detekční hmoty (mass), pružiny (spring) a samotestovací strukturu (self test) – (3)	19
Obr. 8 – 3D struktura akcelerometru (měření zrychlení v osách X, Y, Z) – (3).....	19
Obr. 9 – Struktura spojení snímače a ASIC elektroniky – (3)	20
Obr. 10 – Blokové schéma elektrické struktury 3D akcelerometru – (3)	20
Obr. 11 – Představa pro lepší porozumění principu – (4)	22
Obr. 12 – Představa působení síly – (4)	22
Obr. 13 – Precesní pohyb – (4)	23
Obr. 14 – Kompozice vibračního poměru gyroskopu – (1)	24
Obr. 15 – Coriolisova síla F – (1)	25
Obr. 16 – Příklad výstupního signálu akcelerometru (v čase) – (5).....	27
Obr. 17 – chyby způsobené integrací – (5)	27
Obr. 18 – chyby způsobené integrací jsou redukovány – (5).....	28
Obr. 19 – Zrychlení po kalibraci – (5)	29
Obr. 20 – Ovzorkovaný signál zrychlení po kalibraci – (5).....	29
Obr. 21 – Proporcionální aproximace aktuální polohy	29
Obr. 22 – Graf pro objasnění určení polohy	30
Obr. 23 – Boe Bot robot.....	32
Obr. 24 – Modul BASIC Stamp 2.....	33
Obr. 25 – Schéma zařízení pro inerciální navigaci	35
Obr. 26 – Plošný spoj BOTTOM, TOP.....	36
Obr. 27 – Modul Position sensor	37
Obr. 28 – Vývojový diagram aplikace	38
Obr. 29 – Výstup aplikace v PC.....	41
Obr. 30 – Příklad ovládání servomotoru – (7)	42

Seznam tabulek:

Tab. 1 – Volba citlivosti g – (2).....	14
Tab. 2 – Základní dělení akcelerometrů.....	17
Tab. 3 – Datový rámec USART	42

1. Akcelerometry

Akcelerometry se v dnešním robotizovaném světě využívají stále více. Proto nikdo nechce v této oblasti „zaspat“ a firmy neustále vyvíjejí nové nebo vylepšují stávající funkční struktury pro vylepšení vlastností senzorů. Mají vliv na strategické využití zařízení, ve kterém jsou implementovány. V posledních patnácti letech, speciálně, díky optice a mikrotechnologiím byl enormní pokrok v preciznosti, linearitě, stabilitě, v minimalizaci a elektrické spotřebě senzorů.

Podle základních mechanických principů akcelerace koresponduje se vztahem mezi silou a hmotou. Akcelerometry využívají princip založený na fyzikálním jevu, který nám umožní vycházet z tohoto vztahu a tím získat elektrický signál. Umožňují přímé měření signálu (piezoelektrický senzor) nebo nepřímé, zde se však může vyskytnout chyba a tím nám klesá schopnost určení přesné hodnoty senzoru. Tyto senzory můžeme hodnotit porovnáváním vlastností, které analyzujeme. Poté podle vlastností určíme vhodnost použití senzoru podle přesnosti. Přesnost je limitována fyzikálním principem, s kterým pracuje konkrétní akcelerometr a jakou technologií je vyroben.

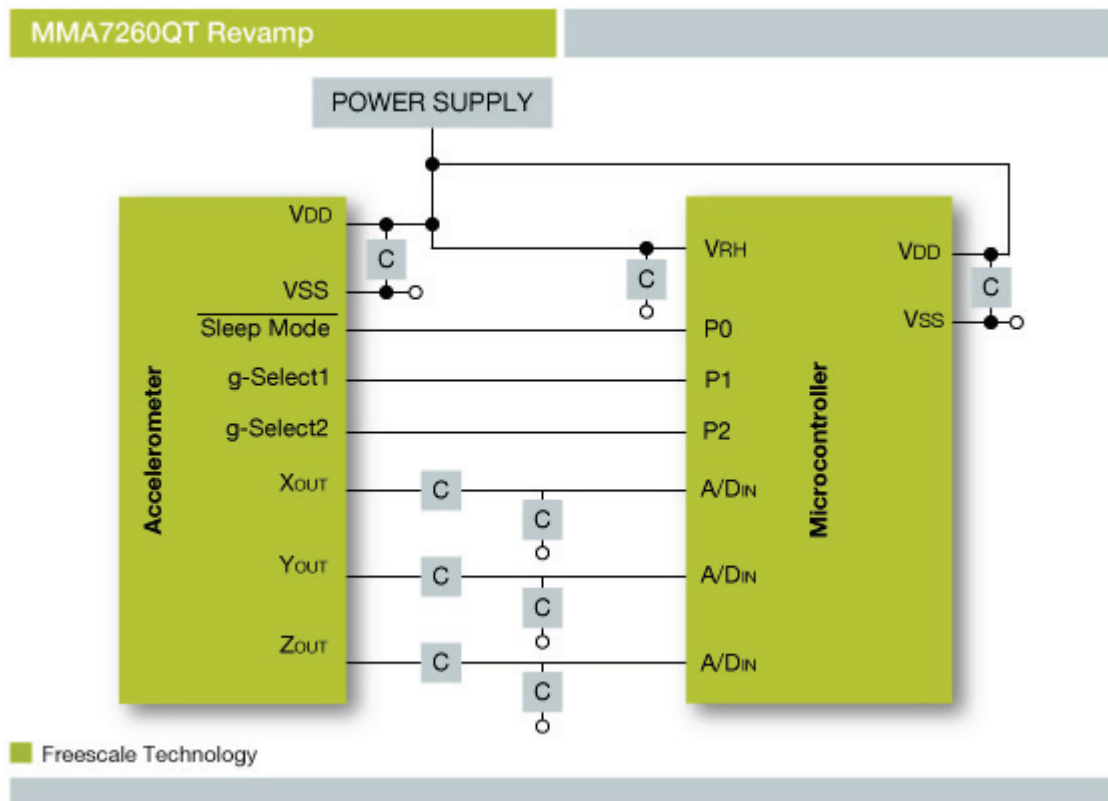
V různých odvětvích, jako je automobilní, letadlové, přístrojové techniky, lékařství a automatizace se vlastnosti akcelerometrů výrazně liší [1].

1.1. Akcelerometr MMA7260QT

Akcelerometr MMA7260QT je 3D kapacitní akcelerometr vyrobený technologií MEMS. Obsahuje jednopólový dolnoproústň (Low-pass) filtr a zahrnuje teplotní kompenzaci. Umožňuje volbu gravitačního zrychlení (g) s výběrem ze čtyř citlivostí. Nulová referenční hodnota (g) je nastavena v polovině rozsahu napájecího napětí. Vnitřní filtr je nastaven při výrobě a nevyžaduje žádné externí součástky. Obvod má v sobě integrován režim spánku (Sleep Mode), tím je vhodné použití tohoto akcelerometru v obvodech napájených bateriemi jako v případě navigace robota napájeného bateriemi [2].

1.1.1. Hlavní vlastnosti MMA7260QT:

- Volitelná senzitivita (1.5g/2g/4g/6g)
- Malý proudový odběr: 500μA
- Odběr Sleep Mode: 3μA
- Malé napájecí napětí: od 2.2 V do 3.6 V
- Malé rozměry 6mm x 6mm x 1,45 mm QFN (Quad Flat No-Lead) pouzdro
- Vysoká senzitivita (800 mV/g @ 1,5g)
- Schopnost okamžité funkce po zapnutí
- Integrovaná úprava signálu s Low-pass filtrem
- Robustní design, vysoká odolnost obvodu
- Vhodný pro bezolovnaté pájení
- Zařízení navržené s ohledem na ekologii
- Nízká cena



Obr. 1 – Schéma zapojení s mikrokontrolerem – (2)

1.1. Možnosti nastavení akcelerometru

1.1.1. Volba - g

Tato volba umožňuje zvolit 4 různé citlivosti zařízení. Závisí na volbě vstupů na pinech 1 a 2 (g-select pin), tento akcelerometr umožňuje volby citlivosti 1,5g, 2g, 4g nebo 6g (Tab. 1) [2]. Tato vlastnost umožňuje akcelerometr provozovat s různou citlivostí pro maximální výkon (nestálá velikost gravitačního zrychlení (g) v různých částech planety). Citlivost může být nastavována kdykoliv kdy je zařízení v provozu.

Tab. 1 – Volba citlivosti g – (2)

g-Select2	g-Select2	rozsah g	citlivost
0	0	1.5g	800mV/g
0	1	2g	600mV/g
1	0	4g	300mV/g
1	1	6g	200mV/g

1.1.2. Režim spánku (Sleep Mode)

Tento typ akcelerometru podporuje režim spánku, proto je jeho použití vhodné v aplikacích napájených baterií, jako je v tomto případě, kdy modul bude napájen akumulátorem robota. Je-li tento mód aktivní, výstupy akcelerometru jsou vypnuty, což výrazně sníží napájecí proud. Tento vstup má negativní logiku, k jeho aktivaci je potřeba přivést signál na pin 12 (Sleep Mode) s úrovní „log 0“. Po opětovném přivedení signálu s „log 1“ se uvede zařízení do normálního chodu.

1.1.3. Filtrace

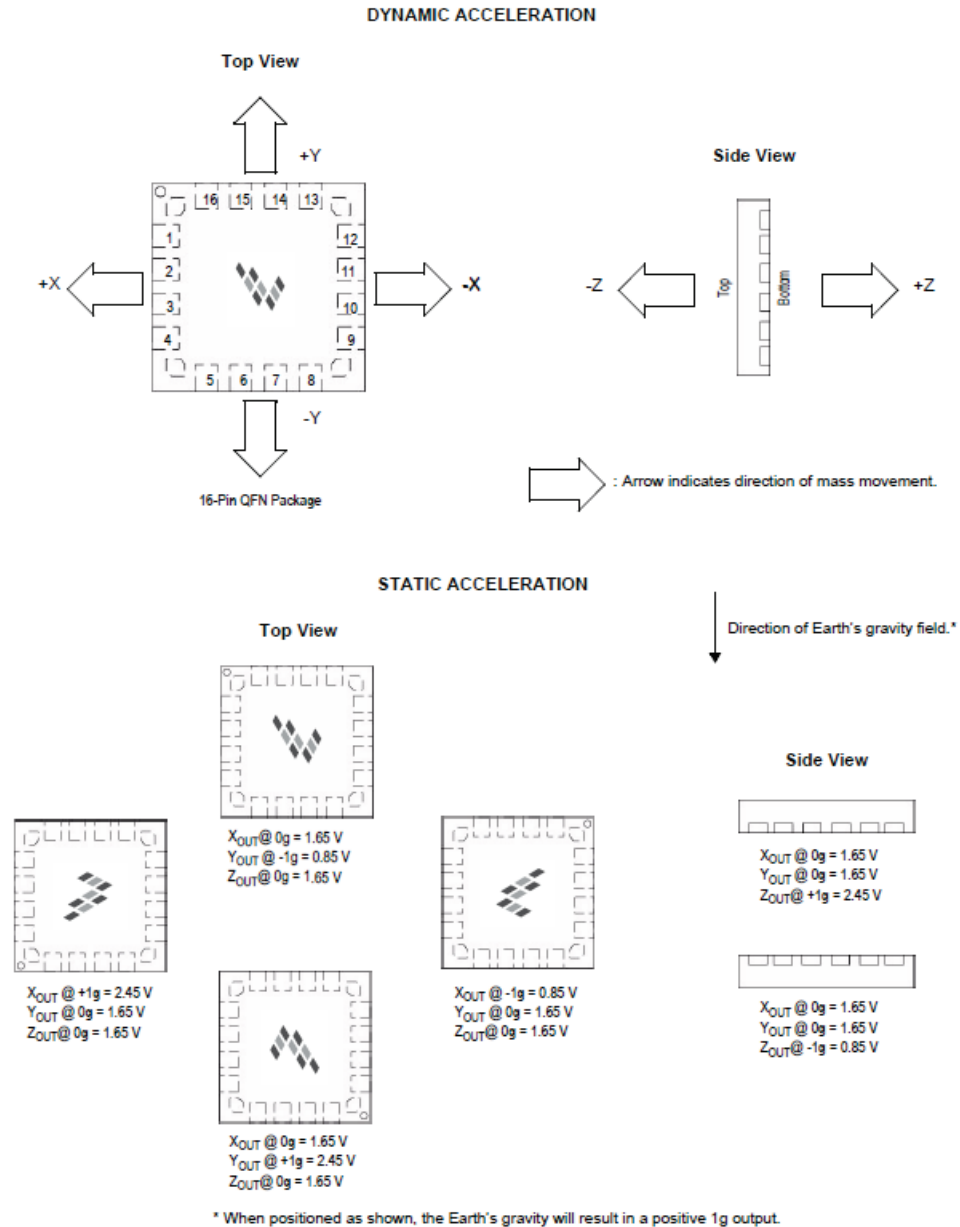
Výstupní signál z akcelerometru je filtrován jednopólovým filtrem přepínaným kapacitními filtry. Vzhledem k tomu, že je filtr takto realizován, není nutné použití externích součástek (rezistory a kondenzátory) k nastavení mezního kmitočtu filtru.

