



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ POLOHY UVNITŘ BUDOV POMOCÍ INERCIÁLNÍ JEDNOTKY

INDOOR POSITIONING BASED ON INERCIAL MEASUREMENT UNIT

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Coufal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Král, Ph.D.

BRNO 2023

Semestrální práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Marek Coufal

ID: 240598

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

BP(K)C-SEP: Seznamte se s dostupnými jednotkami pro měření inerciální polohy. Navrhněte a realizujte vhodný hardware samostatné bezdrátové jednotky, která bude umět zaznamenávat interně své údaje do paměti a na konci měření tato data přenést do počítače.

BP(K)C-BAP: Realizujte ovládací SW a FW a skripty v Matlabu nebo Pythonu pro určení polohy uvnitř budov. Funkci demonstруйте. Všechny programy realizujte tak, aby byly vhodné a použitelné v rámci laboratorní úlohy předmětu MPC-RAR. Navrhněte koncept této laboratorní úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MALÝ, Martin. Hradla, volty, jednočipy: Úvod do bastlení. Praha: CZ.NIC, 2017. ISBN 978-80-88168-26-3.
- [2] RITCHIE, Dennis M., KERNIGHAN, Brian W. The C Programming Language, Second Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1988. ISBN 9780133086249.

Termín zadání: 22.9.2023

Termín odevzdání: 2.1.2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Král, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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

Abstrakt práce v originálním jazyce

KLÍČOVÁ SLOVA

Klíčová slova v originálním jazyce

ABSTRACT

Překlad abstraktu (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

KEYWORDS

Překlad klíčových slov (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

ROZŠÍŘENÝ ABSTRAKT

Výtah ze směrnice rektora 72/2017:

Bakalářská a diplomová práce předložená v angličtině musí obsahovat rozšířený abstrakt v češtině nebo slovenštině (čl. 15). To se netýká studentů, kteří studují studijní program akreditovaný v angličtině. (čl. 3, par. 7)

Nebude-li vnitřní normou stanoveno jinak, doporučuje se rozšířený abstrakt o rozsahu přibližně 3 normostrany, který bude obsahovat úvod, popis řešení a shrnutí a zhodnocení výsledků. (čl. 15, par. 5)

COUFAL, Marek. *Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky* . Semestrální práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Jan Král, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Marek Coufal
VUT ID autora: 240598
Typ práce: Semestrální práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské/diplomové/disertační práce panu Ing. XXX
YYY, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
Cíle práce	13
1 Teoretická část studentské práce	14
1.1 Porovnání navigačních systémů	14
2 Výsledky studentské práce	15
2.1 Hardware inerciální jednotky	15
2.1.1 Akcelerometr a gyroskop	16
2.1.2 Magnetometr	18
Závěr	19
Literatura	20
Seznam symbolů a zkratk	21
Seznam příloh	22

Seznam obrázků

2.1	Blokové schéma inerciální jednotky	15
-----	--	----

Seznam tabulek

2.1	Porovnání základních parametrů gyroskopů [3] [4]	17
-----	--	----

Seznam výpisů

Úvod

Úvod studentské práce, např. . .

Nečíslovaná kapitola Úvod obsahuje „seznámení“ čtenáře s problematikou práce. Typicky se zde uvádí: (a) do jaké tematické oblasti práce spadá, (b) co jsou hlavní cíle celé práce a (c) jakým způsobem jich bylo dosaženo. Úvod zpravidla nepřesahuje jednu stranu. Poslední odstavec Úvodu standardně představuje základní strukturu celého dokumentu.

1

Šablona je nastavena na *dvoustranný tisk*. Nebuďte překvapeni, že ve vzniklém PDF jsou volné stránky. Je to proto, aby důležité stránky jako např. začátky kapitol začínaly po vytisknutí a svázání vždy na pravé straně. Pokud máte nějaký závažný důvod sázet (a zejména tisknout) jednostranně, nezapomeňte si přepnout volbu *twoside* na *oneside*!

¹Tato věta je pouze ukázkou použití příkazů pro sazbu zkratk.

