



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



KOMUNIKACE, MĚŘENÍ VELIČIN A PROSTOROVÁ ORIENTACE MOBILNÍCH OBJEKTŮ

Případová studie

Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.

Ing. Jaromír Zavadil

Ing. Patrik Janečka

Ostrava 2012



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Komunikace, měření veličin a prostorová orientace mobilních objektů
Autoři: Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D., Ing. Jaromír Zavadil, Ing. Patrik Janečka
Vydání: první, 2012
Počet stran: 90
Náklad:

Studijní materiály pro studijní obor Automatické řízení a inženýrská informatika, 3902T004,
Fakulty strojní

Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu
Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D., Ing. Jaromír Zavadil, Ing. Patrik Janečka

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

OBSAH

1	ÚVOD.....	6
2	TÝMOVÝ NÁVRH STRUKTURY MOBILNÍHO OBJEKTU	7
3	LEGO MINDSTORMS	9
3.1	Stavebnice LEGO MINDSTORMS	9
3.1.1	Výstupní porty	11
3.1.2	Vstupní porty	11
3.1.3	Vysokorychlostní komunikační port.....	12
3.1.4	I ² C komunikace	12
3.2	Robot sestavený na Katedře ATR 352.....	13
4	BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE S MOBILNÍM OBJEKTEM.....	15
4.1	Technologie IEEE 802.11.....	15
4.1.1	Standard IEEE 802.11b – Wi-Fi	17
4.1.2	Standard IEEE 802.11a – Wi-Fi5.....	17
4.1.3	Standard IEEE 802.11g.....	17
4.1.4	Standard IEEE 802.11n	17
4.2	Technologie ZigBee a standard IEEE 802.15.4	17
4.2.1	Topologie ZigBee sítě.....	18
5	VÝBĚR BEZDRÁTOVÝCH STANIC PRO KOMUNIKACI S MOBILNÍM OBJEKTEM	19
5.1	Bezdrátové moduly Crossbow MICAz.....	19
5.2	Vývojový kit Jennic JN5139 – EK010	22
5.2.1	Použité snímače na senzorových a řídicích deskách.....	23
6	PŘENOS DAT MEZI BEZDRÁTOVÝMI MODULY MOBILNÍHO OBJEKTU A OPERÁTORA	29
6.1	Přenos dat a směrování rámců.....	29
6.1.1	Připojení modulu do sítě	30
6.1.2	Proces směrování.....	30
6.1.3	Potvrzení o přijetí zprávy	31
6.1.4	Pořadová čísla přenášených zpráv	31
7	DIGITÁLNÍ SIGNÁLOVÉ PROCESORY.....	32
8	ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ Z MOBILNÍHO OBJEKTU	33

8.1	Zpracování analogových a digitálních signálů z připojených snímačů.....	33
8.2	Číselné formáty v DSP	34
8.2.1	Čísla s pevnou řádovou čárkou	34
8.2.2	Čísla s plovoucí řádovou čárkou	36
	• Formát IEEE 754 Single precision	36
8.3	Výhody a nevýhody plovoucí a pevné řádové čárky	37
8.4	Digitální signálové procesory	39
8.4.1	Charakteristika digitálních signálových procesorů.....	39
8.4.2	Architektura procesoru PIC32.....	39
8.4.3	Architektura procesoru řady F28xxx	41
	• Instrukce MAC	42
	• Procesor TMS320F28035	42
	• Procesor TMS320F28335	43
9	ZPRACOVÁNÍ A VYUŽITÍ ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ PRO ORIENTACI ROBOTA V PROSTORU	44
9.1	Princip zpracování zvukových signálů u člověka.....	48
10	METODY LOKALIZACE AKUSTICKÝCH SIGNÁLŮ S POTENCIÁLNÍM VYUŽITÍM U ROBOTICKÉHO ZAŘÍZENÍ	51
10.1	Metody založené na odhadu časových diferencí (TDOA)	51
10.2	Metody založené na tvarování přijímací charakteristiky (Beamforming)	55
10.3	Metody založené na spektrálních odhadech vysokého rozlišení.....	58
11	METODA TDOA VYUŽITÁ NA ROBOTICKÉM ZAŘÍZENÍ PRO URČENÍ SMĚRU PŘÍCHÁZEJÍCÍ ZVUKOVÉ VLNY	59
12	METODA BEAMFORMING.....	64
13	HARDWAROVÉ PROSTŘEDKY PRO ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	67
13.1	Komunikační rozhraní	68
13.2	Digitální kamera iDS UI-1225LE	70
13.3	Digitální kamera Basler acA640-100gm	71
13.4	Objektiv Lensagon CVM40100	71
14	ZPRACOVÁNÍ OBRAZOVÝCH SIGNÁLŮ	72
14.1	Digitální obraz a jeho reprezentace.....	72
14.2	Typy digitálních obrazů	74
14.3	Barevné prostory.....	75

14.4	Metody zpracování obrazu.....	76
14.4.1	Blob analysis	77
14.4.2	Pattern recognition.....	78
14.4.3	Zpracování obrazu ve frekvenční oblasti	79
14.4.4	Vlastnosti dvourozměrné DFT	82
14.5	Softwarové prostředky	85
15	ZÁVĚR.....	87
16	LITERATURA.....	88

1 ÚVOD

Případová studie je zaměřena na rozbor možností komunikace, měření veličin a orientaci mobilních objektů v prostoru. Pro tento účel bylo vybráno více testovacích objektů (robotů), na kterých budou vedle teoretických poznatků aplikovány praktické zkušenosti jednotlivých členů týmu. Týmová skupina je složena ze tří členů, kde každý z nich je orientován do specifické oblasti řešení. Každý člen týmu přidává do případové studie jistou hodnotu svých znalostí, předchozích zkušeností a praktických dovedností.

Studie se bude v úvodních kapitolách zabývat návrhem struktury mobilního objektu tak, jak si jej členové týmu představují s ucelenými parametry hardwarové části, které by měl objekt v konečné fázi mít. Dále se zaměříme na popis vhodných testovacích mobilních jednotek (robotů), které jsou k dispozici na Katedře automatizační techniky a řízení Fakulty strojní VŠB – Technické univerzity Ostrava. Budou popsány parametry a možnosti jejich využití při týmovém návrhu mobilního objektu.

V další části se studie věnuje komunikaci mobilního objektu s dalšími objekty (dalšími roboty) či operátorským stanovištěm. Zde jdou nastíněny a popsány vhodné bezdrátové technologie a měřené veličiny, které jsou důležité pro prostorovou orientaci robota. Jedná se o zvukové signály a obecně zpracování zvuku, obrazové signály a zpracování obrazu, dále dotykové senzory, signály z akcelerometru, ze snímače teploty, vlhkosti a osvětlení. Základním stavebním kamenem celého systému mobilního objektu je signálový procesor. V textu je tedy velká část věnována jeho popisu, hardwarovým možnostem a způsobu práce s číselnými formáty, práci s pevnou a plovoucí řádovou čárkou.

Pro zpracování obrazu a zvuku je možné využít množství metod. Studie popisuje dostupné a známé metody, včetně softwarových prostředí a programovacích jazyků, která jsou pro zpracování vhodná.

2 TÝMOVÝ NÁVRH STRUKTURY MOBILNÍHO OBJEKTU

Pro účely této práce bylo vybráno několik mobilních objektů (robotů) dostupných na našem pracovišti. Jedná se o robota sestaveného ze součástí známé stavebnice LEGO MINDSTORM, dále pak o čtyřkolového robota vytvořeného na Katedře automatizační techniky a řízení, Fakulty strojní VŠB – Technické univerzity Ostrava. Dále budou stručně popsány tyto vybrané objekty a možnosti jejich využití. Před samotným popisem dostupným mobilních objektů se zaměříme na definici struktury mobilního objektu.



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl:

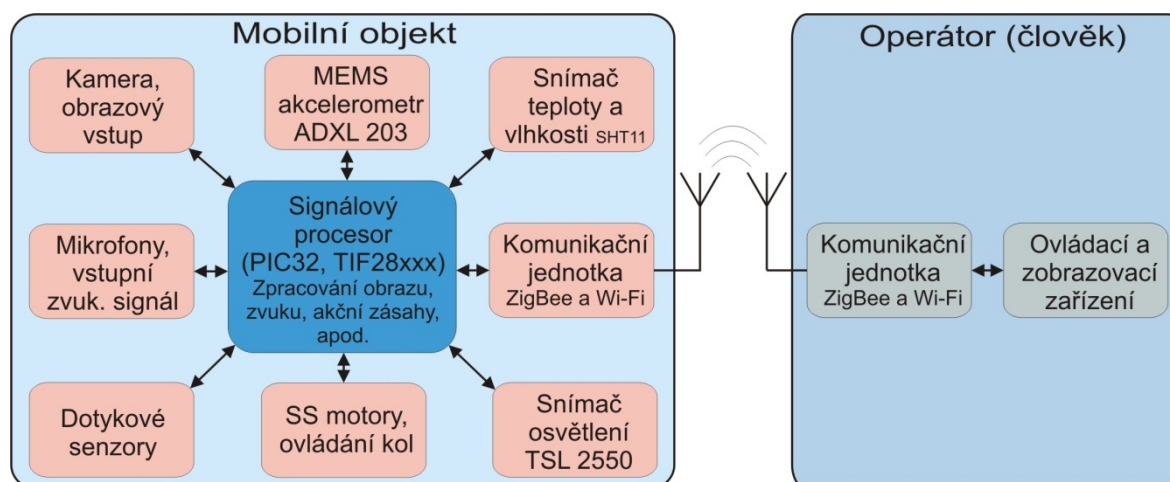
-  Týmový návrh struktury mobilního objektu.
-  Definovat strukturu mobilního objektu.
-  Definovat možnosti komunikaci s operátorem.



Výklad

Každý z řešitelského týmu dostal za úkol navrhnout vlastní strukturu mobilního objektu, přičemž důraz byl na kladen na schopnost orientace mobilního objektu v prostoru, měření veličin (teploty, rel. vlhkosti a osvětlení), komunikace s operátorským stanovištěm (člověkem) a zpracování dat pomocí vhodné výkonné procesorové jednotky.

Po společné konzultaci vzniknul návrh, který je složen z nejdůležitějších částí, které bude mobilní objekt (robot) potřebovat pro orientaci v prostoru, komunikaci s operátorem, v reálném čase zpracovávat data z připojených snímačů a měřit vybrané veličiny. Jádrem celého systému mobilního objektu je signálový procesor, který umožňuje v real-time čase zpracovávat data z připojených senzorů. Pro orientaci v prostoru bude použita kamera jako obrazový vstup, mikrofony představující zvukový vstup a dotykové senzory. Připojen bude také MEMS akcelerometr poskytující informaci o pohybu objektu. Veškeré datové výstupy bude zpracovávat signálový procesor a na nejnižší vrstvě bude rozhodovat o pohybu mobilního objektu. Tedy primárně bude objekt schopen sám rozhodovat o svém pohybu v prostoru tak, aby nedošlo ke kolizím jako nárazům do jiných objektů apod. Na vyšší vrstvě řízení musí být objekt schopen přijímat bezdrátově povely o směru jízdy objektu a odesílat data o měřených veličinách. Nižší vrstva, která řeší kolize systému, musí zabránit nepovoleným stavům a povelům z operátorského stanoviště, jako např. nájezd do překážky. Jedná se vlastně o antikolizní systém. Blokové schéma celého navrženého vnitřního hardwarového uspořádání mobilního objektu s přenosem dat do operátorského stanoviště můžeme vidět na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Blokové schéma hardwarové části mobilního objektu s přenosem dat do operátorského stanoviště

Komunikační jednotka ZigBee zajišťuje přenos dat mezi mobilním objektem a operátorem (člověkem). Tato technologie standardu IEEE 802.15.4 byla vybrána proto, že komunikační moduly mají velmi nízkou spotřebu elektrické energie, což je pro mobilní zařízení jakéhokoliv charakteru velmi důležité. Přenosová rychlost je naopak velmi malá, zhruba 250 kbit/s, což je velmi málo pro přenos dat z kamery. Proto bude nutné data z kamery vhodně signálovým procesorem upravit tak, aby došlo ke snížení datového toku vzhledem k přenosové rychlosti, případně může být ZigBee technologie doplněna o technologii Wi-Fi, standardu 802.11. Pro přenos dat bude využívána přenosová frekvence 2,4 GHz. Více o bezdrátových technologiích a standardu 802.11 a ZigBee (standardu IEEE 802.15.4) bude uvedeno v kapitole 4. V další části se zaměříme na dostupné mobilní objekty (roboty) a jejich hardwarovou strukturu. Tyto poznatky nám pomohou ověřit správnost navržených komponent pro vlastní strukturu mobilního objektu.

3 LEGO MINDSTORMS

Pro účely testování a tvorbu vlastních algoritmů byla vybrána stavebnice LEGO MINDSTORMS. Tato stavebnice je mezi uživateli velmi oblíbená a velkou výhodou je také možnost grafického programování formou bloků. Každý blok představuje určitý funkční celek a jejich seskupováním lze vytvořit celý řídicí algoritmus robota.



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl:

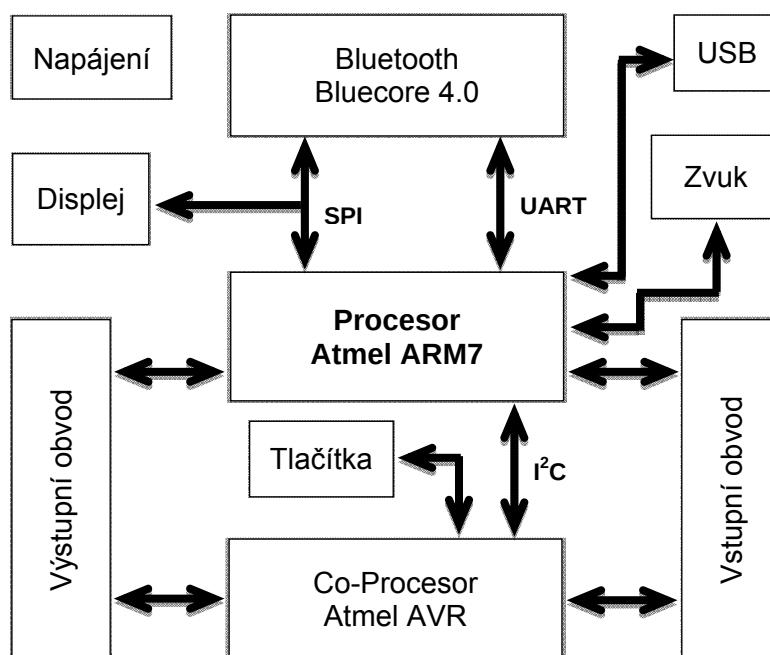
-  Popis stavebnice LEGO MINDSTORMS.
-  Popis technických parametrů řídicí jednotky, komunikačních rozhraní a I/O portů.



Výklad

3.1 Stavebnice LEGO MINDSTORMS

Stavebnice LEGO MINDSTORMS umožňuje sestavit robota libovolné konstrukce a naprogramovat jej k plnění požadované činnosti. Robot je řízen pomocí jednotky disponující třemi výstupy, čtyřmi vstupy, USB portem a technologií Bluetooth. Schéma komunikace uvnitř řídicí jednotky je na obr. 3.1.



Obr. 3.1 – Schéma komunikace uvnitř NXT kostky

Řídicí jednotku pohání 32bitový procesor Atmel ARM na frekvenci 48MHz. Pro připojení NXT kostky k počítači lze použít USB kabel, nebo bezdrátové rozhraní Bluetooth.

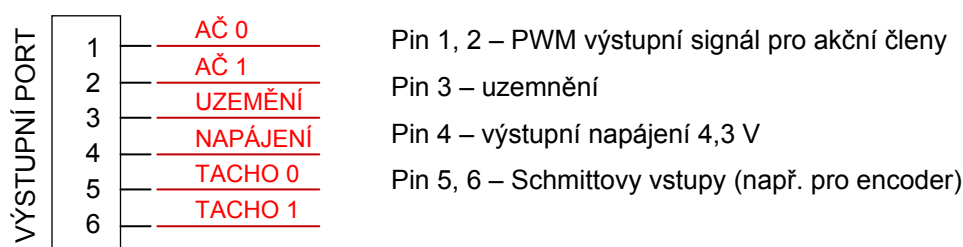
Vstupy a výstupy využívají konektory RJ12 a šestižilové rozhraní. Podporováno je jak digitální, tak i analogové rozhraní. Podrobnější přehled jednotlivých parametrů řídicí jednotky uvádí tabulka (tabulka 3.1).

Tabulka 3.1 – Přehled technických parametrů NXT kostky

Parametr	Specifikace
Procesor	Atmel ARM, AT91SAM7S256 - 48 MHz - 32 bit - 256 KB FLASH - 64 KB RAM
Co-procesor	Atmel AVR, ATmega48 - 8 MHz - 8 bit - 4 KB FLASH - 512B RAM
Připojení k PC	USB 2.0 - 12 Mbit/s Bluetooth, CSR BlueCore 4 v 2.0 + EDR System - podpora Serial Port Profile (SPP) - interní 47 KB RAM - externí 8 Mb FLASH - 26 MHz - 460,8 Kbit/s
Vstupy / výstupy	4 vstupní porty (1, 2, 3, 4) - 6ti žilové rozhraní, konektor RJ12 - podpora digitálního i analogového rozhraní - 1 vysokorychlostní port IEC 61158 Typ 4/EN 50170 3 výstupní porty (A, B, C) - 6ti žilové rozhraní, konektor RJ12 - podpora vstupu pro enkodéry
Display	Grafický LCD - rozlišení 100 x 64, černobílý - viditelná oblast 26 x 40,6 mm
Reproduktor	Výstupní kanál s 8bit rozlišením - podporované vzorkování 2 – 16 KHz
Ovládání	4 tlačítka
Napájení	Li-Ion baterie nebo 6x 1,5 V AA tužkové články

3.1.1 Výstupní porty

LEGO MINDSTORMS NXT disponuje třemi výstupními porty, které slouží k řízení akčních členů připojených k NXT. Šestižilové rozhraní výstupních portů je realizováno tak, že výstupní zařízení mohou zpátky do NXT posílat informace, aniž by musela použít vstupní porty. Schéma zapojení jednotlivých pinů výstupních portů a jejich význam popisuje obrázek obr. 3.2.

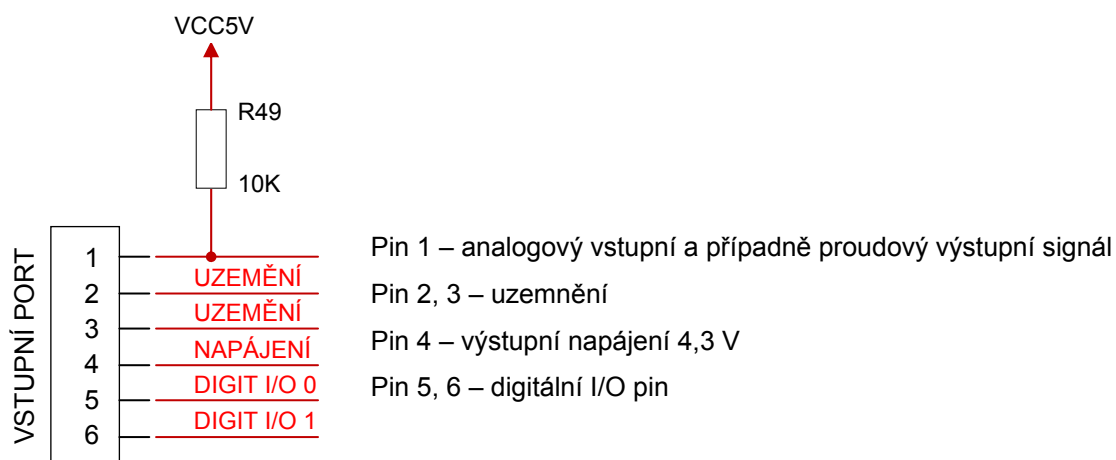


Obr. 3.2 – Význam jednotlivých pinů výstupního portu

Pin1 a 2 jsou výstupní signály pro řízení akčních členů. Tyto signály jsou řízeny vnitřním řadičem, který je schopen dodávat souvisle 700 mA pro každý výstupní port a špičkový proud přibližně 1 A. Řadič má zabudovanou tepelnou ochranu, což znamená, že pokud je z kostky souvisle odebíráno velké množství výkonu, řadič může automaticky upravit výstupní proud.

3.1.2 Vstupní porty

NXT kostka je osazena čtyřmi vstupními porty, které umožňují připojení různých snímačů. Šestižilová koncepce vstupních portů umožňuje použití jak analogového, tak digitálního rozhraní pro každý konektor. Port 4 může být použit pro vysokorychlostní komunikaci prostřednictvím řadiče RS485. Schéma zapojení vstupního portu lze nalézt na obrázku obr. 3.3.



Obr. 3.3 – Zapojení pinů vstupního portu

Vstupní pin (Pin 1) je analogový vstupní pin připojený k 10bit A/D převodníku uvnitř AVR procesoru. Je také připojen ke generátoru proudu, který se používá pro napájení

aktivních snímačů. Vstupní A/D signály jsou vzorkovány stejnou vzorkovací frekvencí pro všechny analogové snímače. Vzorkovací frekvence pro všechny analogové snímače je 333Hz.

3.1.3 Vysokorychlostní komunikační port

Vstupní port č. 4 může pracovat jako vysokorychlostní komunikační port. K tomuto účelu je v NXT kostce implementován komunikační čip RS485, což umožňuje realizaci vysokorychlostní obousměrné komunikace.

3.1.4 I²C komunikace

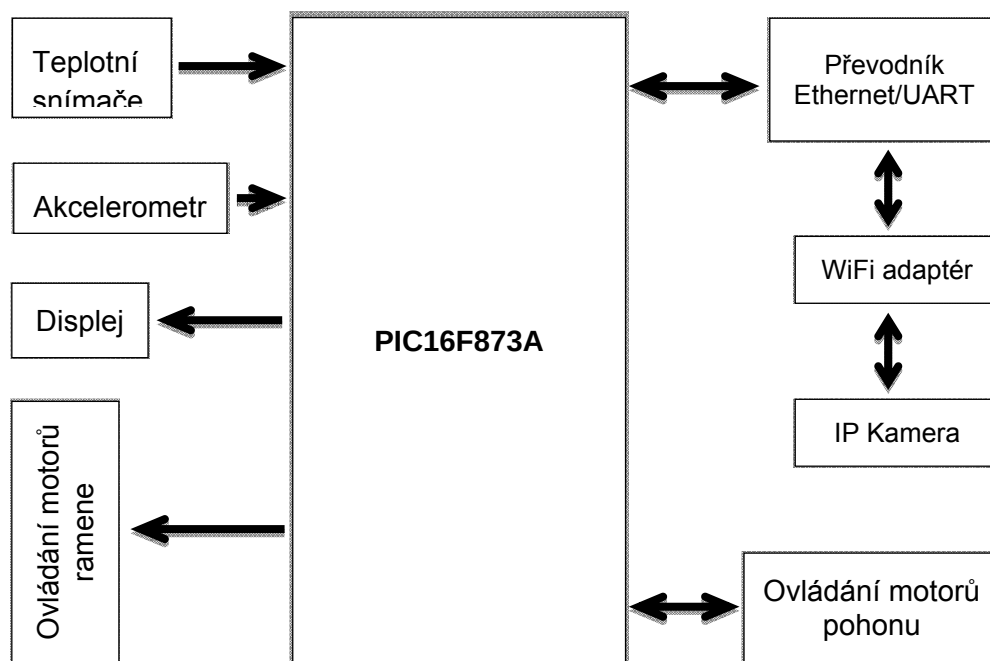
Digitální komunikace v rámci NXT kostky je realizována použitím protokolu I²C. Jedná se o průmyslový komunikační standard vyvinutý Philips Semiconductors na začátku osmdesátých let. Od té doby byl použit u mnoha různých průmyslových komponent, u nichž se vyžaduje jednoduchá digitální komunikace.