1.1.4. Přesnost hodnot

Přesností se rozumí, že kolísání výstupního napětí s citlivostí jsou v lineárním měřítku v závislosti na vstupním napětí. Což znamená, při zvyšování vstupního napětí se citlivost s kolísání zvyšují lineárně, klesá-li napětí, poté se bude citlivost i kolísání snižovat lineárně. Toto je klíčová vlastnost při použití A/D pře-

vodníku nebo mikrokontroleru, protože hardwarově zaručuje eliminaci zvětšujících se chyb při převodu analogového signálu na číslicový.

1.2. Příklady snímání zrychlení



Obr. 2 – Příklady snímání zrychlení – (2)

V horní části (Obr. 10) vidíme, jaké data se objevují na výstupu, když je akcelerometr v pohybu. Šipky nám určují směr pohybu. Spodní část znázorňuje výstup akcelerometru v klidu. Zde je uvedeno několik příkladů výstupu při různé poloze. Pravá část nám znázorňuje vliv působení gravitační síly na akcelerometr. Zemská gravitace má za následek, že se na výstupu Z, když se akcelerometr nachází ve vodo-

rovné poloze, objeví kladná hodnota napětí v porovnání s bodem nulové reference, která odpovídá gravitačnímu zrychlení $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

1.2.1. Možnosti použití 3D MEMS akcelerometrů

- Měření sklonu či naklonění ploch a předmětů
- Monitorování pohybu předmětů při přepravě
- Zabezpečovací zařízení
- Detekce a monitorování nárazů a vibrací
- Měření zrychlení - akcelerace
- Měření brzdění
- Detekce a měření pádu
- Měření otřesů
- Měření a předpovídání seismické aktivity
- Trakční a bezpečnostní systémy automobilů



Obr. 3 – Ukázka akcelerometru – (3)



Obr. 4 – Použití akcelerometrů dle snímacího rozsahu – (3)

1.3. Základní dělení akcelerometrů

Tab. 2 – Základní dělení akcelerometrů

Měření	Typ akcelerometru
síla nebo napětí	<ul style="list-style-type: none">• piezoelektrický akcelerometr• piezorezistivní akcelerometr• rezonátory
posunutí	<ul style="list-style-type: none">• potenciometrický akcelerometr• kapacitní akcelerometr• induktivní akcelerometr• servo-řízený akcelerometr• optický akcelerometr

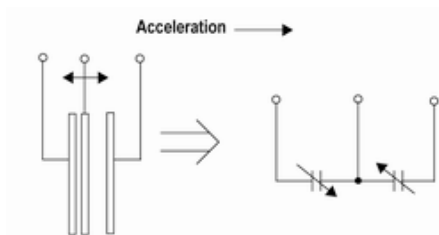
1.4. Princip kapacitního akcelerometru

1.4.1. Mechanická struktura

Struktura a funkce MEMS akcelerometru je založena na proměnné kapacitě tříelektrodového vzduchového kondenzátoru. Využívá se zde známé nelineární závislosti kapacity C na vzdálenosti elektrod kondenzátoru d (velikosti vzduchové meze-ry) dle vzorce (1.1):

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} [F] \quad (1.1)$$

(ε – permitivita, S – plocha elektrod). Pokud tedy jednu elektrodu uděláme pohyblivou a její pohyb bude závislý na působícím zrychlení, získáme kapacitní akcelerometr. A protože taková struktura pohyblivých nosičků (elektrod) je snadno realizovatelná MEMS technologií, vznikne nám MEMS akcelerometr.



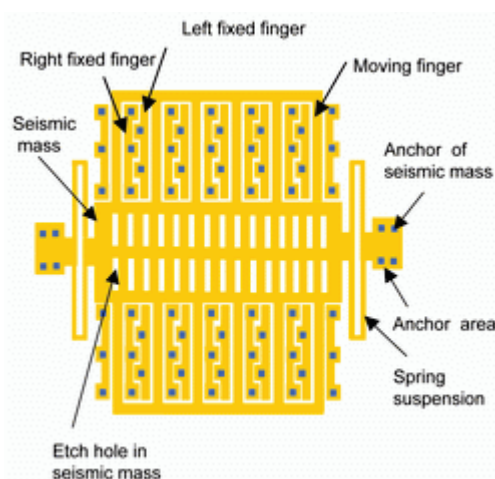
Obr. 5 – Základní princip MEMS akcelerometru – (2)

Výsledná funkční struktura ovšem není zas tak jednoduchá, jak se na první pohled zdá. Hlavní je právě zajistit lineární a dostatečně citlivý převod zrychlení na mechanický posuvný pohyb. Ten totiž určuje samotný měřicí rozsah senzoru, tj. maximální a minimální měřitelné zrychlení [3].

Zde se vychází ze základního vztahu (1.2) pro působení síly při zrychlení:

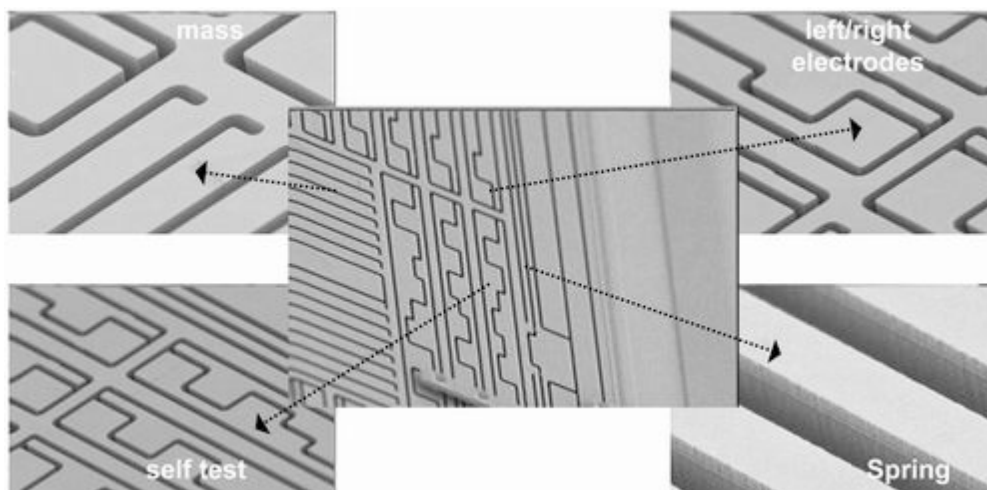
$$F = m \cdot a \quad (1.2)$$

Kde F je síla vzniklá působením zrychlení a na hmotu m (Seismic mass). Síla se pak přes pružiny (Spring suspension) převádí na posuv nosníčku (Seismic mass), jejíž některé části tvoří pohyblivé elektrody vzduchového kondenzátoru (Moving finger). Jejich pozice vůči levým pevným elektrodám (Left fixed fingers) a pravým pevným elektrodám (Right fixed fingers) určuje elektronicky měřenou hodnotu kapacity takto vzniklého kondenzátoru.



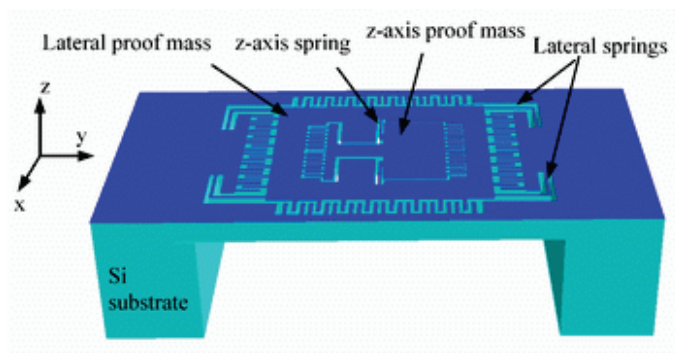
Obr. 6 – Znárodnění mechanické MEMS struktury akcelerometru – (3)

Nosníková struktura (Seismic mass) a pružiny se vyrábí leptáním polykrystalického křemíku (polysilicon), přičemž s postupným vývojem dochází k postupnému protahování pohyblivých elektrod ve směru kolmém na měřenou osu z dřívějších jednotek mikrometrů až na desítky mikrometrů. Díky tomu je možné několikanásobně protáhnout délku elektrod a tím získat lepší odstup signál/šum, menší křížovou citlivost (např. vliv zrychlení v ose X na osu Y) a hlavně odezvu na změnu velikosti zrychlení. Do budoucna se již také počítá nahrazením polySi krystalickým křemíkem.



Obr. 7 – Detailní záběry na reálné provedení jednotlivých částí struktury - pevných a pohyblivých elektrod (electrodes), detekční hmoty (mass), pružiny (spring) a samotestovací strukturu (self test) – (3)

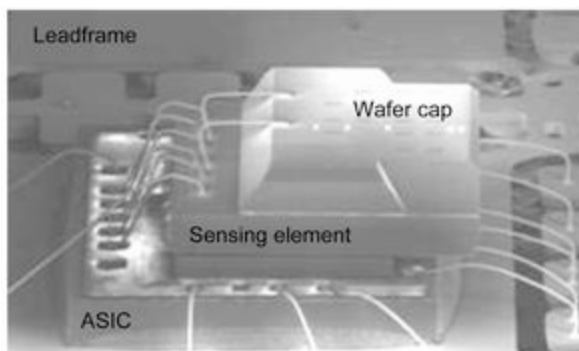
Výše uvedená a popsaná struktura však umožňuje měření zrychlení jen v jednom směru kolmém na pohyblivé elektrody = 1D akcelerometry. Technologicky vcelku není problém na chipu přidat další stejnou strukturu pouze proti té předchozí pootočenou o 90°. Vznikne tak 2D akcelerometr, který například měří v osách XY nebo XZ, dle natočení senzoru. Složitější je již vytvořit jednochipový 3D akcelerometr, protože se musí přidat výškově pohyblivá struktura v ose Z.



