



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

POUŽITÍ MIKROČIPOVÝCH MEMS SENZORŮ V PRAXI

USING MICROCHIP MEMS SENSORS IN PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Rumian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Dominik Rumian**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Zuth, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Použití mikročipových MEMS senzorů v praxi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době se v mnoha odvětvích používají díky svým rozměrům miniaturní MEMS senzory. Práce se bude zabývat porovnáním vlastností těchto snímačů a poté určit využití těchto snímačů v praxi (mobilní telefony, robotika, diagnostika, a další). Po rešeršní části bude provedena ukázka některého MEMS snímače v kombinaci s mikrokontrolérem.

Cíle bakalářské práce:

Popište princip MEMS snímačů.
Proveďte porovnání základních typů snímačů (měřená veličina, rozhraní, atd.).
Popište základní vývojové platformy mikrokontrolérů.
Vyberte a popište zvolený konkrétní MEMS snímač a mikrokontrolér.
Vytvořte a popište ukázku vybraného MEMS snímače a mikrokontroléru.

Seznam doporučené literatury:

MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMELE AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky .. Praha: BEN - technická literatura, 2003. μ C & praxe. ISBN 8073000776.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na MEMS senzory a jejich využití v praxi. První část práce se věnuje historii, současnému využití, principu fungování a porovnání jednotlivých druhů MEMS senzorů. Druhá část se věnuje popisu mikrokontroléru, jeho stavbě a možnostech využití. Ve třetí části jsou popsány externí sériové sběrnice, které slouží k propojení mikrokontroléru s přídatným hardwarem jako například digitální senzor. V poslední části této práce je popsán vybraný mikrokontrolér, senzory a ukázka jejich fungování.

Klíčová slova

MEMS senzor, mikrokontrolér, měření, externí sériová sběrnice, akcelerometr, Arduino, MATLAB

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on MEMS sensors and their use in practice. The first part focuses on history, utilization at present, the principle of operation and comparison of the individual types of MEMS sensors. The second part focuses on description of microcontroller, its structure and possibilities of its use. In the third part there are described external serial buses, which serve as connection of microcontroller and other hardware e.g. digital sensor. In the last part of this thesis there is described chosen microcontroller, sensors and demonstration of their functionality.

Key words

MEMS sensor, microcontroller, measurement, external serial bus, accelerometer, Arduino, MATLAB

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RUMIAN, D. *Použití mikročipových MEMS senzorů v praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Použití mikročipových MEMS senzorů v praxi** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Dominik Rumian

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za morální podporu a trpělivost po celou dobu studia.

Obsah

Úvod	11
1 Technologie MEMS	12
1.1 Základní informace	12
1.2 Historie.....	13
1.3 Rozdělení MEMS snímačů	13
2 Senzory	14
2.1 Akcelerometr	14
2.1.1 Princip kapacitního MEMS akcelerometru	15
2.1.2 Princip piezoelektrického akcelerometru	17
2.2 Gyroskop.....	18
2.2.1 Princip MEMS gyroskopu.....	19
2.3 Rozdíly mezi MEMS akcelerometrem a MEMS gyroskopem	21
3 Mikrokontrolér	22
3.1 Základní charakteristika.....	22
3.2 Rozdíl mezi mikrokontrolérem a mikroprocesorem	23
3.3 Struktura mikrokontroléru	23
3.3.1 CPU	23
3.3.2 Paměť (Memory).....	23
3.3.3 Paralelní I/O sběrnice	24
3.3.4 Sériová sběrnice	24
3.3.5 Systémová sběrnice (Bus)	24
3.3.6 Časovač a čítač (Timers and counters).....	24
3.3.7 Přerušení (Interrupts).....	24
3.3.8 Převodníky (ADC/DAC).....	24
3.4 Architektura mikrokontrolérů	25
3.4.1 Von Neumannova architektura.....	25
3.4.2 Harvardská architektura	25
3.4.3 CISC	26
3.4.4 RISC	26
3.4.5 CISP	26
3.5 Vývojové kity mikrokontrolérů	27
3.5.1 Vývojová deska	27
3.5.2 Programátor.....	28

3.6	Platformy mikrokontrolerů a konkrétní zástupci.....	29
3.6.1	8 bitový mikrokontrolér	29
3.6.2	16 bitový mikrokontrolér	30
3.6.3	32 bitový mikrokontrolér	30
4	Externí sériové sběrnice	31
4.1	USB	31
4.2	SPI	32
4.3	I ² C.....	33
5	Ukázka MEMS senzoru a mikrokontroléru	34
5.1	Použitý hardware	34
5.1.1	Mikrokontrolér.....	34
5.1.2	Senzory	36
5.2	Použitý software	37
5.3	Načítání dat ze senzorů.....	38
5.3.1	Analogový senzor	38
5.3.2	Digitální senzor.....	39
5.4	Vizualizace polohy senzoru.....	40
	Diskuse.....	43
	Závěr	44
	Seznam použitých zdrojů	45
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek	50
	Seznam příloh	51

Úvod

V dnešní době se stále více uplatňuje miniaturizace nejrůznějších zařízení. Díky miniaturizaci můžeme vyrábět nejenom zařízení menších rozměrů, se kterými se nám bude lépe pracovat ale také výkonnější a schopné vykonávat více funkcí. Jednou z technologií umožňující tento proces je technologie MEMS, kterou se tato práce zabývá.

Práce se ve své první části zaměřuje na obecný popis technologie MEMS. Technologie je v této části charakterizována, je stručně popsána její historie a následně je provedeno rozdělení snímačů vyráběných pomocí této technologie.

V druhé části je pozornost věnována MEMS senzorům. S ohledem na význam v průmyslu a demonstrační úlohu popsanou v poslední části práce byly vybráni dva zástupci, a to akcelerometr a gyroskop. U nich je popsáno jednak jejich využití a také princip jejich funkce.

Třetí část se věnuje mikrokontroléru. Ten je opět nejprve obecně charakterizován, poté je popsána jeho vnitřní struktura. Dále jsou rozebrány jednotlivé architektury mikrokontrolérů, kity umožňující jejich vývoj a v závěru jsou popsány jednotlivé platformy s konkrétními zástupci.

Část čtvrtá popisuje externí sériové sběrnice, sloužící jako prostředek k propojení mikrokontroléru a jiných zařízení. V rámci této práce půjde o propojení mikrokontroléru s digitálním MEMS senzorem. Pro popis byli vybráni tři zástupci tohoto typu sběrnice opět s ohledem na demonstrační úlohu.

V poslední části bakalářské práce je řešena spolupráce MEMS senzorů s mikrokontrolérem. Jsou popsáni konkrétní zástupci, způsob čtení dat a realizace demonstrační úlohy.

1 Technologie MEMS

1.1 Základní informace

MEMS je zkratka z anglického „Micro-Electro-Mechanical-Systems“. Na rozdíl od mikroelektronických systémů, běžných v podobě integrovaných obvodů, se systémy mikromechanické začaly používat relativně nedávno. MEMS představuje spojení mikromechanických a mikroelektronických prvků na jednom čipu. V případě senzoru mikromechanická část zajišťuje transformaci měřené veličiny (například zrychlení) na veličinu elektrickou. Takto vytvořený elektrický signál je ale velice slabý, a tak mikroelektronická část tento signál zesílí, zpracuje a případně přemění na digitální signál, který dostáváme jako výstup. Touto technologií se vyrábí především senzory (pohybu, teploty, světla atd.). Můžeme se ale setkat i se zcela jinými druhy zařízení jako jsou například mikrofony, mikročerpadla, miniaturní převodovky nebo mikromotory. [1, 2, 3]



Obr. 1: Ozubené soukolí MEMS. [2]

Zařízení MEMS jsou velice malá, jednotlivé komponenty bývají obvykle mikroskopických rozměrů. Jako materiál pro výrobu se využívá křemík. Elektronika je vyrobena stejným postupem jako integrovaný obvod, zatímco mikromechanické komponenty jsou vyrobeny za pomoci mikroobráběcích procesů spočívajících v selektivním vyleptávání křemíkových plátků. Senzor typu MEMS může být doplněn aparátem pro bezdrátovou komunikaci, například modul ZSTAR od firmy Freescale Semiconductor je vybaven 3 osým akcelerometrem a bezdrátovým obvodem, který umožňuje komunikaci na frekvenci 2,4 Ghz. Zařízení tohoto typu najdou uplatnění v dálkových ovladačích herních konzolích, robotice, hračkách nebo medicínských přístrojích. [6, 7]

1.2 Historie

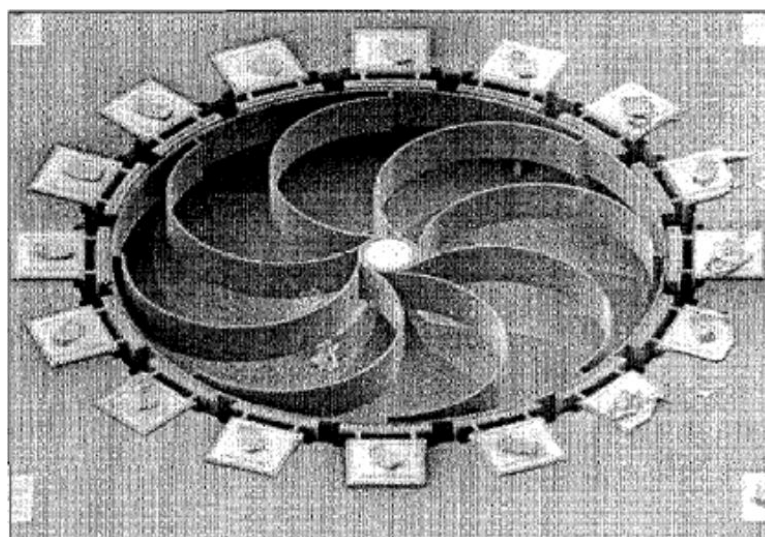
Historie MEMS nám ukazuje, jaká průmyslová odvětví byla v průběhu vývoje touto technologií zasažena. [4]

- 1958 Komerční dostupnost křemíkových tenzometrů
- 1961 Demonstrace prvního křemíkového tlakového senzoru
- 1967 Vynález mikroobrábění
- 1970 Demonstrace prvního křemíkového akcelerometru
- 1979 Vyrobená první inkoustová tryska pomocí mikroobrábění
- 1982 Jednorázový snímač krevního tlaku
- 1988 První konference MEMS
- 1992 Vyroben první pant pomocí mikroobrábění
- 1993 Prodán první akcelerometr vyrobený mikroobráběním (ADXL50)
- 1995 Prudký rozvoj bio MEMS
- 2000 Roste význam MEMS komponentů používaných v optických sítích

1.3 Rozdělení MEMS snímačů

Snímač (senzor) je zařízení měřící veličiny okolního prostředí. Na základě těchto veličin poskytuje výstup ve formě elektrického signálu. Podle měřené veličiny rozdělujeme MEMS snímače do následujících kategorií: [4]

- Mechanické – měří sílu, tlak, rychlost, zrychlení, pozici
- Tepelné – měří teplotu okolí, entropii nebo tepelný tok
- Chemické – měří chemickou koncentraci látky, složení
- Radiační – měří intenzitu elektromagnetických vln, jejich fázi atd.
- Magnetické – měří intenzitu pole, magnetický moment
- Elektrické – měří napětí, proud, náboj, elektrický odpor



Obr. 2: Prstencový vibrační MEMS senzor úhlové rychlosti. [3]

2 Senzory

2.1 Akcelerometr

Principem MEMS senzorů obecně je spolupráce mikromechanické a mikroelektronické části. Senzorů existuje velké množství od akcelerometrů měřících zrychlení až po teploměry. V této kapitole se zaměříme na MEMS akcelerometry, jejichž význam v průmyslu stále roste.

Akcelerometr je zařízení sloužící k měření velikosti zrychlení. Toto zrychlení může být způsobeno buďto působením gravitačních sil, vibracemi nebo přemísťováním snímače.

Akcelerometry rozdělujeme do skupin podle několika kritérií: [8]

- 1) Podle počtu os, v nichž lze měřit¹:
 - a. Jednoosé – měří zrychlení pouze v jednom směru
 - b. Dvouosé – měří zrychlení ve dvou osách, obvykle X a Y nebo X a Z
 - c. Trojosé – měří zrychlení ve všech 3 osách X, Y a Z
- 2) Podle měřicího rozsahu:
 - a. Low g – vhodné do zrychlení o velikosti 20 g²
 - b. Medium g – vhodné do zrychlení o velikosti 100 g
 - c. High g – vhodné pro extrémní zrychlení nad 100 g
- 3) Podle výstupu:
 - a. Digitální – digitální sériový výstup
 - b. Analogový – napěťový výstup je separátní pro každou měřenou osu

Akcelerometry jsou dnes hojně používány v mnoha průmyslových odvětvích. Příkladem jejich použití může být: [1, 9]

- Detekce nárazů
- Bezpečnostní a ochranné systémy v automobilech (airbagy)
- Měření otřesů a jejich předvídání v seismologii
- Zjišťování polohy předmětů v prostoru (mobilní telefony, fotoaparáty)
- Diagnostika (například měření nevyvahy)

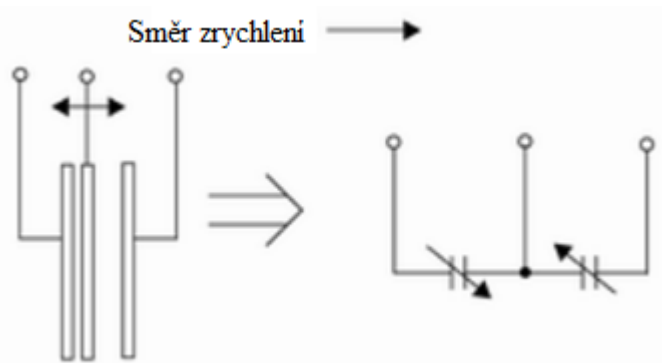
Abychom byli schopni pomocí akcelerometru učit hodnotu zrychlení, je třeba jej převést na elektrickou veličinu. Podle principu tohoto převodu rozeznáváme dva typy akcelerometrů: kapacitní a piezoelektrické. Jako MEMS označujeme pouze kapacitní akcelerometr. Piezoelektrický akcelerometr tuto technologii nevyužívá.