Digitální zařízení mají některé výhody v porovnání s analogovými. Tato zařízení mohou například zahrnovat jméno zařízení a mohou se odkazovat na individuální parametry, jež jsou pro zařízení specifické (např. kalibrační hodnoty, čas inicializace atd.).

I²C komunikace slouží jako digitální rozhraní pro externí zařízení. Toto digitální rozhraní umožňuje externím zařízením vykonávat funkcionalitu individuálně a poté jen poslat výsledek zpět do NXT kostky nebo přijímat nové informace z NXT. NXT kostka disponuje čtyřmi I²C komunikačními kanály (jeden pro každý vstupní port). I²C komunikace je realizována jako „master only“, což znamená, že NXT řídí datový tok každého komunikačního kanálu. Důležitým aspektem umožňujícím I²C komunikaci mezi dvěma zařízeními je hardwarové nastavení každého zařízení.

3.2 Robot sestavený na Katedře ATŘ 352

Dalším mobilním objektem vhodným pro účely této práce je robot sestavený studentem v rámci diplomové práce na Katedře automatizační techniky a řízení Fakulty strojní VŠB – Technické univerzity Ostrava. Jedná se o čtyřkolového robota osazeného robotickým ramenem a kamerou, který lze ovládat vzdáleně pomocí Wi-Fi sítě. Schéma zapojení jednotlivých částí robota znázorňuje obrázek obr. 3.4.



Obr. 3.4 – Blokové schéma komunikace jednotlivých částí robota

Robot je osazen jednočipovým systémem PIC 16F873A s rozhraním I2C, UART, SPI a také vstupně/výstupními A/D převodníky. Výčet parametrů jednočipového počítače je uveden v tabulce (tabulka 3.2).

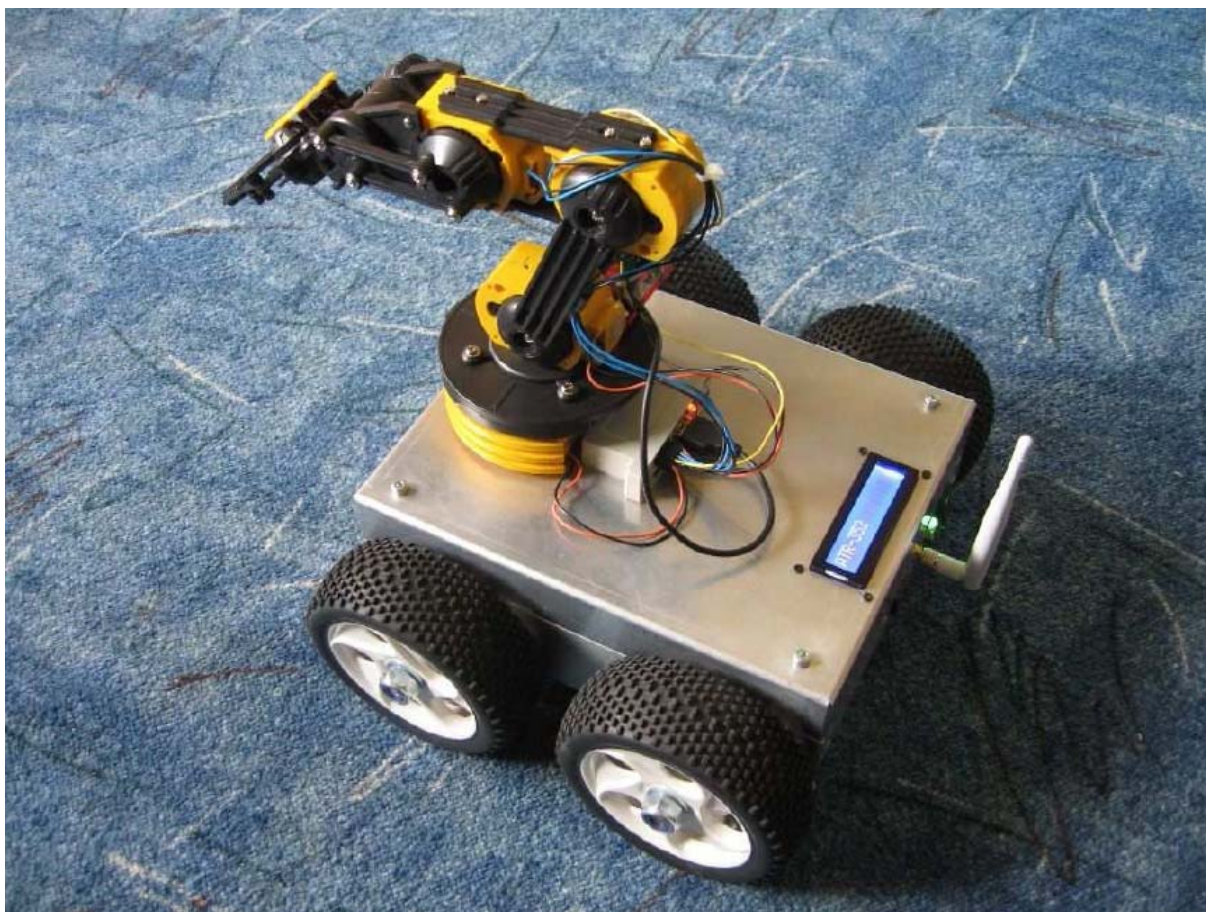
Tabulka 3.2 – Parametry čipu PIC16F873A

Typ programové paměti	FLASH
Velikost programové paměti	7 KB
Paměť RAM	368 b
Paměť EEPROM	256 b
Digitální komunikační rozhraní	1 x UART 1 x I2C/SPI
PWM výstup	2 x 10bit
Čítače	2x 8 bit 1x 16 bit
Analogové vstupy	5 x 10 bit

Robot je osazen jednou barevnou IP kamerou Genius IP Cam Secure 300R, která je osazena snímacím čipem CMOS o velikosti 1/6" s rozlišením 640x480 a 15fps. Kamera je vybavena IR LED diodami pro přisvětlení snímané scény při nedostatečném okolním osvětlení. Kamera je připevněna k robotickému rameni, takže se otáčí spolu s ramenem.

Dále je robot vybaven tříosým akcelerometrem Freescale MMA7260 a digitálním teplotním snímačem Dallas DS18B20.

Větší rozměry a robustnější konstrukce tohoto robota umožňují i různé modifikace a úpravy (např. přidání snímačů, kamery atd.). Také možnost komunikace robota s okolím prostřednictvím WiFi sítě je výhodnější než komunikace prostřednictvím Bluetooth, kterou je vybaven robot sestavený ze stavebnice LEGO MINDSTORMS. Z uvedených důvodů se pro účely této studie jeví výhodnější robot sestavený na Katedře automatizační techniky a řízení (viz obr. 3.5). Robota by bylo možné doplnit například o další kameru, aby se docílilo stereoskopického snímání obrazu, což by umožnilo lepší orientaci robota v prostoru.



Obr. 3.5 – Robot sestavený na Katedře automatizační techniky a řízení [11]

4 BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE S MOBILNÍM OBJEKTEM

Mobilní objekt může s ostatními objekty či operátorským stanovištěm komunikovat pomocí různých standardů bezdrátové komunikace. Každý standard přináší své výhody a nevýhody. V této kapitole se zaměříme na standard IEEE 802.11, jako základ technologie Wi-Fi a standard bezdrátové komunikace IEEE 802.15.4, často označovaného jako ZigBee.



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl:

-  Popis standardu IEEE 802.11 a dalších příbuzných standardů.
-  Popis standardu IEEE 802.15.4.
-  Popis topologie ZigBee sítě.



Výklad

4.1 Technologie IEEE 802.11

WLAN technologie založené na standardu IEEE 802.11 představují praktické a zajímavé řešení v sítích nabízející mobilitu, flexibilitu, nízkou cenu, možnost rozmístění související s dosahem a širokou škálu použitelnosti. Vývoj těchto technologií odstartoval již v roce 1997. WLAN je datový přenosový systém zajišťující konektivitu mezi zařízeními využívající bezdrátovou síť. Tato síť je v dnešní době mnohem více upřednostňována než klasické kabelové sítě, u kterých je uživatel vázán pevně danou infrastrukturou, která ztrácí mobilitu připojených zařízení. Rozšiřování WLAN technologií závisí na vývoji jejich standardů. Komise IEEE 802 uznávaná jako světová autorita pro LAN sítě definovala několik LAN standardů během uplynulých dvaceti let, včetně IEEE 802.3 Ethernetu, IEEE 802.5 technologie Token Ring a IEEE 802.3u, tedy 100Base-T Fast Ethernet, viz [29]. Produkty certifikované jako IEEE 802.11b znamenají technologii Wi-Fi. Tato certifikace je poskytována Wi-Fi aliancí. V tabulce (tabulka 4.1) je uveden seznam standardů a různá odvození z 802.11, viz [17]:

Tabulka 4.1 Přehled odvozených standardů od původního standardu 802.11

Název standardu	Popis
IEEE 802.11	Původní standard pro 1 až 2 Mbit/s, přenos ve 2,4 GHz pásmu.
IEEE 802.11a	Tento standard pracuje v 5 GHz pásmu a dovoluje propustnost od 6 do 54 Mbit/s.
IEEE 802.11b	Rozšíření IEEE 802.11 na přenos 5.5 a 11 Mbit/s.
IEEE 802.11c	Bezdrátové přemostění; obsaženo v IEEE 802.1D standardu (2001).
IEEE 802.11d	Mezinárodní roamingové rozšíření (2001), přístupové body přenášejí informace přístupnými kanály přijatelnou hladinou výkonu podle omezujících zákonů daného státu.
IEEE 802.11e	Jedná se o další rozšíření, standard pro kvalitu služby (QoS), který definuje specifikace QoS mechanismů pro podporu multimediálních aplikací.
IEEE 802.11F	Zabývá se standardizací protokolů mezi AP (Access Point). Dovoluje používání zařízení od různých výrobců.
IEEE 802.11g	Dovoluje dosáhnout vyššího datového toku (54 Mbit/s identický s IEEE 802.11a) v 2.4 GHz pásmu. Je použita ortogonální frekvenčně dělicí multiplexová (OFDM) modulace. Poskytuje zpětnou kompatibilitu s 802.11b (2003).
IEEE 802.11h	Zajištění IEEE 802.11a (5GHz) pro evropskou kompatibilitu (2004). Jsou uvažovány mechanismy frekvenčně dynamického výběru a řízení přenosu.
IEEE 802.11i	Vylepšený autentifikační a šifrovací algoritmus (WPA2), (2004).
IEEE 802.11j	Sbližování amerických (IEEE 802.11) a japonských standardů (je to přizpůsobování dřívějšího standardu pro japonské zákony).
IEEE 802.11k	Definuje metody a měřicí kritéria potřebné pro vyšší vrstvy protokolů.
IEEE 802.11l	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11m	Správa standardu: přenosové metody a drobné úpravy.
IEEE 802.11n	Vylepšení ve směru vyššího výkonu. Nabízí vyšší datový přenos.
IEEE 802.11o	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11p	Jedná se o bezdrátový přístup pro pohyblivá prostředí (automobily, vlaky, sanitky).
IEEE 802.11q	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11r	Rychlé přesuny mezi přístupovými body (roaming).
IEEE 802.11s	Zlepšení síťování, samoorganizace sítí.
IEEE 802.11T	Testovací metody a metrika. Testování výkonu apod.
IEEE 802.11u	Komunikace a propojení systémů s dalšími sítěmi (jinými než 802 sítěmi).
IEEE 802.11v	Management bezdrátové sítě (konfigurace klientských zařízení během připojení).
IEEE 802.11w	Zabezpečení rámců managementu bezdrátové sítě.
IEEE 802.11x	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11y	Standard pro běh ve frekvenčním pásmu 3650 – 3700 MHz (veřejné pásmo v USA).

4.1.1 Standard IEEE 802.11b – Wi-Fi

Tento standard schválený roku 1999 přinesl zrychlení přenosů až na 11 Mbit/s, ale stále pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz jako původní standard 802.11. Je zde použita modulace CCK (Complementary Code Keying), která k tomuto zrychlení přispěla. Fyzická vrstva nedává na výběr tři varianty jako původní standard 802.11, ale je zde pouze varianta s rozprostřeným spektrem DSSS. Tento standard je plně kompatibilní s původním standardem 802.11 a nabízí přenosovou rychlost 11 Mbit/s, což se jedná o nominální přenosovou rychlost.

4.1.2 Standard IEEE 802.11a – Wi-Fi5

Standard 802.11a, který je taktéž označován jako Wi-Fi5 byl schválen roku 1999, čili pochází ze stejného roku jako standard 802.11b. Od tohoto standardu se ale značně liší. Nepracuje v bezlicenčním pásmu jako 802.11 a Wi-Fi, ale využívá licenční 5 GHz pásmo. Toto pásmo umožňuje využívat vyšších přenosových rychlostí a není zde taková náchylnost k rušení jako u bezlicenčního pásma. Tento standard dosahuje přenosových rychlostí až 54 Mbit/s jako nominální hodnoty, hodnota efektivní je zhruba kolem 30 až 36 Mbit/s.

4.1.3 Standard IEEE 802.11g

Tento standard byl schválen v roce 2003 a je jeden z nejpoužívanějších standardů. Tento standard pracuje stejně jako jeho předchůdce 802.11b v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz, ale nabízí vyšší přenosovou rychlost až 54 Mbit/s, s tím ale také nevýhodu kratšího dosahu. Zařízení pracující na standardech 802.11g a 802.11b mají zajištěnou plnou kompatibilitu.

4.1.4 Standard IEEE 802.11n

Ani rychlejší standardy Wi-Fi, tj. 802.11a/g se nemohou srovnávat s běžným ethernetem a to především v menší efektivitě bezdrátového přenosu zapříčiněné ztrátami, šifrováním, apod. Uživatelé této technologie vyžadovali mnohem vyšší rychlost, která přichází v podobě standardu 802.11n. Tento standard se od původních standardů liší hlavně ve zvýšené přenosové rychlosti pomocí principu MIMO (Multiple Input, Multiple Output). Princip MIMO počítá s více anténami na straně vysílače i přijímače oproti tradičně používané antény jediné (SISO – Single Input, Single Output).

4.2 Technologie ZigBee a standard IEEE 802.15.4

Jedná se o standard bezdrátové komunikace, který nachází uplatnění zejména v oblasti řídicí techniky a automatizace. Tento mezinárodní komunikační standard je schválen národní organizací ZigBee Alliance a standardizační organizací IEEE. Tuto technologii vyvíjelo a nadále vyvíjí mezinárodní konsorcium firem ZigBee Alliance a mezi hlavní společnosti podílející se na přímém vývoji patří především společnost Freescale Semiconductor, Mitsubishi Electric, Honeywell, Motorola, Samsung, Philips a další. ZigBee standard je založený na využití fyzické a linkové vrstvy podle standardu označovaného jako IEEE 802.15.4 a poskytuje nízkopříkonovou a cenově nenákladnou bezdrátovou komunikaci.

4.2.1 Topologie ZigBee sítí

Dle specifikace ZigBee se zařízení dělí na zařízení s plnými funkcemi FFD (Full Functional Device) a zařízení s omezenými funkcemi RFD (Reduced Functionality Device). Každá síť tedy musí obsahovat nejméně jedno zařízení typu FFD (koordinátor sítě). Další zařízení ve funkci FFD mohou být směrovače a RFD jsou koncové zařízení (stanice).

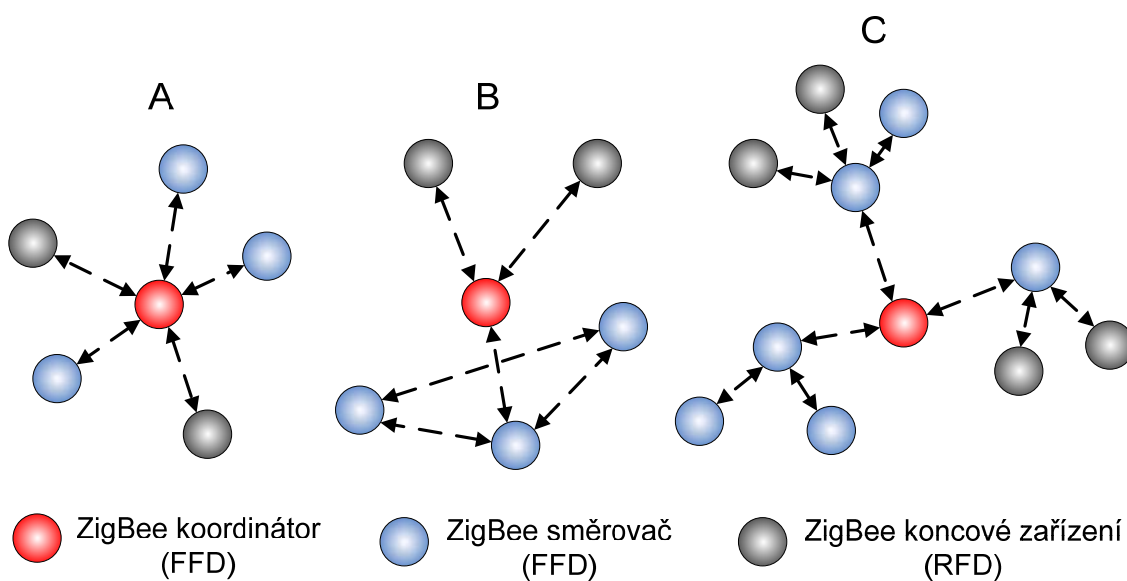
Standard IEEE 802.15.4 používá pro adresaci jednotlivých zařízení binární adresovací kódy, které mohou být buď dlouhé (64 bitové) nebo zkrácené (16 bitové).

Jsou definovány tři typy síťových topologií:

Topologie hvězda (star topology) - tato struktura sítě obsahuje jedno FFD zařízení, které plní funkci koordinátora sítě a ostatní zařízení jsou ve funkci koncových zařízení. Koordinátor je ve funkci přijímání, kromě toho kdy sám vysílá.

Topologie strom (tree topology) - u této topologie nemusí všechna zařízení komunikovat přímo s koordinátorem sítě a mohou využít jiné zařízení (směrovače) jako svého prostředníka. Tedy RFD zařízení připojená k FFD koordinátoru jsou u tohoto typu spojení nahrazena FFD zařízeními, ke kterým se mohou připojovat další FFD nebo RFD zařízení. Tímto se docílí mnohem větší vzdálenosti mezi koncovým zařízením a koordinátorem.

Topologie síť (mesh topology) - tato topologie kombinuje vlastnosti topologií strom a hvězda. Umožňuje sestavit síť libovolným způsobem, proto je velmi často používána.



Obr. 4.1 Topologie ZigBee sítí typu a) hvězda (star), b) síť (mesh), c) strom [17]

5 VÝBĚR BEZDRÁTOVÝCH STANIC PRO KOMUNIKACI S MOBILNÍM OBJEKTEM

Po týmové konzultaci jsme se zaměřili na bezdrátovou technologii standardu IEEE 802.15.4 a technologii standardu 802.11. Pro tyto technologie byly vybírány bezdrátové moduly, které jsou vhodné pro účely komunikace s mobilním objektem.

Jako vhodné hardwarové prostředky technologie ZigBee byly vybrány následující moduly:



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl:

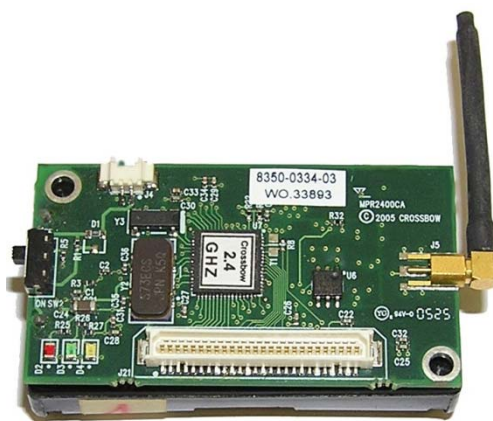
- Popis bezdrátových stanic standardu IEEE 802.15.4., Crossbow MICAz.
- Popis bezdrátových stanic standardu IEEE 802.15.4., Jennic JN5139.



Výklad

5.1 Bezdrátové moduly Crossbow MICAz

Moduly MICAz (obr. 5.1) jsou založeny na standardu IEEE 802.15.4 a komunikují na frekvenci 2,4 GHz. Modul pracuje na platformě MPR2400CA a používá procesor Atmel ATmega128L, více viz [6]. Parametry bezdrátového modulu jsou uvedeny v tabulce (tabulka 5.1).



Obr. 5.1 Bezdrátový modul MICAz

Tabulka 5.1 Parametry bezdrátového modulu MICAz

Platforma MPR2400CA	Popis
Frekvence vysílače	2,4 GHz
Přenosová rychlost	250 kb/s
Sériové komunikační rozhraní	UART
Velikost programové flash paměti	128 kB
Konfigurační paměť EEPROM	4 kB
Výstupní výkon rádia	-24 dBm až 0 dBm
A/D převodník	10 bit – 8 kanálů
Spotřeba v aktivním módu	8 mA
Spotřeba v režimu spánku	< 15 μ A
Spotřeba při vysílání	27 mA
Spotřeba při příjmu	19,7 mA
Dosah uvnitř budov	20 - 30 m
Venkovní dosah	150 m
Napájení	2,7 - 3,3 V

K vývojovému kitu patří také sběrné stanice, viz obr. 5.2, které jsou taktéž nazývány jako programovací moduly. Sběrné stanice tvoří základní bránu pro komunikaci s PC. Data z bezdrátových modulů jsou odesílána přímo nebo prostřednictvím dalších modulů do sběrné stanice, která odesílá naměřená data do PC, kde dochází k ukládání, popř. dalšímu zpracování naměřených dat. Pomocí této stanice můžeme také bezdrátové moduly programovat.