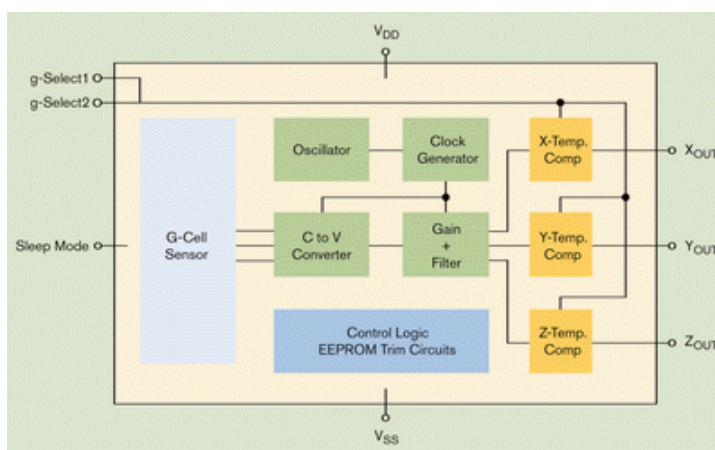
Obr. 8 – 3D struktura akcelerometru (měření zrychlení v osách X, Y, Z) – (3)

1.4.2. Elektrická struktura

Celá ASIC elektronika, která měří změnu kapacity, převádí ji na změnu napětí a zpracovává takto získaný signál na standardní lineární napět'ový výstup, je implantována pod snímacím elementem (Sensing element) překrytého krycí "kopulí" (Wafer cap). K měření kapacity se využívá metody spínaných kondenzátorů řízené číslicovou logikou a generátorem spínacího hodinového signálu. Dochází tak k převodu změny kapacity na změnu napětí. To je následně linearizováno a filtrováno opět obvody se spínanými kondenzátory a nakonec se provádí kompenzace vlivu teploty. Výsledkem je lineární, zesílený a kompenzovaný napět'ový signál s definovanou převodní konstantou - citlivostí podávající informaci o kolik se musí změnit hodnota měřeného zrychlení, aby došlo ke změně výstupního napětí o 1 V (hodnota g/V). Vše se provádí zvlášť pro každou osu snímání (kanál).



Obr. 9 – Struktura spojení snímače a ASIC elektroniky – (3)



Obr. 10 – Blokové schéma elektrické struktury 3D akcelerometru – (3)

2. Gyroskopy

Na počátku dvacátého století vznikaly rádiové navigace. Tyto metody rádiových navigací znamenaly enormní rozvoj v určování polohy a námořnictví. Hrubé určení polohy, ke které sloužil kompas a lodní zápisky, se používaly po staletí. Teprve před několika desetiletími se začal používat gyrokompas, ten nahradil vše potřebné. Gyroskop sám prošel intenzivním vývojem. Schopnost rychlého rotačního pohybu, která uchovává a fixuje řízení v prostoru, byla známá už v 19. století. První experiment byl proveden už v roce 1865 díky využití pohonu elektrickým motorem. První gyrokompas patentoval Dr. H. Anschütz-Kämpfe roku 1904 a byl použit roku 1908.

Gyroskopy musí být schopny detekovat kolísající rotační rychlost od stálé do $100^\circ/\text{s}$. Musí být tedy kvalitně vyrobeny. Například posun o 2 nm mezi centrem gravitace a centrem tlaku vzniká adekvátní nestabilita v gyroskopu a vytvoří odchylku 10^{-9} stupně za hodinu. V gyroskopech je požadována co nejmenší odchylka.

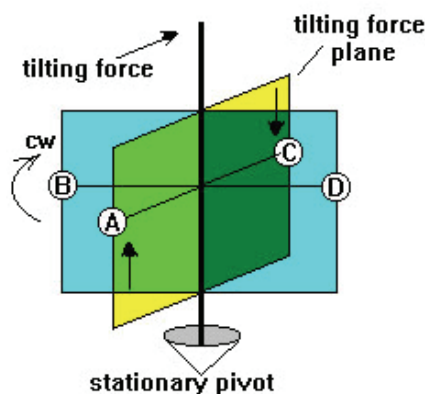
Pro lodě, jejichž navigace může trvat několik týdnů, chyba se akumuluje a je periodicky dorovnávána. V porovnání s letadly, kde let trvá jenom pár hodin nebo střela, která letí jen několik minut, se tato akumulovaná chyba neuvažuje. Ve standardním případě má gyroskop odchylku 10^{-2} stupňů za hodinu. Tuto chybu způsobuje rychlost jedna míle za hodinu.

V dnešní době lze vlastnit samostatný systém pro navigaci. Zpočátku byla akcelerace jediná měřitelná fyzikální jednotka. Nyní, po vynálezu gyroskopu, je možné tyto dva systémy spojit dohromady a ve výsledku získáme nezávislou navigaci bez potřeby jiných signálů jako systém GPS, který vyžaduje komunikaci s družicemi a jeho daná přesnost omezením pro civilní použití není veliká.

Inerční vedení letu se vyvinulo souběžně v posledních desetiletích, první kombinace akcelerometru a gyroskopu byla vyrobena v roce 1923, první 3D zařízení vyrobeno v roce 1924, první provozuschopné zařízení bylo vypuštěno v roce 1940, na raketě V2 a první výkonná stanice testovaná za letu ve Francii byla v roce 1961. Akcelerometry a gyroskopy jsou čím dál více oblíbenější a proto se používají v různých zařízeních [1].

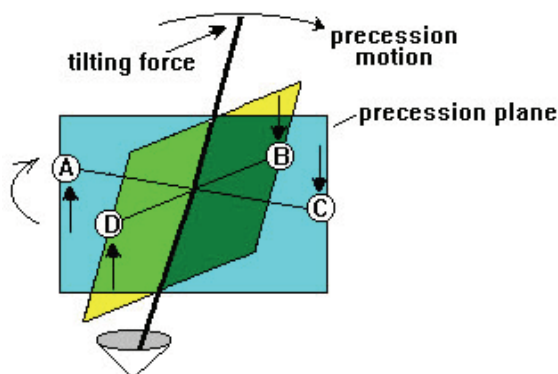
2.1. Princip funkce klasického rotačního gyroskopu

Obvykle mají gyroskopy tvar disku, ale může jím být jakýkoliv objekt, který má povahu setrvačníku. Součásti tvořící gyroskop by měly být ve stejné vzdálenosti od středu. Obvykle se používá tvar disku s velkou, těžkou obručí. Když se gyroskop neotáčí, chová se jako každý jiný objekt, nicméně když se gyroskop uvede do pohybu na své vlastní ose vysokou rychlostí, odolává vlivu působení sil v určitých směrech.



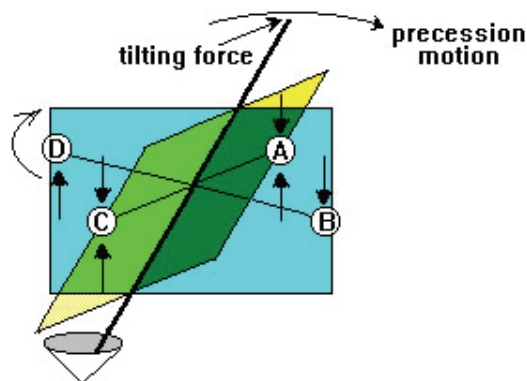
Obr. 11 – Představa pro lepší porozumění principu – (4)

Namísto kompletní obruče si představíme čtyři bodové síly A, B, C, D, které zastupují velmi důležité části pro představu funkce gyroskopu (Obr. 11). Dolní osa je stacionární a může se otáčet na čepu všemi směry. Když vychylovací síla (tilting force) působí na horní osu, bod A je poslán vzestupným směrem a bod C opačným (Obr. 12). Mezitím gyroskop rotuje podle hodinových ručiček, bod A se stává bodem B, když se gyroskop otočí o 90° . To samé se stane s bodem C a D.



Obr. 12 – Představa působení síly – (4)

Bod A se stále pohybuje vzestupným směrem, až je na pozici 90° , jako je vidět na (Obr. 12) a bod C se pohybuje sestupným směrem. Kombinace pohybů bodů A a C způsobuje rotaci osy v tzv. „precesní rovině“ (precession plane) doprava. Tento jev se nazývá precese. Gyroskopická osa se pohybuje v pravém úhlu do rotačního pohybu. V tomto případě doprava. Pokud se gyroskop otáčí proti směru hodinových ručiček, osa se bude pohybovat v precesní rovině doleva. Působí-li ve směru hodinových ručiček například vychylovací síla tahem místo tlakem, precese bude doleva.



Obr. 13 – Precesní pohyb – (4)

Když se gyroskop otočí o dalších 90° (Obr. 13), bod C je tam, kde byl bod A když vychylovací síla začala působit. Sestupný směr bodu C je nyní centrován vychylovací silou a osa se nevychýlí. Čím více tlačí vychylovací síla na osu, tím víc obruč z druhé strany tlačí osu zpět při opsání 180° [4].

Vlastnost precese gyroskopu se využívá k držení (monorail trains – metro nad zemí jedoucí po jedné úzké koleji) roviny při najíždění do zatáčky. Hydraulický válec působí silou, dle aktuální situace, na jednu osu mohutného gyroskopu. Občas je precese nežádoucí, když dva proti sobě se otáčející gyroskopy jsou použity na stejnou osu. Potom musí být použito výkyvné uložení.

Z poslední doby je známé použití gyroskopu jako rehabilitační či zábavný prostředek zvaný Powerball. Podstatou je roztočit v ruce gyroskop a čím rychleji se gyroskop točí, tím má větší odporovou sílu, která se pohybuje kolem 18 kg při otáčkách blízkých se patnácti tisícům. Tímto cvičením se zpevní svaly ruky a zápěstí, což je velice důležité v dnešním světě počítačů, kdy lidé u nich tráví podstatnou část dne.

2.2. Dělení gyroskopů

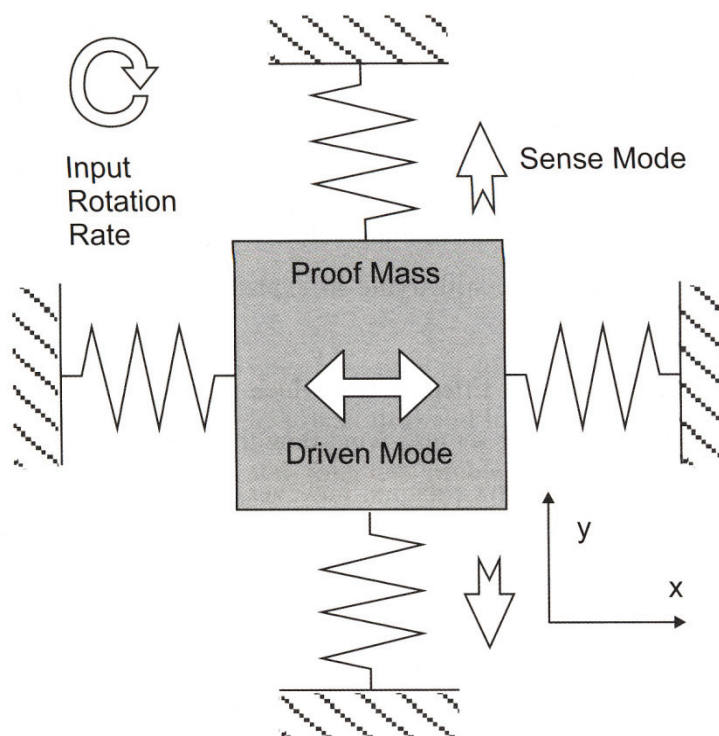
Podle způsobu měření můžeme gyroskopy rozdělit do tří základních skupin:

- 1) **rotační gyroskopy** – jsou nejstarší
- 2) **vibrační gyroskopy** – dnes jsou nejvíce používány a jsou stále ve vývoji
- 3) **optické gyroskopy** – ty jsou řazeny mezi dvě předcházející skupiny svými specifickými vlastnostmi

2.3. Princip vibračního gyroskopu

Pro inerciální navigaci byl zvolen modul od firmy SURE electronics, který obsahuje vibrační gyroskop XV-3500CB.