¹ Kombinací akcelerometru a gyroskopu můžeme ještě zvýšit počet os, ve kterých můžeme měřit hodnoty, až na 6 (kromě zrychlení jsme schopni měřit i rychlost rotace). Příkladem takového zařízení je InvenSense ICM-20608-G.

² Značka g v tomto kontextu označuje tíhové zrychlení, v našich zeměpisných šířkách má hodnotu 9,81 m/s².

2.1.1 Princip kapacitního MEMS akcelerometru

Kapacitní akcelerometr je díky své jednoduché konstrukci nejpoužívanějším akcelerometrem. Základním principem kapacitního snímání je změna kapacity diferenciálního deskového kondenzátoru³, který je realizován třemi elektrodami, z nichž prostřední je pohyblivá a vychyluje se v závislosti na velikosti působícího zrychlení, čímž mění výslednou kapacitu kondenzátoru dle rov. 1. Výhodou kapacitního akcelerometru oproti piezoelektrickému je vyšší citlivost a stabilita. [1, 5, 9, 10]



Obr. 3: Ukázka změny kapacity v závislosti na zrychlení. [9]

Kapacitu zjistíme ze známého fyzikálního vztahu pro kapacitu C deskového kondenzátoru:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad \text{Rov. 1}$$

Kde S představuje plochu desek kondenzátoru, d vzdálenost mezi deskami, ε_0 permitivitu vakua a ε_r relativní permitivitu prostředí.

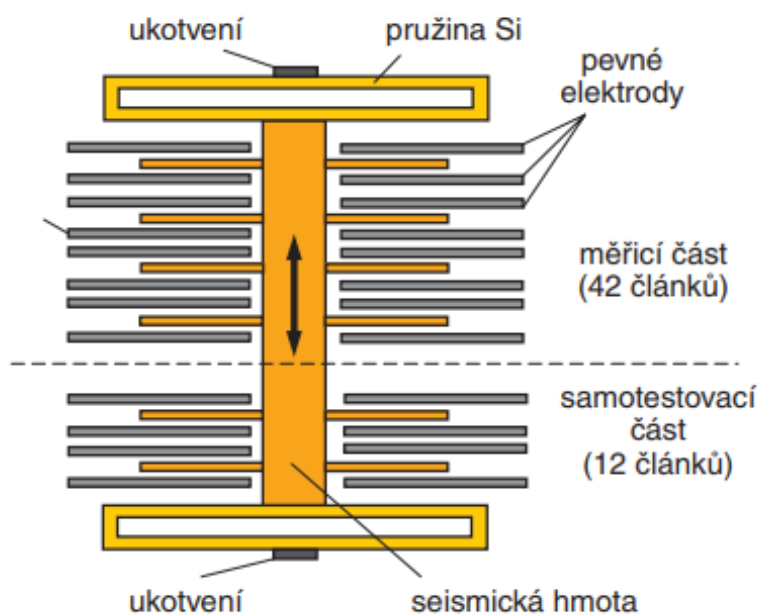
Výsledné zrychlení pak získáme z druhého Newtonova pohybového zákona (zákon síly):

$$F = m \cdot a \quad \text{Rov. 2}$$

Kde F je síla vyvolaná zrychlením a senzoru o hmotnosti m . Síla poté vyvolá posuv nosníku zavěšeného na pružinách, k němuž jsou připevněny pohyblivé elektrody kondenzátoru (viz obr. 4). Změna polohy těchto pohyblivých elektrod vůči pevným elektrodám vyvolá změnu kapacity, kterou měříme. Toto uspořádání akcelerometru nazýváme hřebenové. V akcelerometrech MEMS paralelně spojujeme desítky až stovky diferenciálních kondenzátorů do hřebenových struktur, jak můžeme vidět na obr. 4.

Elektronická část senzoru měří změnu kapacity, kterou následně převádí na napětí. Po provedení kompenzace vlivu teploty je napětí zesíleno. Citlivost snímače je údaj, který nám říká, jaké zrychlení v jednotkách g musí na senzor působit, aby došlo ke změně výstupního napětí právě o 1 V. [1, 9]

³ Diferenciální kondenzátor je kondenzátor s proměnnou kapacitou.



Obr. 4: Jednoosý akcelerometr s hřebenovým uspořádáním. [2]

Struktura nosníku a pružiny je vyrobena pomocí leptání křemíku. Je snaha vyrábět co nejdelší elektrody kvůli přesnějšímu měření a eliminaci šumu. Elektrody mají v současné době rozměry v řádu desítek mikrometrů. [9]

Předchozí princip popisuje jednoosý akcelerometr. Pro výrobu dvouosého akcelerometru přidáme další strukturu pootočenou o 90° oproti struktuře první. Trojosý akcelerometr je komplikovanější, získáme jej přidáním hřebene kolmého na předchozí dvě struktury, výsledná struktura je tedy prostorová. [1, 8]

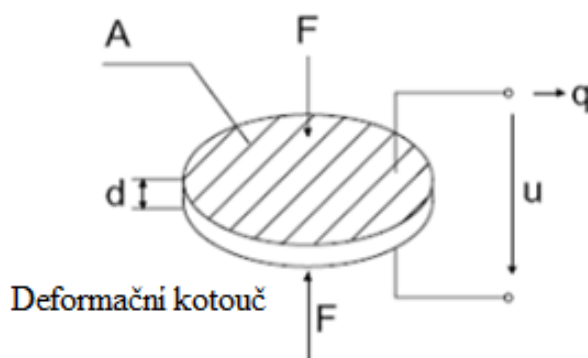
2.1.2 Princip piezoelektrického akcelerometru

Piezoelektrický akcelerometr pracuje na principu piezoelektrického jevu⁴ a nezařazujeme jej mezi MEMS senzory. Jeho princip bude ale popsán pro porovnání se snímači typu MEMS.

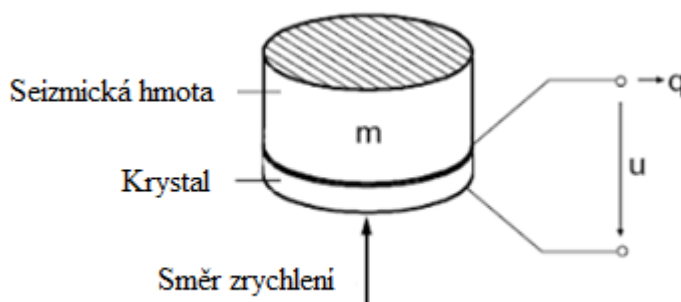
Deformační kotouč, je krystal vyrobený z piezoelektrického materiálu tak, aby piezoelektrický jev nastával právě při zrychlení v měřeném směru. K tomuto kotouči jsou z obou stran připevněny elektrody. Deformace piezoelektrického materiálu je uskutečněna pomocí závaží (tzv. seismická hmota) o předem známé hmotnosti. V závislosti na směru zrychlení závaží působí na krystal buďto tlakovou nebo tahovou silou, což vyvolá generování náboje Q , jehož velikost odpovídá působící síle. Velikost takového náboje jsme schopni vypočítat pomocí následující rovnice:

$$Q = d_{33} \cdot F \quad \text{Rov. 3 [11]}$$

Kde d_{33} je piezoelektrická konstanta a F je působící síla. Generovaný náboj je přenesen na elektrody a dále do elektronického obvodu, který jej zpracuje na výstupní napětí. Díky závislosti mezi působící silou a nábojem jsme tedy schopni pomocí druhého Newtonova pohybového zákona (viz rov. 2) vypočítat zrychlení. [10, 11]



Obr. 5: Znázornění piezoelektrického jevu. [11]



Obr. 6: Schématické znázornění jednoosého piezoelektrického akcelerometru. [11]

Výše znázorněný akcelerometr je pouze jednoosý. Víceosý piezoelektrický akcelerometr je realizován obdobně jako v případě kapacitního akcelerometru.

⁴ Piezoelektrický jev je schopnost krystalu vytvářet elektrický náboj při své deformaci.

2.2 Gyroskop

Gyroskop je zařízení, schopné udržovat svoji polohu. Ve své ryze mechanické podobě se používá například v navigaci (gyroskopický kompas). Obecně se může jednat o jakýkoliv setrvačnick (třeba kolo od bicyklu) obvykle uložený v tzv. Cardanových závěsech, což je uložení umožňující pohyb ve třech osách.



Obr. 7: Gyroskop v Cardanových závěsech. [17]

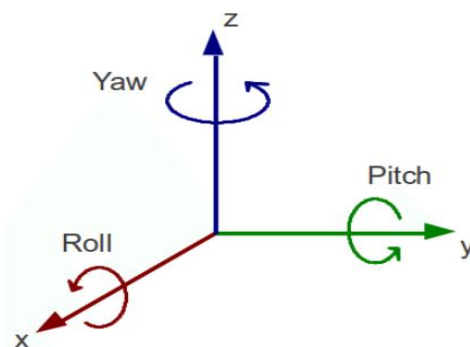
Princip gyroskopického kompasu je znám již od poloviny 19. století. Spočívá v roztočení setrvačnicku na několik desítek tisíc otáček za minutu. Osa rotace setrvačnicku je poté vlivem rotace Země a zemské přitažlivosti srovnána rovnoběžně s poledníky. Takto získáme směr skutečného severu, přičemž směr osy rotace setrvačnicku se bez působení vnějších sil nemění díky momentu setrvačnosti.

Schopnost udržovat neměnný směr osy rotace nazýváme gyroskopickým efektem. Účinek gyroskopického efektu je přímo úměrný otáčkám, průměru setrvačnicku a jeho hmotnosti. Mechanický gyroskop je kromě navigace využíván také například na mezinárodní vesmírné stanici k natáčení solárních panelů (vlivem gyroskopického efektu) nebo v posilovacím přístroji Powerball. V této práci se ovšem zaměříme na gyroskopy využívající technologii MEMS, které se často spojují s MEMS akcelerometry. [12]

MEMS gyroskopy nám umožňují měřit rychlost rotace, obvykle ve stupních za sekundu. Spojení akcelerometru a gyroskopu zvyšuje přesnost při měření změny polohy. Takový snímač nalezne uplatnění například v letectví, kdy letadlo může vykonávat „yaw“ pohyb (viz obr. 8), přičemž gravitační zrychlení působí stále ve svislém směru. Gyroskop je ale schopen měřit rotaci okolo příslušné osy, a tak jsme schopni přesně zjistit změnu polohy letadla. Příkladem takového zařízení budiž již zmiňovaný InvenSense ICM – 20608–G. Jako příklad použití MEMS gyroskopu můžeme uvést ovladač herní konzole Nintendo Wii, uvedené na trh v roce 2006.

2.2.1 Princip MEMS gyroskopu

V současné době se na trhu vyskytují výhradně gyroskopy pracující na principu vibrující hmoty. Základní fyzikální veličina používaná k popisu takového gyroskopu je Coriolisova síla. Nejprve si však popíšeme souřadnicový systém, ve kterém se budeme pohybovat. Použít budeme kartézský souřadný systém, ve kterém svislou osu z nazveme jako yaw axis, příčnou y pitch axis a podélnou x jako roll axis. Anglické pojmy jsou uvedeny záměrně, protože stejně nazýváme pohyby letadla kolem těchto os a díky tomu se s nimi často setkáme při popisu rotace okolo os x , y a z . [13, 16]

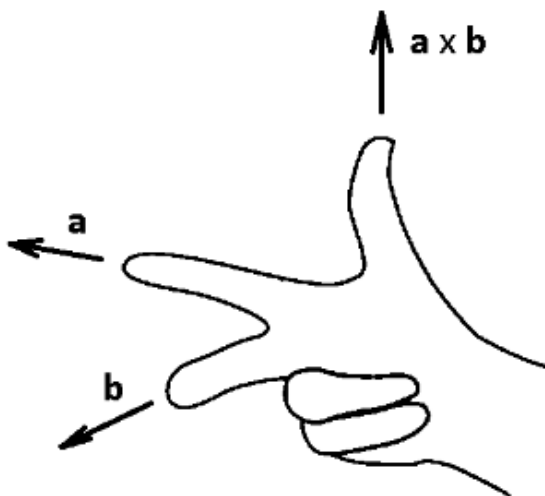


Obr. 8: Popis os. [15]

Nyní přejdeme k popisu Coriolisovy síly. Coriolisova síla patří mezi setrvačné síly působící v rotujících neinerciálních vztažných soustavách. Jde o tzv. zdánlivou sílu, což znamená, že nekoná mechanickou práci. Vliv této síly můžeme pozorovat v přírodě, díky rotaci planety Země okolo své osy, například na stáčení vzdušných proudů (tlakové výše na severní polokouli jsou pravotočivé, na jižní polokouli levotočivé). Coriolisovu sílu vypočítáme podle vztahu:

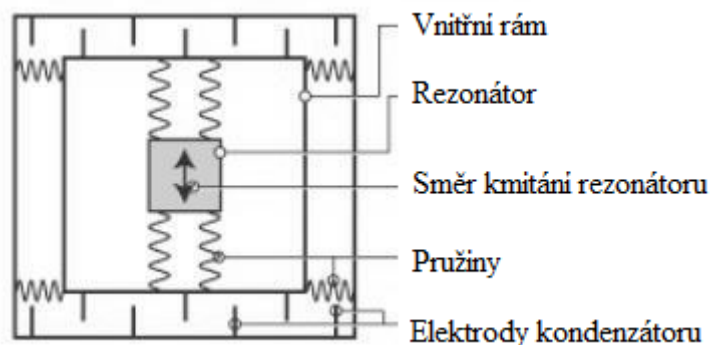
$$F_{cor} = -2 \cdot m \cdot \omega \times v \quad \text{Rov. 4 [14]}$$

Kde m je hmotnost, ω úhlová rychlost rotace a v rychlost translačního pohybu tělesa. Směr Coriolisovy síly zjistíme použitím pravidla pravé ruky.