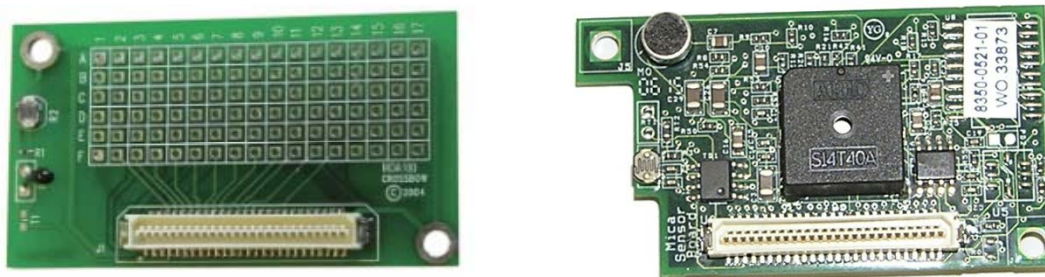


Obr. 5.2 Sběrná stanice MIB520

Sběrná stanice MIB520 používá ke komunikaci s PC sériové rozhraní s dostupným USB portem. Při připojení dojde k vytvoření dvou virtuálních sériových portů, z nichž zpravidla port s nižším označením slouží ke sběru dat a s vyšším k programování modulů.

Poslední částí vývojového kitu jsou tzv. měřicí karty (desky) s označením MDA100CB a MTS300CA/310CA, viz obr. 5.3. MDA100CB je označení pro univerzální karty, které disponují již zabudovaným termistorem YSI 44006 a fotosenzorem Clainex

CL94L. Deska nabízí možnost připojení dalších volitelných snímačů s normovaným výstupem 0 – 3 V. Komunikace probíhá po sběrnici I²C. Více o měřicí kartě MDA100CB viz [5].

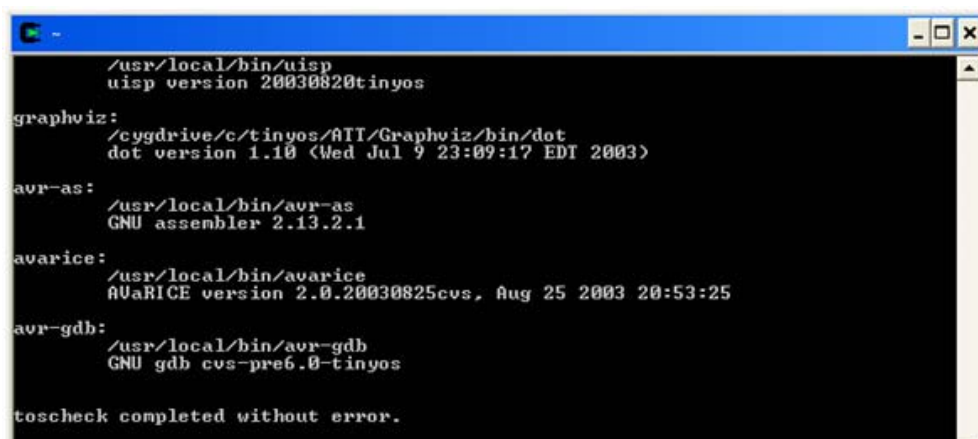


Obr. 5.3 Měřicí karty (desky), vlevo – MDA100CB, vpravo – MTS300CA

Karta MTS300CA je velmi podobná k předchozí měřicí kartě, odlišuje se pouze typem připojeného termistoru. Modul je osazen termistorem Panasonic ERT - J1VR103J, fotosenzorem Clainex CL94L a mikrofonom LM567 CMOS. U vyšších typových označení těchto karet bývá navíc snímač zrychlení s označením ADXL202JE, či dvouosý magnetometr Honeywell HMC1002.

Společnost Crossbow nabízí jako podporu pro nasazení senzorových sítí operační systém TinyOS. Jedná se o operační systém, který má komponentově založenou strukturu pro zrychlení implementace navržených algoritmů do bezdrátové sítě, kde jeho součástí je programovací jazyk nesC, simulační nástroj TOSSIM a další nástroje, které jsou užitečné k vývoji aplikací pro bezdrátové moduly. NesC je jazyk se syntaxí jazyka C a je účelně vyvinut pro bezdrátové senzorové sítě. Aplikace vytvořená v tomto jazyce je složená z jednotlivých komponent, přístupových souborů, které daná aplikace využívá ke své činnosti nebo naopak poskytuje data pro tyto komponenty. Jedná se o samostatné soubory obsahující algoritmy ovládající danou periferii. Pro jejich provázání je nutné, aby byl použitý soubor definován v záhlaví každého souboru. Zde je viditelná syntaxe jazyka C vycházející z definice hlavičkových souborů.

Velmi důležitou součástí operačního systému TinyOS je tzv. emulátor Cygwin, viz obr. 5.4, což je nástroj, který slouží pro komunikaci a programování bezdrátových modulů. Jedná se o emulátor systému Linux pod operačním systémem MS Windows a je součástí instalace balíčku TinyOS, více viz [26].



```
/usr/local/bin/uisp
uisp version 20030820tinyos

graphviz:
/cygdrive/c/tinyos/ATT/Graphviz/bin/dot
dot version 1.10 (Wed Jul 9 23:09:17 EDT 2003)

avr-as:
/usr/local/bin/avr-as
GNU assembler 2.13.2.1

avarice:
/usr/local/bin/avarice
AVaRICE version 2.0.20030825cvs, Aug 25 2003 20:53:25

avr-gdb:
/usr/local/bin/avr-gdb
GNU gdb cvs-pre6.0-tinyos

toscheck completed without error.
```

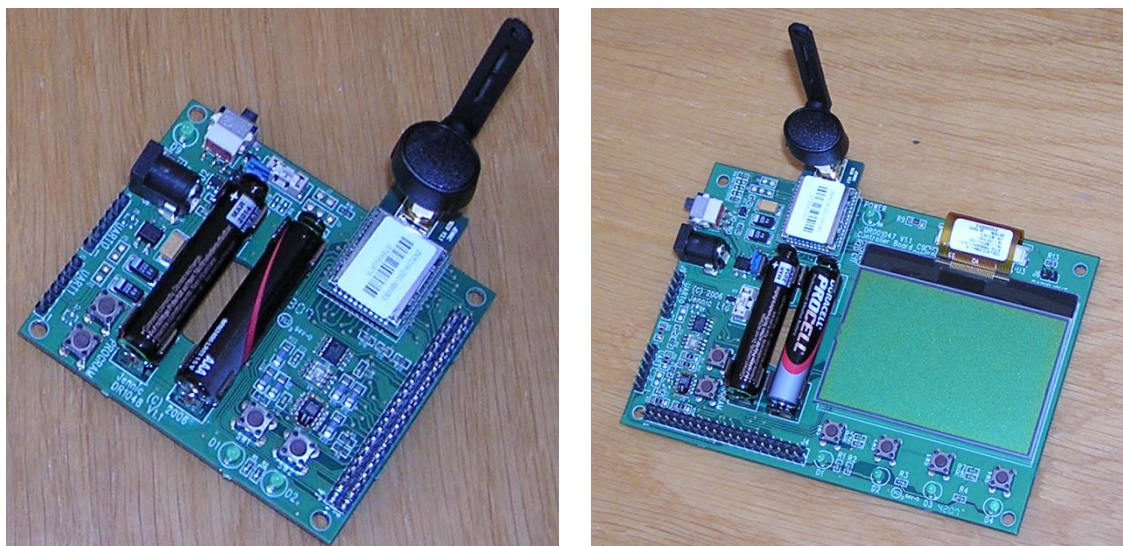
Obr. 5.4 Emulátor Cygwin pod operačním systémem MS Windows

Tento vývojový kit se liší oproti předešlému (od společnosti Freescale) nižší cenou a hlavně větší modularitou, kdy k bezdrátovým stanicím lze připojit podporované desky s již zabudovanými snímači, popř. pájivá pole s možností připojení dalších snímačů s požadovaným vstupním signálem na straně desky.

Stejně jako u předchozích popisovaných bezdrátových modulů je i u těchto modulů použito 8 bitových mikroprocesorů (ATMEL AVR ATmega128L), což nemusí být dostačující pro některé typy aplikací. Navíc pokud vyžadujeme vyšší přenosovou rychlost, jsme odkázáni pouze na vývoj aplikací se ZigBee stackem. Zcela jiné varianty, co se síťového rozhraní a komunikačního protokolu týče, nabízí vývojový kit Jennic JN5139 - EK010.

5.2 Vývojový kit Jennic JN5139 – EK010

Společnost Jennic nabízí vývojový kit s typovým označením JN5139 – EK010. Tento vývojový kit včetně dalších samotných bezdrátových modulů lze použít pro realizaci přenosu dat mezi mobilním objektem a operátorem. Celý vývojový kit se skládá z modulů s označením JN5139-Z01 a desek tvořící interface pro snadnější návrh a realizaci aplikací pro bezdrátové moduly. Vývojový kit obsahuje základnovou (řídící) desku a čtyři senzorové desky. Bezdrátové moduly pracují na frekvenci 2,4 GHz a jsou vybaveny SMA anténním konektorem či keramickou anténou. Moduly s SMA konektorem nabízí vyšší vysílací výkon a tedy větší dosah oproti modulům s keramickou anténou. Tomuto faktu také odpovídá vyšší proudový odběr při vysílání a přijímání dat. Řídící a senzorové desky disponují hardwarovým rozhraním dovolující snadnější návrh vyvíjených aplikací. Tyto desky vývojového kitu s připojeným bezdrátovým modulem můžeme vidět na. obr. 5.5.



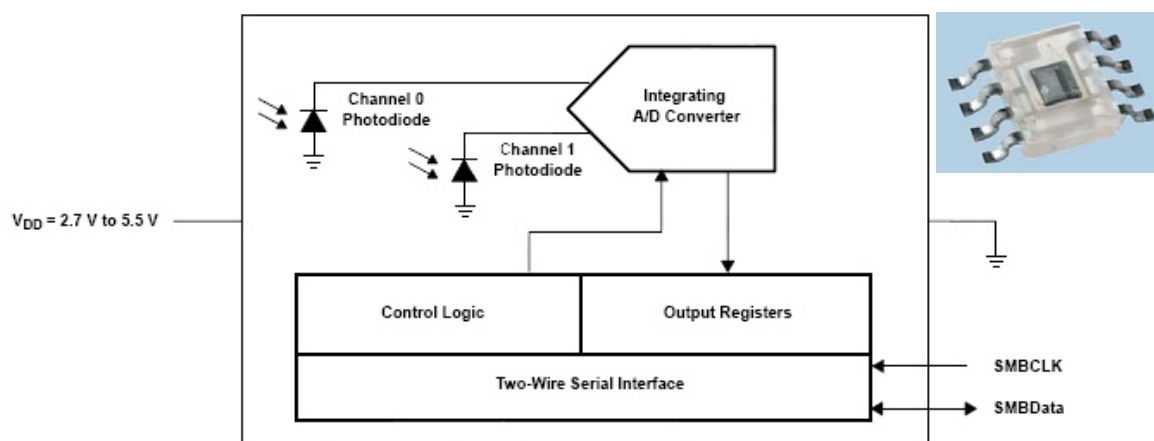
Obr. 5.5 Sensorová a řídicí deska s modulem JN5139

Senzorové desky poskytují hardwarové rozhraní pro snadnější vývoj aplikací. Řídicí deska navíc obsahuje LCD displej s rozlišením 128 x 64 pixelů a větší počet využitelných tlačítek a světelných diod.

Rozšiřující desky jsou osazeny usměrňovačem napětí a stabilizátorem, přičemž je možné je napájet externím napájecím zdrojem o velikosti stejnosměrného napětí 5 V až 7 V nebo střídavým napětím o velikosti 4,5 V až 6 V. Napájecí vstup je chráněn proti obrácené polaritě. Při volbě akumulátorového napájení je potřeba přepnout piny spínače J2, viz příloha I, na desce do příslušné polohy. Pro akumulátorové napájení je potřeba velikosti napětí 3 V, což odpovídá dvěma 1,5 V akumulátorům velikosti AAA.

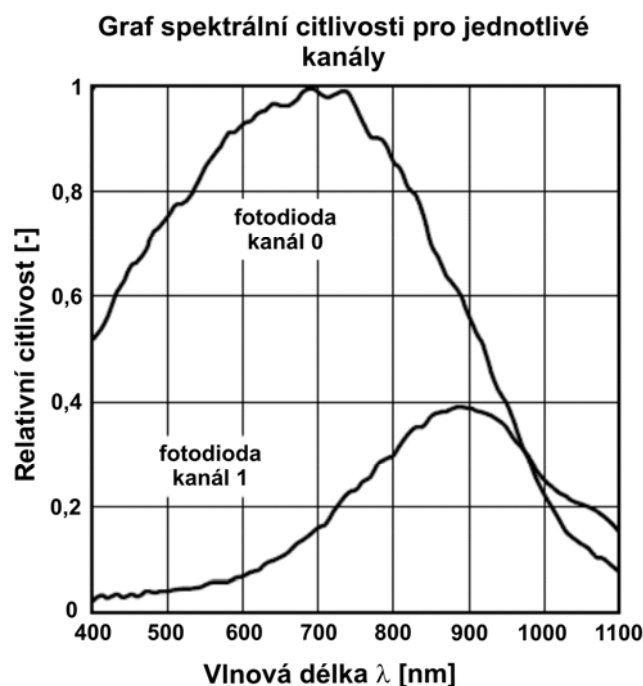
5.2.1 Použité snímače na senzorových a řídicích deskách

Snímač osvětlení TAOS TSL2550 konvertuje intenzitu osvětlení do digitálního signálu. Kombinuje dvě fotodiody, obsahuje A/D převodník a SMBus sériové rozhraní na samostatném CMOS integrovaném obvodu poskytující měření osvětlení skrz 12-bitový dynamický rozsah, viz obr. 5.6. Pro získání hodnot osvětlení, které jsou přibližné citlivosti lidského oka, jsou použity digitální výstupy dvou kanálů s používanými jednotkami Lux.



Obr. 5.6 Vnitřní struktura snímače osvětlení TAOS TSL 2550, vpravo je jeho podoba [20]

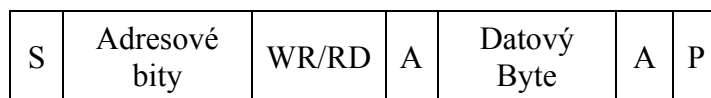
Tento snímač je navržen pro světelné zdroje s větší vlnovou délkou, kde jedna fotodioda (kanál 0) je citlivá na viditelné a infračervené světlo a druhá fotodioda (kanál 1) je primárně citlivá jen na infračervené světlo. A/D převodník převádí proudy z jednotlivých kanálů fotodiód na digitální signály. Nejdříve dochází k převodu kanálu 0 a následně kanálu 1. Doba trvání převodu jednoho kanálu je zhruba 400 ms a výsledek konverze je uložen do výstupního registru A/D převodníku. Digitální výstup kanálu 1 je využíván pro kompenzaci efektu infračervené složky okolního světla na kanálu 0 digitálního výstupu. Tyto digitální výstupy obou kanálů jsou použity pro získání hodnoty, která se přibližuje citlivosti lidského oka v obvykle používaných jednotkách Lux. Graf spektrální citlivosti pro obě fotodiody můžeme vidět na obr. 5.7.



Obr. 5.7 Graf spektrální citlivosti pro jednotlivé kanály fotodiód snímače TSL 2550 [20]

Komunikace snímače s mikroprocesorem probíhá pomocí dvou vodičového sériového rozhraní. Snímač disponuje 8 – bitovým příkazovým registrem, jehož zápis

a čtení je přes sběrnici SMBus. Snímač má navíc implementovaný tzv. „send byte“ protokol a „receive byte“ protokol, které dovolují zápis a čtení do připojeného zařízení. Struktura těchto rámců je vidět na obr. 5.8, kde rámce se liší v adresaci a bitu povolující zápis či čtení.



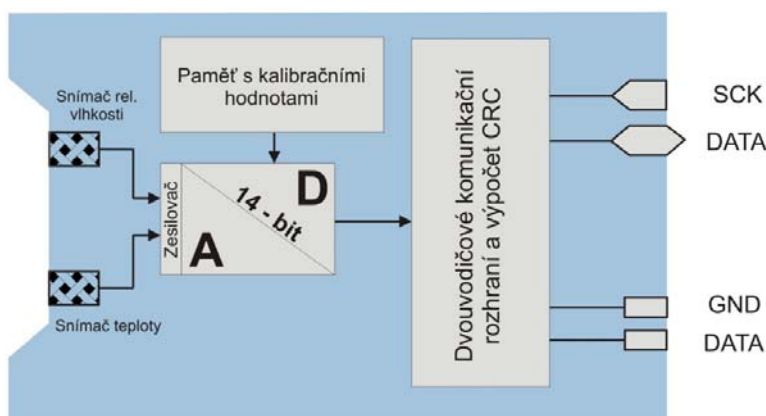
S – startovací bit WR – bit povolující zápis RD – bit povolující čtení
A – ACK potvrzení zahájení relace P – stop bit

Obr. 5.8 Struktura komunikačního rámce snímače TSL 2550

Tento typ snímačů je velmi hojně používán v aplikacích, kde je potřeba měřit intenzitu okolního osvětlení pro možnosti řízení, např. podsvícení displejů u notebooků, PDA zařízení apod.

Snímač teploty a relativní vlhkosti Sensirion SHT11 je dalším snímačem, kterým disponují senzorové a řídicí desky vývojového kitu. Jedná se o inteligentní senzor, který snímá teplotu a relativní vlhkost na bázi kapacitního polymeru. Měřená teplota je využívána pro kompenzaci měřené relativní vlhkosti, kde oba snímače jsou připojeny na 14 – bitový A/D převodník. Získaná digitální data jsou následně upravena do formy, která je vhodná pro přenos po dvou vodičové sběrnici. Komunikace je velmi podobná jako po sběrnici I²C.

Při měření neelektrických veličin bývá problémem kalibrace. Snímače obecně mají danou přesnost, ale jsou velmi často nelineární. Snímač SHT11 umožňuje měřit teplotu a relativní vlhkost bez nutnosti kalibrace, protože snímač obsahuje vnitřní kalibrační paměť, kde jsou uloženy kalibrační koeficienty sloužící k internímu přepočítání údajů ze senzorů.



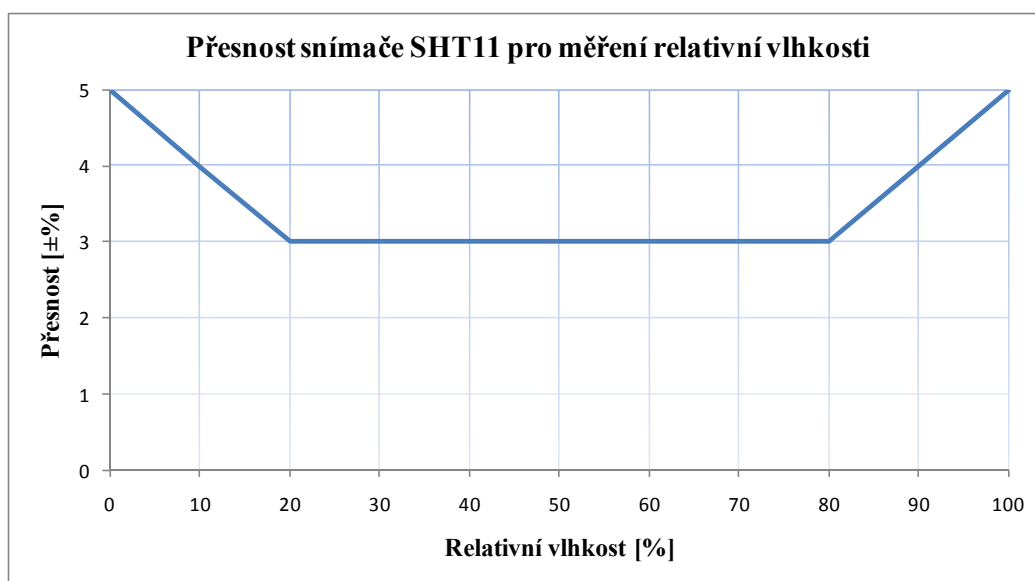
Obr. 5.9 Snímač teploty a relativní vlhkosti SHT11 a jeho blokový diagram

Mezi výhody tohoto snímače patří nejen kalibrace, ale také velmi nízká spotřeba, dlouhodobá stabilita, malé rozměry a automatický režim snížené spotřeby. Jeho charakteristické vlastnosti zobrazuje následující tabulka (tabulka 5.2).

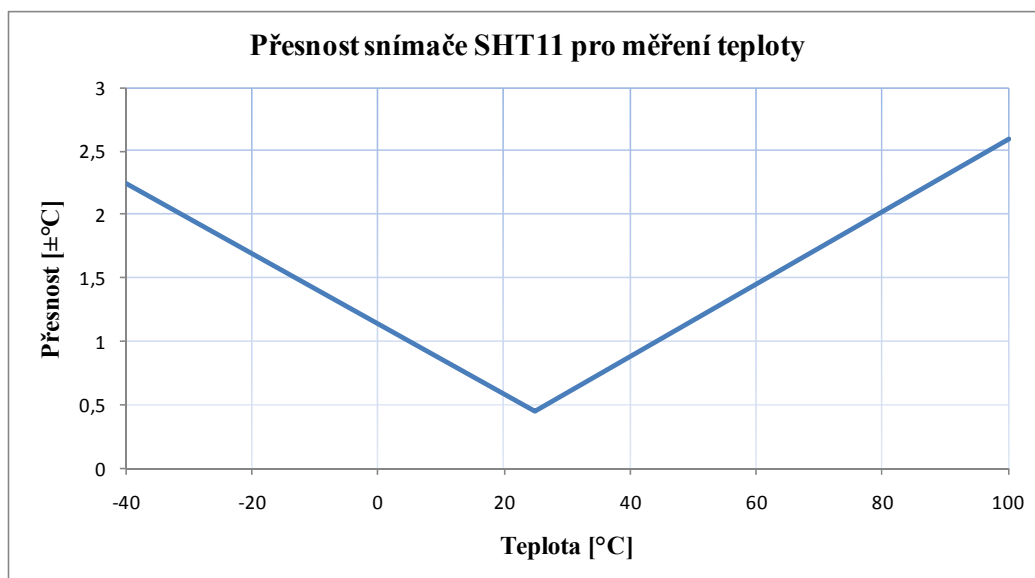
Tabulka 5.2 Charakteristické vlastnosti snímače SHT11

SHT11	Měření vlhkosti	Měření teploty
Odchylka relativní vlhkosti [RV] a teploty při 25 °C	$\pm 3 \%$	$\pm 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Rozlišení	0,03 % RV	0,01 °C
Opakovatelnost	$\pm 0,1 \%$ RV	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Rozsah měření	0 – 100 % RV	-40 – 123,8 °C
Napájecí napětí	2,4 – 5,5 V	
Proudový odběr při měření	550 μA	
Proudový odběr v režimu sleep	0,3 μA	

Závislost přesnosti snímače vlhkosti SHT11 na relativní vlhkosti vyjádřené v procentech můžeme vidět na obr. 5.10. Na obr. 5.11 je uvedena závislost přesnosti snímače teploty na rozsahu měřené teploty.