Princip spočívá v elektrodynamickém závěsu na listové pružiny. Spíše než odstředivým pohybem funguje běžný gyroskop jako rotor. Elektrodynamicky vibruje dopředu a dozadu v postupném pohybu.



Obr. 14 – Kompozice vibračního poměru gyroskopu – (1)

Základní funkční princip všech vibračních gyroskopů vychází z detekce Coriolisova zrychlení. Jednoduchý vibrační gyroskop je složený z elektrodynamicky upevněných pružin, které dovolují pohyb ve dvou ortogonálních směrech. V gyroskopické dynamice je zřetelný pohyb všemi třemi směry ortogonálních os (Obr. 14)

Tělisko (proof-mass), je umístěno do oscilačního pohybu v ose x (zvaná (drive axis) osa pohybu) paralelně se substrátem. Pohybem těliska je citlivý na úhlové změny indukované v substrátu, když rotuje kolem osy z kolmo na substrát. Vstupní rozsah indikuje Coriolisovo zrychlení v ose y (zvaná (sense axis) osa senzitivity), která je kolmá na osu x (osa pohonu) a osu z (vstupní rozsah). Toto Coriolisovo zrychlení zahrnuje Coriolisův pohybový rozkmit úměrný úhlové rychlosti substrátu. Detekce Coriolisova pohybu vyvolaná Coriolisovým zrychlením umožňuje odvodit původní rotaci gyroskopu.

Coriolisův efekt je použit pro praktickou představu rezonátoru (snímací prvek). Každá částice o hmotnosti (m) je chápána jako elastická struktura. Když je částice uvedena do pohybu a pohybuje se kolem osy x, pohybuje se rychlostí rotace Ω , potom síla F (podle vztahu (2)) známá jako Coriolisova je generována podél osy y, kolmá na osu x [1].

$$F = 2 \cdot m \cdot v \cdot \Omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2)$$

F – Coriolisova síla

m – hmotnost tělesa

v – rychlost pohybu v ose x

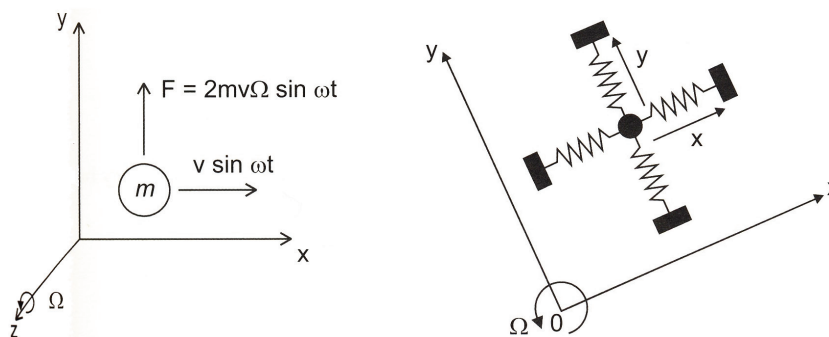
Ω – úhlová rychlost

ω – vibrační frekvence tělesa o hmotnosti m

Výsledek vibrace má složky X a Y:

- vibrace ve směru x
- vibrace související s Coriolisovou silou ve směru y

Měření následné vibrace (podél osy y) je použito na určení počtu otáček.



Obr. 15 – Coriolisova síla F – (1)

Aktuální výzkum se zaměřuje na symetrii snímacího elementu pro poskytnutí co nejlepšího snímání vibrací. V budoucnu se dočkáme různých variant využití tohoto fyzikálního principu, každý je však odvozen ze symetrie snímacího elementu.

3. Určování polohy

3.1. Získání polohy akcelerometrem

Nejlepším přiblížením v pochopení algoritmu výpočtu nám poskytuje numerická integrace. Akcelerace je míra změny rychlosti objektu. Zároveň platí, že rychlost je míra změny pozice téhož objektu. Jinými slovy, rychlost je derivace dráhy podle času (3.1) a zrychlení je druhá derivace dráhy podle času (3.2):

$$\vec{v} = \frac{d \vec{s}}{dt} \quad (3.1)$$

$$\vec{a} = \frac{d \vec{v}}{dt} \quad (3.2)$$

Z předchozích vztahů (3.1) a (3.2) vyplývá (3.3):

$$\vec{a} = \frac{d(d \vec{s})}{dt^2} \quad (3.3)$$

Integrace je protiklad derivace, když je akcelerace objektu známá, můžeme získat data o poloze, tím že použijeme dvojitou integraci (3.4) a (3.5) (za předpokladu nulových počátečních podmínek):

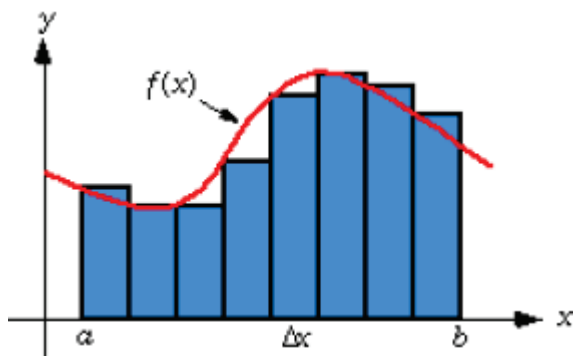
$$\vec{v} = \int \vec{a} . dt \quad (3.4)$$

$$\vec{s} = \int \vec{v} . dt \quad (3.5)$$

Z předchozích vztahů (3.4) a (3.5) vyplývá (3.6):

$$\vec{s} = \int \left(\int \vec{a} . dt \right) . dt \quad (3.6)$$

Vyjádřením tohoto výrazu je definice integrálu kolem křivky, kde integrace je suma malých přírůstků, jejichž šířka je téměř rovna nule. Jinými slovy suma integrálů reprezentuje křivku vzdálenosti (3.7). (Obr. 16)



Obr. 16 – Příklad výstupního signálu akcelerometru (v čase) – (5)

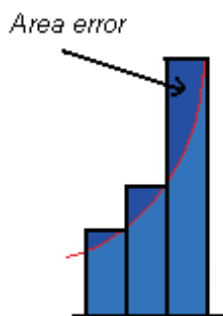
$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(x_i)\Delta x \quad (3.7)$$

Kde Δx (3.8):

$$\Delta x = \frac{b-a}{n} \quad (3.8)$$

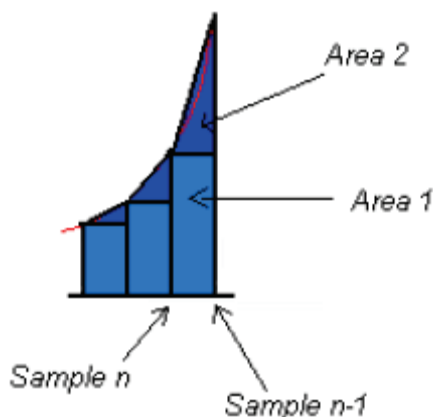
Z této představy „oblasti kolem křivky“ můžeme odvodit: Vzorkováním signálu získáme okamžité hodnoty zrychlení, ale tak zanedbatelná vzdálenost Δx nemůže být vytvořena mezi dvěma vzorky a vzniká chyba. Pro získání co nejmenší chyby při měření zrychlení, musí zůstat vzorkování vždy stejné. Vzorkovací perioda představuje vzdálenost dvou vzorků. V případě eliminace násobení se zlomky (mikrosekundy nebo milisekundy) zahrnující plovoucí čárku ve výpočtu a čas považujeme jako jednotku.

Nyní víme, že každý vzorek reprezentuje oblast, která má základní šířku 1. Následující odečet vzorku může způsobit, že hodnota integrálu může být snížena sumou integrálů. Tento předpoklad bývá správný, jedná-li se o ideální vzorkování. V reálu je vytvářena chyba (Obr 17). Vzniklá chyba se časem akumuluje.



Obr. 17 – chyby způsobené integrací – (5)

Tyto chyby jsou formálně známé jako ztráty způsobené vzorkováním. V případě redukce těchto chyb můžeme realizovat následující předpoklad. Výslednou oblast si můžeme představit jako dvě malé oblasti (Obr. 18).



Obr. 18 – chyby způsobené integrací jsou redukovány – (5)

První oblast je hodnota předchozího vzorku (obdélník), druhá oblast (trojúhelník) vytvořený předchozím vzorkem (n-1) a aktuální vzorkem (n) dělený dvěma. Tímto postupem dosáhneme přiblížení ke skutečnému průběhu (3.9).

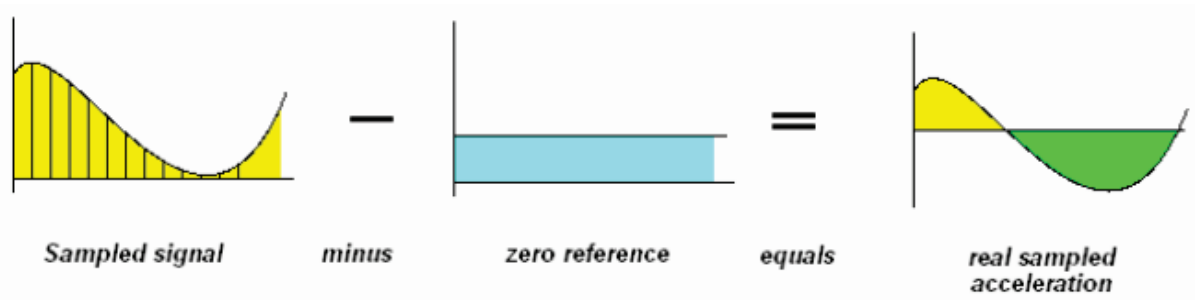
$$oblast_n = vzorek_n + \frac{|vzorek_n - vzorek_{n-1}|}{2} \cdot t \quad (3.9)$$

Nyní je chyba mnohem menší než předtím před použitím aproximace. Přesto získané údaje nemusí být přesné ve srovnání s reálným světem. Přestože může být zrychlení kladné nebo záporné, vzorky jsou vždy kladné (vychází z výstupních charakteristik akcelerometru MMA7260QT), proto musí být provedena kompenzace. Jinými slovy je potřeba kalibrace. Tento problém řeší kalibrační funkce, která je implementována v programu.