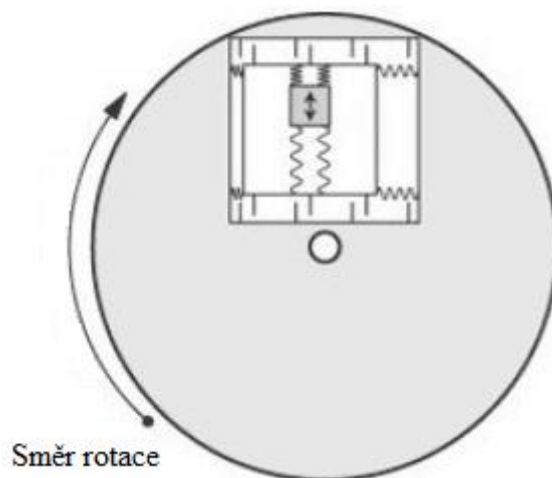
Obr. 9: Pravidlo pravé ruky. [18]

Mechanická struktura MEMS gyroskopu má nejčastěji podobu periodicky kmitajícího mechanického rezonátoru o známé hmotnosti se dvěma stupni volnosti, který je zavěšen na pružinách připevněných k vnitřnímu rámu. Vnitřní rám je poté dalšími pružinami, kolmými na směr kmitání rezonátoru, připevněn k rámu vnějšímu. Směr kmitání rezonátoru musí být kolmý ke směru osy rotace, ve které chceme rychlost rotace měřit.



Obr. 10: Struktura mechanické části MEMS gyroskopu. [13]

Při rotaci okolo osy kolmé na směr kmitání začne na rezonátor působit Coriolisova síla podle rov. 4, která způsobí stlačení pružin, na nichž je zavěšen vnitřní rám. Tímto dojde k posuvu plošek tvořících elektrody vzduchového diferenciálního a následně ke změně jeho kapacity podle rov. 1. Změnu kapacity poté vyhodnotí elektronická část MEMS gyroskopu a převede ji na výstupní napětí, které je úměrné úhlové rychlosti. [13, 14, 16]



Obr. 11: Chování mechanické části MEMS gyroskopu při rotaci. [13]

2.3 Rozdíly mezi MEMS akcelerometrem a MEMS gyroskopem

Přestože MEMS akcelerometr a MEMS gyroskop pracují na stejném principu (v obou případech je měřena změna kapacity diferenciálního kondenzátoru), existují mezi nimi rozdíly, které je dobré si uvědomit.

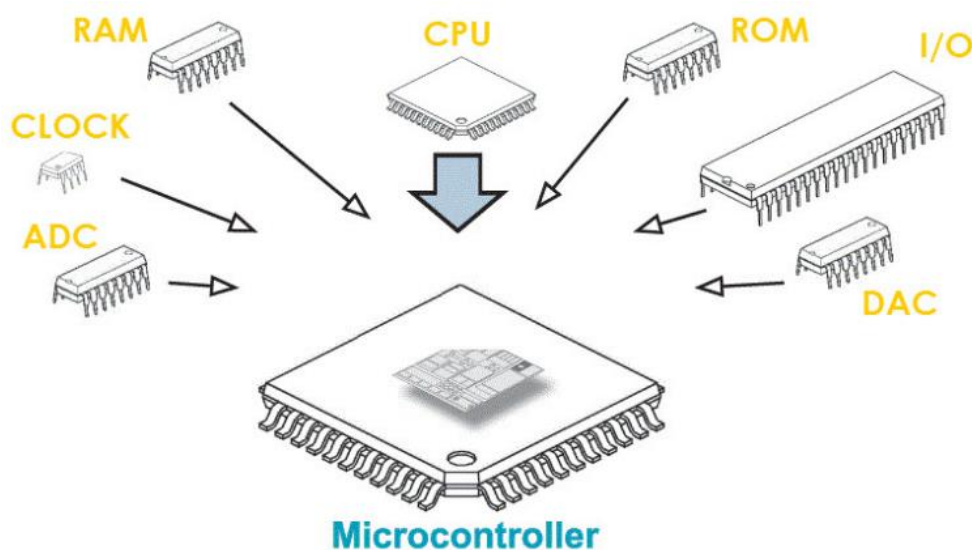
První rozdíl můžeme pozorovat v samotném principu. Zatímco v případě akcelerometru je nosník nesoucí elektrody kondenzátoru volně zavěšen na pružinách a k jeho pohybu dochází až díky působení vnější síly, u gyroskopu je rezonátor vybuzován k harmonickému kmitání, aby se mohl projevit účinek Coriolisovy síly.

Druhým rozdílem je měřená veličina. U akcelerometru měříme zrychlení v jednotlivých osách. V případě gyroskopu měříme rychlost rotačního pohybu okolo těchto os.

3 Mikrokontrolér

3.1 Základní charakteristika

Mikrokontrolér je integrovaný obvod typu VLSI⁵. Obsahuje elektronickou výpočetní jednotku, nazývanou zkráceně CPU⁶, paměť pro program, paměť pro data, vstupní a výstupní porty, AD a DA převodník, časovač, případně další komponenty integrované na jednom čipu. Vzhledem ke skutečnosti, že mikrokontrolér obsahuje všechny důležité části počítače, nazýváme jej někdy jednočipovým počítačem. Ve své podstatě jde o programovatelný počítač, který ale na rozdíl od svých protějšků (jako například PC) dokáže plnit jen jednu úlohu (říkáme o něm, že je jednoúčelový) a není schopen multitaskingu⁷. Mikrokontroléry jsou dnes všudypřítomné. Nacházíme je ve všech přístrojích, které něco měří, ukládají, zobrazují, počítají nebo ovládají.



Obr. 12: Znáznornění obsahu mikrokontroléru. [20]

Mezi typické znaky mikrokontrolérů patří malé rozměry, nízká cena a nízká energetická náročnost. Díky těmto vlastnostem jsou často používány v zařízeních napájených baterií (například fotoaparáty, kamery, mobilní telefony). Největším uživatelem mikrokontrolérů je však automobilový průmysl, kde mikrokontroléry řídí chod motoru, stabilizační a bezpečnostní systémy a mnoho dalších subsystémů. S využitím mikrokontrolérů v automobilovém průmyslu se pojí požadavek na jejich další vlastnost – robustnost. Robustností se v kontextu mikrokontrolérů rozumí schopnost pracovat za, pokud možno, všech podmínek (například extrémní teploty). [19, 20]

⁵ VLSI, z anglického Very-Large-Scale-Integration, označuje obvody s vysokou mírou integrace.

⁶ CPU je zkratka z anglického Central Processing Unit.

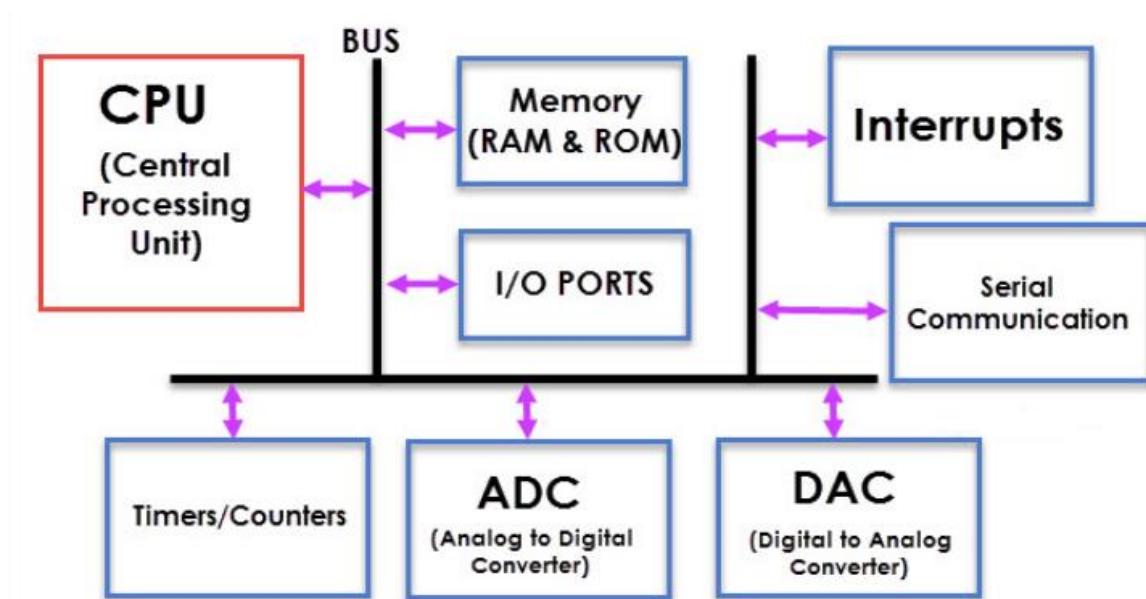
⁷ Multitasking je schopnost vykonávat více úloh současně.

3.2 Rozdíl mezi mikrokontrolérem a mikroprocesorem

CPU v mikrokontroléru, stejně jako v mikroprocesoru, provádí instrukce zadané programem. Rozdíl mezi mikrokontrolérem a mikroprocesorem tkví ve skutečnosti, že mikroprocesor musí být připojen k externí paměti vstupně-výstupním rozhraním, zatímco mikrokontrolér obsahuje paměť a ostatní potřebné komponenty na jednom čipu. Tato integrace se vyznačuje vyšší rychlostí, nižšími rozměry a cenou. Mikroprocesor je tedy pouze jedna z komponent počítače, kdežto mikrokontrolér je počítač. [19, 21]

3.3 Struktura mikrokontroléru

Jak vidíme na obr. 13, mikrokontrolér se skládá z mnoha částí. Dnešní mikrokontroléry však mohou obsahovat některé další v závislosti na požadované funkci. V následující části bude popsána struktura a jednotlivé části mikrokontroléru. [19, 20, 21]



Obr. 13: Schematické znázornění vnitřní struktury mikrokontroléru. [19]

3.3.1 CPU

Tvoří pomyslný mozek mikrokontroléru, skládá se z aritmeticko-logické jednotky⁸ a řídicí jednotky⁹. CPU vykonává instrukce uložené v paměti, řídí čtení a zápis z/do paměti, provádí logické a matematické operace a vyhodnocuje vstupní signály.

3.3.2 Paměť (Memory)

Každý počítač obsahuje dva typy pamětí: paměť programovou a paměť datovou. Programová paměť, jak je již z názvu patrné, slouží k uložení instrukcí z nichž se skládá program, který má být mikrokontrolérem vykonáván. Obvykle se jedná o paměť typu ROM¹⁰, která dokáže uchovat svůj obsah i bez zdroje elektrické energie, říkáme o ní, že je nevolatilní. Jako programové paměti se používají také paměti typu EEPROM nebo Flash, v obou případech jde o nevolatilní paměti. Datová paměť slouží ke krátkodobému uchování dočasných dat a mezivýsledků během vykonávání instrukcí programu. V případě datové paměti jde o paměť

⁸ Často se setkáme s označením ALU, což je zkratka z anglického Arithmetic Logic Unit.

⁹ Řídicí jednotka se označuje jako CU, což je zkratka z anglického Control Unit.

¹⁰ Jako paměť typu ROM označujeme paměť určenou pouze pro čtení (Read Only Memory).

typu RAM¹¹, která potřebuje napětí k uchování informace v ní uložené, po odpojení zdroje elektrické energie se vymaže, je tedy volatilní.

3.3.3 Paralelní I/O sběrnice

Neboli paralelní vstupně-výstupní sběrnice zajišťují spojení mikrokontroléru s okolím. Prostřednictvím těchto portů lze připojit různá vstupní a výstupní zařízení. Nejčastěji se jedná o LCD display, LED diody a tlačítka. Paralelní komunikace se vyznačuje tím, že posílá několik bitů dat najednou. Příklady těchto sběrnic jsou ISA, ATA, SCSI.

3.3.4 Sériová sběrnice

Podobně jako sběrnice paralelní slouží pro spojení mikrokontroléru a okolí. Sériová komunikace se oproti komunikaci paralelní vyznačuje tím, že posílá informaci postupně po jednotlivých bitech v tzv. paketech. Příkladem takovéto sběrnice je USB, 1-Wire, I²C nebo SPI, kterým se budeme věnovat dále v této práci.

3.3.5 Systémová sběrnice (Bus)

Představuje obvody spojující CPU s ostatními komponenty mikrokontroléru.

3.3.6 Časovač a čítač (Timers and counters)

Časovač se stará o měření času. To se uskutečňuje počítáním pulzů vnitřního zdroje, po určité době vyvolá přerušení. Čítač počítá impulzy vnějšího zdroje (například změny v signálu).

3.3.7 Přerušení (Interrupts)

Přerušuje úlohu, která právě probíhá na CPU. Toto se periodicky opakuje v závislosti na časovači. Toto přerušení umožňuje zkontrolovat a případně zpracovat vstupy za běhu programu.

3.3.8 Převodníky (ADC/DAC¹²)

Přeměňují jednu formu signálu na druhou podle potřeby. Analogově-digitální převodník může sloužit k převodu vstupu z analogového snímače na digitální signál, se kterým umí pracovat CPU. Oproti tomu analogový signál je potřeba kupříkladu k ovládání elektromotorů a k získání potřebného signálu slouží převodník digitálně-analogový.

¹¹ RAM je zkratka ze slov Random Access Memory, což v češtině znamená paměť s náhodným přístupem.