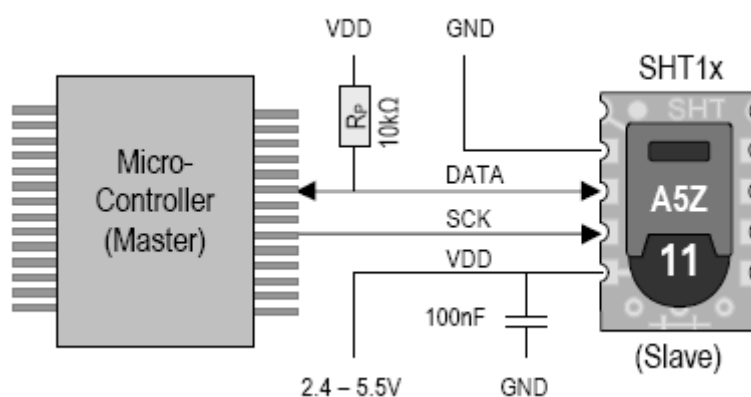


Obr. 5.10 Přesnost snímače relativní vlhkosti Sensirion SHT11



Obr. 5.11 Přesnost snímače teploty Sensirion SHT11

Senzor je možné přímo připojit k mikroprocesorové jednotce, kde komunikace se snímačem je typu master/slave. Vstup SCK hodinového signálu se používá k synchronizaci komunikace mezi mikroprocesorem a snímačem. Po datovém vodiči jsou přenášena obousměrně data, kde inicializace komunikace se provádí přivedením logické hodnoty 0 na datový vodič s následným nastavením stavu do logické hodnoty 1. Poté dochází k adresaci snímače a vyslání příkazu (příkaz pro vyhodnocení a zaslání informace o měřené vlhkosti či teplotě). Po vyslání potvrzujícího ACK paketu je hodnota na datovém vodiči nastavena na hodnotu logické úrovně 1 a procesor očekává dokončení měření nastavením datového vodiče do logické úrovně 0. Na obr. 5.12 je možné vidět propojení snímače s mikroprocesorem a průběh komunikace, viz [19].



Obr. 5.12 Propojení snímače SHT11 s mikroprocesorem

Pro výpočet měřené teploty snímačem je nutné použít vztah umožňující přepočítat hodnoty z A/D převodníku na teplotu ve stupních Celsia. Pro napájecí napětí senzoru 5 V a použitý 12 – bitový převodník platí rovnice s těmito přepočtovými konstantami:

$$T = d_1 + d_2 \cdot DM_T, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

$$T = -40,1 + 0,04 \cdot DM_T, \quad [^{\circ}\text{C}]$$

kde:

d_1, d_2 - konstanty převodu,

DM_T - 12 – bitový výsledek měření teploty.

Pro výpočet měřené relativní vlhkosti je potřeba použít následující vztah:

$$RV_{linear} = c_1 + c_2 \cdot DM_{RV} + c_3 \cdot DM_{RV}^2, \quad [\%] \quad (2)$$

$$RV_{linear} = -4 + 0,0405 \cdot DM_{RV} + (-2,8 \cdot 10^{-6}) \cdot DM_{RV}^2. \quad [\%]$$

Pro teploty, které se vzdalují teplotě 25 °C je potřeba použít teplotní kompenzaci pro správný výpočet relativní vlhkosti:

$$RV_{kompenz} = (T - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot DM_{RV}) + RV_{linear}, \quad [\%] \quad (3)$$

$$RV_{kompenz} = (T - 25) \cdot [0,01 + (8 \cdot 10^{-5}) \cdot DM_{RV}] + RV_{linear}, \quad [\%]$$

kde:

c_1, c_2, c_3, t_1, t_2 - konstanty převodu,

T - vypočtená teplota [$^{\circ}\text{C}$],

DM_{RV} - 12 – bitový výsledek měření relativní vlhkosti.

Tento typ senzoru je vhodný pro měření v průmyslových aplikacích, jako např. v automobilovém průmyslu či různých lékařských přístrojích, měření teploty při vytápění, v klimatizacích apod.

Vývojový kit bude použit pro aplikaci bezdrátového měření veličin na mobilním objektu. Měřit se bude teplota, relativní vlhkost a intenzita osvětlení. Měřené veličiny budou podávat informaci o stavu v jakém se momentálně mobilní objekt nachází. Takto lze identifikovat, zda je mobilní objekt (robot) v prostředí se zvýšenou teplotou (může se jednat o prostředí, kde vznikl požár), kde dochází také ke změně hodnoty relativní vlhkosti a konečně také intenzita osvětlení, která včetně s kamerovým systémem podává informaci o změnách v daném prostředí. Více o bezdrátových modulech a popisu snímačů sensorových a řídicích desek, viz [17][16].

6 PŘENOS DAT MEZI BEZDRÁTOVÝMI MODULY MOBILNÍHO OBJEKTU A OPERÁTORA

V této kapitole si popíšeme jakým způsobem dochází k přenosu dat a případného směrování rámců při komunikaci mezi bezdrátovým modulem mobilního objektu a modulem operátorského stanoviště. Přenos probíhá na frekvenci 2,4 GHz a jako bezdrátové moduly byly použity moduly standardu IEEE 802.15.4, konkrétně JN5139. Ty slouží k přenosu dat ze snímačů teploty, rel. vlhkosti, osvětlení, akcelerometru, dotykových senzorů a dat ze snímačů zvukových signálů. Pro přenos obrazu je nutné využít standard IEEE 802.11, nejlépe příbuzný standard dosahující vyšších rychlostí přenosu, konkrétně standard IEEE 802.11n.



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl:

-  Přenos dat mezi moduly JN5139, standardu IEEE 802.15.4.
-  Popis procesu připojení modulu do sítě.
-  Popis směrování rámců.



Výklad

6.1 Přenos dat a směrování rámců

Normálním režimem bezdrátových modulů je odesílání a příjem dat od ostatních modulů. Jsou podporovány dvě metody, jak odesílat data z modulu do jiného modulu v závislosti na topologii sítě.

- Použitím adresy cílového modulu.
- Použitím adresy modulu, který představuje další hop (skok) pro síťovou komunikaci. Tedy následující modul, přes který bude komunikace probíhat, aniž by byl zrovna cílovým modulem.

Pro každou síťovou formaci ale platí, že pakety jsou předávány v síti od modulu k modulu, dokud nedorazí ke svému cíli, což odpovídá popsané druhé variantě. Mechanismus směrování paketů vyžaduje, aby koordinátor a směrovače měly uloženy informace o směrování. Jedná se o adresy modulů, které jsou uloženy v modulu ve dvou tabulkách:

Tabulka sousedních modulů – obsahuje adresy všech dětí, tedy modulů, které jsou k němu přímo připojeny a adresu jeho rodiče, ke kterému je sám připojen. Tato tabulka nezabírá v paměti mnoho místa.

Směrovací tabulka – obsahuje adresy všech dětí a to nejen těch, které jsou přímo připojeny k danému modulu, ale i modulů, které jsou níže ve stromové struktuře). Směrovací

tabulka je uložena v paměti modulu jako pole struktur, kde každá tato struktura je typu *tsJenieRoutingTable* a obsahuje informace o směrování. Pole struktur musí být v aplikaci konfigurováno za pomoci dvou globálních parametrů. Jedná se o parametr *gJenie_RoutingTableSize*, který určuje velikost pole a *gJenie_RoutingTableSpace* což je ukazatel na směrovací tabulku v paměti. Tedy že pole začne na tomto daném místě v paměti.

Obě tyto tabulky poskytují informace pro směrovač o všech jeho dětech a koordinátoru dávají informaci o celé síti.

Velikost směrovací tabulky má vliv na obsazení paměti RAM. Tabulka (tabulka 6.1) ukazuje, kolik paměti vyžaduje stack pro různou velikost směrovací tabulky.

Tabulka 6.1 Paměť vyžadovaná stackem pro různou velikost směrovací tabulky

Velikost směrovací tabulky	Využívaná paměť [kB]	
	Koordinátor	Směrovač
25	41	41
100	42	42
250	44	44
500	47	47
1000	53	53

6.1.1 Připojení modulu do sítě

Když se připojí nový modul do bezdrátové sítě, musí se nejdříve v síti identifikovat. Musí být pro něj povolena možnost doručování zpráv, což není nic jiného, než aktualizace směrovacích tabulek příslušných směrovačů a koordinátoru.

Kroky, které se dějí bezprostředně po připojení nové stanice do sítě, vypadají následovně:

1. Nový modul odešle informaci do koordinátoru sítě. Uzly, kterými zpráva prochází (směrovače) si novou adresu modulu uloží do směrovací tabulky spolu s adresou modulu, který předal paket dále směrem nahoru v síti.
2. Když je zpráva doručena ke koordinátoru sítě, koordinátor odpoví zpět novému modulu potvrzením, že založil novou cestu a přidal si jej do směrovací tabulky. Zároveň posílá odezvu rodiči nového modulu, zda byl modul v síti povolen nebo zakázán.
3. Jakmile je modul v síti povolen, je na modulu do aplikační vrstvy generováno oznámení o připojení do sítě a také je uložena adresa rodičovského modulu.

6.1.2 Proces směrování

Po přijetí zprávy směrovačem dojde k následujícímu postupu směrování:

1. Směrovač nejdříve zkontroluje cílovou adresu, kam má být zpráva doručena a v případě, že je určena pro něj, zpracuje obsah zprávy.

2. Pokud zpráva není určena pro tento směrovač, zkontroluje tabulku sousedních modulů, zda je zpráva určená pro modul, který je jeho dítětem, tedy je přímo v jeho uzlu. Pokud je, zpráva je modulu odeslána.
3. Pokud předchozí testování nebylo úspěšné a zpráva má být doručena jinému modulu, směrovač zkontroluje svou směrovací tabulku, zda je zpráva určena pro modul, který patří do jeho potomků. Pokud tomu tak je, odešle zprávu na příslušný modul (směrovač), který patří do uzlu směrem k cílové adrese.
4. Když zpráva není určena pro nějakého z potomků směrovače, musí směrovač zprávu předat dál směrem výše ve stromové topologii na další směrovač. Pro koordinátor platí stejné pravidlo směrování, vyjma toho, že zpráva nemůže být předána dále směrem výše ve stromu.

Po celou dobu zde hovoříme o zprávách, nicméně je potřeba doplnit, že tyto zprávy jsou organizovány jako rámce skládající se z jednotlivých částí. Rámce obsahují přenášená data a v závislosti na jejich typu rozlišujeme účel komunikace.

6.1.3 Potvrzení o přijetí zprávy

V případě, že odesíláme zprávu z jednoho modulu do druhého, může být modul, který zprávu obdržel požádán, aby odeslal zpět potvrzení, že zpráva byla skutečně doručena. Pokud ihned po přijetí zprávy nedostane modul odpověď o doručení, bude se snažit odeslat zprávu znovu. Potvrzovací zprávy se nazývají jako *Acknowledgements* a jsou implementovány do aplikační vrstvy. Tyto zprávy můžeme uživatelsky povolit nebo zakázat.

6.1.4 Pořadová čísla přenášených zpráv

Každá vyslána zpráva má své pořadové číslo. Toto číslo je uloženo v počátečních Byte přenášeného rámce a říká, v jakém pořadí byly jednotlivé zprávy vyslány. Moduly si tuto posloupnost přijatých zpráv ukládají a spolu s tímto číslem je uložena i adresa modulu, odkud zpráva pochází. Koncová stanice si ukládá pořadové číslo pouze poslední zprávy a je tedy přepsáno vždy novou příchozí zprávou. Koordinátor a směrovače si ukládají pořadová čísla posledních deseti došlých zpráv. Jestliže dorazí zpráva, která má stejné pořadové číslo a stejnou adresu vysílajícího modulu, pak je tato zpráva zahozena. Tímto se zabráňuje předávání zpráv do aplikace, které byly vícekrát přijaty. Vždy ale platí, že nová zpráva, potažmo nová položka v historii pořadových čísel nahrazuje nejstarší uloženou položku.

Více o přenosu zpráv mezi bezdrátovými moduly, procesu směrování rámců, potvrzování příchozích zpráv, pořadových čísel, auto-pingu apod., viz [17].

7 DIGITÁLNÍ SIGNÁLOVÉ PROCESORY

Protože základní jednotkou navrženého mobilního objektu je digitální signálový procesor (DSP), pak v této kapitole se budeme zabývat popisem DSP.



Čas ke studiu: 0,5 hodin



Cíl:

- Seznámení se signálovým procesorem DSP.
- Problematika při zpracování signálů.



Výklad

Protože základní jednotkou navrženého mobilního objektu je digitální signálový procesor (DSP), pak v této kapitole se budeme zabývat popisem DSP.

DSP (Digital Signal Processors) jsou procesory, které můžeme najít v různých typech zařízení. Slouží pro filtraci signálů, jejich komprimaci či dekomprimaci, rekonstrukci dat z analogových signálů obsahujících šum apod.

První typy digitálních signálových procesorů vznikly na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let minulého století. Do dnešní doby prošly značným vývojem a také vylepšeními a to nejen ve zmenšování jejich rozměrů. Postupně se začaly vytlačovat analogové počítače a s nástupem polovodičových čipů, založených na bipolární nebo unipolární technologii došlo k nahrazování za digitální signálové procesory. V rámci nových pokročilých výzkumů v této oblasti vznikaly i nové teorie a poznatky o zpracování signálů. Můžeme uvést teoremy jako např. Shannonův-Nyquistův-Kotělnikovův teorém nebo také vznik nových filtrů jako FIR filtrů, IIR filtrů, transformací signálu (digitální Fourierova transformace, rychlá diskretní digitální Fourierova transformace) apod.

U digitálních signálových procesorů je také velmi důležitý pojem latence při zpracování signálů v reálném čase. Tedy jedná se o zpoždění, které vzniká při zpracování a modifikaci analogového nebo digitálního signálu. Můžeme si to představit na konkrétním případě našeho mobilního objektu při zpracování obrazového nebo zvukového signálu, kdy dochází ke vzorkování analogového signálu a zpracování takového signálu je zpožděno. Vzhledem k naprogramování se ovšem zpoždění nebude měnit a je předem známé. Pokud by se jednalo o příliš velké zpoždění nebo nepravidelné pak na výstupu můžeme sledovat chyby, které nemusí být způsobeny pouze nedokonalým hardwarem, tedy jeho výkonem, ale může se jednat o nedokonalost naprogramovaného software.

8 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ Z MOBILNÍHO OBJEKTU

V této kapitole si popíšeme prostředky, pomocí kterých lze data z mobilního objektu získávat, zpracovávat a vyhodnocovat. Na základě týmových konzultací byly vybrány signálové procesory, jako výkonné hardwarové nástroje pro zpracování a úpravu signálů. V dalších kapitolách si stručně popíšeme práci ve fixed a floating point, popis hardwarových prostředků a obecnou strukturu signálových procesorů.



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl:

-  Popis způsobu zpracování analogových a digitálních signálů z připojených snímačů.
-  Seznámení s číselnými formáty DSP.
-  Výhody a nevýhody plovoucí a pevné řádové čárky.
-  Problematika při zpracování signálů.
-  Charakteristika digitálních signálových procesorů.
-  Architektura DSP řady PIC32 a TI F28xxx.



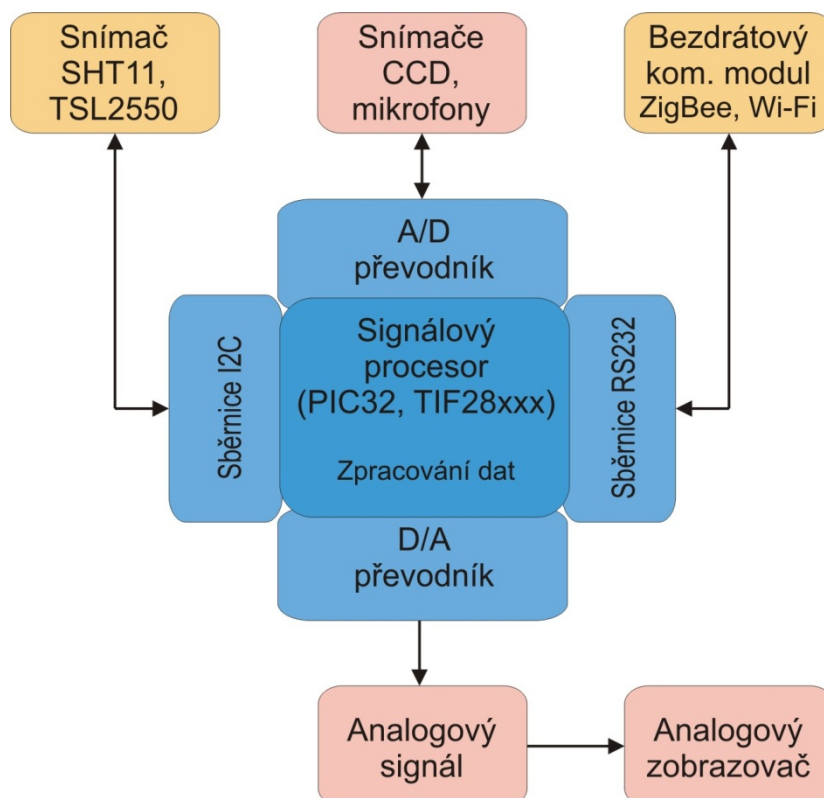
Výklad

8.1 Zpracování analogových a digitálních signálů z připojených snímačů

Signálový procesor, který je jádrem mobilního objektu (robota) musí být schopen zpracovat analogové a digitální signály z připojených snímačů, jako z CCD čipu kamery, snímače teploty a relativní vlhkosti SHT11, osvětlení TSL2550, či mikrofónů. Digitalizace analogového signálu tak, aby jej mohl zpracovat signálový procesor se děje v A/D převodníku. Analogový signál, přicházející ze snímače a čtený na vstupu, je přiváděn na analogově/digitální převodník, ve kterém dochází k digitalizaci signálu a tedy zároveň ke vzorkování signálu. Program, uložený v DSP, zpracovává jednotlivé vzorky (sampler) a výsledkem je opět proud číselných vzorků. Tento tok dat je možné formátovat a pomocí sériové sběrnice RS232 odeslat do bezdrátového komunikačního modulu ZigBee či Wi-Fi. Signál může být ovšem také převeden zpět na analogový signál pomocí digitálně/analogového (D/A) převodníku. Celý řetězec zpracování analogových a digitálních signálů můžeme vidět na obr. 8.1.

Signály ze snímačů teploty a relativní vlhkosti SHT11 a snímače osvětlení TSL2550 komunikují po dvou vodičové sběrnici, kde komunikace odpovídá komunikaci po sběrnici I²C. Strukturu komunikačního rámce můžeme vidět na obr. 5.8. Signálový procesor přichází data ze snímače resp. sběrnice zpracuje dle vnitřního programu a opět je výsledkem digitální

signál, který lze přenést pomocí sběrnice RS232 do bezdrátového komunikačního modulu nebo signál pomocí D/A převodníku převést na signál analogový.



Obr. 8.1 Zpracování analogových a digitálních signálů mikroprocesorem

8.2 Číselné formáty v DSP

V DSP a obecně mikrokontrolérech jsou dvě možnosti, jak zpracovávat desetinná čísla. Lze je zpracovávat a ukládat jako čísla s pevnou řádovou čárkou tzv. *fixed point numbers* nebo jako čísla s plovoucí řádovou čárkou tzv. *floating point numbers*. Každý z uvedených způsobů má své výhody i nevýhody. Stolní počítače zpracovávají desetinná čísla vždy v plovoucí řádové čárce, avšak hodnoty s pevnou řádovou čárkou je rovněž možné ve vyjimečných případech použít. K tomu je ale potřeba použít speciální knihovny daného programovacího jazyka, které práci s čísly v pevné řádové čárce umožňují.

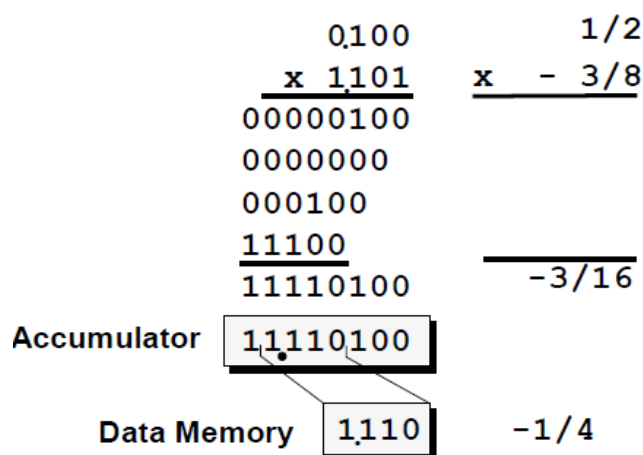
8.2.1 Čísla s pevnou řádovou čárkou

Čísla v interpretaci s pevnou řádovou čárkou jsou definována poměrně jednoduše. Jedná se o posloupnost 8, 16 nebo 32 bitů, přičemž poloha desetinné čárky je algoritmu předem známá. Bity, které leží před desetinnou čárkou mají hodnotu 2^n a bity ležící za desetinnou čárkou mají hodnotu 2^{-n} , kde n je poloha bitu v čísle. Tedy první bit před desetinnou čárkou má hodnotu 2^1 a první bit za desetinnou čárkou má hodnotu 2^{-1} . Rozložení jednotlivých bitů můžeme vidět v tabulce (tabulka 8.1).

Tabulka 8.1 Rozložení jednotlivých bitů při použití pevné řádové čárky

Pozice bitu	7	6	5	4	3	•	2	1	0
Váha bitu	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	•	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}
Desítková váha bitu	16	8	4	2	1	•	0,5	0,25	0,125

V případě, kdy se používají znaménková čísla jsou tato čísla uložena ve formě dvojkového doplňku. Na první pohled se může zdát, že ukládání čísel v podobě pevné řádové čárky vypadá jednoduše, nicméně není tomu tak. Podstatný problém je, že v programovacím jazyce C ani C++ neexistuje ve skutečnosti žádný datový typ pro uložení takového čísla. K dispozici máme pouze datové typy pro uložení čísel v plovoucí řádové čárce (*float* a *double*). Pro uložení celých čísel máme datové typy (*integer* a *long*). Právě datové typy *integer* a *long* se využívají pro uložení čísel v pevné řádové čárce. Ovšem je zapotřebí mít navíc funkce a podpůrné části programu, které budou zajišťovat jejich rozkódování a vědět, kde se desetinná čárka v binárním čísle nachází. Neexistence datových typů není ovšem jediným problémem. Další komplikace nastávají např. při násobení těchto čísel mezi sebou. Při vynásobení dvou čísel s pevnou řádovou čárkou můžeme dostat na výstupu číslo, až s dvojnásobným počtem bitů, tzn. při násobení dvou 4 bitových čísel, bude výsledek obsahovat 8 bitů apod., viz obr. 8.2. Čísla na uvedeném příkladu jsou uložena ve formě dvojkového doplňku, viz [24].