Cíle práce

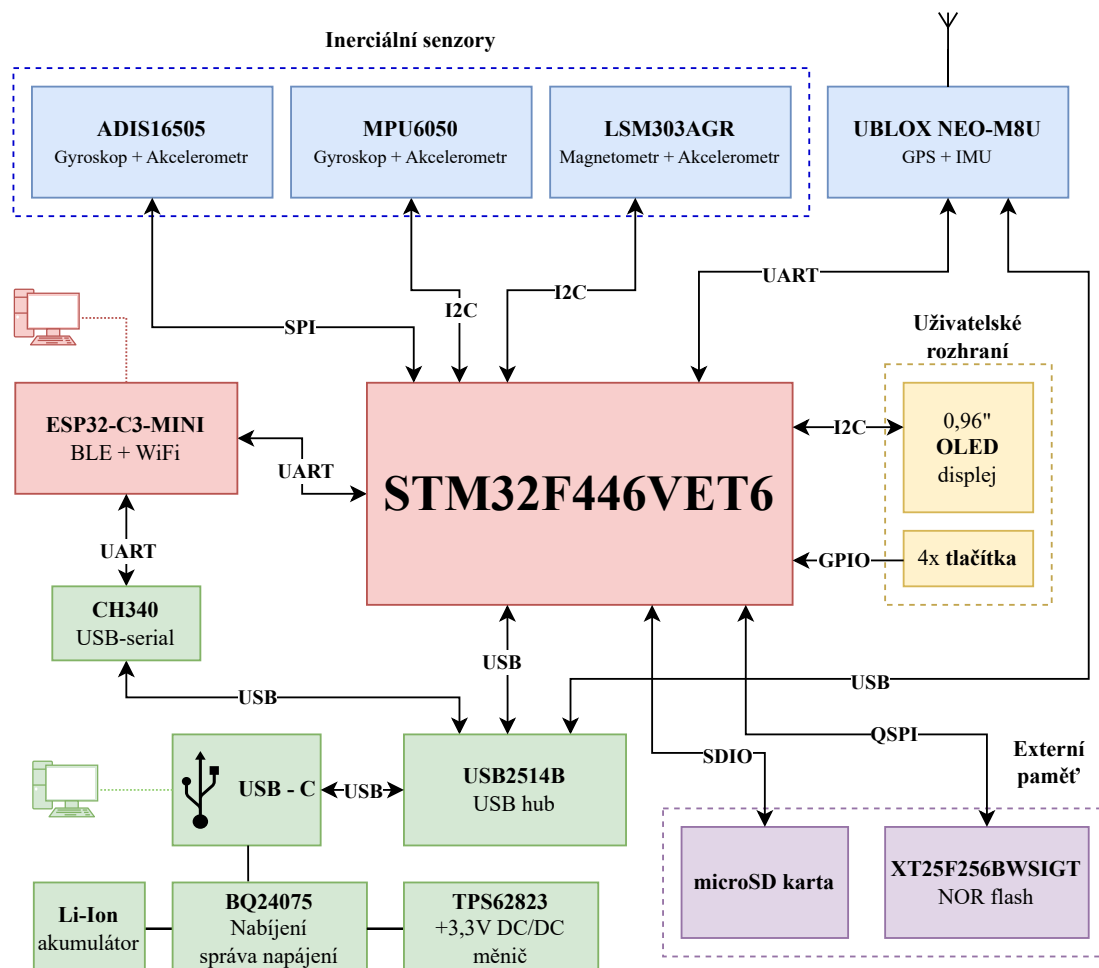
Konkrétní specifikace cílů, které má autor v práci vyřešit. Tato kapitola je *volitelná* – pokud váš studijní program nevyžaduje zvláštní kapitolu s cíli, cíle specifikujte v rámci Úvodu.

1 Teoretická část studentské práce

1.1 Porovnání navigačních systémů

2 Výsledky studentské práce

2.1 Hardware inerciální jednotky



Obr. 2.1: Blokové schéma inerciální jednotky

Hardware inerciální jednotky je realizován tak, aby umožňoval zaznamenávat hodnoty změřené inerciálními senzory a poskytovat dohromady data o rozměru 9 DoF (akcelerometr, gyroskop a magnetometr). Jednotka také obsahuje GPS modul s vestavěným IMU, jehož použití by mohlo být vhodné například v prostorech s alespoň částečným pokrytím signálu GPS.

Naměřená data je možné uložit do externí NOR Flash paměti připojené k MCU, popřípadě lze využít i kartu typu microSD. K přenosu dat pro jejich následné zpracování v PC primárně slouží ESP32-C3, umožňující bezdrátovou komunikaci přes Wifi, nebo Bluetooth. Konektor USB typu C umožňuje nabíjení vestavěného Li-Ion akumulátoru jednotky a komunikaci mezi PC a ESP32, GPS modulem a hlavním

MCU skrze vestavěný USB rozbočovač. Toto rozhraní je plánované pro použití např. ke konfiguračním, nebo ladícím účelům.

Pro jednoduchou volnost pohybu je jednotka napájena jedním Li-Ion akumulátorem velikosti 18650, při záznamu dat tedy nebude potřeba externího zdroje energie. Grafický OLED displej a 4 tlačítka slouží jako uživatelské rozhraní při používání jednotky.