Kalibrace se provádí, když se akcelerometr nepohybuje. Výstup je porovnáván s referenčním bodem „nula“. Hodnoty menší jak referenční bod představují záporné hodnoty (zpomalení), zatímco hodnoty větší jak referenční představují kladné hodnoty (zrychlení).

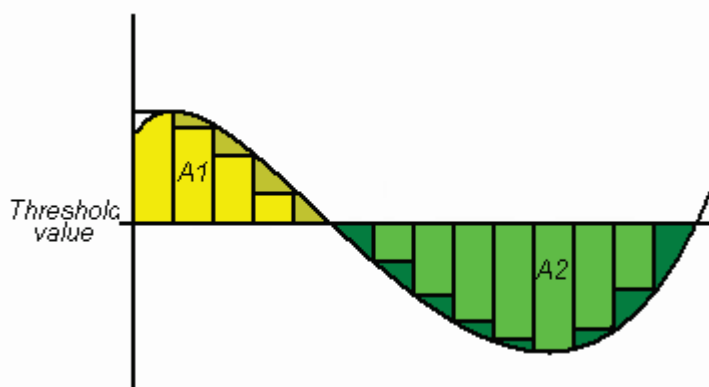
Výstup akcelerometru se mění od 0 V do hodnoty Vdd (napájecí napětí) a je typicky interpretován analogově digitálním převodníkem (A/D). Nulový referenční bod odpovídá polovině napájecího napětí (Vdd/2). Kalibrační hodnota je ovlivněna orientací plošného spoje, na kterém je umístěn akcelerometr a statickým zrychlením g (zemská gravitace) ve všech třech osách. Jestliže je modul co nejméně rovnoběž-

ný s povrchem země, kalibrační hodnota bude odpovídat polovině napájecího napětí ($V_{dd}/2$). Výsledek kalibrační funkce (Obr. 19) [5].



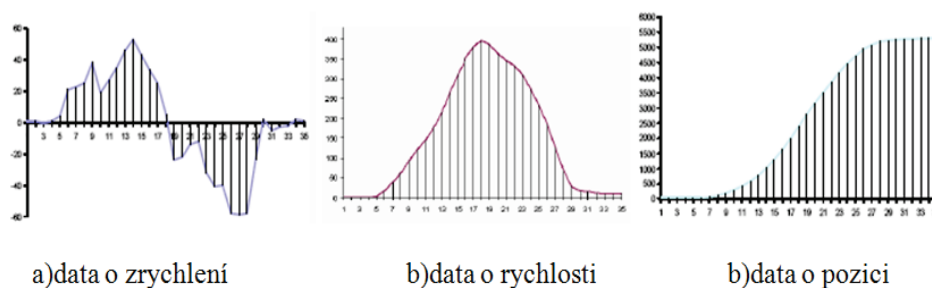
Obr. 19 – Zrychlení po kalibraci – (5)

Z ovzorkovaného signálu, od kterého odečteme nulový referenční bod, získáme pravý průběh ovzorkovaného zrychlení. Oblast A1 představuje zrychlení, oblast A2 představuje zpomalení. Když si představíme tyto data jako ovzorkovaná data, signál bude podobný jako na následujícím obrázku (Obr. 20).



Obr. 20 – Ovzorkovaný signál zrychlení po kalibraci – (5)

Po použití integrace podle vzorce (3.9), získáme proporcionální aproximaci rychlosti. Pro získání polohy musíme integrovat ještě jednou. Použitím stejného vzorce na získaná data o rychlosti, dostaneme ve výsledku proporcionální aproximaci o aktuální poloze (Obr. 20).

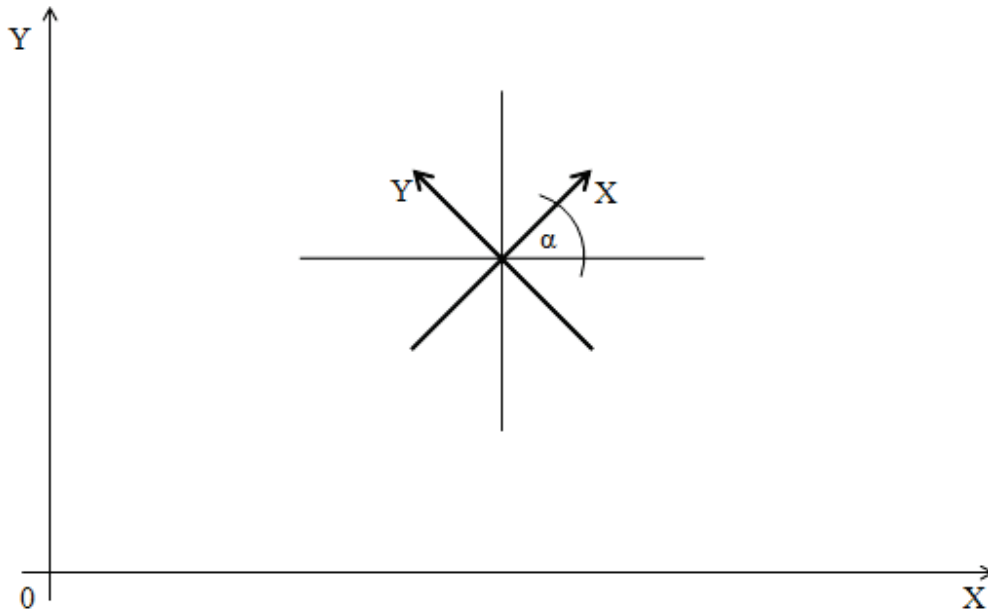


Obr. 21 – Proporcionální aproximace aktuální polohy

3.2. Získání polohy gyroskopem

Výstup gyroskopu udává úhlovou rychlost. Z ní získáváme opsaný úhel za jednotku času (3.10):

$$\alpha = \omega \cdot t \quad (3.10)$$



Obr. 22 – Graf pro objasnění určení polohy

$$X = X_{senz.} \cdot \cos(\alpha) + Y_{senz.} \cdot \sin(\alpha) \quad (3.11)$$

$$Y = Y_{senz.} \cdot \cos(\alpha) + X_{senz.} \cdot \sin(\alpha) \quad (3.12)$$

Vzorce (3.10) a (3.11) poskytují v kombinaci s hodnotami akcelerometru a úhlem ze vztahu (3.10) informace o skutečné poloze v prostoru i v případě různého natočení.

4. Praktické řešení

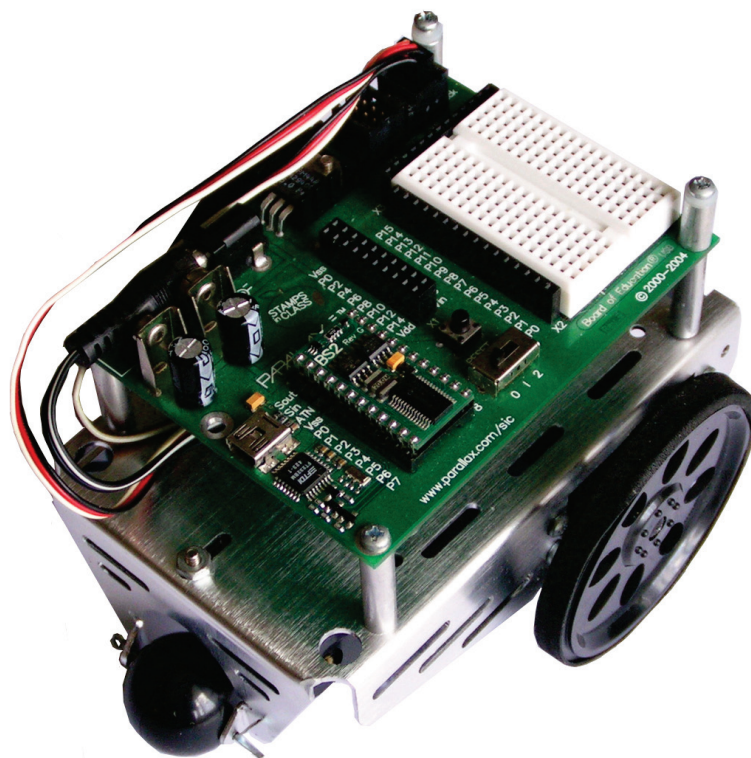
4.1. Boe-Bot robot

Robot navržen a postaven firmou Parallax Inc., skládá se z kvalitního, broušeného, hliníkového šasi, které nabízí pohodlné upevnění servomotorů a základní desky procesoru. Šasi je uzpůsobeno tak aby na něj šly případně přidělat další části, jako jsou různá čidla, která slouží pro jeho lepší orientaci v prostoru. Zadní kolo tvoří polyetylenová kulička upevněná závlečkou. Kola se snadno připevňují na servomotory, na kterém jsou přichyceny šroubkem, kompletní sestavený robot (Obr. 22).

Systém je vyvinut na základě dlouhodobých zkušeností, snadno se ovládá, proto je vhodné ho použít i pro výuku. Všechny I/O části jsou umístěny na základní desce. Základní deska je odnímatelná, lze jí použít i v jiných aplikacích nebo lze kombinovat různé produkty této firmy dohromady. Robot se dá snadno sestavit, má přívětivé vývojové prostředí, do kterého se dají snadno a rychle zapsat jednoduché, ale přesto účinné aplikace [7].

4.1.1. Základní vlastnosti:

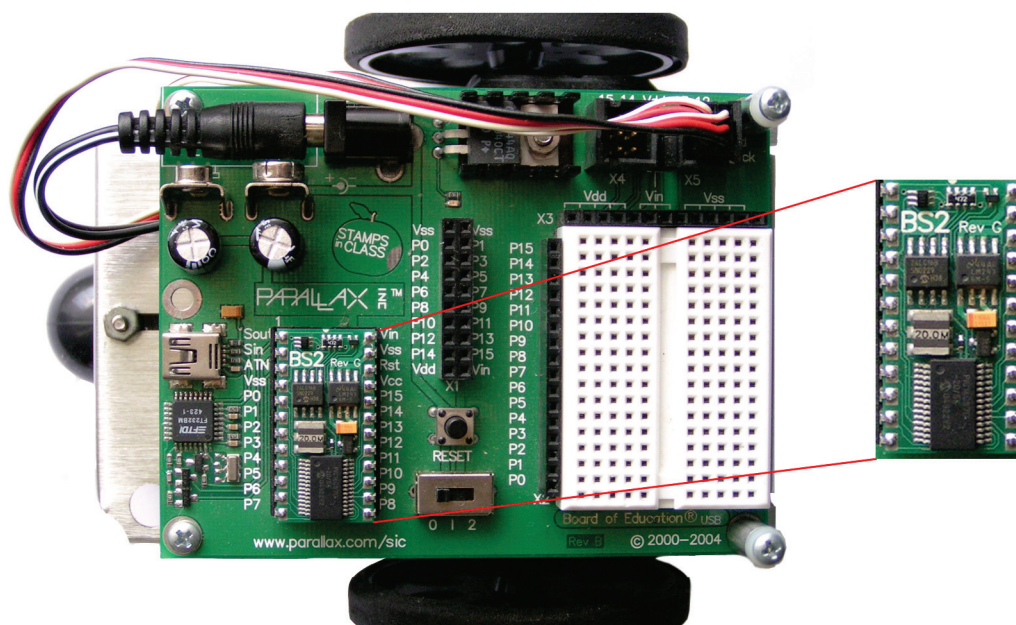
- **Cílová skupina:** Slouží pro vzdělání nebo robotové nadšence, případně díky svojí jednoduchosti i pro začátečníky. Doporučený věk je 14 let a výše, vhodné pro střední, vysoké, odborné školy nebo jako koníček pro domácnost, obzvláště vhodné použití na univerzitách zaměřených na řízení.
- **Napájení:** 4 AA baterie pro BASIC Stamp® mikrokontroler a řízení motoru
- **Čas potřebný k sestavení a programování:** 2-3 hodiny, Boe-Bot robot se sestavuje z připravených součástí k montáži a velice užitečná je dodávaná příručka, která obsahuje i ukázky programů.
- **I/O komponenty:** LED diody, reproduktor, tlačítka, fotorezistory, rezistory a kapacity, infradiody s přijímači, kontaktní tykadla
- **Použití BASIC Stamp I/O pinů:** Sensorový obvod se staví na nepájivém poli, na které jsou vyvedeny všechny potřebné piny mikrokontroleru, a lze snadno a rychle upravovat zapojení dle potřeby.
- **Detekce objektů:** Detekce objektů je umožněna pomocí infradiod a pomocí kontaktních tykadel
- **Rozšíření:** Robota je možno rozšířit o další zařízení a moduly jako je třeba LCD terminál nebo různé doplňkové senzory.