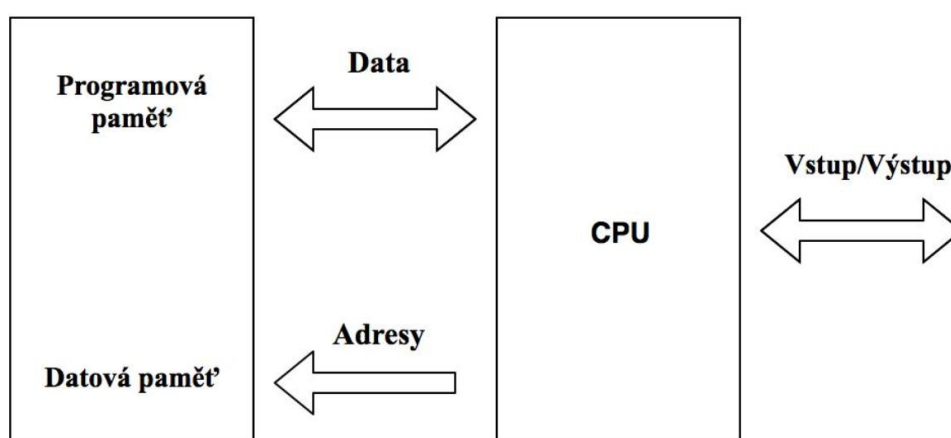
¹² Zkratka ADC označuje analogově-digitální převodník (Analog to Digital Converter), obdobně zkratka DAC označuje digitálně-analogový převodník (Digital to Analog Converter).

3.4 Architektura mikrokontrolérů

Architektura je spolu s rozsahem příkazů, maximální hodinovou frekvencí, počtem cyklů na příkaz a efektivností kódu určujícím faktorem výkonnosti mikrokontroléru. Dnes se v kontextu mikrokontrolerů setkáváme s von Neumannovou architekturou a Harvardskou architekturou, případně s jejich kombinací.

3.4.1 Von Neumannova architektura

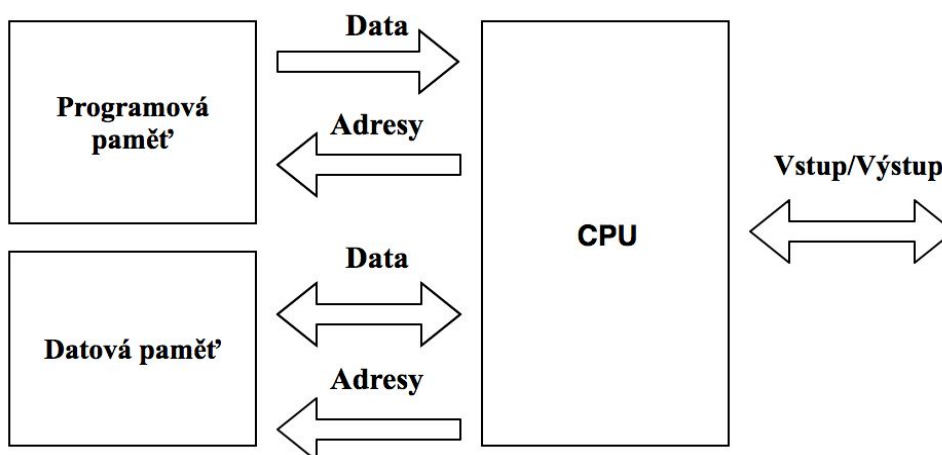
Charakteristikou von Neumannovy architektury je spojení datové a programové paměti do jednoho celku. Tato paměť má tedy pouze jednu sběrnici, přes kterou komunikuje s CPU. Výhodou takového uspořádání je právě hospodárné využívání sběrnice systému. Nevýhodou je ale pomalejší zpracování dat, které je způsobeno použitím společné sběrnice jak pro datovou, tak programovou část paměti. Z paměti tedy můžeme číst buďto pouze data nebo instrukce programu.



Obr. 14: Schéma von Neumannovy architektury. [22]

3.4.2 Harvardská architektura

Harvardská architektura je oproti von Neumannově starší. Liší se v rozdělení paměti na datovou a programovou část, kde každá z těchto částí má své oddělené sběrnice systémy. Díky tomuto uspořádání je tedy možné číst z datové i programové části současně, což zrychluje zpracování informací. Tato architektura na poli mikrokontrolérů převládá. [22]



Obr. 15: Schéma Harvardské architektury. [22]

Pro již jmenovanou výkonnostní charakteristiku „rozsah příkazů a počet hodinových cyklů na jeden příkaz“ je rozhodujícím faktorem architektura interpretu příkazů. Tyto interprety budou rozebrány v následující části.

3.4.3 CISC

CISC je zkratkou z Complex Instruction Set Computer. Jde o tradiční interpret příkazů. Obsahuje velké množství příkazů, takže lze realizovat poměrně složité úlohy zadáním pouze jediného příkazu. Toto má pozitivní vliv na velikost kódu, celkový program má nižší paměťové nároky. Další výhodou je, že programátoři nemusí některé základní funkce (například násobení) programovat sami. Nevýhodou ovšem je, že celý interpret je velice složitý, běžně obsahuje 200 i více příkazů, tím nastává problém, kdy některé programovací jazyky nejsou schopny využít kompletní rozsah příkazů.

3.4.4 RISC

Architektura RISC¹³ je opakem k architektuře CISC. Jedná se o redukovanou sadu příkazů, která běžně obsahuje pouze okolo 50 příkazů. Jedná se pouze o jednodušší úlohy, tím se celý interpret příkazů zjednoduší a je tak možno příkazy dekodovat a zpracovávat mnohem efektivněji v rámci jednoho hodinového cyklu. To má za následek zrychlení zpracování ale také růst velikosti programu.

3.4.5 CISP

CISP¹⁴ je novou architekturou interpretu. Má velký potenciál pro aplikace pracující v reálném čase. V tomto případě je interpret příkazů i příkazová sada konfigurovatelná uživatelem. Programátor si tedy může vytvořit přesně takovou příkazovou sadu, která bude odpovídat jeho potřebám a maximalizovat tak efektivitu vykonávání programu. [22]

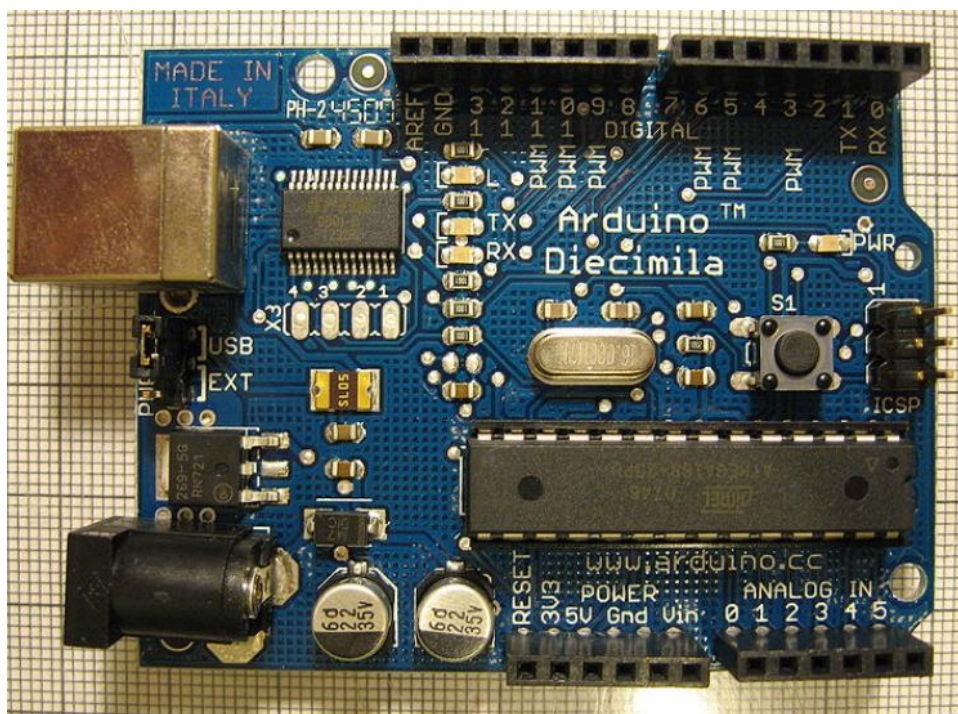
¹³ RISC je zkratkou z anglického Reduced Instruction Set Computer.

¹⁴ CISP je zkratkou z anglického Configurable Instruction Set Processor.

3.5 Vývojové kity mikrokontrolérů

3.5.1 Vývojová deska

Vývojová deska, nazývaná též jednodeskový mikrokontrolér, představuje desku s vyvedenými vstupními a výstupními porty a napájecím konektorem, na níž je patice pro připojení mikrokontroléru. Toto řešení nám umožňuje k mikrokontroléru snadno připojit nejrůznější vstupní zařízení (například snímače nebo tlačítka) a také zařízení výstupní (například LED diody, display nebo motor). Aby mikrokontrolér vykonával činnost, kterou vyžadujeme, musíme jej prvně naprogramovat. Toto nám deska opět usnadní, protože nemáme možnost mikrokontrolér připojit přímo k počítači, jelikož počítače typu PC, které běžně používáme, nemají potřebné patice pro jejich připojení. Vývojové desky ale v dnešní době mají, prakticky ve všech případech, vyvedené USB, přes které mikrokontrolér s počítačem snadno propojíme, a to nám umožní jeho naprogramování podle našich potřeb. Kromě vstupních a výstupních portů najdeme na vývojové desce obvykle také několik LED diod a tlačítko pro reset. [23, 25]



Obr. 16: Jednodeskový mikrokontrolér Arduino Decimila. [25]

Vývojová deska nemůže, na rozdíl od jednodeskového počítače, se kterým bývá často zaměňována, sloužit jako plnohodnotný počítač typu PC, neboť neobsahuje vstupy pro běžné vstupní periferie počítače (klávesnice, myš) ani pro periferie výstupní (monitor). [24]

Mezi nejznámější vývojové desky patří Arduino, což je deska založená na mikrokontrolérech ATmega od firmy Atmel. Dále jsou hojně používané vývojové desky WeMos.

Stavba konkrétní vývojové desky bude popsána v kapitole věnující se popisu hardware zvoleného pro demonstrační úlohu.

3.5.2 Programátor

Další možností, jak programovat mikrokontrolér je použití tzv. programátoru. Programátor je ve své podstatě deska s patičí pro mikrokontrolér, která má vyvedené rozhraní pro připojení k PC. Dnes má toto rozhraní zpravidla formu USB, v minulosti se jednalo o RS-232. Na rozdíl od vývojové desky nemá programátor možnost připojení dalších zařízení k mikrokontroléru, slouží pouze k přenesení programu z PC do mikrokontroléru. Výhodou oproti vývojové desce z hlediska programování je možnost debuggingu¹⁵ pomocí krokování - program spustíme po jednotlivých krocích a sledujeme jeho chování, jakmile narazíme na chybu, vidíme okamžitě na jakém řádku kódu chyba nastala a máme možnost ji opravit. Další výhodou je možnost programování mikrokontrolérů, které neobsahují bootloader. Nevýhodou je nemožnost přímého využití mikrokontroléru k řízení nějakého zařízení, jako v případě vývojové desky. [26, 27]



Obr. 17: Programátor Geekcreit K150 s patičí pro mikrokontroléry PIC. [28]

Bootloader, v češtině nazývaný zavaděč, je program uložený na mikrokontroléru, který se spustí po připojení ke zdroji napětí a několik desítek či stovek milisekund naslouchá toku informací po sériovém portu, zda není nahráván nový program. Pokud ano, přepíše stávající program v paměti novým programem a po dokončení přepisu restartuje mikrokontrolér. Pokud se tomu tak neděje, spustí program uložený v paměti. [36]

¹⁵ Debugging je pojem označující odstraňování chyb z kódu programu.

3.6 Platformy mikrokontrolérů a konkrétní zástupci

Mikrokontroléry se zpravidla dělí na:

- 8 bitové
- 16 bitové
- 32 bitové

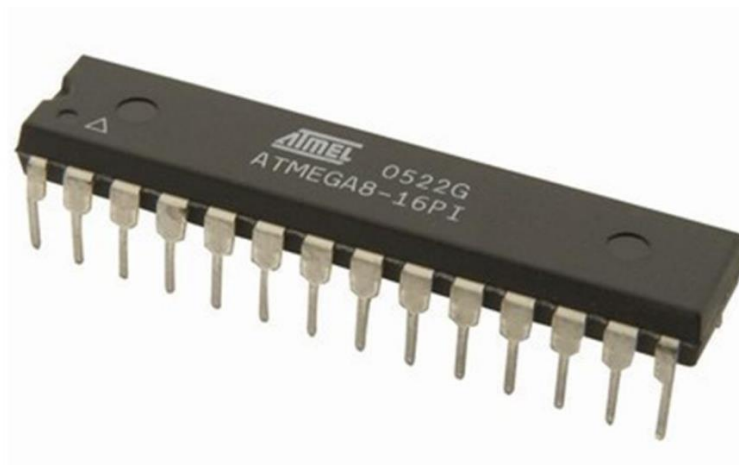
kde počet bitů označující šířku registrů a operandů, nesouvisí s šířkou sběrnice. Například Intel 8088 má 8 bitovou datovou sběrnici ale jedná se o 16 bitový procesor.