Obr. 8.2 Bitová operace násobení dvou čísel s pevnou řádovou čárkou [24]

Pozitivní vlastností čísel s pevnou řádovou čárkou je, že když z čísla vyjmeme původní počet bitů, tak má přibližně stejnou hodnotu, jako výsledek dekadického násobení, viz obr. 8.2. U násobení dvou 4 bitových čísel vzniká poměrně velká chyba (-1/4 a -3/16 jsou dosti různé hodnoty). Pokud vezmeme v úvahu, že se pracuje se 32 bitovým procesorem a násobíme mezi sebou dvě 32 bitová čísla, tak výsledek bude 64 bitový. Jestliže z tohoto výsledného čísla vyjmeme původních 32 bitů, viz [24], které jsme zanedbali, budou mít hodnoty např. 2^{-30} , což je ve většině případů jen zanedbatelný šum.

Při násobení dvou 32 bitových čísel s pevnou řádovou čárkou narážíme ještě na další problémy, jako je neexistence datového typu v případě výsledku v podobě 64 bitového čísla.

V jazyce C ani C++ není možné uložit tak velký datový typ. Největší je datový typ *long* s délkou 32 bitů. V běžném vývojovém prostředí je toto násobení nereálné. V signálových procesorech a obecně procesorech je tento problém řešen pomocí integrované hardwarové násobičky. Konkrétně TI vyvinulo knihovnu pro obsluhu této násobičky a pro aritmetické operace v pevné řádové čárce tzv. „*IQ-Math library*“. Hardwarová násobička dokáže uložit 64 bitový mezivýsledek a následně jej opět správně převést na 32 bitové číslo. Pro tuto knihovnu TI přímo ustanovilo zvláštní datové typy tzv. IQ dat typy. Více o této problematice, viz [24].

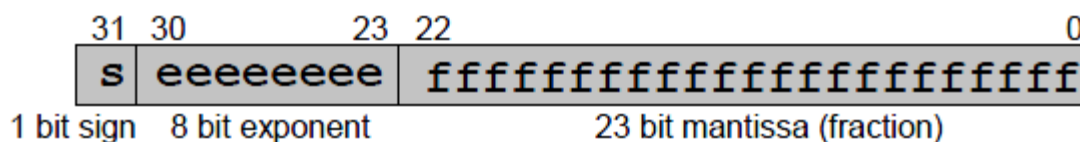
8.2.2 Čísla s plovoucí řádovou čárkou

Z důvodu optimálního výkonu procesoru vyžadují čísla s plovoucí řádovou čárkou implementaci tzv. *Floating Point Unit* (FPU), která je implementována přímo na čipu procesoru. Tato jednotka zajišťuje veškeré výpočetní operace s čísly v plovoucí řádové čárce včetně jejich ukládání ve správném formátu. Čísla s plovoucí řádovou čárkou můžeme také zpracovávat s procesory bez FPU, ale je k tomu zapotřebí knihoven daného programovacího jazyka s patřičnými funkcemi. Zpracování čísel v plovoucí řádové čárce bez FPU ovšem spotřebovává velkou část výpočetního výkonu procesoru a implementovaný algoritmus se tak stává neefektivním a tudíž se tato možnost téměř nepoužívá. Pro čísla v plovoucí řádové čárce byl zpracován standart IEEE 754, který popisuje jak mají být prováděny výpočetní operace s těmito čísly a v jakém formátu jsou ukládána. IEEE 754 definuje dva základní datové typy. Prvním je datový typ o velikosti 32 bitů a v jazyce C mu odpovídá datový typ *float*. Druhý datový typ má velikost 64 bitů a jazyce C mu odpovídá typ *double*. Pro potřeby průmyslových real-time mikrokontrolérů většinou ale postačuje 32 bitový standart, který se také podle IEEE 754 nazývá „*Single precision*“.

V případě real-time mikrokontrolérů od TI je jediným členem rodiny C 2000 s integrovanou FPU procesor F28335. Jeho FPU zpracovává čísla s plovoucí řádovou čárkou právě ve formátu *IEEE 754 Single precision*.

✚ Formát IEEE 754 Single precision

Jak bylo uvedeno výše, tak čísla v tomto formátu mají velikost 32 bitů. Rozdělení jednotlivých bitů podle jejich funkce je na



Obr. 8.3 IEEE 754 Single precision [24]

Číslo v desítkové soustavě je pak z této kombinace jednotlivých bitů vypočítáno podle následujícího vztahu:

$$X_{fp} = (-1)^s \cdot 2^{exp-bias} \cdot m \quad (4)$$

kde:

X_{fp} - výsledné číslo v dekadické soustavě

s - hodnota znaménkového bitu

exp - číslo odpovídající osmibitové hodnotě exponentu

$bias$ - hodnota, díky které je exponent vždy kladný, většinou je volen dle:

$$bias = 2^{eb-1} - 1 \quad (5)$$

eb - počet bitů exponentu

m - číselná hodnota odpovídající 23 bitům mantisy, která je uložena ve formě:

$$m = 1 + m_{22} \cdot 2^{-1} + m_{21} \cdot 2^{-2} + m_{20} \cdot 2^{-2} + \dots + m_0 \cdot 2^{-23} \quad (6)$$

Na ukázkou byla vybrána hodnota 0,01 a reprezentace tohoto čísla ve formátu IEEE 754 Single precision je uvedena v tabulce (tabulka 8.2).

Tabulka 8.2 Reprezentace čísla 0,01 ve formátu IEEE 754

Vyjádření čísla v desítkové soustavě	0,01		
Bitová hodnota čísla podle IEEE 754	Znaménkový bit	Exponent	Mantisa
	0	01111000	0100 0011 1101 0111 0000 1101
Výpočet hodnoty čísla	$X_{single} = (-1)^s \cdot 2^{exp-bias} \cdot m = (-1)^0 \cdot 2^{120-127} \cdot 1,280000392 = 0,01$		

Z tabulky (tabulka 8.2) vyplývá, že ukládání čísel v plovoucí řádové čárce je dosti komplikované. To je také hlavní důvod, proč je pro efektivní algoritmus zapotřebí integrovaná FPU (*Floating Point Unit*). Na druhou stranu navzdory této komplikovanosti je dynamický rozsah a přesnost těchto čísel větší než u čísel s pevnou řádovou čárkou.

V následující kapitole si shrneme výhody a nevýhody vývoje algoritmů pro pevnou a plovoucí řádovou čárkou.

8.3 Výhody a nevýhody plovoucí a pevné řádové čárky

Jeden z nejpodstatnějších rozdílů mezi procesory, které pracují v pevné a plovoucí řádové čárce je jejich cena. Procesory s plovoucí řádovou čárkou jsou podstatně cenově nákladnější a v současnosti je hlavním faktorem při vývoji konečného produktu cena produktu a ta je složena také z ceny procesoru. Kdybychom měli shrnout výhody a nevýhody při použití procesorů s pevnou a plovoucí řádovou čárkou, pak je můžeme uvést do několika bodů popsaných v tabulce (tabulka 8.3).

Tabulka 8.3 Hlavní výhody a nevýhody pevné a plovoucí řádové čárky

<i>Pevná řádová čárka</i>	<i>Plovoucí řádová čárka</i>
<i>Výhody</i>	
Menší pořizovací náklady	Veškeré programy v PC používané pro podporu vývoje algoritmu pracují s FP
Menší rozměry procesoru	Větší dynamický rozsah čísel. Ve většině případů není potřeba řešit přetečení datových typů
Větší rychlost procesoru	Funkce vygenerované z jazyka C nebo C++ z jiných podpůrných nástrojů jsou plně kompatibilní
<i>Nevýhody</i>	
Nutnost použití knihoven pro práci s FP číslly	Větší pořizovací náklady
Pokud se používají překladače od podpůrných vývojových prostředí jako např. z Matlabu, je nutné převedení do fixed point aritmetiky.	Nížší rychlost - menší výkon procesoru při zpracování algoritmu

Procesory s pevnou řádovou čárkou je možné použít do různých výpočetních oblastí. V našem případě mobilního objektu se jedná o zpracování dat z připojených snímačů, dále pro řízení elektronických motorů a servomotorů, zpracování audio signálů a zpracování obrazu.

Pokud uvažujeme o zpracování 3D obrazu, či aplikaci digitálních filtrů signálu, pak je nutné použít signálové procesory s plovoucí řádovou čárkou, protože aritmetika s pevnou řádovou čárkou je v tomto případě nedostačující.

Na je možné vidět různé zápisy kódu v jazyce C a C++ pro případ použití Floating a Fixed Point aritmetiky a knihovny IQMath. Z tabulky je patrné, že při použití jazyka C musíme pro každou operaci včetně násobení a dělení používat funkce knihovny IQMath. V případě algoritmu psaného v jazyce C++ vypadá zápis podobně jako klasický matematický zápis, nicméně se ve skutečnosti používají stejné funkce jako v případě zápisu v jazyce C. Tohoto se docílí pomocí tzv. přetížených metod (*overload metody*) jazyka C++.

Operation	Floating-Point	“IQmath” in C	“IQmath” in C++
type	float A, B;	_iq A, B;	iq A, B;
constant	A = 1.2345	A = _IQ(1.2345)	A = IQ(1.2345)
multiply	A * B	_IQmpy(A, B)	A * B
divide	A / B	_IQdiv(A, B)	A / B
add	A + B	A + B	A + B
subtract	A - B	A - B	A - B
boolean	>, >=, <, <=, ==, !=, &&,	>, >=, <, <=, ==, !=, &&,	>, >=, <, <=, ==, !=, &&,
trig functions	sin(A), cos(A) sin(A*2pi), cos(A*2pi) atan(A), atan2(A, B) atan2(A, B)/2pi sqrt(A), 1/sqrt(A) sqrt(A*A + B*B)	_IQsin(A), _IQcos(A) _IQsinPU(A), _IQcosPU(A) _IQatan(A), _IQatan2(A, B) _IQatan2PU(A, B) _IQsqrt(A), _IQisqrt(A) _IQmag(A, B)	IQsin(A), IQcos(A) IQsinPU(A), IQcosPU(A) IQatan(A), IQatan2(A, B) IQatan2PU(A, B) IQsqrt(A), IQisqrt(A) IQmag(A, B)
saturation	if(A > Pos) A = Pos if(A < Neg) A = Neg	_IQsat(A, Pos, Neg)	IQsat(A, Pos, Neg)

Obr. 8.4 Rozdílný zápis kódu v jazyce C a C++ pro Floating a Fixed Point [24]

8.4 Digitální signálové procesory

Digitální signálové procesory, potažmo procesory obecně, se staly součástí dnešního každodenního života. Můžeme je nalézt jak v domácnosti např. v domácích spotřebičích, tedy v oblasti elektroniky, audio techniky, průmyslu, tak v různých asistenčních systémech např. automobilu nebo ve kterémkoliv ze stolních počítačů.

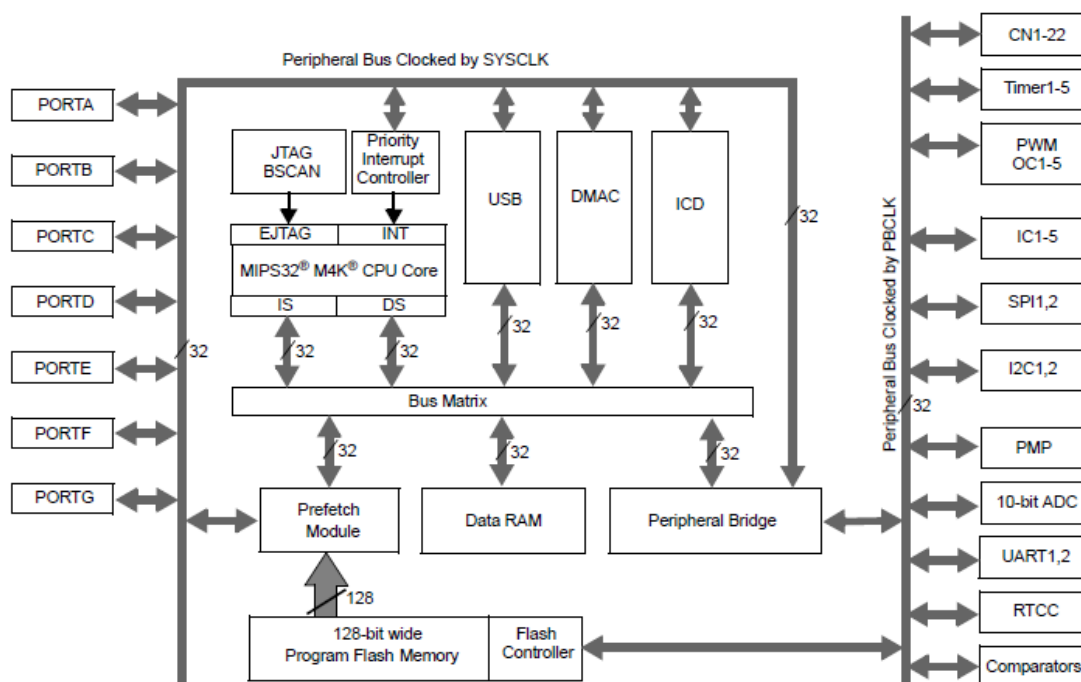
8.4.1 Charakteristika digitálních signálových procesorů

Charakteristickou funkcí a vlastností digitálního signálového procesoru je paralelní provádění jednotlivých instrukcí (Pipelining) v jednom instrukčním cyklu. Jedná se o obrovskou výhodu oproti ostatním počítačům. U dnešních digitálních signálových procesorů je možné provádět až 8 instrukcí v jednom instrukčním cyklu.

Pro možnosti použití na mobilním objektu jsme se v týmu rozhodli, že pro řízení a měření dat z mobilního objektu (robota) použijeme signálové procesory PIC 32MX360F512 pracující s pevnou řádovou čárkou od Microchip a v úvahu přicházejí také procesory od Texas Instruments, konkrétně procesory řady F28xxx. Ty umožňují aritmetiku v plovoucí řádové čáře.

8.4.2 Architektura procesoru PIC32

Procesory řady PIC32MX360F512L mají specifickou architekturu 32 bitových procesorů od firmy Microchip. Tato architektura je znázorněna na obrázku

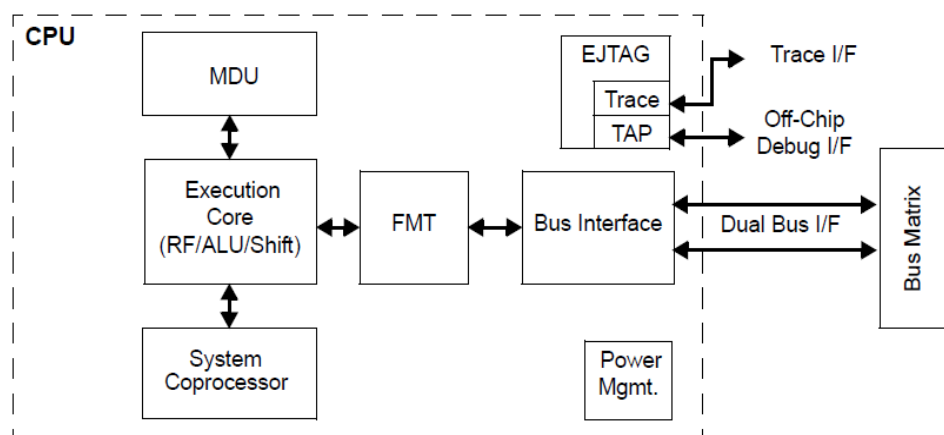


Obr. 8.5 Architektura procesoru PIC32MX360F512L [18]

Základem této architektury je procesorové jádro *MIPS32 M4K CPU*. Toto jádro obsahuje tzv. „*Execution Unit*“ pro provádění základních výpočetních operací typických pro všechny mikroprocesory (sčítání, odčítání, bitový posun, logické operace). Za další důležitý stavební prvek jádra MCU můžeme považovat jednotku MDU „*Multiple/Divide Unit*“, která provádí výpočetní operace násobení a dělení hardwarově, tudíž se tyto výpočetní operace nemusí provádět jako u běžných MCU, pomocí základních procesorových instrukcí. Násobení dvou číselných hodnot v procesoru bez MDU je provedeno např. pomocí několikanásobného součtu. Dalšími prvky jádra MCU jsou:

- „*System Control Coprocessor*“ jehož úlohou řídí chod celého jádra,
- „*Power management*“ zodpovědný za spotřebu mikroprocesoru,
- „*EJTAG*“ rozhraní které lze použít pro ladění a sledování běhu programu v reálném čase,
- prvky pro komunikaci s ostatními periferiemi mikroprocesoru.

Blokové schéma jádra je možné vidět na obr. 8.6.



Obr. 8.6 Schématické znázornění jádra procesoru MIPS32 M4K [18]

Další část architektury mikroprocesoru tvoří sběrnice pro komunikaci mezi periferiemi a jádrem. Komunikace mezi periferiemi a jádrem je zprostředkována pomocí „Peripheral Bridge“ sběrnice spojující periferie a „Bus Matrix“ viz obr. 8.5. Z obrázku je také možno vyčíst veškeré periferní zařízení, které je v mikroprocesoru implementováno.

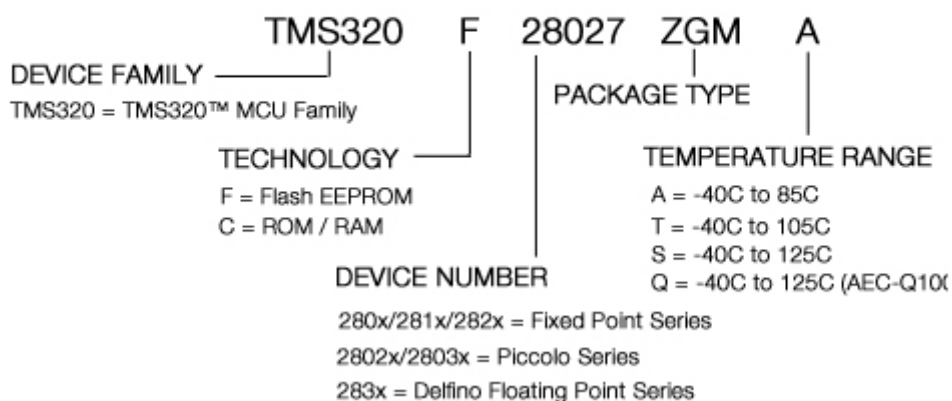
Mezi základní technické parametry procesoru PIC32MX360F512L patří:

- Hodinová frekvence max. 80MHz
- Napájecí napětí: 2,3-3,6V
- Komunikační rozhraní: SPI, I2C, USB, UART, PMP, PSP
- Analogové vstupy: max. 16 vstupů s rozlišením 10bit

8.4.3 Architektura procesoru řady F28xxx

Digitální signálové procesory řady TMS320F28xxx patří do velké rodiny signálových procesoru TMS320C2000. Rodina C2000 obsahuje digitální signálové procesory (dále jen DSP), které dokáží zpracovávat výpočetní operace v plovoucí řádové čárce *floating point*, nebo v pevné řádové čárce *fixed point*. Přehled celkového značení je uvedeno na obr. 8.7.

C2000 TMS320 devices



Obr. 8.7 Přehled značení mikroprocesorů rodiny C2000

Veškeré DSP od TI jsou založeny na Harvardské architektuře. Základem Harvardské architektury procesoru je oddělaná paměť pro program a data rovněž obsahuje také samostatné sběrnice pro čtení programu, pro čtení dat a zápis dat. U DSP od TI je harvardská architektura sběrnic tvořená jednou sběrnicí nazývanou „*Memory Bus*“ tato sběrnice ve skutečnosti rozdělená do tří částí. První část tvoří sběrnice pro čtení programových instrukcí a je složena z 22 adresových bitů a 32 datových bitů obsahujících specifikaci instrukce procesoru.

Druhá část je tvořena sběrnicí pro čtení dat s 32 adresními bity a 32 datovými bity. Poslední třetí část je tvořená sběrnicí pro zápis dat, která je rovněž obsahuje 32 adresních bitů a 32 datových bitů. Díky této sběrnice struktuře je DSP schopen během jediného hodinového cyklu načíst instrukci programu, zapsat data do paměti a rovněž je i z paměti načíst což podstatně urychluje běh celého programu. Výše popsanou architekturu sběrnic mají všechny DSP společnou další části architektury se mohou lišit podle konkrétního typu procesoru. Z tohoto důvodu bych se rád v této práci zaměřil na dva konkrétní procesory, které jsou dostupné pro pozdější realizaci řídicího algoritmu. Jedná se o procesory TMS320F28335 a TMS320F28035.

Instrukce MAC

Instrukce MAC je jedna z hlavních odlišností DSP od klasických Mikroprocesorů. Její název znamená v anglickém znění *Multiple And Accumulate*. Tento typ instrukce je do DSP implementován z důvodu urychlení jedné z nejčastějších úloh, kterou DSP provádí a to algoritmus Rychle Fourierovy Transformace (FFT). Instrukce MAC nedělá vlastně nic jiného, než že v jednom hodinovém cyklu dokáže vynásobit mezi sebou dvě hodnoty a výsledek pak následně přičíst do tzv. Akumulátoru. Pro MAC instrukce je v CPU implementována hardwarová násobička, právě díky ní je MAC instrukce schopna se provést v jednom cyklu procesoru, protože násobení provede hardwarová násobička a akumulaci hodnoty pak CPU. Tyto instrukce podstatně urychlují výpočet FFT algoritmu, který jak již bylo zmíněno je jednou z hlavních úloh DSP.

Procesor TMS320F28035

DSP TMS320F28035 jeden z mnoha členů rodiny C2000, který zpracovává výpočetní operace v pevné řadové čárce tzv. *fixed point* od ostatních procesorů rodiny C2000 se liší tím, že má zabudován tzv. *Control Law Accelerator* neboli zkráceně *CLA*. Tento akcelerátor je tvořen dalším 32bit procesorovým jádrem, které je schopno vykonávat paralelně běžící program s programem hlavním. *CLA* se používá pro obsluhu rutinních přerušení jako čtení hodnot z A/D převodníku, obsluha některých periférií a různá další rutinní přerušení. *CLA* může vykonávat maximálně obsluhu 8 přerušení. Díky tomu, že *CLA* tyto rutinní úlohy převezme tak dává možnost hlavnímu procesoru vykonávat jeho prioritní algoritmus rychleji a efektivněji.