2.1.1 Akcelerometr a gyroskop

Jednotka obsahuje dvě 6 DoF IMU (gyroskop s akcelerometrem) rozdílných parametrů a řádově rozdílnou cenou. Takto odlišné součástky byly vybrány proto, aby bylo možné porovnat vliv přesnosti a šumu senzorů na následně zpracovaná data. V Tabulce 2.1 jsou porovnány důležité parametry senzorů MPU6050 a ADIS16505-2. Pro účely inerciální navigace je důležitý zejména nízký drift senzorů, aby při integraci dat k vyhodnocení polohy nebyla integrována i driftová chyba, což má za výsledek velmi nepřesné zpracování hodnot.

Integrovaný obvod MPU6050 je standardní 6 osé MEMS IMU, vhodné mimo jiné pro použití v mobilních zařízeních a dalších podobných aplikacích. Jeho vnitřní gyroskop a akcelerometr má softwarově přepínatelné rozsahy měřených veličin. Kromě inerciálních senzorů má i vestavěný signálový procesor pro fúzi a filtrování dat přímo v integrovaném obvodu. Tato funkce může být vhodná pro odlehčení výpočetního výkonu hlavního procesoru, ovšem pro účely této práce nebude signálový procesor využit, jelikož se měřená data budou zpracovávat až po jejich naměření v PC, ne v reálném čase. Vzorkovací frekvence gyroskopu je 8 kHz a akcelerometru 1 kHz, oba senzory mají 16bitové rozlišení. [3]

MPU6050 disponuje rozhraním I2C s maximální frekvencí hodinového signálu 400 kHz. [3] Pokud bychom chtěli vyčítat ze senzoru data při maximální možné vzorkovací frekvenci, byla by potřeba minimální přenosová rychlost sběrnice:

$$f_{clk} = 3 \text{ osy} \times (f_{gyro} + f_{acc}) \times (16 \text{ bitů} + 2 \times \text{ACK}) = 3 \times (8000 + 1000) \times (16 + 2) = 486 \text{ kHz}$$

Při vyčítání dat o maximální vzorkovací frekvenci jsme omezeni samotným I2C rozhraním senzoru (využití maximální vzorkovací frekvence je teoreticky možné krátkodobě, pomocí interního 1kB FIFO zásobníku). [3]

Jelikož pro účely inerciální navigace stačí vzorkovací frekvence dat v řádu stovek Hz [2], tak není tato limitace omezující. Senzor je propojen s hlavním MCU přes

¹Pro porovnání citlivosti byl vybrán dynamický rozsah $500^\circ/\text{s}$ senzoru MPU6050 pro možnost porovnání hodnoty s druhým senzorem

²Pro porovnání citlivosti byl vybrán dynamický rozsah 78.4 m/s^2 senzoru MPU6050 pro možnost porovnání hodnoty s druhým senzorem

Model IMU	MPU6050	ADIS16505-2	jednotka
Parametry gyroskopů			
Dynamický rozsah	programovatelný, ±250, ±500, ±1000, ±2000	±500	°/s
Citlivost ¹	65, 5	2621440	LSB/(°/s)
Drift v ose x a z	±20	±0, 14	°/s
Drift v ose y	±20	±1, 4	°/s
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osy x a y	0,005	0,0043	°/s/√Hz
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osu z	0,005	0,0034	°/s/√Hz
Parametry akcelerometrů			
Dynamický rozsah	programovatelný, ±19, 6, ±39, 2, ±78, 4, ±156, 8	±78, 4	m/s ²
Citlivost ²	418	26756268	LSB/(m/s ²)
Drift v ose x a y	±0, 491	±0, 0196	m/s ²
Drift v ose z	±0, 785	±0, 0196	m/s ²
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osy x a y	3924	167	μm/s ² /√Hz
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osu z	3924	243	μm/s ² /√Hz

Tab. 2.1: Porovnání základních parametrů gyroskopů [3] [4]

I2C sběrnici s frekvencí hodinového signálu 400 kHz a není sdílena s žádným jiným zařízením, aby bylo možné, v případě potřeby, využít maximální dostupný potenciál senzoru (i přestože je reálná potřeba vzorkovací frekvence nižší).