Šířka operandu nám říká, jaké největší číslo dokáže procesor nebo mikrokontrolér zpracovat během jedné operace, pokud je třeba zpracovat číslo větší než dovoluje šířka operandu, musí být rozděleno a zpracovává se po částech v několika operacích. Jednotlivé platformy budou popsány na konkrétních zástupcích. [29]

3.6.1 8 bitový mikrokontrolér

Jako příklad bude popsán mikrokontrolér ATmega328P od firmy Atmel používaný ve vývojových deskách Arduino UNO. [30]

- Rozšířená RISC architektura – 131 instrukcí, z nichž je většina vykonána během jednoho pracovního cyklu
- Harvardská architektura paměti
- 32 KB programové Flash paměti
- 2 KB operační SRAM paměti
- Frekvence CPU 20MHz
- Rozsah operačních teplot: -40 °C až 105 °C
- Pouzdro: 28 pinů

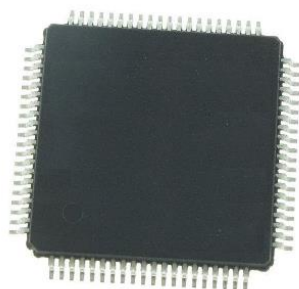


Obr. 18: Mikrokontrolér ATmega328P. [31]

3.6.2 16 bitový mikrokontrolér

Jako příklad 16 bitového mikrokontroléru byl vybrán mikrokontrolér C161S od firmy Infineon. [32]

- Kombinovaná architektura interpretu příkazů RISC a CISC
- Von Neumannova architektura paměti
- 16 MB sdílené paměti pro program a data
- 2 KB operační RAM paměti
- Frekvence CPU 25Mhz
- Rozsah operačních teplot: -40 °C až 85 °C
- Pouzdro: 80 pinů

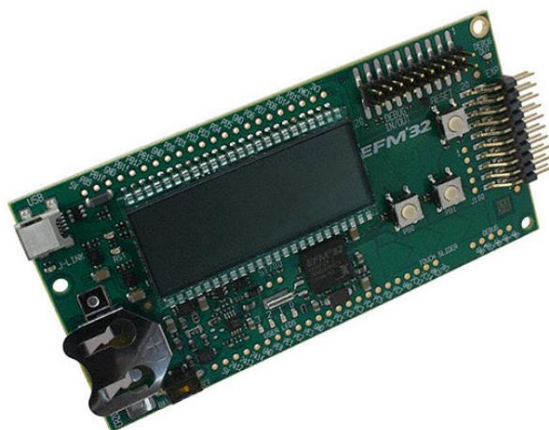


Obr. 19: Mikrokontrolér C161S. [33]

3.6.3 32 bitový mikrokontrolér

Pro popis 32 bitového mikrokontroléru byl zvolen mikrokontrolér EFM32 Gecko od firmy Silicon Labs, postavený na jádře ARM Cortex-M3. [34]

- Architektura RISC
- Harvardská architektura paměti
- 128 KB programové Flash paměti
- 16 KB operační RAM paměti
- Frekvence CPU 32MHz
- Rozsah operačních teplot: -40 °C až 85 °C
- Pouzdro: 112 pinů



Obr. 20: Mikrokontrolér EFM32 Gecko ve vývojové desce. [35]

4 Externí sériové sběrnice

Jak již bylo stručně popsáno v kapitolách 3.3.3 a 3.3.4, sběrnice je zařízení, které zprostředkovává komunikaci mezi částmi počítače, případně počítače a jiných zařízení, k němu připojených. Sběrnice existuje velké množství, v minulosti bylo navrženo mnoho technologií sloužících pro komunikaci mezi počítačem a externími zařízeními, ovšem mnoho z nich se nedočkalo standardizování a širšího využití. [37]

Tato kapitola pojednává o externích sériových sběrnicích. Nejpoužívanější sběrnici tohoto typu je bezpochyby USB, z průmyslového hlediska hrají velký význam sběrnice SPI a I²C, kterými se mimo jiné připojují právě také digitální MEMS senzory k mikrokontrolérům. V následující části budou popsány jmenované typy sběrnic.

4.1 USB¹⁶

Univerzální sériová sběrnice je nepoužívanějším typem externí sériové sběrnice. Slouží k připojení celé řady zařízení k počítačům například mobilních telefonů, kamer, lampiček nebo mohou sloužit k připojení vývojové desky mikrokontroléru, případně programátoru. USB používá ke komunikaci 2 datové vodiče. Kromě vodičů datových jsou zde přítomny i dva vodiče napájecí. Díky tomu můžeme pomocí USB připojit lampičky nebo různé nabíječky bez toho, aniž by musely mít vlastní napájecí zdroj. Toto je dobře vidět u moderních mobilních telefonů, které jsou nabíjeny výhradně přes USB rozhraní. [37, 38]

V případě potřeby připojení většího počtu zařízení, než je počet dostupných konektorů umožňuje USB použít takzvaný hub (rozbočovač).

USB se od svého vzniku v roce 1995 neustále vyvíjí. Jednotlivé verze USB se liší především přenosovou rychlostí. V současnosti je nejrozšířenější verze USB 3.0, která se od předchozích liší modrou barvou konektoru. V roce 2013 byla představena nová verze, a to USB 3.1, se kterou byl uveden zcela nový konektor USB-C, který je na rozdíl od předchozích generací konektorů (USB-A a USB-B) oboustranný. Mezi jeho další výhody patří možnost přenosu většího množství elektrické energie. Pro porovnání: USB 2.0 s konektorem USB-A je schopno poskytnout příkon maximálně 2,5 W, u USB 3.1 s konektorem USB-C to může být až 100 W, což dále rozšiřuje jeho možnosti a je tak použitelný i jako napájecí konektor pro notebooky. Ani USB 3.1 však není posledním standardem tohoto rozhraní, v září roku 2017 byl představen standard USB 3.2, který dále zvyšuje přenosovou rychlost. [39]

Tab. 1: Verze USB a jejich přenosové rychlosti. [40]

Verze	Datum uvedení	Maximální přenosová rychlost
USB 1.0	Leden 1996	12 Mbit/s
USB 2.0	Duben 2000	480 Mbit/s
USB 3.0	Listopad 2008	5 Gbit/s
USB 3.1	Červenec 2013	10 Gbit/s
USB 3.2	Září 2017	20 Gbit/s

¹⁶ USB je zkratka z Universal Serial Bus, což v češtině znamená univerzální sériová sběrnice.



Obr. 21: Srovnání konektorů typu USB-A (vlevo) s konektorem USB-C (vpravo). [41]

4.2 SPI¹⁷

Sběrnice SPI je díky své implementační jednoduchosti (jak hardwarové, tak softwarové) využívána velice často. Připojují se přes ni například LCD panely, senzory, A/D a D/A převodníky a mnoho dalších periférií. Její podpora bývá často přímo zabudována do mikrokontroléru.

SPI je schopna přenášet data pouze na krátké vzdálenosti, kvůli vlastnímu hodinovému singálu, nímž je řízena komunikace – na delší vzdálenost by docházelo ke zpoždění. Stejně tak u této sběrnice neexistuje signál, který by potvrzoval přijetí dat. Další nevýhodou je nutnost použití minimálně 4 vodičů pro komunikaci. Komunikace pak probíhá v obou směrech.

První vodič se označuje jako SCK (Serial Clock) a slouží k přenosu hodinového signálu. Druhý, označený jako SDO (Seriál Data Output) slouží k výstupu dat, oproti tomu třetí vodič SDI (Seriál Data Input) slouží ke vstupu dat. Čtvrtým vodičem je CS (Chip Select), který určuje se kterým zařízením připojeným ke sběrnici právě chceme komunikovat.

Sběrnice SPI nemá na rozdíl od USB standardizovaný konektor, většinou se jedná pouze o vyvedené vodiče. Stolní počítače obvykle nemají tuto sběrnici vyvedenou, pokud tedy potřebujeme ovládat nebo zpracovávat informace ze zařízení komunikujícího pomocí této sběrnice, musíme použít převaděč, který komunikaci převede na sběrnici, kterou je náš počítač vybaven, viz obr. 22. [42]



Obr. 22: Převaděč mezi sběrnicemi USB a SPI. [42]

¹⁷ SPI je zkratkou z anglického Serial Peripheral Interface.

4.3 I²C¹⁸

Sběrnice I²C je v některých ohledech podobná sběrnici SPI, obě například používají vlastní hodinový signál. Na rozdíl od SPI komunikuje zařízení skrz I²C pomocí pouze 2 vodičů. To s sebou nese složitější vnitřní strukturu připojovaných zařízení, protože se piny neustále přepínají ze vstupního na výstupní režim a naopak. Výhodou oproti SPI je možnost komunikace na delší vzdálenosti (až na několik metrů). [42]

Kvůli použití dvou vodičů se tato sběrnice někdy označuje jako TWI (Two Wire Serial Interface). Toto označení používá firma Atmel.

První vodič obstarává obousměrný přenos dat, označuje se jako SDA (Serial Data). Druhý vodič potom slouží k posílání hodinového signálu a označuje se SCK¹⁹ (Serial Clock). V praxi se pak k těmto dvěma vodičům připojuje ještě navíc vodič signálové země, který nese označení GND (ground). Sběrnice SPI používá sedmibitovou adresu (poslední, osmý bit, určuje režim zápisu – čtení/zápis), díky tomu umožňuje připojit až 128 různých zařízení, v praxi je ovšem toto číslo zmenšeno o tzv. rezervované adresy. [43, 44]

¹⁸ I²C je zkratka z anglického Inter-Integrated Circuit.

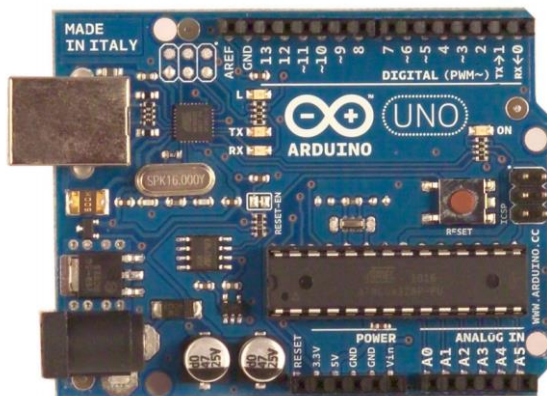
¹⁹ Kromě SCK se pro Serial Clock používá i označení SCL.

5 Ukázka MEMS senzoru a mikrokontroléru

5.1 Použitý hardware

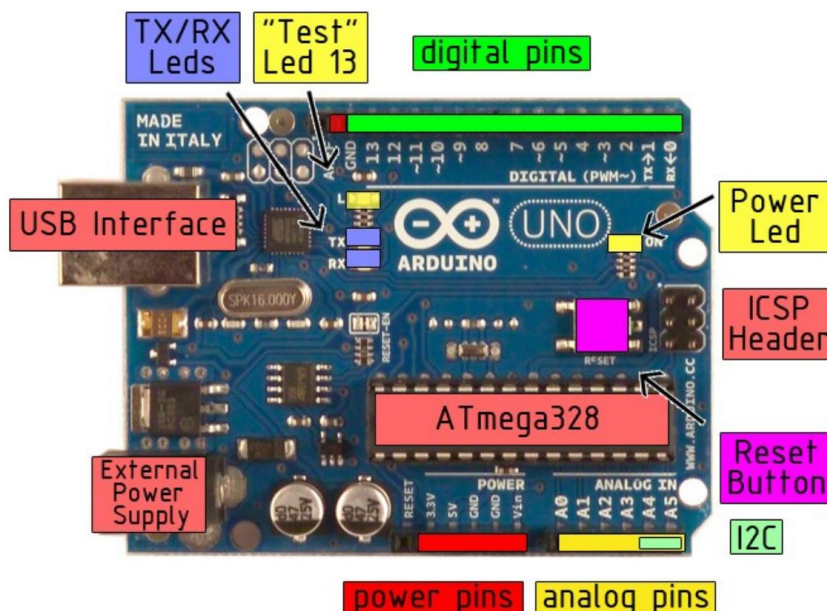
5.1.1 Mikrokontrolér

Jako mikrokontrolér pro provedení ukázky byl zvolen ATmega328P od firmy Atmel, který je již popsán v kapitole 3.6.1. Mikrokontrolér je zasazen do vývojové desky Arduino UNO. Vzhledem ke skutečnosti, že mikrokontrolér je již popsán v předcházející části této práce se budeme dále věnovat popisu desky Arduino UNO.



Obr. 23: Arduino UNO. [45]

Tato vývojová deska disponuje 14 digitálními I/O piny, z nichž 6 může být použito jako PWM²⁰ výstupy, vidíme je na horním okraji desky. Na desce se dále nachází 6 analogových vstupů, označených jako A0 až A5, 16 MHz oscilátor, USB rozhraní pro připojení k PC nebo externímu napájení, dedikovaný napájecí konektor, tlačítko pro restart a ICSP²¹ piny.



Obr. 24: Význam jednotlivých částí desky. [45]

²⁰ PWM označuje pulzní šířkovou modulaci, což je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu.

²¹ ICSP označuje schopnost zařízení být programováno, zatímco je instalováno v systému. Není tedy nutné programovat čip před samotnou instalací na desku.

Arduino UNO může být napájeno buďto přes USB rozhraní nebo externím zdrojem (doporučené rozmezí napájecího napětí je mezi 7 až 12 V) pomocí dedikovaného konektoru. Zdroj napájení je volen plně automaticky.

Popis napájecích pinů (power pins):

- VIN – poskytuje napětí, jímž je deska napájena
- 5V – regulovaný zdroj napětí 5 V pro napájení připojených komponentů
- 3,3V – zdroj napětí 3,3 V, může poskytnout proud až 50 mA
- GND – piny sloužící pro připojení zemních vodičů

Každý ze 14 digitálních pinů na desce může být použit jako vstup nebo výstup. Tyto piny pracují s napětím 5 V a mohou poskytnout nebo přijmout proud o maximální hodnotě 40 mA. Některé piny mají speciální funkci:

- 0 (RX) a 1 (TX) – jsou používány k příjmu (RX) a posílání (TX) TTL²² sériových dat
- 2 a 3 – externí přerušení
- 3, 5, 6, 9, 10 a 11 – poskytují 8 bitový PWM výstup
- 10, 11, 12 a 13 – slouží pro komunikaci přes sběrnici SPI
- 13 – vestavěná LED dioda je připojena k digitálnímu pinu 13

Analogové vstupy poskytují 10 bitové rozlišení (což znamená, že jsou schopny rozlišit 1024 různých hodnot). Stejně jako v případě digitálních pinů mají i některé analogové speciální funkci: [45]

- 4 a 5 – slouží pro komunikaci přes sběrnici I²C

²² TTL označuje tranzistorově tranzistorovou logiku.

5.1.2 Senzory

Jako ukázka MEMS senzorů byly vybrány dva akcelerometry – jeden analogový a jeden digitální. Na těchto dvou exemplářích budou ukázány rozdíly v práci s analogovými a digitálními snímači.