Základní technické parametry procesoru:

- Hodinová frekvence max. 60MHz
- Napájecí napětí: 3,3V

- Komunikační rozhraní: SPI, I2C, SCI, LIN, eCAN
- Analogové vstupy: max. 16 vstupů 12bit ADC
- JTAG rozhraní
- PWM výstupy

Procesor TMS320F28335

DSP TMS320F28335 je jeden z mála členů rodiny C2000, který dokáže zpracovávat výpočetní operace v plovoucí řadové čárce tzv. *floating point*. Pro zpracování výpočetních operací v plovoucí řadové čárce je potřeba, aby byl DSP vybaven tzv. „*Floating Point Unit*“ což je jednotka, která zajišťuje celkové zpracování a ukládání čísel s plovoucí řadovou čárkou. Rozdíl mezi zpracováním čísel v plovoucí a pevné řadové čárce je popsán v kapitole 8.2. K tomuto DSP existuje rovněž ekvivalentní procesor TMS320F28235, který má naprosto stejnou architekturu až jednu odlišnost. Není vybaven FPU a tudíž zpracovává výpočetní operace v pevné řadové čárce. Od ostatních DSP z rodiny C2000 se tyto dva procesory liší především tím, že mají zabudovaný řadič DMA „*Direct Memory Access*“ neboli řadič přímého přístupu do paměti. Díky tomuto řadiči je možno přenášet data z různých periferních zařízení do paměti bez nutnosti využití hlavního jádra procesoru, což opět umožňuje vykonávat hlavní algoritmus rychleji a efektivněji.

Základní technické parametry procesorů:

- Hodinová frekvence max. 150MHz
- Implementovaná FPU
- Napájecí napětí: 1,8-1,9V vstupně výstupní porty optimalizované na 3,3V
- Komunikační rozhraní: SPI, I2C, SCI, LIN, eCAN
- Analogové vstupy: max. 16 vstupů s rozlišením 12bit

9 ZPRACOVÁNÍ A VYUŽITÍ ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ PRO ORIENTACI ROBOTA V PROSTORU

V této části práce se zaměřujeme na možnou orientaci robota pomocí zvukových signálů.



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl:

-  Popis zpracování a využití zvukových signálů.
-  Tvorba zvuku.
-  Lokalizace akustických zdrojů zvuku.
-  Seznámení s principem zvukových signálů u člověka.



Výklad

První počátky lokalizace zdrojů zvuků sahají do konce 18 století, konkrétně do roku 1859, kdy byl zaregistrován v USA patent Benjamina R. Smitha a v roce 1871 patent na jméno James Cochrane. Tyto zařízení měly podobný charakter jako systém patentovaný v roce 1880, tzv. Mayerův topofón od Alfreda M. Mayera.



Obr. 9.1 Systém patentovaný v roce 1880 Alfrédem M. Mayerem.

Další rozmach nastal v meziválečném období 20. století. V roce 1935 byl v Anglii předveden první pasivní radar. Tento vynález byl následně úspěšně použit ve 2. světové válce v bitvě o Anglii. S příchodem osobních počítačů a rozvojem elektroniky v 90 letech 20. století došlo k použití pasivních radarů v civilní sféře. Mezi nejpoužívanější aplikace lokalizace zdroje zvukového signálu patří lokalizace řečníka v místnosti. Tento problém je řešen přibližně od 90. let 20. století, ale první patent na automatické natáčení kamer směrem ke zdroji zvukového signálu je patentován v USA v roce 2002. Dalším odvětvím jsou robotické systémy, kdy se vývojová centra snaží vyvinout inteligentního robota se schopnostmi, které se

nejvíce podobají lidským smyslům. V neposlední řadě se teorie lokalizace zdroje zvuku uplatňuje v bezpečnostní sféře.

Lokalizace akustických zdrojů (v anglicky psané literatuře označeno jako SSL – Sound Source Localization) je odvětví zaměřující se na zpracování akustických signálů. Za použití mikrofonního pole o 2 a více mikrofonech, lze pomocí algoritmů zjistit informaci o poloze zdroje signálu a jeho vzdálenost od měřicí aparatury (mikrofonní pole).

V současné době lokalizace akustických signálů (SSL – Sound Source Localization) je rozvíjející se odvětví v oblasti měření akustických signálů. Cílem tohoto odvětví je lokalizovat zdroj akustického signálu a vyhodnotit úhel a vzdálenost tohoto zdroje od měřicího systému. S rozvojem informační technologie dochází k novým výzkumům v oblasti řešení lokalizace zvukových signálů. Současný výzkum lokalizace vede k vytvoření systému, který by se co nejblíže podobal lidskému mechanismu vyhodnocování akustických signálů.

Odvětví lokalizace zvukových signálů můžeme rozdělit na dva základní směry - jednokanálové a vícekanálové techniky. Jednokanálová technika využívá jeden všesměrový mikrofón. Nejjednodušší realizace tohoto systému spočívá ve využití filtrů dolní a horní propust s proměnnými mezními kmitočty. Touto separační technikou dojde k potlačení dolních a horních kmitočtů a takto dojde k omezení přijatého zvukového signálu. Takto sice zůstává nežádoucí šum ve zvukovém signálu, ale pro lidský sluchový orgán není tento šum tak výrazný jako před odfiltrováním. Vícekanálová technika využívá minimálně dva a více senzorů pro zachycení zvukových signálů. Nejstarší a nejjednodušší vícekanálová technika využívá dvou mikrofónů. Nejběžnější použití této techniky nachází uplatnění v televizních přenosech odehrávající se v hlučném prostředí. Hlas moderátora je zašuměn okolním prostředím. Aby bylo docíleno co nejsrozumitelnější řeči moderátora, je hlučné prostředí snímáno všesměrovým mikrofónem. Signál moderátorova mikrofónu se porovná s mikrofónem snímajícím hlučné prostředí a tyto dva jednotlivé signály se analogově nebo digitálně odečtou. Takto získáme kvalitnější zvukový signál. Další možností využití tohoto jednoduchého mikrofonního pole, nemusí být použito v automatizovaných systémech ale například v automobilním nebo leteckém průmyslu. Kabina letadla anebo vnitřek automobilů mohou být vybaveny sadou 2 mikrofónů. Jeden mikrofón snímá zvuk mluvící osoby a druhý snímá provozní a vnitřní hluk jako například hluk ventilátoru, motoru anebo okolního prostředí.

V souvislosti s rozvojem telekonferencí nastává vývoj systému, který dokáže identifikovat aktuální pozici řečníka v místnosti a tuto osobu vizuálně snímat pomocí kamerového systému. V současné době je většina videokonferenčních sálů vybavena polem mikrofónů. Pomocí tohoto pole lze určit polohu aktuálně mluvící osoby. Určení pozice aktuálně mluvící osoby je založena na principu zjištění směru příchodu signálů (označeno v anglicky psané literatuře jako DOA – Direction of Arrival). V závislosti na zjištění této informace dochází k natočení příslušné kamery ve směru zjištění příchozího zvukového signálu. Tímto je docíleno aktuálního vizuálního a zvukového kontaktu s řečníkem.

Vhodným umístěním kamery, například doprostřed kruhového mikrofonního pole, můžeme spojit vizuální a akustické zpracování signálu. Odborným názvem pojmenovaný tento přístup jako akustická holografie (v anglicky psané literatuře Acoustic Holography)

využívaná především v bezkontaktním měření a lokalizaci vibrací. Tento přístup využívá Akustickou kameru s vysokým rozlišením (High Definition Acoustic Camera). Jedná se o jednoduchý a rychlý způsob lokalizace umožňující pomocí kamery vizuálně sledovat okolní prostředí a do obrazového výstupu barevně označovat jednotlivé akustické signály zdroje stacionárních i nestacionárních akustických signálů. Jednou z aplikací je využití tohoto přístupu v aerodynamickém tunelu pro akustické měření deflektorů a zrcátek automobilů. Pomocí softwaru pro řešení a zobrazení výstupních dat, může uživatel definovat jednotlivé požadavky na zpracování akustického signálu. Těmito požadavky jsou především frekvenční rozsah, přesnost, časovou délku měření atd. Způsob vyhodnocení akustických signálů je založen na principu beamformingu.



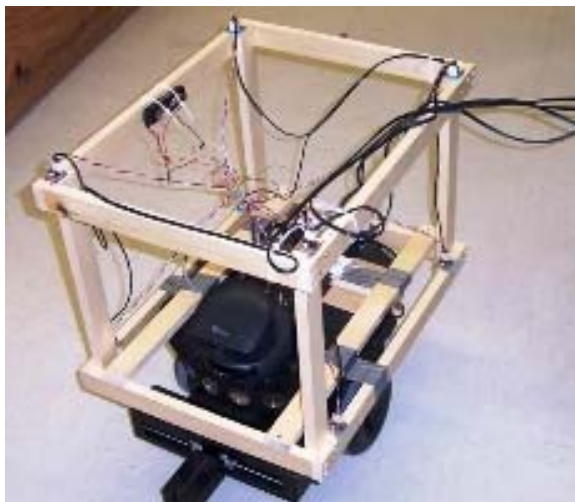
Obr. 9.2 Měření aero akustického hluku v aerodynamickém tunelu [4]

Robotika je dalším odvětvím, ve kterém nachází své uplatnění obor zabývající se lokalizací zvukových signálů. V současné době mnoho specializovaných vědeckých nebo univerzitních skupin publikuje na seminářích, konferencích anebo internetu své výzkumy zabývající se sestavením inteligentního robota. Dnešní robotické systémy dokážou poměrně kvalitně zpracovat obraz pomocí optických senzorů - kamer a přibližují se tak reálnému zpracování obrazu, tak jak člověk zpracovává viditelné vjemy.

Tabulka 9.1 Porovnání zpracování obrazových a zvukových signálů

Kritéria porovnání	Obraz	Zvuk
Směr příchozího signálu	Směrové	Všesměrové
Čas měření signálu	Krátký	Dlouhý
Časová náročnost výpočtu	Krátká	Dlouhá
Světelná závislost	Ano	Ne
Zdolávání překážek	Obtížné	Snadné

Další výzvou v robotickém odvětví je vyvinout systém, který dokáže napodobit lidské vnímání zvukových signálů, plnohodnotně zpracovávat zvukové signály a směr příchodu signálu. Jak je vidět v předchozí tabulce (tabulka 9.1) zvukový i obrazový signál má své klady i zápory. Například ve tmě není zpracování obrazových signálů tak účinné jako zpracování zvukových signálů. Naopak pokud chceme rychle analyzovat přijatý obrazový signál, je potřeba mnohem kratší čas pro jeho snímání a následné vyhodnocení.



Obr. 9.3 Demonstrace aplikace mikrofonního pole na robotickém systému

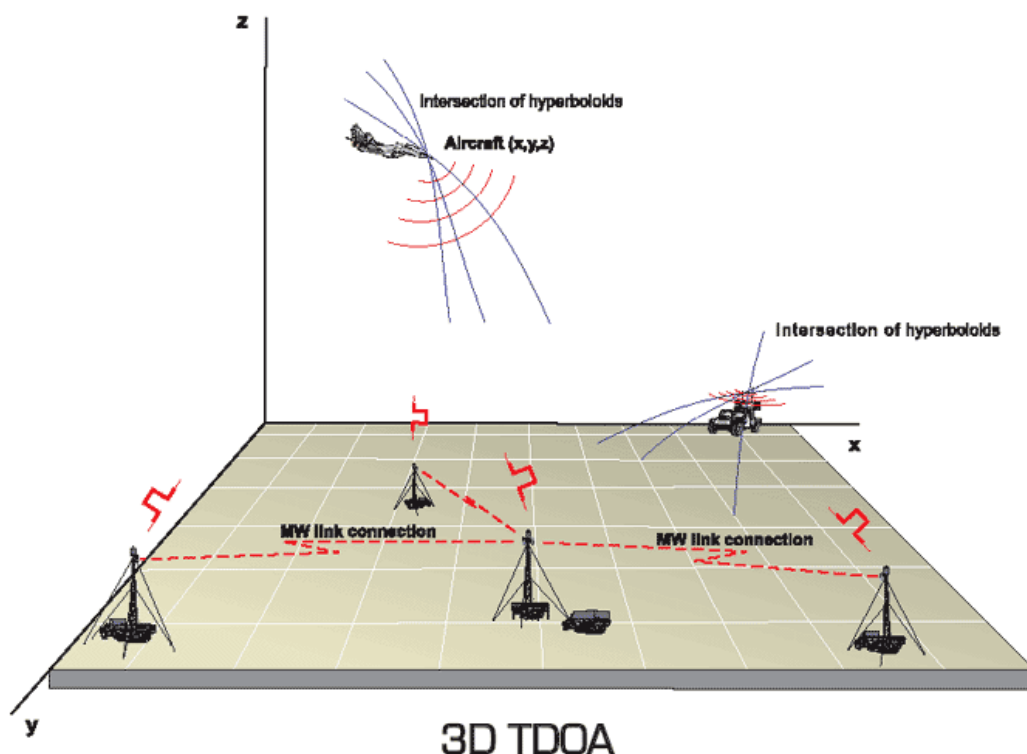
Lidské sluchové ústrojí se skládá se dvou orgánů pro zpracování zvukových signálů – pravé a levé ucho a společně s mozkem dokážou vyhodnotit přijaté akustické signály. Z těchto dvou přijatých signálů mozek vyhodnotí délku fáze a amplitudu a dokáže poznat ze kterého směru a v jaké vzdálenosti přichází akustický signál. Systém podobajícímu se lidskému zpracování zvukových signálů není jednoduché vyvinout. Při lokalizaci zdroje zvukového signálu potřebujeme minimálně 3 vstupní signály. Bez 3 mikrofónů nejsme schopni přesně odhadnout úhel, jestli přichází zepředu nebo zezadu.

Všechny výše zmiňované příklady vycházejí z 3 základních technik přístupů k lokalizaci akustického signálů. Metoda odhadu časového zpoždění (v anglicky psané literatuře TDOA – Time Difference of Arrival), metoda tvarování přijímací charakteristiky (Beamforming) a metoda spektrálního odhadu vysokého rozlišení. Pomocí těchto metod a jejich modifikací lze určit směr přicházejícího signálu (DOA – Direction of Arrival) a úhel sklonu dopadající vlnoplochy (AOA – Angle of Arrival).

Metoda odhadu časového zpoždění (TDOA) porovnává vzájemné časové zpoždění dopadu akustického signálu na jednotlivé mikrofony – výsledkem jsou pak jednotlivé hyperboly. Zdroj akustického signálu je závislý na geometrickém uspořádání mikrofonního pole a na průniku jednotlivých hyperbol. Pro měření v horizontální rovině je potřeba použít minimálně 3 mikrofony, jinak dochází k nejednoznačnosti určení. Na tomto principu, měření rozdílu časového zpoždění, jsou založeny české pasivní radarové systémy Věra a Tamara [13]. Tyto systémy jsou schopné lokalizovat americké armádní stealth technologie a samy svou pasivitou vyzařování působí nenápadně. Obsahují většinou 1 hlavní stanici a 2-3 mobilní stanice umístěné v okolní krajině.

Radarový systém Tamara byl vytvořen v roce 1987 a umožňuje sledovat až 72 letadel. Novější systém pasivního sledování Věra, vytvořený v roce 1995, dokáže automaticky sledovat až 300 letadel. Jeho sledovací rozsah je v úhlovém sektoru 120° do vzdálenosti 400-500km. Přesnost tohoto systému na 100km je v desítkách metrů. V současné době je používána civilní verze na letištích v Praze, Ostravě anebo v německém Hamburgu především jako záložní radarový systém. Výborné vlastnosti dokazuje především v krizových situacích, při navádění nouzově přistávajícího letadlo nebo při husté mlze, dešti nebo sněžení. Metoda

tvarování přijímací charakteristiky se vyznačuje nutností použití více mikrofónů oproti metodě TDOA. Tato metoda dokáže spolehlivě určit více zdrojů akustických signálů. Nevýhodou této metody je vysoká výpočetní náročnost, proto se tato metoda nepatří mezi nejpoužívanější v odvětví lokalizaci akustických zdrojů, ale její přínos se nachází především ve videokonferenčních místnostech. Metody spektrálního odhadu vysokého rozlišení jsou založeny na spektrální analýze vysokého rozlišení. A jsou navrženy především pro řešení úzkopásmových signálů, typickým příkladem je využití v radarové technice. Tyto metody pracují se spektrální fázovou korelační maticí.



Obr. 9.4 Princip fungování pasivního radarového systému Věra[13].

9.1 Princip zpracování zvukových signálu u člověka

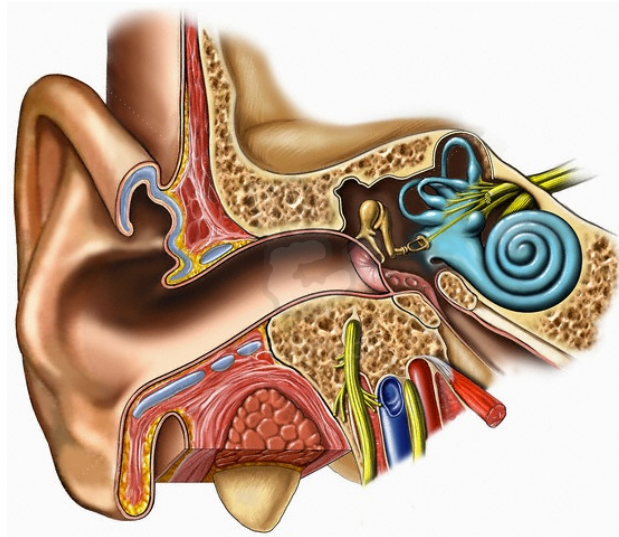
Sluch je smysl vyvinutý pro vnímání akustických signálů. Nejrozvinutější sluchové mechanismy mají živočichové, kteří používají jako hlavní komunikační prostředek akustické signály jako například vyšší živočichové čeledi obratlovců anebo hmyz. Různé živočišné druhy se liší v citlivosti a vnímání frekvenčního rozsahu akustických signálů. Lidské vnímání zvukových tónů je ve frekvenci 16 Hz až 20 KHz. Tóny o frekvenci menší než 16 Hz nazýváme infrazvuk, který v přírodě slyšíme při bouřce nebo zvuku vodopádu a tóny o frekvenci vyšší než 20 kHz nazýváme ultrazvuk. Infrazvuk je využíván například v diagnostice kazů v kovových pilířích, odborně nazýván jako defektoskopie. Další využití infrazvuku se nachází v medicíně k diagnostickým a léčebným procesům.

Pro člověka je sluch druhým nejdůležitějším smyslem. A na tomto smyslu je založená hlavní komunikace mezi lidmi. Lidé dokáží vnímat zvukovou frekvenci v rozsahu 16 – 20 000 Hz. Horní hranice se snižuje s věkem. Nejcitlivěji dokážeme vnímat zvuk v oblasti 1000-3000 Hz, do kterého spadá frekvence lidského hlasu. Lidský sluchový ústrojí lze přirovnat

k dvěma snímačům akustických signálů - uši, a vyhodnocovacího systému - mozek. Tímto model lze simulovat jednoduché činnosti vykonávající lidské sluchové ústrojí při zpracování akustických signálů. Složitost lidského vnímání akustických signálů nelze přesně modelovat pouze pomocí dvou mikrofónů. Pro analýzu směru zdroje akustického signálu je potřeba minimálně 3 mikrofónů.

Všechny zvukové podněty jsou přijímány sluchovým ústrojím, které se dělí na 3 základní části. Zevní a střední ucho slouží pro zachycení zvukových podnětů a k vedení zvukových vln. Následná transformace zvukových vln do podoby sluchového podnětu je realizována ve vnitřním uchu. Dále je tento podnět zpracováván a vyhodnocován mozkem.

Zevní ucho je složeno z ušního boltce a zvukovodu. Boltce slouží jako akustický stín pro zvukové signály přicházející zezadu. Díky této části, lidské ucho snadněji lokalizuje zdroje akustického vlnění. Intenzita zvukového vlnění, která dopadající na bubínek je závislá na frekvenci a úhlu dopadu akustického vlnění na ušní boltce. Střední ucho obsahuje bubínek se středoušními kůstkami (kladívko, kovádlínka a třmínek) a je ukončeno. Společně zevní se středním uchem tvoří tzv. převodní aparát sluchového orgánu. Vnitřní ucho obsahuje sluchové a rovnovážné ústrojí a tzv. kostěný labyrint, který se skládá z 3 základních částí a to předsíně, tři polokruhové kanálky a kostěný hlemýžď.



Obr. 9.5 Vnitřní struktura lidského ucha[13].

Princip činnosti sluchového ústrojí je následující. Přicházející akustické signály jsou zachycené ušním boltcem (část vlnění je odražena a pohlcena) a pomocí zvukovodu vedeny k bubínku. Délka zvukovodu je přibližně 25mm a jeho funkce je podobná zesilovači. Zvuk je rezonancí zesílen až o 12 dB oproti vstupní hodnotě. Tyto zesílené zvukové vlny rozechvějí bubínek o ploše 60 mm². Toto chvění je dále převedeno na středoušní kůstky (kladívko, kovádlínka a třmínek). Tyto kůstky provádějí impedanční přizpůsobení mezi velkou plochou bubínku s malou impedancí na malou plochu oválného okénka tvořícího vstup do kapaliny hlemýžďe s velkou impedancí. Takto je zajištěn přenos zvukové energie do tekutiny vnitřního ucha – dochází k převedení zvukové energie z plynného skupenství na kapalinové. Uvnitř hlemýžďe se nacházejí dvě membrány – Reisnerová a Basilární. Druhá membrána obsahuje 15000 tenkých vlasových buněk, které při změně tlaku v kapalině hlemýžďe, vysílají nervové

impulsy směrem do mozku. Vlasové buňky jsou rozmístěny podél celého hlemýžďe a odpovídají určité zpracované frekvenci. Z tohoto je patrné, že v případě zachycení zvukových signálů, proudí paralelně do mozku informace o frekvenčním spektru zachyceného zvukového signálu. Vyhodnocení těchto informací provádí mozek. Jednou z činností, která je vykonávána ve spojení s lokalizací akustického zdroje je vzájemná korelační analýza signálů levého a pravého ucha.

10 METODY LOKALIZACE AKUSTICKÝCH SIGNÁLŮ S POTENCIÁLNÍM VYUŽITÍM U ROBOTICKÉHO ZAŘÍZENÍ

Tato část studie pojednává o třech možných přístupech k řešení problematiky orientace robota v prostoru pomocí akustických signálů. Předpoklad pro využití těchto technik spočívá v osazení robotického zařízení mikrofonním polem. Toto pole by mělo být upraveno tak, aby splňovalo požadované podmínky pro orientaci v prostoru. Přístup k řešení problému lokalizace akustických signálů vychází z 3 základních technik. Nejrozšířenější přístup je založen na metodě odhadu časového zpoždění (TDOA), rozšířená především v pasivních radarových systémech. Druhá metoda je založená na tvarování přijímacích charakteristik (Beamforming) a je vhodná pro zpracování signálu v konferenčních místnostech. Třetí přístup se nazývá metoda spektrálního odhadu vysokého rozlišení. Z těchto 3 přístupů, bychom mohli využít především metodu TDOA.



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl:

-  Popis metod lokalizace akustických signálů
-  Popis metody založené na odhadu časových diferencí (TDOA).
-  Popis metody založené na tvarování přijímací charakteristiky (Beamforming).
-  Popis metody založené na spektrálních odhadech vysokého rozlišení.