Obr. 23 – Boe Bot robot

4.1.2. Mikroprocesorový modul BASIC Stamp 2

BASIC Stamp 2 (Obr. 23) modul představuje výkonnou část robota, lze ho jednoduše použít i v různých projektech a aplikacích, kde je vyžadován mikrokontroler. Je schopen kontrolovat a sledovat časovače, klávesy, servomotory, senzory, vypínače, relé, světelné indikátory a další. Programování probíhá ve snadném, lehce osvojitelném programovacím jazyku nazývaném PBASIC, který má velmi dobře popsanou syntaxi. V dodávané knize je mnoho příkladů, které jsou bohatě popsány, proto není problém je snadno a rychle aplikovat. Na stránkách výrobce se nachází další ukázky zdrojových kódů, CD a mnoho přehledných a podrobných manuálů. S tímto modulem lze naprogramovat jednoduché, přesto účinné aplikace.



Obr. 24 – Modul BASIC Stamp 2

4.1.3. Hlavní specifikace mikrokontroleru BASIC Stamp 2

- Frekvence procesoru: 20 MHz
- Rychlost vykonávání programu: ~4,000 PBASIC instrukcí/s
- Velikost RAM: 32 Bytes (6 I/O, 26 proměnných)
- EEPROM (Programová) velikost: 2 kBytes; ~500 PBASIC instrukcí
- Počet I/O pinů: 16 + 2 určených pro sériovou komunikaci
- Napájení 5 V DC: 3 mA provozní stav, 50 μ A režim spánku
- Zátěž jednoho I/O: 20 mA / 25 mA
- Zátěž celku: 40 mA / 50 mA na 8 I/O pinů
- PBASIC příkazů: 42
- Pouzdro: 24pin DIP

4.1.4. Klíčové specifikace:

- Napájení: 5,5 do 15 VDC (V_{in}) nebo 5 VDC (V_{dd})
- Komunikace s deskou: sériový port (9600 Bd pro programování)
- Rozměry: 30,0 x 16,0 x 3,81 mm
- rozmezí provozních teplot: -40 do +85 $^{\circ}$ C

4.2. Modul pro navigaci

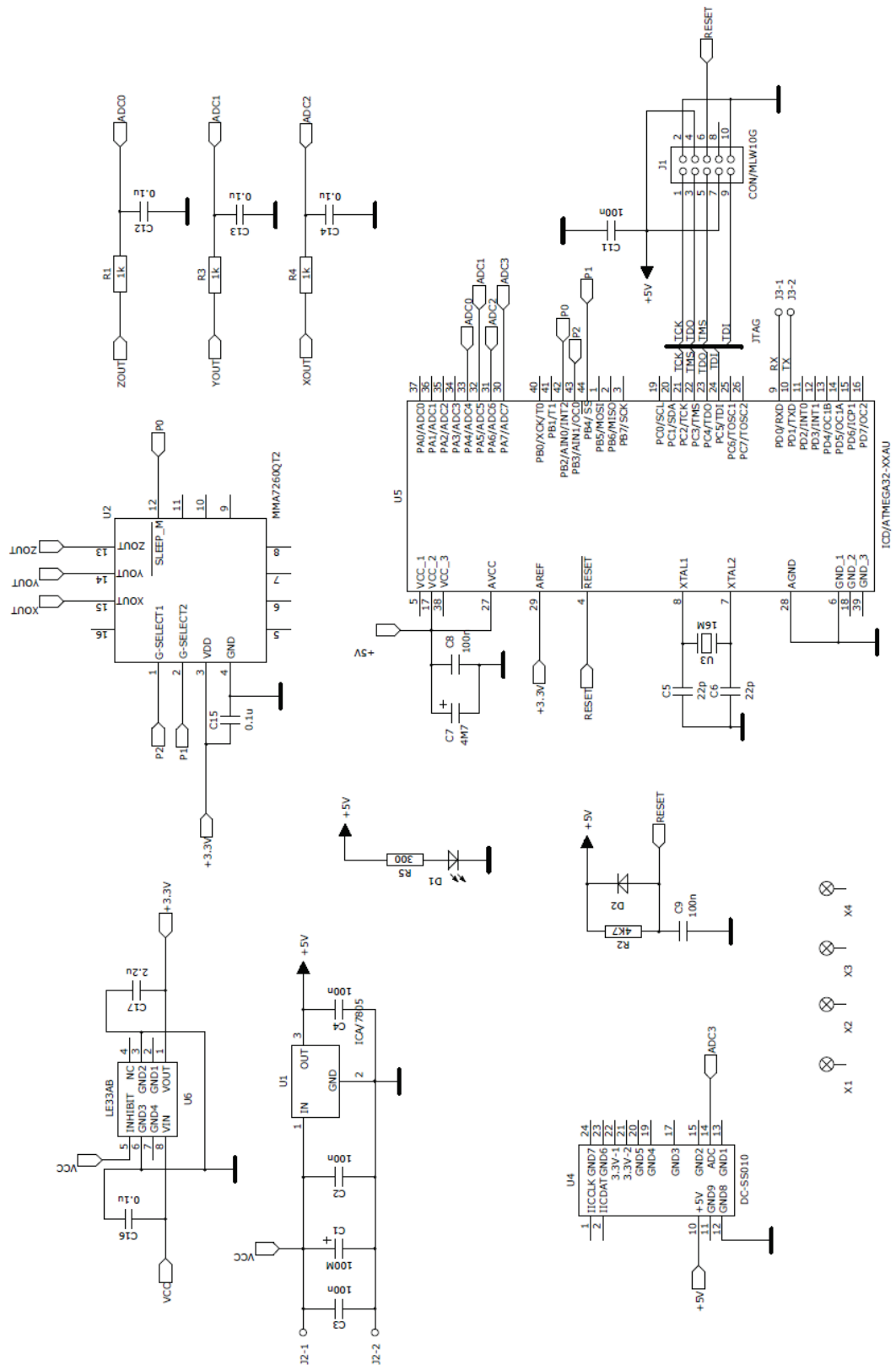
4.2.1. Návrh plošného spoje

Výběr součástek pro výrobu plošného spoje spočíval na volbě prvků pro navigaci. Jako akcelerometr jsem zvolil obvod MMA7260QT od firmy Freescale. Jeho parametry splňovaly požadavky na použití k navigaci v malém prostoru. Zejména vlastnost použití v zařízeních, které jsou napájené baterií. Navíc byl získán zdarma díky poskytování vzorků firmou Freescale pro studijní účely. Funkci gyroskopu zastupuje modul s gyroskopem od firmy SURE electronics. Byl vybrán pro svou jednoduchost použití, protože k jeho funkci je potřeba jen napájení a A/D převodník podobně jako u akcelerometru.

Navigační prvky jsou zvoleny, na řadu přichází obvod, který bude řídit celou funkci zařízení, počítat jeho polohu a starat se o sériovou komunikaci. Výběr nebyl složitý, zvolil jsem mikrokontroler AVR ATmega32 od firmy Atmel. Jedná se o 8bit RISC mikrokontroler. Disponuje jednotkou USART, 10bit A/D převodníkem s osmi multiplexovanými vstupy, čtveřicí portů, třemi jednotkami čítače/časovače a mnoho dalších věcí, které nejsou nutné pro funkci zařízení. Obvod lze programovat jazykem C, kterým se jednoduše a rychle dosáhne požadované nastavení a funkce pro ovládání celého systému. Programovací režim byl zvolen JTAG, umožňuje za použití doporučených programátorů ladící režim aplikace přímo na fyzickém zařízení. Taktovací kmitočet je řízen 16 MHz krystalem. Je vyžadována vyšší frekvence, aby vzorkování probíhalo v co nejkratších časových okamžicích (ovlivnění přesnosti navigace) a zároveň musí být zaručeno nezbytné ovládání dalších funkcí.

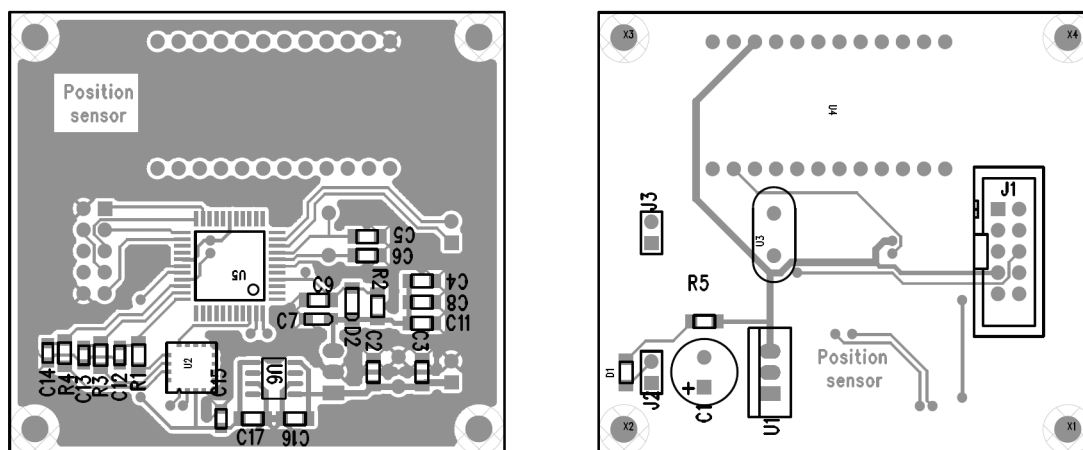
Napájecí napětí jsem vyřešil použitím dvou stabilizátorů. Stabilizátor 7805 zajišťuje napájení 5 V mikrokontroleru a modulu s gyroskopem. Pro akcelerometr je použit stabilizátor LE33 na 3,3 V. Toto napětí také slouží jako referenční napětí pro převodník A/D, je přivedeno na vstup AREF mikrokontroleru. I přesto, že je modul s gyroskopem napájen napětím 5 V výstupní napětí pro A/D převod je 3,3 V. Díky těmto dvěma stabilizátorům se může napájecí napětí pohybovat v rozsahu 6-15V.