MPU 6050 od firmy InvenSense byl vybrán jako zástupce digitálního akcelerometru. Jde o zařízení schopné měřit pohyb v 6 osách (kromě akcelerometru obsahuje i gyroskop). Samotný snímač má rozměry 4×4×0,9 mm a s okolím komunikuje pomocí sběrnice I²C. Snímač má integrované tři 16 bitové analogově-digitální převodníky pro digitalizaci výstupů gyroskopu a tři 16 bitové převodníky pro digitalizaci výstupů akcelerometru. Pro co možná nejvyšší přesnost měření je možné naprogramovat měřicí rozsah jak gyroskopu, tak akcelerometru. Pro gyroskop je možné nastavit měřicí rozsah ±250, ±500, ±1000 nebo až ±2000 °/s. Pro akcelerometr jsou dostupné rozsahy měření ±2 g, ±4 g, ±8 g nebo ±16 g.

Senzor je schopen vydržet i přetížení až 10 000 g a obsahuje i vestavěný teploměr. Napájecí napětí musí být v rozmezí 2,375 V až 3,46 V. [46]

Použití senzoru je různé, jako příklady lze uvést:

- Stabilizace obrazu u kamer a fotoaparátů
- 3D myši
- Ovladače herních konzolí
- Sportovní hodinky a náramky
- Diagnostika

ADXL 335B, vyrobený firmou Analog Devices, byl vybrán jako zástupce analogového akcelerometru. Zařízení je schopné měřit zrychlení ve třech osách. Jeho rozměry jsou 4×4×1,4 mm. Senzor dokáže měřit zrychlení při napájecím napětí od 1,8 V do 3,6 V. Měřicí rozsah je ±3 g. Výstupem je analogový signál (napětí), přímo úměrný měřenému zrychlení, přenášený 3 vodiči (pro každou osu zvlášť). Pokud je v ose naměřeno nulové zrychlení, je výstupem pro danou osu signál o hodnotě poloviny napájecího napětí. Při měření zrychlení v dané ose se výstup mění o určitou hodnotu napětí, díky čemuž jsme schopni určit jeho velikost. Změna výstupu v mV/g je uvedena v dokumentaci k senzoru.

Stejně jako jeho digitální protějšek je i ADXL 335B odolný vůči přetížení až 10 000 g. Použití analogového senzoru je obdobné jako u výše popsaného digitálního senzoru. [47]

5.2 Použitý software

Demonstrační úloha byla vytvořena v prostředí MATLAB, což je programovací platforma navržená pro inženýry a vědce. Název MATLAB je zkratkové slovo z anglického Matrix Laboratory, což v překladu znamená maticová laboratoř. Hlavním a nejdůležitějším specifikem MATLABu je jeho programovací jazyk. Ten je speciálně uzpůsoben k práci s maticemi a díky tomu je velice vhodný pro inženýrské aplikace a analýzu dat, obsahuje rovněž také mnoho vestavěných matematických funkcí a stejně jako jiné programovací jazyky umožňuje uživateli vytvořit své vlastní funkce. Vlastní program se ukládá ve formě tzv. m scriptu. [48]

Díky výše jmenovaným vlastnostem se MATLAB využívá v těchto oblastech:

- Analýza dat
- Vývoj algoritmů
- Tvorba modelů a aplikací

MATLAB umožňuje také programování a ovládání mikrokontrolérů. Po připojení k počítači si MATLAB nahraje do mikrokontroléru svůj firmware²³, který umožňuje jeho ovládání přímo pomocí m scriptu. Následně probíhá komunikace mezi mikrokontrolérem a počítačem, v rámci které jsou vykonávány instrukce zadané programátorem ve scriptu. Pro programování mikrokontroléru je nutné nainstalovat příslušné rozšíření, v našem případě jde o „Support Package for Arduino“, které lze stáhnout přímo ze stránek firmy MathWorks.

Skripty vytvořené pro demonstrační úlohu jsou přiloženy k této práci v podobě přílohy.

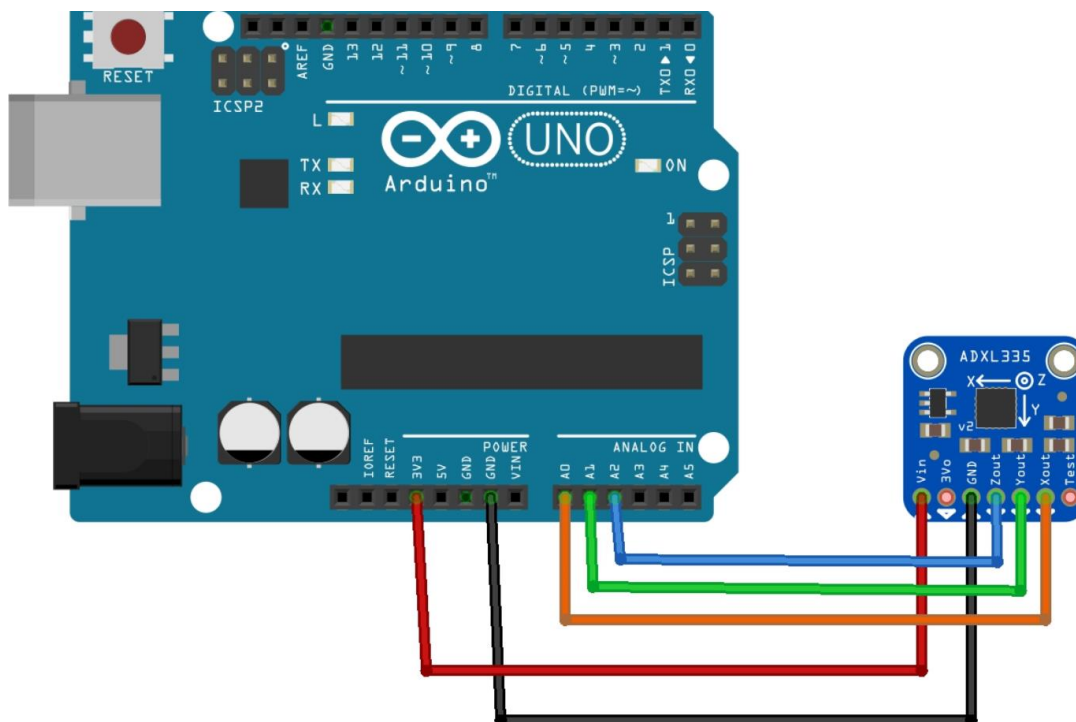
²³ Firmware je software řídící vestavěný systém, zajišťuje jeho funkčnost.

5.3 Načítání dat ze senzorů

Aby mohly být údaje naměřené senzory dále zpracovávány, musejí být nejprve přečteny. Způsob tohoto čtení dat je u analogového a digitálního senzoru odlišný a oba způsoby budou popsány v následující části této práce.

5.3.1 Analogový senzor

Následující text se vztahuje k souboru „Analog.m“ na příloženém CD. Před měřením dat je nutné senzor připojit k vývojové desce. Připojení je znázorněno na následujícím schématu, vytvořeném v programu Fritzing.



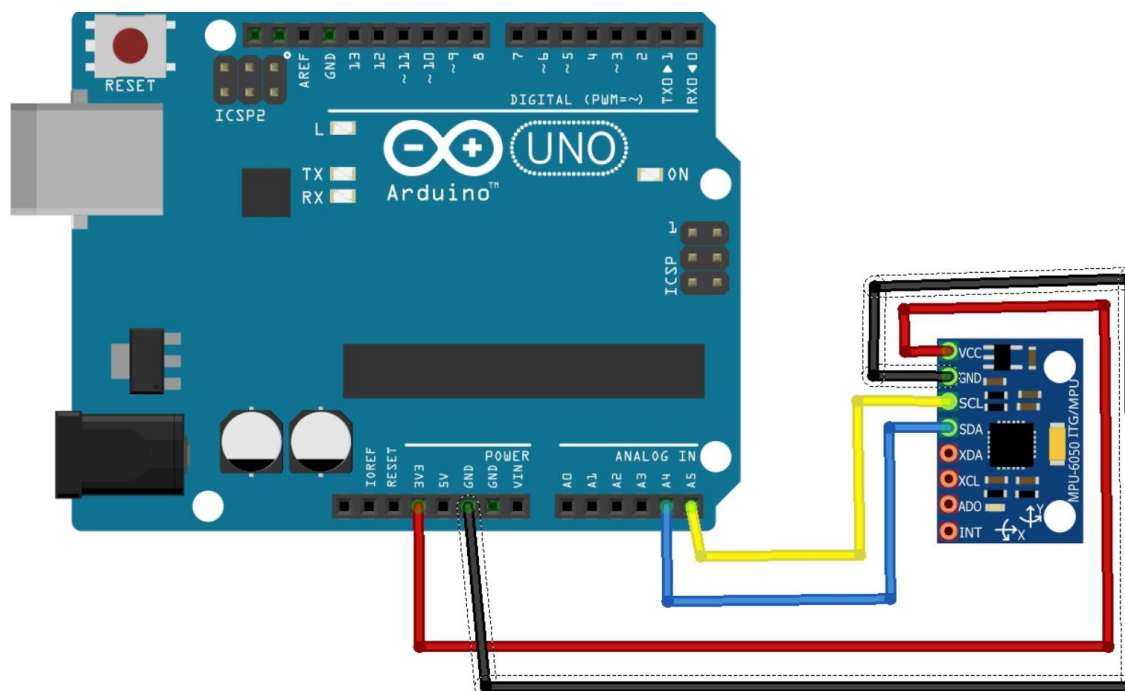
Obr. 25: Schéma zapojení analogového senzoru

V programu potřebujeme nejprve vytvořit objekt, přes který budeme přistupovat k mikrokontroléru. Tohoto docílíme pomocí funkce `arduino()`, jejíž první argument specifikuje, k jakému portu na počítači je mikrokontrolér připojen (zjistíme ve správci zařízení) a druhý argument specifikuje typ desky Arduino připojené k PC (v našem případě Uno). Dále vytvoříme proměnné pro klidové napětí (při zrychlení 0 g) `g_klid` a pro velikost změny napětí při změně zrychlení o 1 g `g_napeti`, velikost obou hodnot je vyčtena z datasheetu k danému senzoru, viz [47]. Dále vytvoříme nekonečnou smyčku, která zaručí opakované čtení dat ze senzoru. Tuto smyčku ukončíme pomocí podmínky a příkazu `break` po uplynutí požadovaného času.

Analogový senzor poskytuje měřené údaje ve formě analogového signálu – napětí, jehož velikost je úměrná hodnotě měřené veličiny. Uvnitř nekonečné smyčky tedy, při každé její iteraci, čteme hodnoty napětí na příslušných analogových vstupech. K tomu nám slouží funkce `readVoltage()`, jejíž první parametr specifikuje objekt a druhý parametr určuje vstup, na němž měření probíhá. V dalším kroku je vypočítána hodnota zrychlení pro každou osu a to tak, že od naměřené hodnoty napětí odečteme hodnotu `g_klid` a výsledek vydělíme hodnotou `g_napeti`. Tímto získáme velikost zrychlení v dané ose v jednotkách g.

5.3.2 Digitální senzor

Následující text se vztahuje k souboru „Digital.m“ na přiloženém CD.



Obr. 26: Schéma zapojení digitálního senzoru

Obdobně jako v případě analogového snímače musíme nejprve vytvořit objekt, pomocí kterého budeme přistupovat k mikrokontroléru, ke kterému je snímač připojen. K tomu opět slouží funkce `arduino()`, ve které tentokrát navíc specifikujeme fakt, že chceme načíst knihovnu pro práci se sběrnici I²C, kterou použijeme pro připojení senzoru. Dalším krokem bude vytvoření objektu odkazujícího na I²C sběrnici, k tomu použijeme funkce `scanI2Cbus()`, jejímž argumentem je objekt pro mikrokontrolér.

Dále je třeba nastavit měřící rozsah (v tomto případě na ± 2 g). To provedeme zápisem specifických dat do registru²⁴ senzoru funkcí `writeRegister()` podle mapy registrů, viz [49]. Obdobně nastavíme požadavek neustálého měření.