Výklad

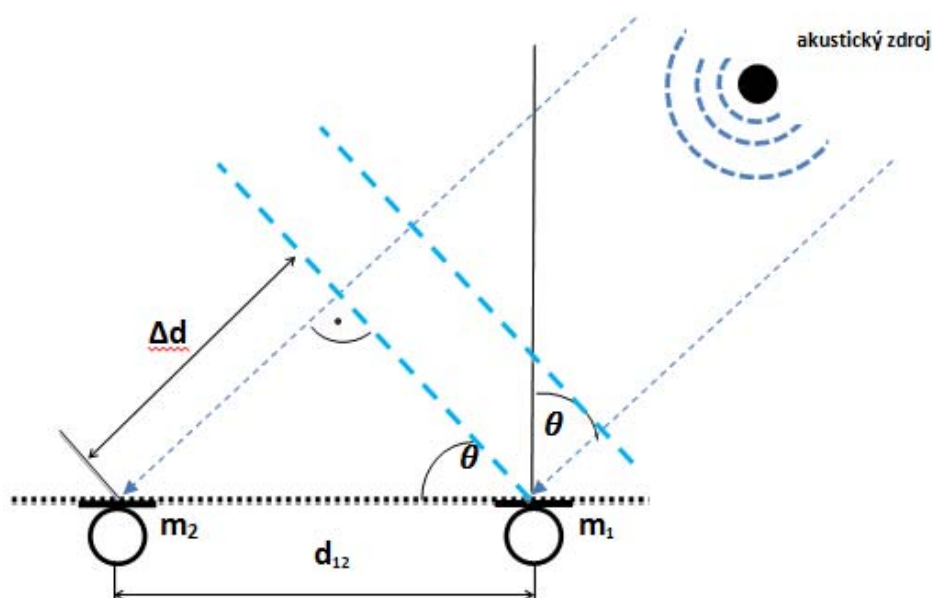
10.1 Metody založené na odhadu časových diferencí (TDOA)

Metoda založená na odhadu časových diferencí - zpoždění (v anglicky psané literatuře označovaná jako TDOA - Time Difference of Arrival), nazývaná také jako multilaterace a nebo časoměrně hyperbolický princip. Je metoda velice rozšířená v systémech pro lokalizaci zdroje akustických signálů. V principu jsou z mikrofonního pole přiváděny signály do vyhodnocovacího zařízení, které analyzuje časové zpoždění mezi jednotlivými páry mikrofónů na základě informací o geometrickém rozmístění mikrofónů v mikrofonním poli. Z této analýzy je získán předpokládaný směr zdroje akustického signálu. Jedná se o nenáročnou dvou krokovou metodu. V první kroku je určené časové zpoždění (TDE – Time Delay Estimate) mezi mikrofonním párem. Nejčastěji se v tomto kroku používá vzájemná – křížová korelační analýza. Ve druhém kroku se známých geometrických rozmístění mikrofónů, vypočítá zdroj akustického signálu. Přesnost této metody je závislá na velikosti vzorkovací frekvence, geometrii mikrofonního pole a dozvuku. Nevýhodou této metody je obtížně lokalizovat více zdrojů najednou. Další možností, při použití tohoto algoritmu, je místo využití vzájemné – křížové korelační analýzy, použít číslicového filtrování (Particle

Filtering). Z důvodů vysoké výpočetní náročnosti se tento přístup rozvíjí především s příchodem rychlých a výkonných mikropočítačů. Tyto algoritmy jsou vhodné především pro lokalizaci pohyblivých akustických zdrojů v odrazovém prostředí. Princip tohoto algoritmu je založen na práci s měřeními vzorky, které berou v úvahu předešlé odhady polohy mobilního akustického zdroje. V konečném výsledku má tento algoritmus lepší odolnost vůči dozvukům. Tento přístup by byl vhodný především u robotických zařízení, která se pohybují rychle a analyzují okolní prostředí, ve kterém se nacházejí další pohyblivé objekty. V tomto případě je potřeba využít vysoce výkonný mikropočítač nebo DSP.

Pro sledování rychlosti, zrychlení a směru mobilního akustického zdroje existuje metoda frekvenčního rozdílu zpoždění (FDOA – Frequency Difference Of Arrival) někdy značená jako DD (Differential Doppler). Od metody TDOA se odlišuje v relativním pohybu mikrofónů. Aktuální poloha je odhadována ze znalostí geometrického rozmístění mikrofónů, z vektoru rychlosti zdroje a senzorů a z pozorovaných Dopplerových posunů mezi páry senzorů. Přesnost této metody je závislá na frekvenční šířce pásma akustického zdroje signálu, na hodnotě SNR (Signal to Noise Ratio) každého mikrofónu a geometrickém rozmístění mikrofónního pole. Nevýhoda je vysoká výpočetní náročnost.

Při metodě TDOA předpokládáme vzdálenost zdroje akustického signálu od robota větší než vzdálenost mezi dvěma sousedními mikrofóny v mikrofónním poli, které je aplikováno na robotickém zařízení. Tímto předpokladem můžeme aproximovat kulovou vlnoplochu signálu jako plochu rovinou a zjednodušit tak výpočet směrového úhlu viz následující obrázek.



Obr. 10.1 Zobrazení akustického signálu dopadajícího na dvojici mikrofónů, která může být implementována na přední část robotického zařízení

Jak je patrné na předcházejícím obrázku, každý mikrofón přijme akustický signál v jinou dobu. Z toho je patrné, že každá akustická vlna urazí jinou vzdálenost k jednotlivým mikrofónům. Takto lze pomocí dvou mikrofónů, vestavěných v přední části robotického

zařízení, analyzovat směr přicházejícího akustického signálu. Tento jednoduchý princip, by sloužil především jako prvotní analýza směru, ve kterém se nachází jiné zařízení, které vydává zvukové signály. Pro výpočet úhlu dopadu akustické vlny na jednotlivé mikrofony, lze aplikovat vztah:

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta d}{d_{12}} \quad (7)$$

Velikost uražené dráhy akustického signálu Δd , lze vyjádřit s obecného vzorce pro dráhu. Dráha rovná se součinu rychlosti a času. Aplikací tohoto jednoduchého vzorce dostaneme:

$$\theta = \arcsin \frac{\tau_{12} \cdot c}{d_{12}} \quad (8)$$

Hodnota d_{12} značí vzdálenost mezi párem mikrofonů, τ_{12} je časové zpoždění mezi jednotlivými dopady akustického signálu na mikrofony a c je rychlost zvuku, kterou lze definovat jako:

$$c = 331,57 + 0,607 \cdot t \quad (9)$$

kde t je teplota vzduchu.

Z předchozích rovnic jsou patrné výpočty úhlu dopadu vlnoplochy na jeden pár mikrofonů. Pokud bychom předpokládali pole o 3 a více mikrofonů, které by byly vhodně rozmístěny po celém robotickém zařízení, je vhodné pro každý jednotlivý pár, v mikrofonním poli, provést vyhodnocení úhlu dopadu akustického signálu. Přesný počet možných párů mikrofonů vyjadřuje počet kombinací 2. třídy bez opakování:

$$C(n, k) = \frac{n_m!}{2! (n_m - 2)!} \quad (10)$$

kde n_m je počet mikrofonů.

K výpočtu časového zpoždění τ_{12} mezi párem mikrofonů, můžeme použít vzájemnou korelační analýzu. Korelace obecně popisuje vztah mezi dvěma veličinami, kdy jedná veličina je závislá na druhé, tzn., pokud se jedna z nich změní, korelativně se změní i druhá a naopak. Tímto způsobem zjistíme jednotlivé podobnosti mezi signály. Aplikací těchto poznatku na předcházející obrázek, můžeme definovat přichodící akustický signál z prvního mikrofonů jako $x_1[n]$, druhého mikrofonů jako $x_2[n]$ a počet vzorků N . Signál z prvního mikrofonů $x_1[n]$ definujeme jako referenční a signál druhého mikrofonů $x_2[n]$ jako porovnávaný. Vzájemnou korelaci R_{12} těchto dvou signálů lze popsat vztahem:

$$R_{12}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] \cdot x_2[n+k] \quad (11)$$

Využitím vzájemné korelační funkce mezi dvěma signály získáme index posloupnosti k , ve kterém se vyskytne globální maximum. Tedy maximální hodnotě R_{12} odpovídá určitý index posloupnosti k . Pro výpočet časového zpoždění τ_{12} je potřeba znát vzorkovací frekvenci měřených signálů f_{vz} . Časové zpoždění τ_{12} tedy určíme ze vztahu:

$$\tau_{12} = \frac{1}{f_{vz}} \operatorname{argmax}(R_{12}[k]) \quad (12)$$

Všeobecně v oblasti akustických signálů je vzájemná korelace dvou signálů náročná na výpočetní čas. Proto je výhodnější převést signál z časové oblasti do frekvenční oblasti pomocí Fourierovy transformace (FT – Fourier Transform), konkrétně diskrétní Fourierovy transformace. Po výpočtu vzájemné korelační analýze, použijeme zpětnou Fourierovu transformaci pro převod do časové oblasti, výsledný vzorec je pak:

$$R_{12}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{12}[k] e^{i2\pi \frac{kt}{N}} \quad (13)$$

V případě použití lineárního mikrofonního pole s více než 2 mikrofony dostaneme soustavu rovnic o jedné neznámé. Počet řádků této soustavy je roven počtu utvořených mikrofonních párů. Na předcházejícím obrázku je vidět popis jednotlivých konstant. Pokud vezmeme v úvahu lineární mikrofonní pole s 3 mikrofony, pak můžeme popsat soustavu rovnic jako:

$$\begin{aligned} \sin \alpha \cdot d_{12} &= \tau_{12} \cdot c \\ \sin \alpha \cdot d_{13} &= \tau_{13} \cdot c \\ \sin \alpha \cdot d_{23} &= \tau_{23} \cdot c \end{aligned} \quad (14)$$

kde d_{ij} jsou jednotlivé vzdálenosti mezi jednotlivými mikrofony, τ_{ij} jsou časové zpoždění, získána korelační analýzou, mezi jednotlivými mikrofony, c je rychlost zvuku a α reprezentuje úhel dopadu vlnoplochy na lineární mikrofonní systém a je v rovnici neznámou. Soustavu rovnic lze vyjádřit v maticovém tvaru:

$$\sin \alpha \cdot \mathbf{d} = \boldsymbol{\tau} \cdot c \quad (15)$$

$$\mathbf{d} = [d_{12} \ d_{13} \ d_{23}]^T \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_{12} \ \tau_{13} \ \tau_{23}]^T \quad (17)$$

kde $\mathbf{d}$ odpovídá sloupcovému vektoru vzdálenosti mezi mikrofonními páry a $\boldsymbol{\tau}$ sloupcovému vektoru vyjadřující časové zpoždění.

Vhodná metoda pro řešení rovnice je aproximace metodou nejmenších čtverců. Aplikací této metody dostaneme rovnici:

$$\sin \alpha \cdot \mathbf{d}^T \mathbf{d} = \mathbf{d}^T \boldsymbol{\tau} \cdot c \quad (18)$$

Z předchozí rovnice lze vyjádřit úhel dopadu vlnoplochy jako:

$$\alpha = \arcsin \{(\mathbf{d}^T \mathbf{d})^{-1} \mathbf{d}^T \boldsymbol{\tau} \cdot c\} \quad (19)$$

Předchozí algoritmus vyjadřuje jednoduché a rychlé vyřešení úhlu dopadu vlnoplochy na lineární mikrofonní pole. Pro lokalizaci zdroje akustického signálu se musí použít složitější algoritmus výpočtu. Zdroj akustického signálu a oba mikrofony jsou popsány v 2D souřadnicovém systému. Pro mikrofony M_1 a M_2 souřadnice $[m_{1x} \ m_{1y}]$ a $[m_{2x} \ m_{2y}]$. Zdroj akustické signál je reprezentován souřadnicemi $[s_x \ s_y]$.

Vztah mezi jednotlivými mikrofony a zdrojem lze popsat rovnicí využívající Pythagorovu větu:

$$d_{m1} = \sqrt{(s_x - m_{1x})^2 + (s_y - m_{1y})^2} \quad (20)$$

$$d_{m2} = \sqrt{(s_x - m_{2x})^2 + (s_y - m_{2y})^2} \quad (21)$$

Závislost časové difference na poloze zvuku lze popsat rovnicí:

$$\tau_{12} = \frac{d_{m1} - d_{m2}}{c} \quad (22)$$

Dosazením do předcházejících rovnic vyjádříme:

$$\tau_{12} = \frac{\sqrt{(s_x - m_{1x})^2 + (s_y - m_{1y})^2} - \sqrt{(s_x - m_{2x})^2 + (s_y - m_{2y})^2}}{c} \quad (23)$$

Rovnice musí splňovat podmínku, že časová difference τ_{12} nesmí být v absolutní hodnotě větší než maximální dosažitelná časová difference $\tau_{12 \text{ MAX}}$:

$$|\tau_{12}| \leq \tau_{12 \text{ MAX}} \quad (24)$$

kde $\tau_{12 \text{ MAX}}$ vyjádříme pomocí rovnice:

$$\tau_{12} = \frac{\sqrt{(m_{1x} - m_{2x})^2 + (m_{1y} - m_{2y})^2}}{c} \quad (25)$$

Korelační analýzou přijatých signálů dvou mikrofónů, zjistíme časové zpoždění dopadu akustické vlnoplochy τ_{12} na tento pár mikrofónů. Po dosazení do rovnice 17, získáme nekonečně mnoho bodů, které reprezentují všechny možné pozice akustického zdroje signálů. Vyjádřením této množiny bodů je hyperbola, pro každý jednotlivý pár mikrofónů. Protnutím těchto hyperbol v jednom místě udává zdroj akustického signálu.

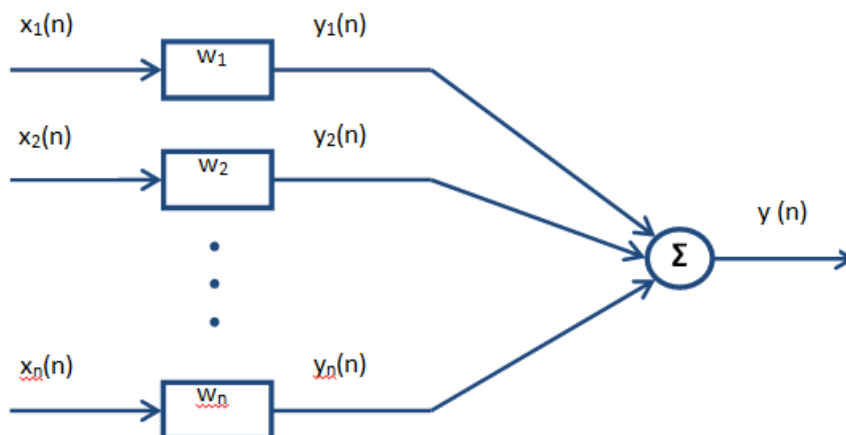
10.2 Metody založené na tvarování přijímací charakteristiky (Beamforming)

Metody založené na tvarování přijímací charakteristiky (v anglické literatuře nazývané Beamforming a nebo Steered Beamformer Based Locators) jsou spektrální metody, které jsou využívány již delší dobu. Tento přístup by se dal aplikovat na robotické zařízení, které by mělo rychlý mikropočítač a nebo DSP. V současné době jsou známy další typy této metody, které obecně vycházejí ze základního tvarovače typu Delay and Sum. Propracovanější tvarovače pracují na principu filtrů a rozdíly mezi typy tvarovacích metod jsou dány právě těmito filtry. Využití těchto metod je celá řada, jedná se především o separaci žádaného signálu od rušivých signálů, určení směru přichozích signálů anebo potlačení odrazů a ozvěn. Výhoda této metody oproti metodě TDOA je schopnost lokalizace více zdrojů signálů. Nevýhodou se jeví vysoká početní náročnost.

Princip této metoda lze popsat jako hledání nejvyšší hladiny akustické energie, pro všechny předpokládané polohy zdroje akustického signálu. Směrový úhel dopadu na mikrofonní pole lze vyčíst s tvarované přijímací charakteristiky mikrofonního pole. Využití pro robotické zařízení by především spočívalo v tom, že by si robot předem vypočítával možné směry přicházejících zvukových vln.

Tvarovač typu Delay and Sum(DAS) T je typ tvarovače také nazýván jako konvenční beamformer a je nejjednodušší a jeho princip využívá časových posuvů k vyrovnání zpoždění

dopadající akustické vlny na jednotlivé mikrofony. Předpokladem jsou stejné akustické signály dopadající na jednotlivé mikrofony, které se liší pouze ve zpoždění, které bude odlišné pro jednotlivé mikrofony. Tvarovač se v tomto případě chová jako filtr s konečnou délkou impulsové odezvy.

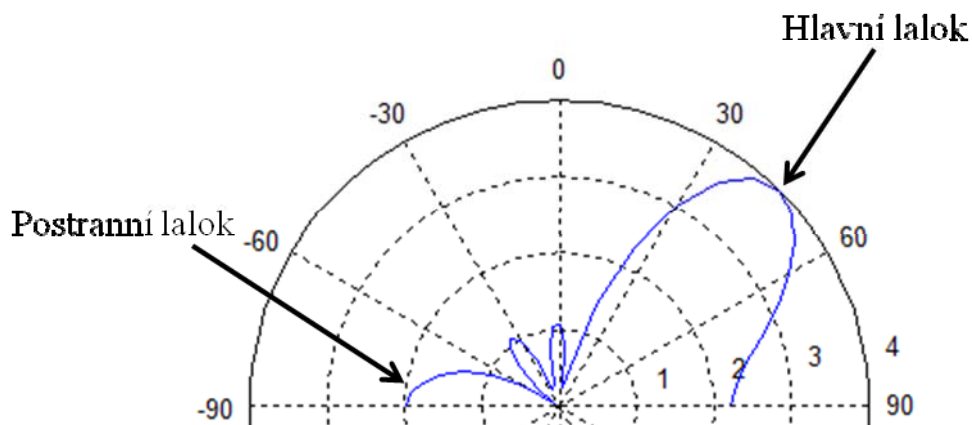


Obr. 10.2 Blokové schéma tvarovače typu Delay and Sum

Název Delay and Sum znamená „počkej a sečti“ a v praxi se realizuje tak, že signály jednotlivých snímačů jsou zpožděny proto, aby se pole „natočilo“ do směru užitečného signálu, to lze chápat jako užití časových posuvů k vyrovnání časového zpoždění mezi akustickým zdrojem a jednotlivými mikrofony. K časovému zpoždění se využívají jednotlivé váhy. Po té následuje součet všech přijatých signálů do jednoho výstupu, který je v časové oblasti popsán jako:

$$y(n) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i(n - \tau_n(\kappa)) \quad (26)$$

kde $x_i(n)$ je naměřený akustický signál z mikrofону i , w_i vyjadřuje zpoždění pro nastavení žádaného úhlu směrové charakteristiky, κ je jednotkový vektor určující směr a n_m je počet mikrofónů v poli. Jednotlivé váhy w_i se nastavují jako konstanty $w_i=1$ a nebo $w_i = \frac{1}{n_m}$.



Obr. 10.3 Mikrofonní pole a jeho směrová charakteristika, která určuje robotickému zařízení nejvyšší hladinu akustického signálu

Pro zpracování přijatého signálu předpokládáme, že zdroj akustického signálu a mikrofonní pole robota jsou dostatečně vzdáleny. Dalším předpokladem je, že zpracovávané signály jsou úzkopásmové. První předpoklad je téměř vždy splněn, druhý předpoklad už tak často není dodržen, protože se většinou zpracovává širokopásmový signál.

Pokud není splněná druhá podmínka, dochází k prostorovému aliasingu. Proto vzdálenost dvou sousedních mikrofonů musí splňovat tuto podmínku:

$$d < \frac{c}{2 \cdot f_{max}} \quad (27)$$

Pokud tedy jsou splněny předchozí dvě podmínky, lze vyjádřit časové zpoždění mezi referenčním a n -tým jako:

$$\tau_n = \frac{\kappa \cdot d}{c} \quad (28)$$

kde n je index senzoru, d je vzdálenost mezi referenčním a ostatními mikrofony, κ je jednotkový vektor určující směr a n -tým mikrofonom a c je rychlost zvuku.

Ve frekvenční oblasti vyjádříme rovnici jako:

$$Y(\omega) = \sum_{i=1}^{n_m} w_i \cdot x_i(\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_n(\kappa)} = \sum_{i=1}^{n_m} w_i \cdot x_i(\omega) \cdot e^{jk \cdot d} \quad (29)$$

kde ω je úhlová frekvence, k je číslo z vektoru podle úhlu, na který se pole zaměřuje.

10.3 Metody založené na spektrálních odhadech vysokého rozlišení

Tyto metody jsou založené na spektrální analýze vysokého rozlišení(v anglicky psané literatuře nazývané High Resolution Spectral Estimation Based Locators), například autoregresivní modelování (AR – Autoregressive Modeling), spektrální odhad minimálního rozptylu (MV – Minimum Variance) a metodu vícenásobné klasifikace signálů(MUSIC – Multiple Signal Classification). První z metod AR je použitelná pouze pro vzdálené zdroje. Metody MV a MUSIC lze aplikovat i pro blízké zdroje

Princip těchto metod je ve využití spektrálních fázových korelačních matic. Podoba těchto matic je odvozená z pozorovaných údajů. To je realizováno pomocí střední hodnoty signálu v intervalu, ve kterém jsou parametry odhadu zdroje a šumu stacionární. Pro lokalizaci řečníka jsou tyto metody velmi problematické z důvodů nesplnění podmínky předchozí podmínky.

Tyto metody jsou vhodné pro lokalizování vícenásobných akustických zdrojů, které se nacházejí blízko sebe. Oproti metodě beamforming vykazují tyto metody lepší výsledky, především v menší výpočetní náročnosti. Využití těchto metod je především v radarové technice, pro úzkopásmové signály. Pokud bychom aplikovali tyto metody na širokopásmový signál, rapidně se zvýší výpočetní náročnost.

Po prostudování všech získaných poznatků od člena našeho týmu, jsme se domluvili, že se zaměříme na metody TDOA a Beamforming. Tyto metody se nám zdály nejlépe použitelné při možnosti vytvořit laboratorní model, který by se přiblížil lidskému sluchovému ústrojí. Práci jsme si rozdělili mezi dva členy našeho týmu. První člen vytvoří simulační podmínky pro ověření metodou TDOA a druhý člen se zaměří na metodu Beamforming.

11 METODA TDOA VYUŽITÁ NA ROBOTICKÉM ZAŘÍZENÍ PRO URČENÍ SMĚRU PŘICHÁZEJÍCÍ ZVUKOVÉ VLNY

V prvním pokusu se člen našeho týmu věnoval využití metody TDOA. Tato simulace slouží pro ověření našich předchozích poznatků. Uvažovali jsme o budoucím využití dvou základních mikrofونů, umístěných na přední části robotického zařízení. Tyto dva mikrofony by určovaly směr přicházejícího zvukového signálu.