Integrovaný obvod ADIS16505-2 je precizní 6 osé MEMS IMU, vhodné pro použití v průmyslových a navigačních aplikacích s poměrně nízkým driftem a vysokou přesností. Na rozdíl od MPU6050 nemá přepínatelný dynamický rozsah, je fixně daný variantou součástky. Vzorkovací frekvence gyroskopu i akcelerometru je 2 kHz, oba senzory mají 32bitové rozlišení. S hlavním MCU komunikuje přes sběrnici SPI s maximální frekvencí hodinového signálu 2,1 Mhz. [4] Pokud budeme chtít vyčítat data ze senzoru při maximální možné vzorkovací frekvenci, bude potřeba minimální přenosová rychlost sběrnice:

$$f_{clk} = 3 \text{ osy} \times (f_{gyro} + f_{acc}) \times 32 \text{ bitů} = 3 \times (2000 + 2000) \times 32 = 384 \text{ kHz}$$

Nejsme tedy omezeni maximální frekvencí hodinového signálu a můžeme teoreticky využívat senzor i při nejvyšší možné rychlosti.

Výrobce poskytuje tento obvod ve variantě 100 pinového BGA čipu, ale i jako vývojovou desku osazenou senzorem a kolíkovou lištou pro jednodušší práci s osazením DPS. [4] Hardware jednotky byl navržen tak, aby bylo možné využít jak samotný BGA čip, tak i hotový modul s konektorem.

2.1.2 Magnetometr

Vzhledem k tomu, že výběr komerčně dostupných 9 DoF (akcelerometr, gyroskop a magnetometr) je značně omezený, popřípadě součástky prodávané jako 9osé IMU jsou ve skutečnosti moduly více součástí na jedné desce, tak je ve výsledném obvodovém zapojení použit senzor magnetické indukce jakožto samostatná součástka.

Přestože fúze dat z magnetometru může mít pozitivní dopady na zmenšení chyby trajektorie [1], jeho použití uvnitř budov je značně omezené vzhledem k jednoduché ovlivnitelnosti měření blízkými feromagnetickými látkami, silovými rozvody elektřiny a pod. Proto nebyly na výběr magnetometru kladeny vysoké požadavky a slouží spíše pro porovnání vlivu přítomnosti / absence naměřených dat z tohoto senzoru.

K tomuto účelu byl vybrán běžně dostupný obvod LSM303AGR, který kromě magnetometru v pouzdře obsahuje i akcelerometr, ten ovšem nebude pro potřeby práce využit, jelikož tuto funkci obstarávají součástky z kapitoly 2.1.1.

Magnetometr komunikuje s hlavním MCU přes sběrnici I2C s maximální vzorkovací frekvencí 150 Hz, dynamickým rozsahem ± 4.915 mT a 16bitovým rozlišením. [5]

Závěr

Shrnutí studentské práce.

Literatura

- [1] TKHORENKO, M. Yu.; PAVLOV, B. V.; KARSHAKOV, E. V. a VOLKOVITSKY, A. K. On integration of a strapdown inertial navigation system with modern magnetic sensors. Online. In: *2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE, 2018, s. 1-4. ISBN 978-5-91995-057-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405845>. [cit. 2023-12-17].
- [2] WEI, Y. a LI, Y. IMPACT OF SENSOR DATA SAMPLING RATE IN GNSS/INS INTEGRATED NAVIGATION WITH VARIOUS SENSOR GRADES. Online. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022, roč. XLVI-3/W1-2022, s. 205-211. ISSN 2194-9034. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-205-2022>. [cit. 2023-12-16].
- [3] TDK INVENSENSE. *MPU6050: Product specification*. Online katalogový list. 3.4. 2013. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [4] ANALOG DEVICES. *ADIS16505: Precision, Miniature MEMS IMU*. Online katalogový list. C. 2020. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adis16505.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [5] ST MICROELECTRONICS. *LSM303AGR: Ultracompact high-performance eCompass module*. Online katalogový list. 11. 2022. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303agr.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [6] ST MICROELECTRONICS. *STM32F446xC/E: Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 225 DMIPS, up to 512 KB Flash/128+4 KB RAM, USB OTG HS/FS, seventeen TIMs, three ADCs and twenty communication interfaces*. Online katalogový list. 10. 2021. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f446ve.pdf>. [cit. 2023-12-14].
- [7] BLOCHER, Lukas; MAYER, Wolfram; ARENA, Marco; RADOVIC, Dusan; HILLER, Tobias et al. Purely Inertial Navigation with a Low-Cost MEMS Sensor Array. Online. In: *2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. IEEE, 2021, s. 1-4. ISBN 978-1-7281-5099-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/INERTIAL51137.2021.9430468>. [cit. 2023-12-09].

Seznam symbolů a zkratek

DoF Degrees of Freedom - stupně volnosti

IMU Inertial Measurement Unit - měřicí inerciální jednotka

OLED

MCU

GPS

IMU

IMU

Seznam příloh