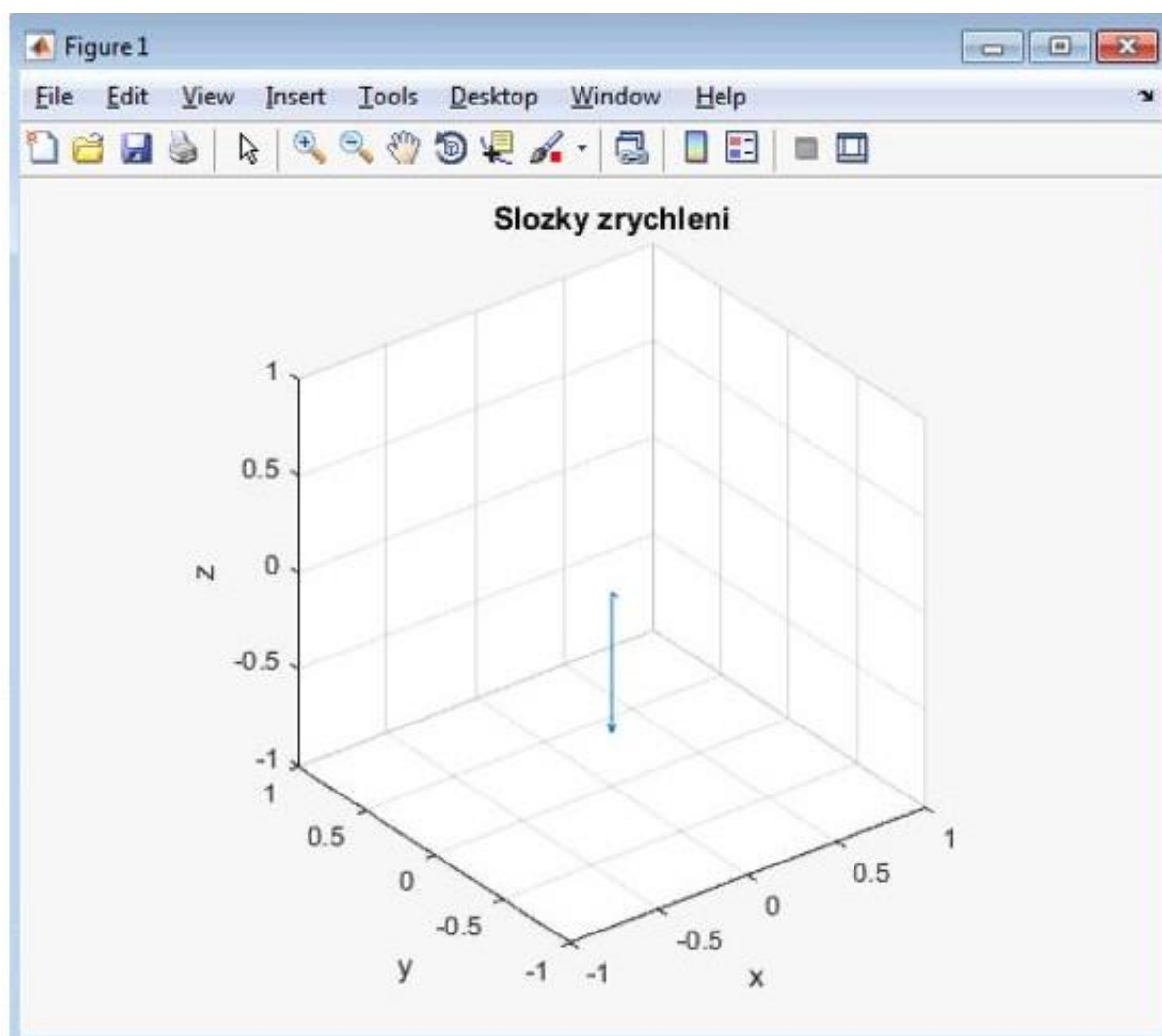
Na rozdíl od analogového senzoru byla v tomto případě pro opakování měření použita smyčka s předem daným počtem iterací (cyklus `for`). Samotné měření zrychlení pro jednotlivé osy probíhá čtením dat z registrů na senzoru. Čísla registrů sloužících pro čtení údajů o zrychlení v jednotlivých osách jsou opět uvedeny v mapě registrů k senzoru. Čtení údajů z registru provádíme funkcí `readRegister()`. Tímto získáme dvě komplementární osmibitová čísla, abychom ale získali číselnou hodnotu vyjadřující zrychlení v jednotkách g, musíme tyto dvě čísla sečíst a poté vydělit číslem, které odpovídá zvolenému měřicímu rozsahu (je uvedeno v mapě registrů).

²⁴ Registr v tomto kontextu znamená část paměti přímo na senzoru.

5.4 Vizualizace polohy senzoru

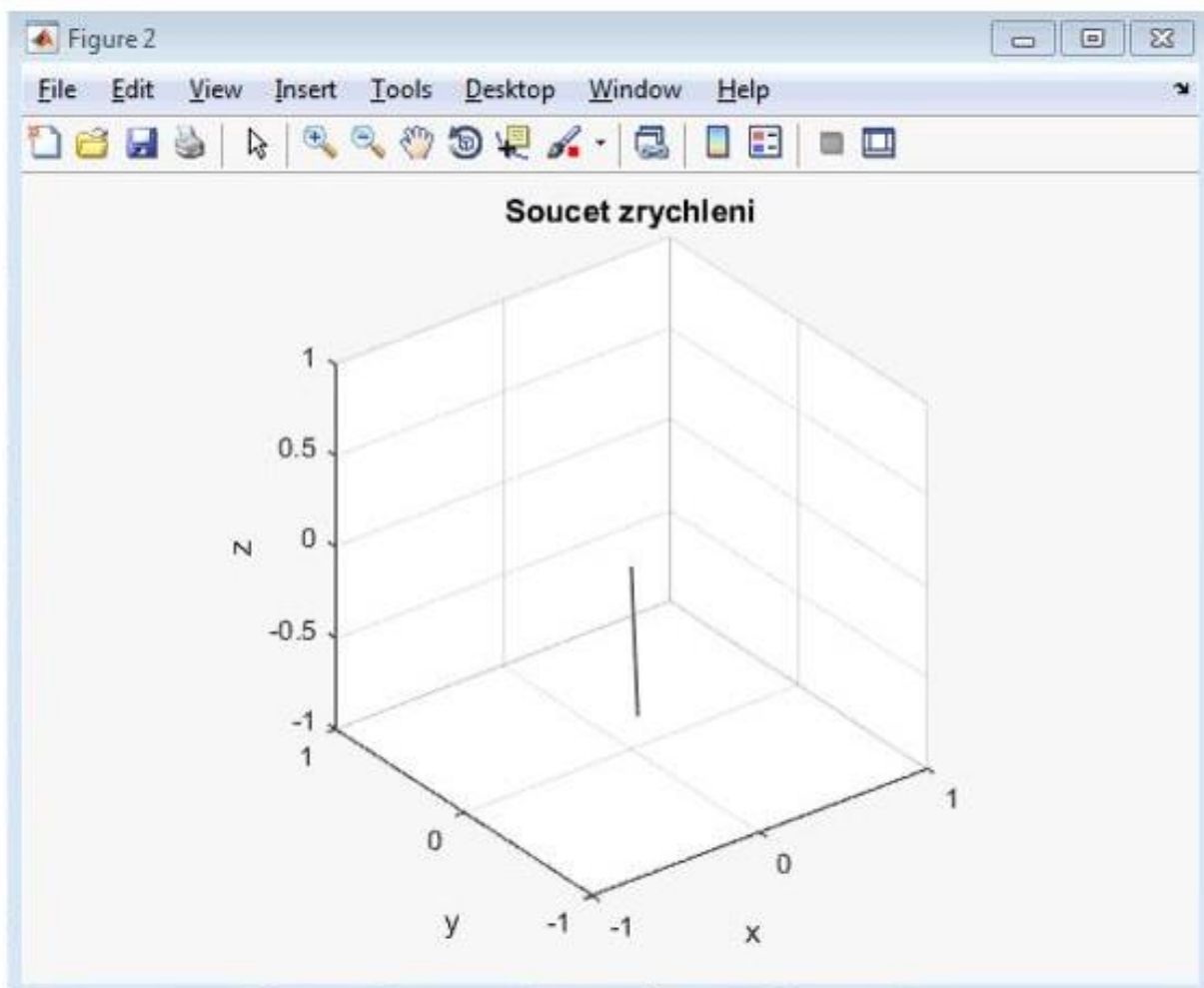
Samotná demonstrace funkce snímače a mikrokontroléru spočívá ve vizualizaci polohy akcelerometru v prostoru a je pro analogový i digitální senzor prakticky stejná. Skripty (Analog.m a Digital.m) se liší v již popsaném principu čtení dat ze senzorů. Vizualizace se skládá celkem ze tří částí, v první z nich se vykreslí složky zrychlení v jednotlivých osách, v druhé části se vykreslí grafický součet těchto vektorů a v poslední části se zobrazí poloha senzoru v prostoru pomocí čtverce reprezentujícího senzor.

Vykreslení složek zrychlení je snadné. Nejprve musíme určit počátek, tedy bod odkud budou vektory, reprezentující složky zrychlení v osách x, y a z vycházet. To provedeme vytvořením matice POČATEK, pomocí funkce zeros(), která vytvoří nulovou matici 3×3. Tím tento bod umístíme do souřadnic [0, 0, 0]. V dalším kroku si vytvoříme matici složek zrychlení SLOZKY_ZRYCHLENÍ. Poté přistoupíme k samotnému vykreslení složek pomocí funkce quiver3(), která vykresluje vektory v prostoru v podobě šipek.



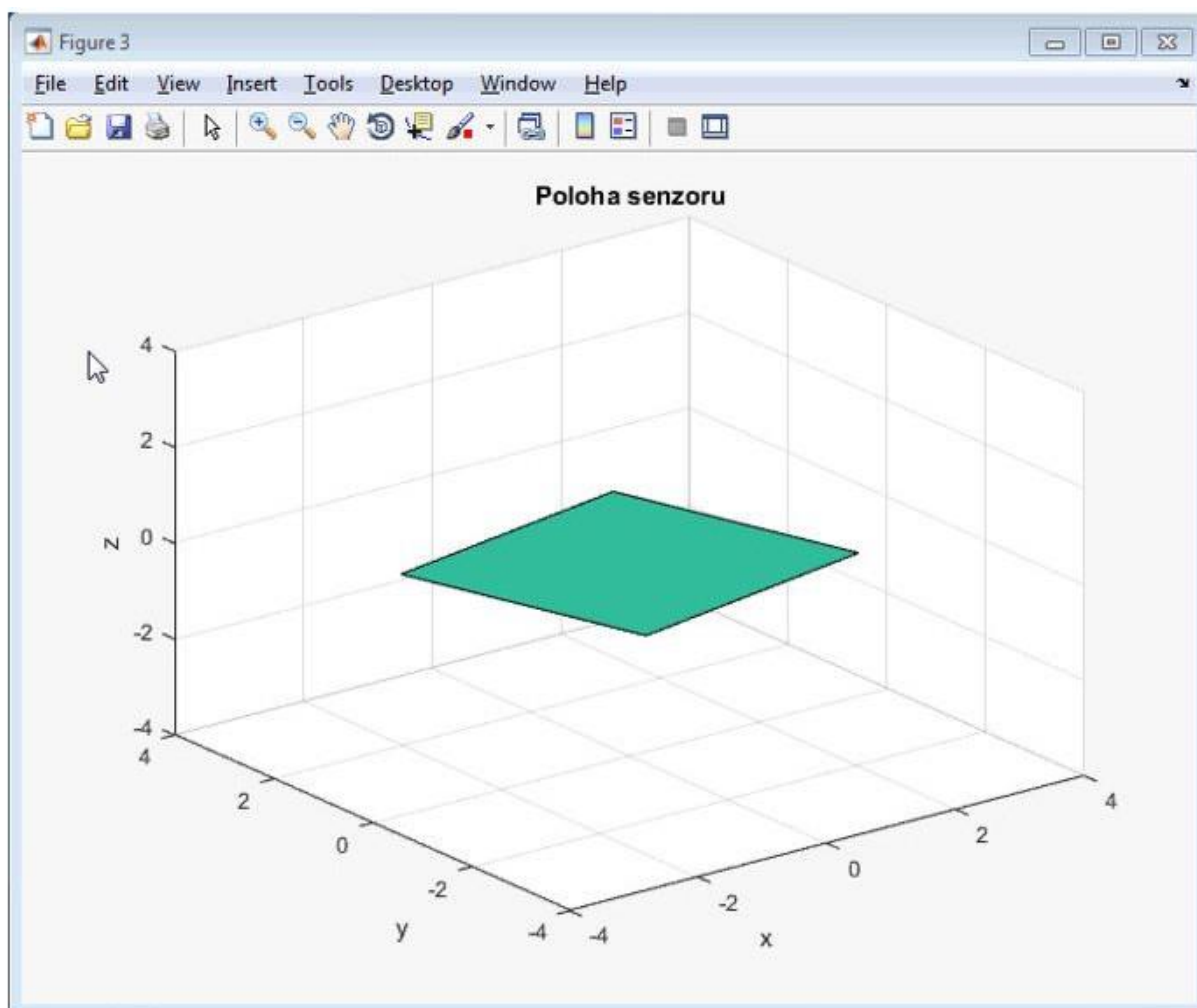
Obr. 27: Vizualizace složek zrychlení

Dalším krokem je vykreslení grafického součtu složek zrychlení. Tento vektor je normálou plochy, ve které leží čtverec reprezentující polohu senzoru vykreslený v posledním kroku. K vykreslení tohoto vektoru byla použita funkce `arrow3()`, stažená ze serveru firmy MathWorks, funkce je také přílohou k této práci. Jako první argument funkce použijeme vektor souřadnic počátku, jako druhý zadáme vektor celkového zrychlení ZRYCHLENÍ. Funkce poté vykreslí vektor v podobě šipky.



Obr. 28: Vizualizace normály plochy

Třetím a posledním krokem je vizualizace polohy senzoru. Nejprve je třeba určit počáteční souřadnice vrcholů čtverce, následně ze souřadnic vrcholů vytvoříme matici *Souradnice*. Poté vytvoříme matici rotace pomocí funkce `vrrotvec()`, která určí prostorový úhel mezi dvěma vektory. Na výstup této funkce aplikujeme funkci `vrrotvec2mat()`, která vytvoří matici rotace. Výslednou polohu vrcholů čtverce získáme vynásobením matice *Souradnice* s maticí rotace. Poslední krok je vykreslení čtverce v prostoru funkcí `fill3()`, která vyplní oblast mezi zadanými souřadnicemi.



Obr. 29: Vizualizace polohy senzoru

Ukázka vizualizace je přiložena k této práci na CD v podobě dvou videozáznamů (pro každý senzor zvlášť) pod názvy „Demonstrace_analog.avi“ a „Demonstrace_digital.avi“.

Diskuse

MEMS senzory jsou díky stupňujícím se požadavkům na miniaturizaci moderní techniky stále využívanější. Moderní mobilní telefony a tablety umějí „otáčet obrazovku“ podle své aktuální polohy, za tuto schopnost vděčí právě MEMS akcelerometrům a gyroskopům. Své využití mohou MEMS senzory najít také u zábavní techniky. Jejich miniaturní rozměry umožňují integraci do ovladačů herních konzolí, kde mohou dále rozšiřovat možnosti ovládání nejrozumnějších her. Dalším odvětvím průmyslu, ve kterém najdou své uplatnění je bezpochyby letectví, kde se uplatní ve stabilizačních systémech, obdobně se uplatní ve vojenství, například u raket. Význam MEMS senzorů se projevuje také při seizmických a diagnostických měřeních. V neposlední řadě je velkým uživatelem tohoto typu senzorů automobilový průmysl, ve kterém se používají u stabilizačních a bezpečnostních systému (odpalování airbagů při naměření velkých hodnot zrychlení).