Výběr komponent je hotov. Pro sestavení schématu a návrhu desky plošného spoje jsem volil návrhový software PADS ve verzi 2005 dodávaný firmou Mentor Graphics. Zvolil jsem ho proto, že se mi líbí jeho funkce a seznámil jsem se s ním během studia. Schéma se nachází na další stránce (Obr. 25).



Obr. 25 – Schéma zařízení pro inerciální navigaci

Návrh desky plošného spoje probíhal s ohledem na možnost ruční výroby celého zařízení, jednak z finančního hlediska a nejedná se o příliš komplikovaný obvod. Tomu odpovídalo i patřičné rozmístění součástek. Celý obvod by se vešel i na menší destičku, ale bylo by nutné použít výrobu strojovou. Návrh výsledné desky se nachází na (Obr. 26).



Obr. 26 – Plošný spoj BOTTOM, TOP

4.2.2. Výsledná deska

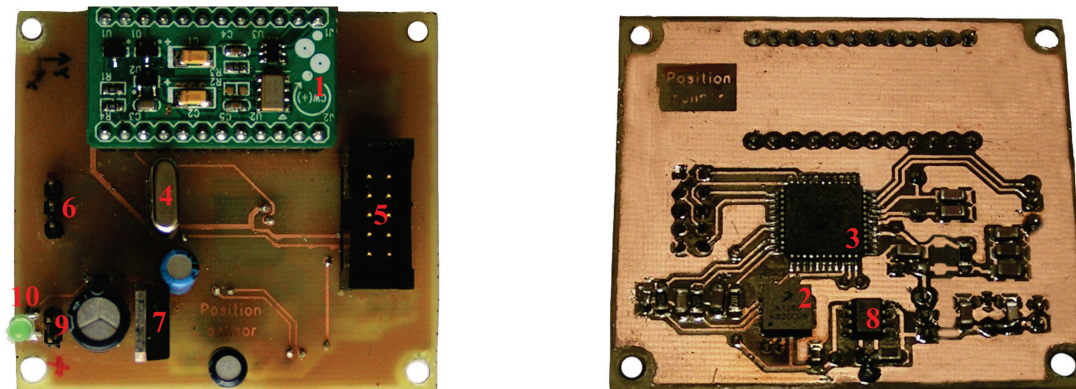
Akcelerometr slouží k orientaci prostoru v o sáh X, Y a Z (není zahrnuta). Gyroskop na výstupu dává hodnotu úhlové rychlosti. Popis principů a funkcí akcelerometru a gyroskopu je uveden v předchozí kapitole (3.).

O celý chod obvodu se stará mikrokontroler, který řídí časování vzorkování, zajišťuje samotný A/D převod všech vstupů, ovládání obvodů, posílání dat po USART a celý proces výpočtu polohy. Kompletní deska je na (Obr. 26).

4.2.3. Ovládání akcelometru a gyroskopu:

Na porty mikrokontroleru jsou připojeny piny akcelerometru pro volbu citlivosti g a pin sloužící k přepnutí do režimu spánku. Výstupy os X, Y, Z a výstup modulu s gyroskopem jsou přivedeny na multiplexované vstupy A/D převodníku mikrokontroleru. K funkci modulu s gyroskopem není třeba další ovládání. Disponuje sběrnici I2C, ale způsob odečítání hodnot byl zvolen stejný jako v případě akcelerometru. A/D převodník mikrokontroleru má 10 bitů, tedy maximální hodnota je 1023. Referenčnímu napětí 3,3 V odpovídá právě číslo 1023. Z výstupních charakteristik akcelerometru vyplývá, že při rovnovážné poloze je výstupní napětí rovno polovině napájecího napětí. Po převodu je hodnota blízko kolem čísla 512. Hodnotě 1g odpo-

vídá $\frac{3}{4}$ napájecího napětí (vyčteno z datasheet, ověřeno testem při naklonění akcelerometru v různých osách).



Obr. 27 – Modul Position sensor

Popis zařízení:

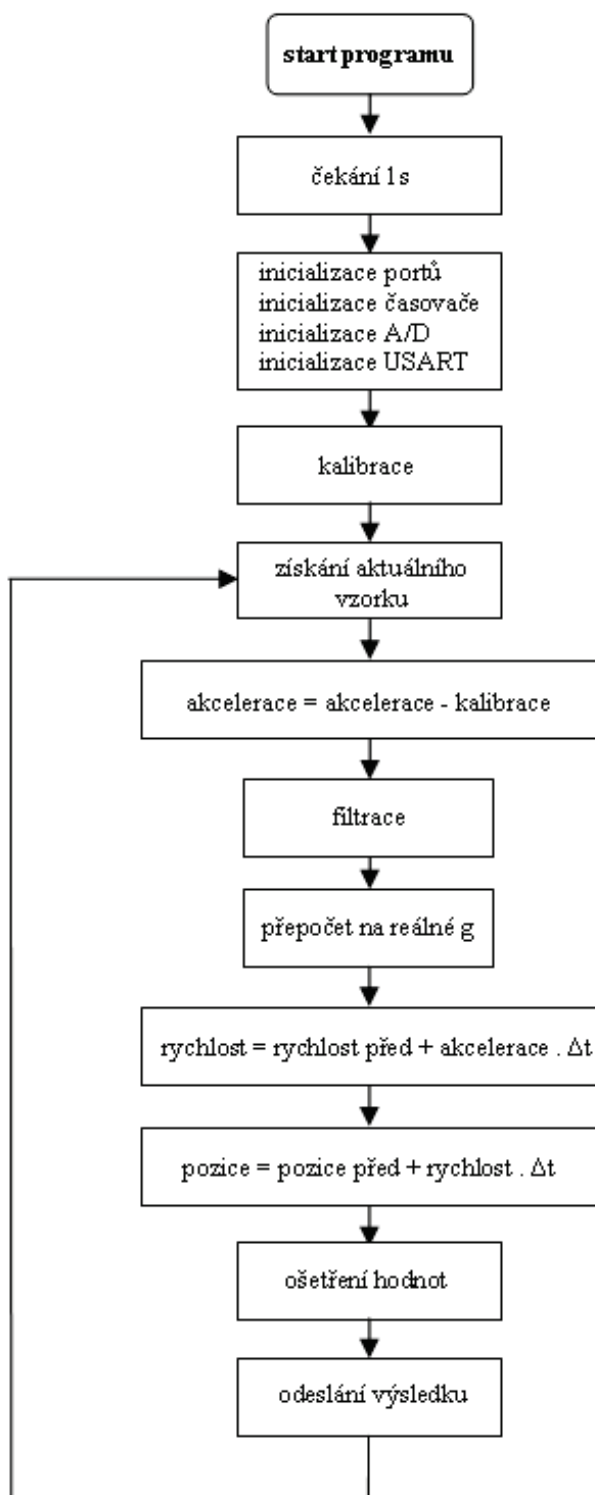
1. modul s gyroskopem XV-3500CB
2. akcelerometr MMA7260QT
3. mikrokontroler Atmel AVR ATmega32
4. krystal 16 MHz
5. programovací konektor JTAG
6. piny pro komunikaci po USART
7. 5 V stabilizátor 7805
8. 3,3 V stabilizátor LE33
9. připojení napájecího napětí
10. indikační LED dioda spuštěného zařízní

4.3. Softwarové řešení:

Základním úkolem mikrokontroleru je v pravidelných časových okamžicích měřit výstupy akcelerometru. Na základě těchto hodnot probíhají výpočty. Nejdříve se provede kalibrace pro získání klidové polohy pozičního senzoru, která poté slouží k určení odchylky od klidového stavu. Známe-li kalibrační hodnotu, může se přistoupit k výpočtu pozice.

Z aktuálního zrychlení odečteme referenční nulovou hodnotu získanou kalibrací a tím získáme aktuální hodnotu zrychlení. Na ní aplikujeme první integraci, tím získáme velikost rychlosti a druhou integrací získáme hodnotu pozice, kterou následně můžeme odeslat po USART.

4.3.1. Vývojový diagram



Obr. 28 – Vývojový diagram aplikace

Pozn.: Výpočet zrychlení se musí provádět pro každou osu akcelerometru zvlášť. Tedy budeme-li požadovat všechny tři osy X, Y a Z, tak je potřeba provést následné integrace pro každou osu zvlášť.

4.3.2. Popis funkcí software v mikrokontroleru ATmega32

Po připojení napájecího napětí program čeká jednu sekundu na ustálení stavu. Následně se provede inicializace portů a periférií. Nastavení portů spočívá ve volbě citlivosti g akcelerometru s uvedením do provozního stavu z režimu spánku. Nastavení časovače slouží pro převodník A/D, kdy se na jeho náběžnou hranu spouští A/D převod. Volba hodnoty časovače má vliv na přesnost měření zrychlení. Problém také spočívá v tom, že je k dispozici jeden převodník s multiplexovaným vstupem. Vstupy se proto musí přepínat a se zvětšujícím se počtem vstupů A/D převodníku roste čas Δt k získání dalšího vzorku z určitého vstupu. Činnost A/D převodníku je nastavena na (Output Compare) přerušení časovače a základní inicializace vstupu je na výstup X. Periferie USART je nastavena na přenosovou rychlost 19200 Bd. Činnost je standardní (8 bitů 1 stop bit). Přenosová rychlost je volena s ohledem na přepínání vstupů A/D převodníku, proto vyšší rychlost, aby přenos netrval příliš dlouho.

4.3.3. Kalibrace

Tato funkce načítá jednotlivé vzorky, plošný spoj musí být v klidu ve výchozí pozici, po načtení 64 vzorků se provede dělení vlastním počtem vzorků, tomu odpovídá bitový posuv o 6 doprava. Dělení je náročná činnost na počet vykonaných operací, proto je výhodné toto dělení provést tímto způsobem. Touto funkcí získáme referenční nulovou hodnotu, ze které poté vychází výpočet aktuální hodnoty akcelerace. Do jisté míry tato funkce slouží také k eliminaci chyb, které vznikají A/D převodem tím, že dochází-li ke změnám hodnot i při stálé poloze, vznikne suma vzorků a z nich je vypočten průměr. Tímto postupem vznikne nejlepší vztažná hodnota k nepatrně se měnícím hodnotám vzorků vlivem chybného A/D převodu.