Spolu s MEMS senzory zažívají rozmach také mikrokontroléry, ty řídí prakticky jakoukoliv dnešní elektroniku od praček a ledniček po set top boxy a hračky. V každém automobilu se nachází desítky mikrokontrolérů a mnoho z nich zpracovává data z MEMS senzorů. Do budoucna lze očekávat, že s rostoucími požadavky na bezpečnost automobilů, miniaturizaci a s rozmachem tzv. internetu věcí význam MEMS senzorů a mikrokontrolérů poroste.

Demonstrační úloha měla za úkol ukázat funkci a spolupráci snímače s mikrokontrolérem. Jak můžeme vidět na videích z provádění ukázky přiložených k této práci, čtverec reprezentující polohu senzoru se při malých výchylkách „třepe“. To je způsobeno jednak šumem v signálu a také faktem, že senzor snímal i zrychlení třesu ruky držící senzor. Skript byl napsán tak, že každé zrychlení bylo považováno za zrychlení tíhové, takto bylo nahlíženo i na třes ruky, což způsobilo mírné kmitání.

Závěr

Jedním z cílů této bakalářské práce bylo seznámit čtenáře s MEMS senzory, jejich principem a použitím. Tomuto byly věnovány první dvě kapitoly, v nichž byla nejprve obecně rozebrána technologie MEMS a následně dva konkrétní zástupci senzorů vyrobených touto technologií: akcelerometr a gyroskop.

Dále měla tato práce za úkol seznámit čtenáře s mikrokontroléry. K tomu sloužila třetí kapitola, v níž byl mikrokontrolér nejprve charakterizován, následně byla popsána jeho struktura, kity používané pro vývoj a jeho platformy s konkrétními zástupci.

Ve čtvrté kapitole byl proveden popis a rozdělení externích sériových sběrnic, které slouží k připojování periférií k mikrokontrolerům. V případě této práce byla externí sériová sběrnice, konkrétně sběrnice I²C, použita k připojení digitálního senzoru k mikrokontroléru v rámci provedení demonstrační úlohy popsané v páté kapitole.

Ukázka senzoru a mikrokontroléru byla provedena pomocí vizualizace polohy senzoru v prostoru. Jako senzor byly vybrány dva akcelerometry, jeden digitální a jeden analogový, na nichž byly ukázány rozdíly mezi těmito typy senzorů ve smyslu čtení dat. Skripty použité pro tuto úlohu byly vytvořeny v prostředí MATLAB. Přílohou k práci je CD obsahující skripty využívané k vizualizaci a načítání dat, funkci staženou ze serverů MathWorks použitou k vykreslování jedné části vizualizace a videa dokumentující provedení úlohy.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HUSÁK, Miroslav. *Automa: Užití MEMS v průmyslu* [online]. 2008 [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>
- [2] VOJÁČEK, Antonín. MEMS – díl 1. - Co to je a jak to vypadá? <https://vyvoj.hw.cz/> [online]. 2006, 19.6.2006 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz//clanek/2006111901>
- [3] ČIŽMÁR, Jan. *Současnost a budoucnost inerciálních MEMS senzorů*. Univerzita obrany, 2011, 9 s. Dostupné také z: <http://old.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2011/06/cizmar.pdf>. Seminární práce. Univerzita obrany
- [4] LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)* [online]. Loughborough: PRIME Faraday Partnership, 2002 [cit. 2018-02-17]. ISBN 1-84402-020-7. Dostupné z: http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/an-introduction-to-mems.pdf
- [5] KOPEČEK, P. MEMS technologie snímání náklonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 32 s., 2 příl. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dlouhý
- [6] HRUŠKA, František. *Senzory: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011 [cit. 2018-02-17]. ISBN 978-80-7454-096-7. Dostupné z: www.utb.cz/file/15534_1_1/
- [7] *Wireless Sensing Triple-Axis Reference Design (ZSTAR)*. Freescale Semiconductor, 2007. Dostupné také z: <https://www.nxp.com/docs/en/fact-sheet/ZSTARBOARDFS.pdf>
- [8] VOJÁČEK, Antonín. Akcelerometry Freescale pro každou aplikaci. <https://vyvoj.hw.cz/> [online]. 2007, 4. července 2007 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/soucastky/akcelerometry-freescale-pro-kazdou-aplikaci.html>
- [9] VOJÁČEK, Antonín. Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale?. <https://vyvoj.hw.cz/> [online]. 2007, 30. dubna 2007 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html>
- [10] BOBALÍK, L. Využití senzorů MEMS pro lokální určení polohy Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno, 2014. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaromír Žák. FEKT VUT v Brně [cit. 2018-02-20].
- [11] JURÁNEK, Martin. Prostředky automatického řízení: Akcelerometry. <http://homel.vsb.cz> [online]. VŠB Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~jur286/prostredky_aut_rizeni/preklad.htm
- [12] VYDARENÝ, Tomáš. *Co je gyroskop* [online]. 2017 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.gyroskopy.cz/?co-je-gyroskop,24>

- [13] VOJÁČEK, Antonín. Integrované MEMS gyroskopy. <https://automatizace.hw.cz/> [online]. 11. října 2009 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [14] VÁGNER, Martin. Návrh a identifikace rozšířeného modelu MEMS gyroskopu: disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2015. 148 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D. [cit. 2018-02-27].
- [15] ResearchGate. www.researchgate.net [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Pitch-roll-and-yaw-of-the-tag_fig7_322408155
- [16] ANEESH, Nainani. How do MEMS gyroscopes work?. In: *Nanolearning* [online]. 24. listopadu 2014 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=PK05u9c3yWI>
- [17] Mechanics. <https://courses.umass.edu/> [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://courses.umass.edu/plecprep/mech/1q5030.html>
- [18] Vektory. <http://portal.matematickabiologie.cz/> [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--priloha-a-zaklady-maticove-algebry--vektory>
- [19] Basics of Microcontrollers – History, Structure and Applications. *Electronics hub* [online]. 13. listopadu 2017 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/microcontrollers-basics-structure-applications/>
- [20] AGARWAL, Tarun. Microcontrollers – Types & Applications. <https://www.elprocus.com/> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/microcontrollers-types-and-applications/>
- [21] Basics of Microcontrollers. *Circuits today* [online]. 17. ledna 2011 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/basics-of-microcontrollers>
- [22] MANN, Burkhard. C pro mikrokontrolery: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy – linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, typy a triky, Praha: BEN – technická literatura, 2003. μ C & praxe. ISBN 8073000776 [cit. 2018-03-03].
- [23] CO JE TO ARDUINO?. *Arduino.cz* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://arduino.cz/co-je-to-arduino/>
- [24] Electronic Control Units. *Super droid robots* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.superdroidrobots.com/shop/custom.aspx/electronic-control-units/10/>
- [25] Arduino. <http://www.wikiwand.com> [online]. 30. října 2017 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/cs/Arduino>
- [26] KEIM, Robert. Design a Custom Microcontroller Programming and Testing Board. *All about circiuts* [online]. 25. února 2018 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/design-your-own-microcontroller-programming-and-testing-board/>
- [27] Programování mikrokontrolérů architektury AVR. <https://www.soom.cz> [online]. 17. listopadu 2015 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <https://www.soom.cz/clanky/1170--Programovani-mikrokontroleru-architektury-AVR-1>

- [28] Geekcreit® K150 ICSP USB PIC Automatic Develop Microcontroller Programmer. *<https://www.banggood.com/>* [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://www.banggood.com/Wholesale-K150-ICSP-USB-PIC-Automatic-Programing-Develop-Microcontroller-Programmer-p-43254.html?gmcCountry=CZ&cy=CZK&utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_elc&utm_content=zouzou&utm_campaign=pla-cz-elc2-pc&gclid=Cj0KCQjwy9LVBRDOARIsAGqoVnv5hOvn2Q0nrUL3pab1lPyEM-hNX2udgYNtxlJw7vY2pjZ4pv2ZVbsaArCAEALw_wcB&cur_warehouse=CN
- [29] DESHMUKH, Ajay. *Microcontrollers [Theory and applications]* [online]. 6. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2007 [cit. 2018-03-16]. ISBN 0-07-058595-4. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=5PDx2Q9Ea_YC&pg=PA84&lpg=PA84&dq=atmel+microcontrollers&source=bl&ots=uDoqPaUplt&sig=NZNlYIK8nFfJDmoNhbdRZ5wN_8g&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwiR99qEypfaAhVqhaYKHeTYBpk4ChDoAQgnMAA#v=onepage&q&f=false
- [30] ATmega328P. *<http://www.microchip.com>* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>
- [31] Atmel Atmega328P 8-bit AVR Microcontroller. *<https://www.lelong.com.my/>* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://www.lelong.com.my/atmel-atmega328p-8-bit-avr-microcontroller-dip-28-littlecraft-185724193-2018-11-Sale-P.htm>
- [32] C161S 16-Bit Single-Chip Microcontroller, datasheet. *Infineon Technologies AG* [online]. 2003, , 75 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-C161S-DS-v03_03-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b41d58bb2ffe
- [33] SAF-C161S-LM 3V AA. *<https://cz.mouser.com>* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Infineon-Technologies/SAF-C161S-LM-3V-AA/?qs=mzcOS1kGbgeFcKgerdtZeQ%3D%3D>
- [34] EFM32G Data Sheet. *Silicon Laboratories Inc.* [online]. 19. října 2009 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/efm32g-datasheet.pdf>
- [35] EFM32G290F128 EFM32 Gecko 32-bit Microcontroller. *<https://www.arrow.com/>* [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/reference-designs/efm32-g8xx-stk-starter-kit-development-kit-for-the-efm32g290f128-efm32-gecko-32-bit-microcontroller/9827baceded86f5f5051d4f3b9cf936c>
- [36] STEHLÍK, Petr. *Arduino bootloader* [online]. In: InstallFest 2017, 2017 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=6_1VQvVuFf8
- [37] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Externí sběrnice a porty. *<https://www.root.cz/>* [online]. 6. listopadu 2008 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-sbernice-a-porty/>
- [38] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Komunikační protokol universální sériové sběrnice. *<https://www.root.cz/>* [online]. 22. ledna 2009 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/komunikacni-protokol-universalni-seriove-sbernice/>

- [39] Vyznáte se ve světě USB konektorů?. <https://www.unet.cz/> [online]. 8. ledna 2016 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.unet.cz/blog/2016/01/08/vyznate-se-ve-svete-usb-konektoru/>
- [40] USB. <https://en.wikipedia.org/> [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/USB>
- [41] Kabel USB 3.1 do USB-C. <https://www.comfor.cz/> [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.comfor.cz/prislusenstvi/k-notebookum/kabely-a-redukce/belkin-kabel-usb-3-1-usb-c-to-usb-a-3-1>
- [42] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Externí sériové sběrnice SPI a I²C. <https://www.root.cz/> [online]. 30. prosince 2008 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/>
- [43] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Komunikace po sériové sběrnici I²C. <https://www.root.cz/> [online]. 8. ledna 2009 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/komunikace-po-seriove-sbernici-isup2supc/>
- [44] VALDEZ, Jonathan a Jared BECKER. Understanding the I2C Bus. *Texas Instruments* [online]. 2015 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>
- [45] Arduino UNO, datasheet. <https://datasheet.octopart.com/> [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/A000066-Arduino-datasheet-38879526.pdf>
- [46] MPU-6050 Product Specification. *InvenSense Inc.* [online]. 19. srpna 2013 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [47] ADXL335, datasheet. *Analog Devices Inc.* [online]. 2010 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADXL335.pdf>
- [48] What is MATLAB? <https://www.mathworks.com/> [online]. The MathWorks [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [49] MPU-6050 Register Map and Descriptions. *InvenSense Inc* [online]. 19. srpen 2013 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>

Seznam obrázků

- Obr. 1: Ozubené soukolí MEMS. [2]
Obr. 2: Prstencový vibrační MEMS senzor úhlové rychlosti. [3]
Obr. 3: Ukázka změny kapacity v závislosti na zrychlení. [9]
Obr. 4: Jednoosý akcelerometr s hřebenovým uspořádáním. [2]
Obr. 5: Znázornění piezoelektrického jevu. [11]
Obr. 6: Schématické znázornění jednoosého piezoelektrického akcelerometru. [11]
Obr. 7: Gyroskop v Cardanových závěsech. [17]
Obr. 8: Popis os. [15]
Obr. 9: Pravidlo pravé ruky. [18]
Obr. 10: Struktura mechanické části MEMS gyroskopu. [13]
Obr. 11: Chování mechanické části MEMS gyroskopu při rotaci. [13]
Obr. 12: Znázornění obsahu mikrokontroléru. [20]
Obr. 13: Schématické znázornění vnitřní struktury mikrokontroléru. [19]
Obr. 14: Schéma von Neumannovy architektury. [22]
Obr. 15: Schéma Harvardské architektury. [22]
Obr. 16: Jednodeskový mikrokontrolér Arduino Decimila. [25]
Obr. 17: Programátor Geekcreit K150 s patičí pro mikrokontroléry PIC. [28]
Obr. 18: Mikrokontrolér ATmega328P. [31]
Obr. 19: Mikrokontrolér C161S. [33]
Obr. 20: Mikrokontrolér EFM32 Gecko ve vývojové desce. [35]
Obr. 21: Srovnání konektorů typu USB-A (vlevo) s konektorem USB-C (vpravo). [41]
Obr. 22: Převaděč mezi sběrnici USB a SPI. [42]
Obr. 23: Arduino UNO. [45]
Obr. 24: Význam jednotlivých částí desky. [45]
Obr. 25: Schéma zapojení analogového senzoru
Obr. 26: Schéma zapojení digitálního senzoru
Obr. 27: Vizualizace složek zrychlení
Obr. 28: Vizualizace normály plochy
Obr. 29: Vizualizace polohy senzoru

Seznam tabulek

Tab. 1: Verze USB a jejich přenosové rychlosti. [40]

Seznam příloh

Příloha A: CD obsahující skripty použité pro demonstrační úlohu (Analog.m a Digital.m), funkci arrow3.m, videoukázky demonstrační úlohy Demonstrace_analog.avi a Demonstrace_digital.avi a elektronickou verzi této práce ve formátu PDF