4.3.4. Určování pozice:

Pro výpočty jsou potřeba dvouprvkové pole, aby bylo možno zaznamenávat aktuální hodnotu vzorku (výpočtu) a znát i hodnotu předchozí. Z naměřeného vzorku se provede odečtení referenční nulové hodnoty, tím se získá aktuální hodnota. Výsledkem může být zrychlení, zpomalení nebo nula (klid). Následuje softwarová filtrace, která by měla definitivně ošetřit chybu vzniklou A/D převodem, tedy není-li zařízení v pohybu, nesmí se hodnota polohy v jednotlivých osách změnit. Ze znalosti velikosti čísla po převodu, kterému odpovídá hodnota $1g$ se přepočítá reálná velikost zrychlení. Po zjištění aktuální hodnoty zrychlení tuto hodnotu integrujeme způsobem

nejprve výpočtem rychlosti (první integrace) ze znalosti předchozí (počáteční) rychlosti, aktuálního zrychlení a časové vzdálenosti dvou vzorků Δt .

```
//první integrace zjištění rychlosti v ose X
```

```
velocityx[1] = velocityx[0] + accelerationx[1] * deltaT;
```

Pro zjištění pozice je nutné integrovat ještě jednou (druhá integrace). Předchozí (počáteční) pozice je známá, po první integraci se zjistila aktuální rychlost, Δt je stejné.

```
//druhá integrace zjištění pozice v ose X
```

```
positionx[1] = positionx[0] + velocityx[1] * deltaT;
```

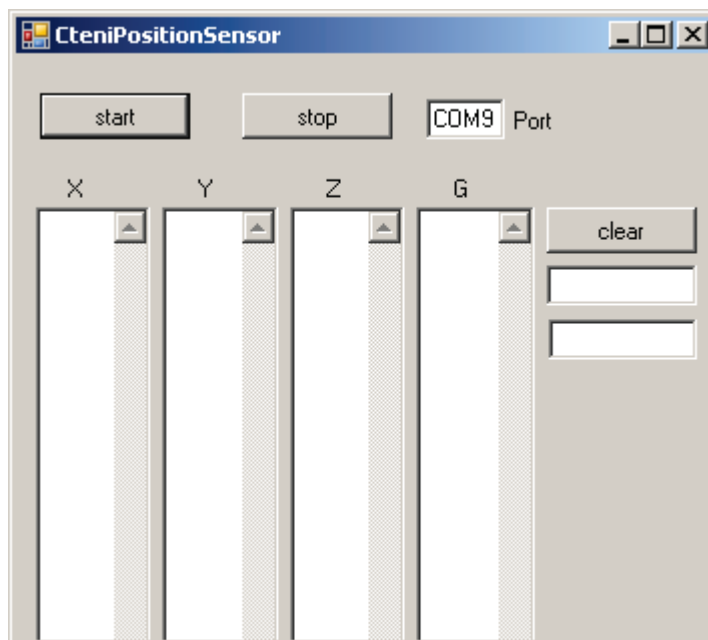
Tento postup je potřeba aplikovat na každou osu akcelerometru zvlášť (pro navigaci robota stačí osa X a Y). Interval Δt mezi vzorky neumožňuje odebrání vzorků v libovolném okamžiku, tím nelze zaznamenat všechny hodnoty a při zastavení pohybu nelze srovnat rychlost na nulu. Tato vlastnost se odstraní použitím softwarového filtru, který zahrnuje funkce „move_end_check“. Funguje na principu, není-li naměřeno zrychlení a těchto stavů se napočítá několik za sebou, považujeme zařízení za stojící. Provedeme tak, že zrychlení a rychlost nastavíme ručně na nulu. Jednotka zrychlení má velikost m.s^{-2} , při výpočtech se uvažují základní jednotky a výslednou pozici získáme v jednotkách metrů (m) a je potřeba tuto hodnotu převést na centimetry (cm), poté se hodnota může vyslat.

4.3.5. Vývoj aplikace

Dříve než byla kompletní a odladěná funkce určující pozici nahrána do mikrokontroleru, tak její vývoj probíhal na PC. Z mikrokontroleru se posílala samotná data z připojených vstupů na jeho A/D převodník. Každá odeslaná hodnota obsahovala identifikátor, aby bylo možno rozeznat, ze kterého vstupu A/D převodníku přišla hodnota.

Pro připojení k PC byl potřeba převodník pro sériovou komunikaci na logické úrovni 5 V. K tomuto účelu slouží převodník s chipem od společnosti FTDI. Pomocí vývojového prostředí Visual Studia 2008, za použití programovacího jazyka C#, jsem si naprogramoval jednoduchou aplikaci na příjem ze sériového portu. Podle

identifikátorů jsem si přehledně rozdělil přijatá data do čtyř sloupečků odpovídající jednotlivým vstupům A/D převodníku a v pravé části okna se zobrazuje aktuální poloha zařízení. Výstup aplikace je zobrazen na (Obr. 29).



Obr. 29 – Výstup aplikace v PC

Do kolonky port se zadá číslo potru, který je použit pro příjem ze zařízení. Tlačítkem *start* spustíme příjem dat, v sloupcích X, Y, Z a G se zobrazují přijmutí data a pod tlačítkem *clear* se zobrazuje aktuální pozice v ose X a Y. Tlačítkem *clear* se nulují přijatá data a informace o pozici a program funguje jakoby od začátku. Průběh načítání se dá zastavit tlačítkem *stop*. Program lze kdykoliv ukončit stiskem křížku.

4.3.1. Posílání dat

Datová komunikace jednotkou USART probíhá rychlostí 19200 Bd. Použit je standardní přenos 8N1 (8datových bitů, 1 stop bit). Maximální velikost čísla, které lze přenést jednotkou USART je 9 bitů. Při posílání hodnot v centimetrech by nebylo možné poslat větší hodnotu než 512 cm a proto je přenos ponechaný na standardních 8 bitů a problém se řeší rozdělením hodnoty pozice na 2 části a to prvních osmi spodních datových bitů a následných dvou horních bitů. Na přijímací straně je potřeba výslednou hodnotu složit bitovým posuvem a logickým součinem. Příklad datového rámce komunikace (Tab. 3).

Tab. 3 – Datový rámeček USART

x	čísloL	čísloH	y	čísloL	čísloH	d	znaménkoX	znaménkoY	;
---	--------	--------	---	--------	--------	---	-----------	-----------	---

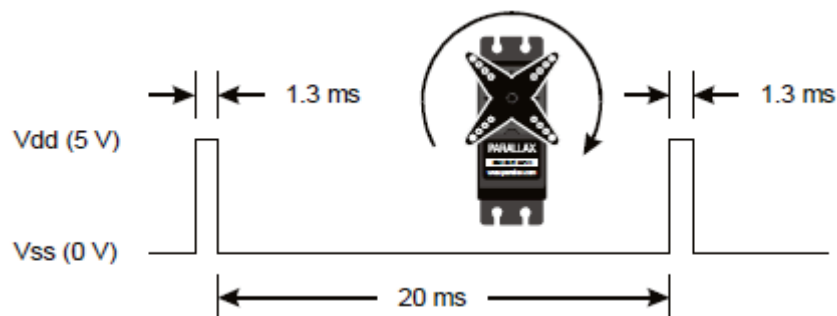
- znaky x, y a d značí identifikátory hodnot (x – pozice X, y – pozice Y, d – znaménka směru)
- pro bezproblémový přenos se aktuální pozice převede na absolutní hodnotu a znaménko se posílá jako doplňující informace
- znak ; znamená ukončení datového rámeček

4.4. Software robota:

Po startu robot čeká na příjem hodnot po sériové lince. Přijme-li celý datový rámeček, probíhá složení hodnot pozic X a Y. Ze znalosti jednotlivých znamének je sestavena jízda, která zajistí navrácení robota do původní pozice, ze které byl přemístěn. Celý systém, ale ztrácí na přesnosti tím, že výkonná jednotka robota nezná datový typ s řádovou čárkou a přesnost se vztahuje jen na jednotky cm.

4.4.1. Ovládání servomotorů robota

Servomotory jsou připojeny na porty 12, 13 modulu BASIC Stamp 2. Šířka pulzu ovládá rychlost a směr točení servomotoru. Šířka pulzu se může pohybovat v rozmezí od 1,3 ms do 1,7 ms [7]. Šířka pulzu 1,5 ms zajistí, zastavení točícího se servomotoru. Hodnoty pulzů menších jak 1,5ms způsobí otáčení servomotoru podle hodinových ručiček, hodnoty větší šířky pulzu působí naopak. V obou případech, čím více se blížíme k mezním hodnotám, tím dosáhne servomotor větší rychlosti. Limitní hodnoty vyjadřují nejvyšší rychlost. Kombinací šířky pulzů u jednotlivých servomotorů se zajistí požadovaný směr jízdy.



Obr. 30 – Příklad ovládání servomotoru – (7)

5. Závěr

Podařilo se sestrojít funkční zařízení pro inerciální navigaci. Přesnost je ale ovlivněna počtem vstupů, které se zpracovávají při A/D převodu. Se zvyšujícím se počtem roste doba Δt mezi vzorky stejného vstupu a nelze tím postihnout všechny změny v každém časovém okamžiku.

Model robota neumožňuje použití datového typu s řádovou čárkou a tím je podstatně ovlivněna jeho přesnost jízdy. Je nutné vypočítat, jak dlouho bude trvat jízda v žádaném směru. Omezením jen na celá čísla vzniká problém vypočítat přesnou hodnotu doby jízdy. Touto odchylkou vzniká omezení v řádu jednotek cm.

Gyroskop nakonec do navigace robota nebyl zahrnut díky náročnosti výpočtu a v daném čase se nepodařilo zvládnout jeho správnou implementaci. Akcelerometr sám o sobě neposkytuje tak přesná data o poloze a do celého systému by se jen zaváděla větší chyba nežli je nyní.

Robot je také závislý na povrchu, po kterém pohybuje a je nutné použít individuální nastavení pro každý povrch zvlášť. Konkrétně se jedná o zatáčení a otáčení. Podložka, po které se robot pohybuje, klade různý odpor servomotorům představující kola robota a není možné zaručit správné zatočení. Touto nežádoucí vlastností s kombinací celočíselného datového typu by nebylo téměř možné pro navigaci tohoto modelu robota gyroskop vůbec použít.

Seznam použité literatury:

- [1] RIPKA, P.; TIPEK, A. *Master Book of Sensors*. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184-4
- [2] Freescale. *MMA7260QT: 3-Axis Acceleration Sensor* [online]. 2008 [cit. 2009-03-16]. Dostupný z WWW: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf?pspll=1
- [3] VOJÁČEK, A. *Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale* [online]. 2007 [cit. 2009-03-23] Dostupný z WWW: <http://hw.cz/Produkty/Nove-soucastky/ART1875-Jak-pracuji-nove-3D-MEMS-akcelerometry-Freescale-.html>
- [4] CEF, T. *How a gyroscope works* [online]. 1999 [cit. 2009-03-23] Dostupný z WWW: <http://www.gyroscopes.org/how%5Chagwa4.pdf>
- [5] Freescale. *Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers* [online]. 2007 [cit. 2009-04-06] Dostupný z WWW: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3397.pdf
- [6] Atmel. *Datasheet AVR ATmega32* [online]. 2008 [cit. 2009-04-06] Dostupný z WWW: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8155.pdf
- [7] Parallax. *Robotics whit the Boe-Bot* [online]. 2004 [cit. 2009-04-27]. Dostupný z WWW: http://www.parallax.com/Portals/0/Downloads/docs/books/edu/Roboticsv2_2.pdf
- [8] Parallax. *BASIC Stamp Manual* [online]. 2005 [cit. 2009-04-27]. Dostupný z WWW: <http://www.parallax.com/Portals/0/Downloads/docs/prod/stamps/web-BSM-v2.2.pdf>
- [9] TAUFER, I.; KOTYK, J.; JAVŮREK, M. *Jak psát a obhajovat závěrečnou práci bakalářskou, diplomovou, rigorózní, disertační, habilitační*. Pardubice: Tiskařské středisko Univerzity Pardubice, 2009/04. 40s. ISBN 978-80-7395-157-3

Přílohy:

Příloha 1 – CD:

Obsah adresáře:

Chmelar.pdf – vlastní text práce

složka Software:

- Výpočet_v_PC – obsahuje software pro výpočet navigace v PC
- Výpočet_v_AVR – obsahuje software pro výpočet navigace v AVR
- Robot – obsahuje software pro navigaci robota podle dat z AVR

složka Návrh – obsahuje podklady pro výrobu desky plošného spoje softwarem
PADS 2005 SP2