Čas ke studiu: 3 hodiny



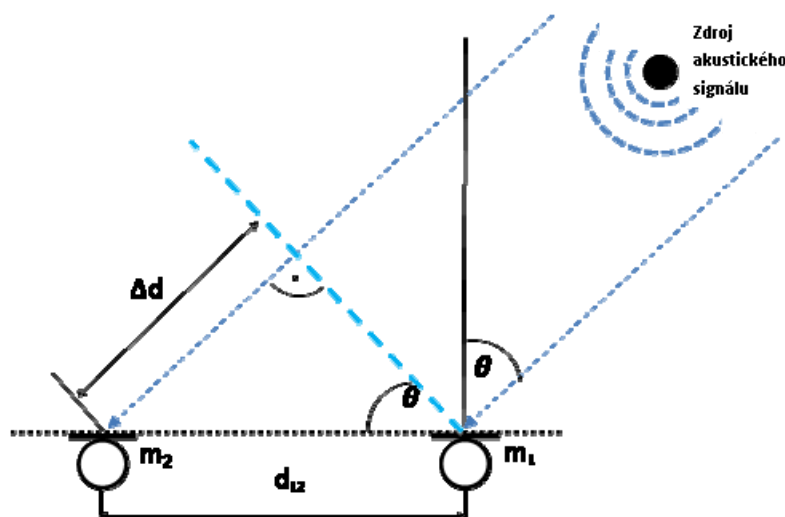
Cíl:

Využití metody TDOA pro orientaci mobilního objektu v prostoru.



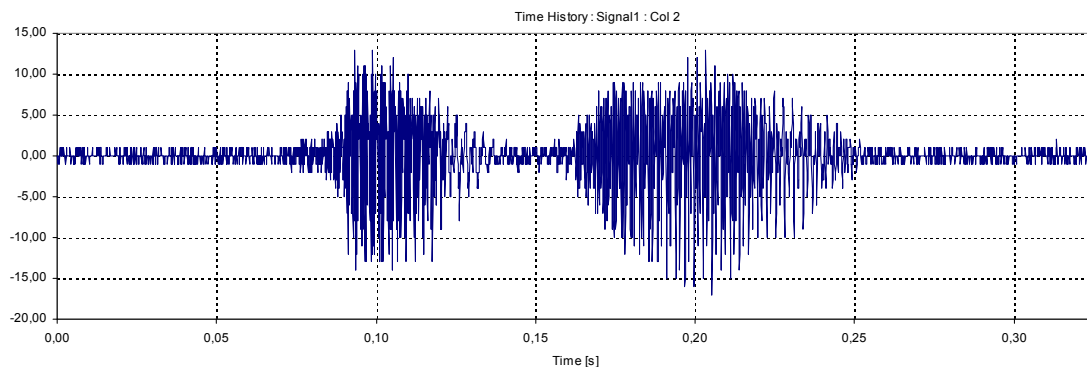
Výklad

Na začátku jsme museli rozhodnout, jak tuto simulaci provedeme. Po velice krátkém briefingu jsme se rozhodli využít software Signal Analyser a MATLAB. V softwaru Signal Analyser člen našeho týmu namodeloval zvukový signál, který dopadne na simulované mikrofoni pole pod úhlem 45° . Mikrofoni pole bylo reprezentováno dvěma lineárně umístěnými mikrofony. Vzdálenost mezi mikrofony činila $d_{12}=0,08\text{m}$.

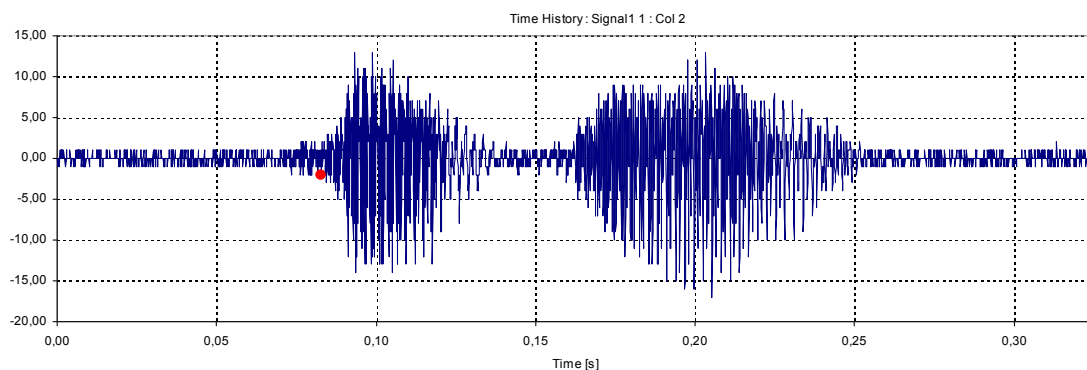


Obr. 11.1 Rozložení mikrofoniho pole při simulaci dopadu akustické vlny

Následující obrázek reprezentuje jednotlivé naměřené signály prvním a druhým mikrofonom. Jednotlivé mikrofony přijaly akustický signál s časovou diferencí τ_{12} . Tyto data by robotické zařízení zpracovávalo pomocí mikropočítače a nebo DSP.



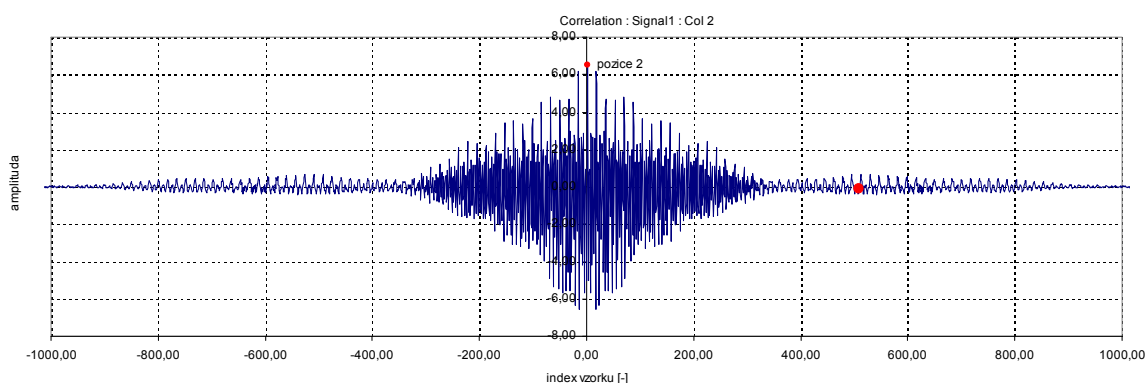
Obr. 11.2 Simulačně změřený signál při dopadu na první mikrofon



Obr. 11.3 Simulačně změřený signál při dopadu na druhý mikrofon

Pro výpočet časové diference použijeme vzájemnou korelační analýzu:

$$R_{12}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] \cdot x_2[n+k] \quad (30)$$



Obr. 11.4 Korelační analýza dvou signálů

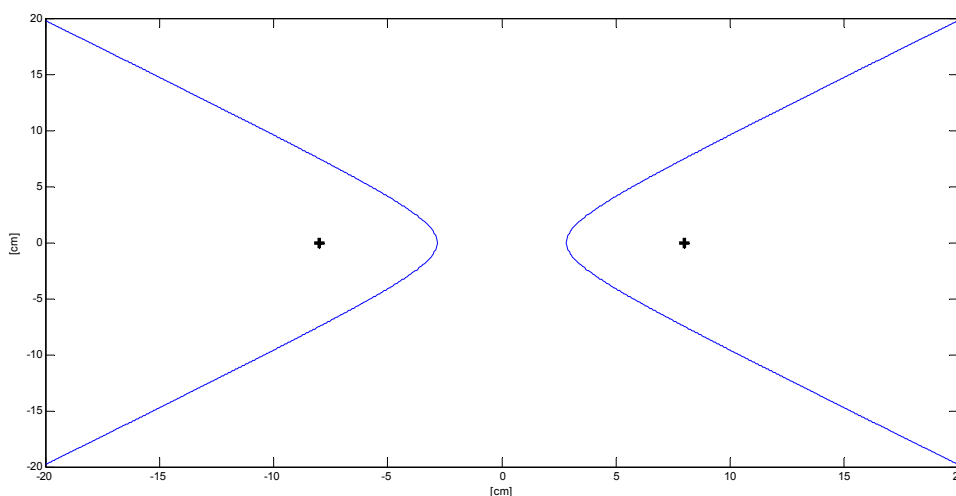
Korelační analýza dvou předchozích signálů ukazuje globální maximum na indexu $k = 2$, počet vzorků naměřeného signálu $f_{vz} = 12048$. Výpočet časového zpoždění τ_{12} dostaneme jako:

$$\tau_{12} = \frac{2}{12048} = 0,166 \text{ ms} \quad (31)$$

Dosazením známých hodnot do rovnice 7 získáme úhel dopadu jako:

$$\theta = \arcsin \frac{0,000166.340}{0,08} = 44,89^\circ \quad (32)$$

Z předchozího výsledku tohoto měření vyplývá nepřesnost analýzy dopadu vlnoplochy na $0,1^\circ$. Chyba je způsobená vzorkováním a následným zaokrouhlováním početního řešení. Všechny možné pozice zdroje signálu pro jeden pár mikrofónů jsou vykresleny na dalším obrázku. Z toho je patrné, že pokud bychom využili tuto metodu u našeho robota, měli bychom nepřesnost. U tohoto jsme předpokládali, že chyba je zanedbatelná, protože tento princip by sloužil k prvotnímu určení směru a využitím dalších přesnějších metod bychom dosáhli lepších výsledků. Otázka zda-li by to budoucí robotické zařízení potřebovalo.

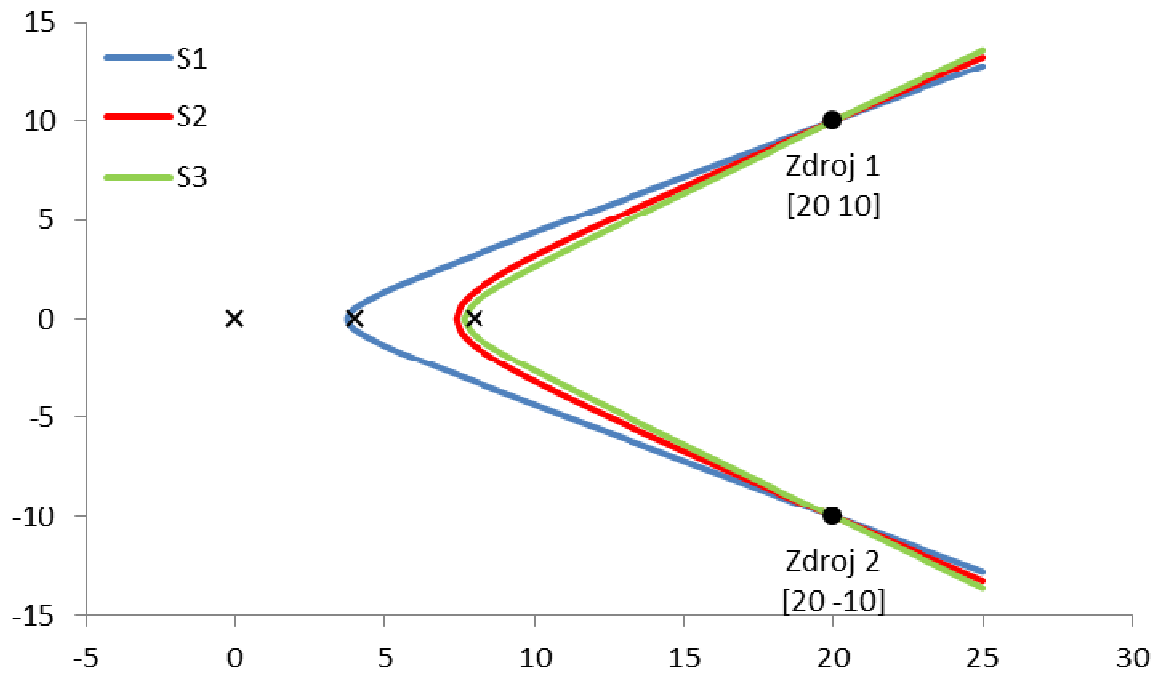


Obr. 11.5 Simulace využití dvou mikrofónů na přední části, které ukazují na předozadní nejednoznačnost.

Z toho simulačního experimentu je patrné, že pokud máme dva mikrofóny, lze určit směr, odkud přichází zvukový signál, ale nelze z něj určit, místo odkud zvukový signál přichází. Tuto nepřesnost bychom mohli odstranit, protože v našem případě předpokládáme, že robot má dva mikrofóny v přední části a tudíž měří signály pouze z předního směru. Nakonec z tohoto důvodu jsme se rozhodli vyzkoušet namodelovat mikrofonií pole se třemi mikrofóny. Dohodli jsme se, že v prvním kroku namodelujeme lineární mikrofonií pole a ve druhém se zaměříme na mikrofonií pole, ve kterém budou rozložené mikrofóny ve tvaru rovnostranného trojúhelníku.

Při simulaci lineárního pole, jsme přiřadili mikrofónům tyto souřadnice: M1 [0 0], M2[4 0] a M3[8 0]. Z tohoto je patrné, že robotické zařízení by mělo 3 lineárně umístěné mikrofóny na přední části. Opět jsme použili stejný postup jako v předcházející simulaci a zjistili časovou diferenci dopadu zvukového signálu na jednotlivé mikrofóny. Rovnice pro výpočet bodu zdroje akustického signálu je:

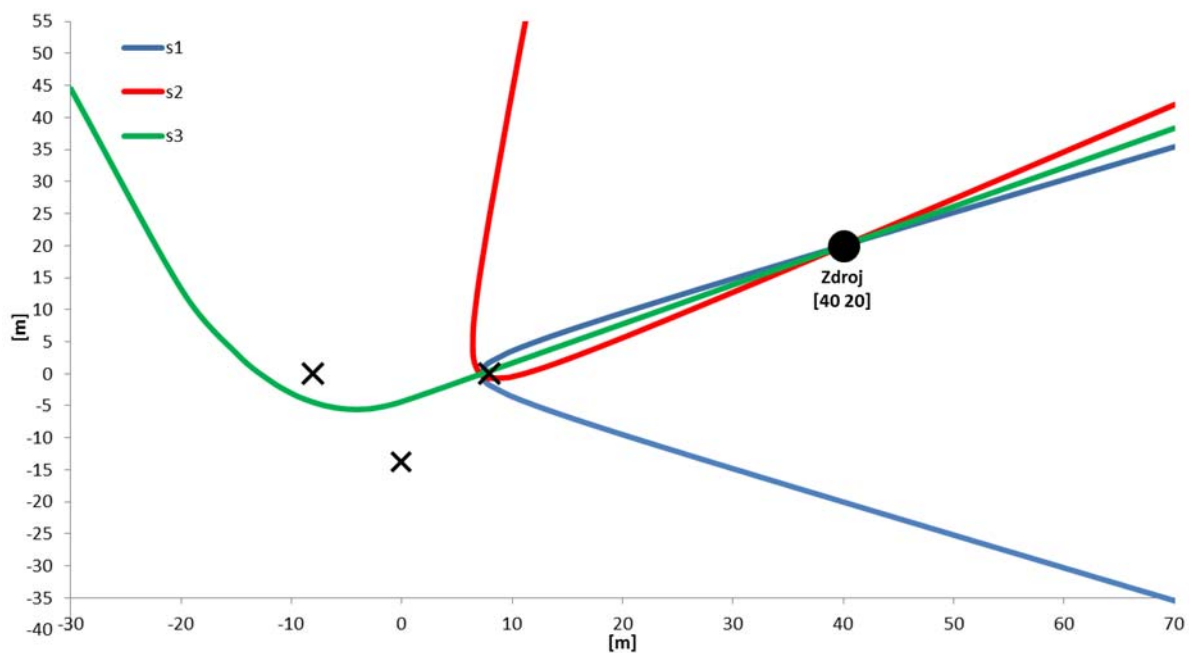
$$\tau_{12} = \frac{\sqrt{(s_x - m_{1x})^2 + (s_y - m_{1y})^2} - \sqrt{(s_x - m_{2x})^2 + (s_y - m_{2y})^2}}{c} \quad (33)$$



Obr. 11.6 Simulace lineárního mikrofonního pole, umístěného na přední části robotického zařízení

V tomto simulačním experimentu se ukázala opět předozadní nejednoznačnost. Nelze tedy s určitostí říct, jestli přicházející akustický signál přichází zepředu nebo zezadu. Tuto nejednoznačnost lze eliminovat, pokud známe směr, ze kterého očekáváme zvukový signál. V našem případě bychom věděli, že lineární pole je umístěno v přední části a mohli bychom tak vyřadit, data, která by ukazovala na jiný směr než z přední části robota.

V dalším experimentu jsme, na návrh člena našeho týmu, uspořádali mikrofony do tvaru rovnostranného trojúhelníka. Přiřadili jsme mikrofonom tyto souřadnice: M1[-8 0], M2[8 0] a M3[0 -13,36]. Tímto jsme docílili přesné lokalizace zdroje akustického signálu.



Obr. 11.7 Simulace mikrofonního pole-rovnostanný trojúhelník, umístěného na
přední části robotického zařízení

12 METODA BEAMFORMING

Při ověření této metody jsme se opět jednoznačně rozhodli využít softwaru Matlab Simulink. Nejdříve bylo nutné vytvořit matematický model, který popisuje chování vybrané metody.



Čas ke studiu: 3 hodiny



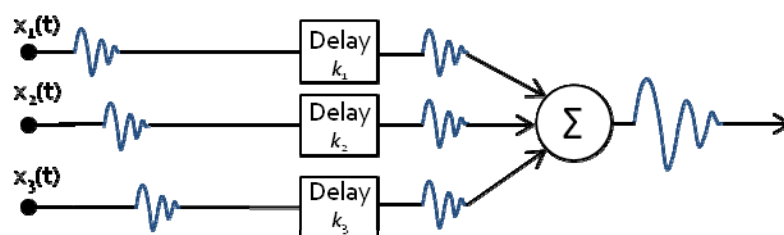
Cíl:

 Využití metody Beamforming pro orientaci mobilního objektu v prostoru.



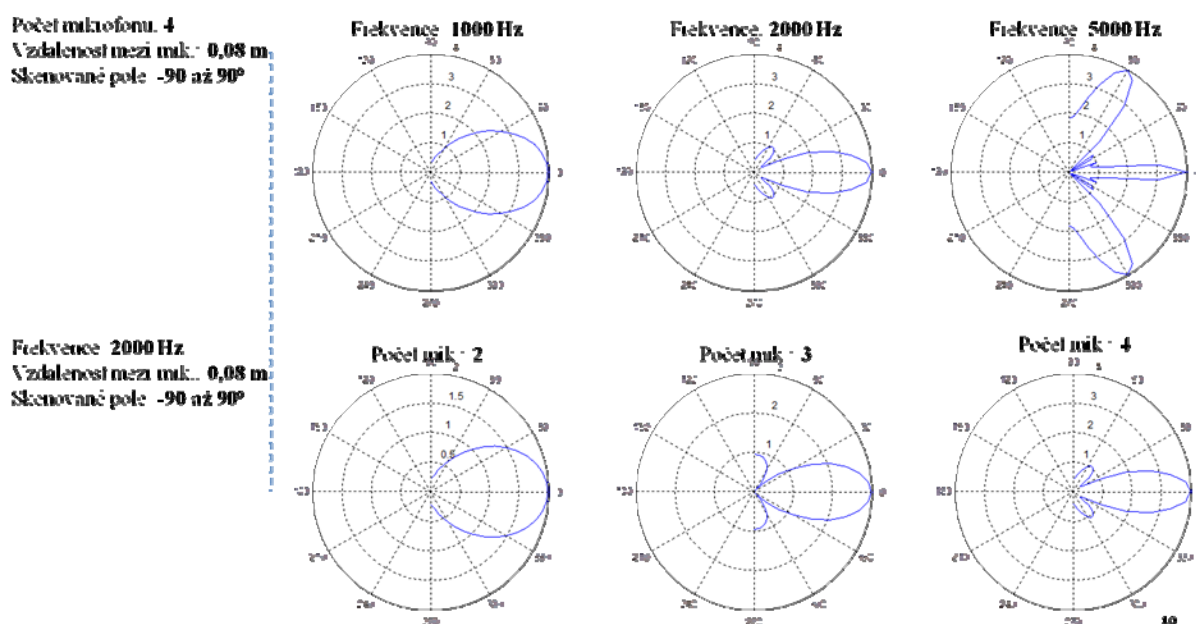
Výklad

Člen týmu vytvořil matematický model pro tuto metodu, která umožňuje libovolně nastavit počet mikrofónů v mikrofónním poli, vzdálenost mezi jednotlivými mikrofóny v mikrofónovém poli, frekvenci zdroje zvukové vlnoplochy a konstantu zpoždění dopadu jednotlivých vlnoploch na páry mikrofónů. Časové zpoždění dopadajícími vlnoplochy, mezi dvěma mikrofóny, obecně udává úhel a směr, ve kterém se nachází zdroj zvukového signálu.



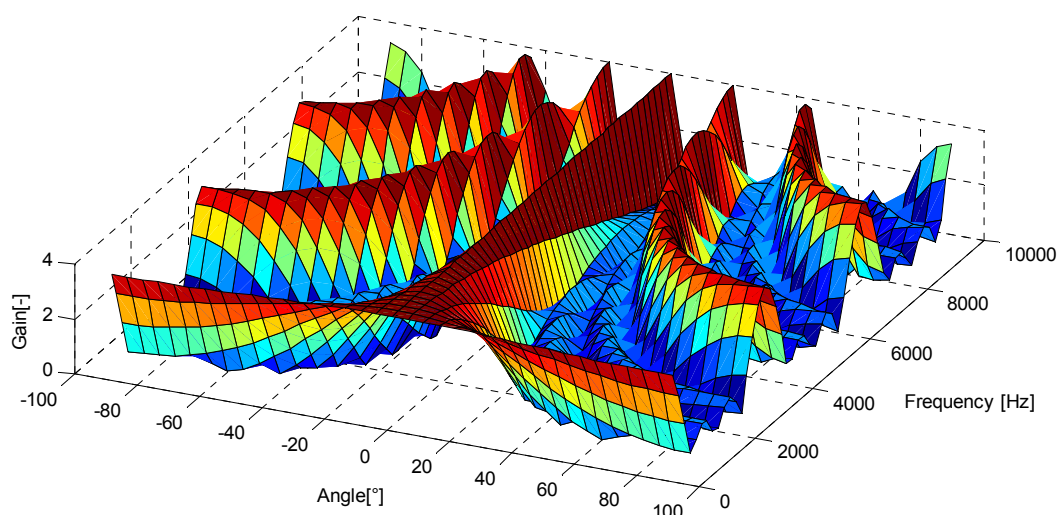
Obr. 12.1 Schéma matematického modelu metody Beamforming

Při debatě v našem týmu, jsme se uvažovali o tom, který ukazatel nastavení mikrofónního pole, bude ten hlavní a bude reprezentovat nasimulované výsledky. Jeden člen našeho týmu přišel s návrhem, že bychom se měli zaměřit na počet mikrofónů v poli, protože s vyšším počtem stoupají cenové náklady a bude zajímavé porovnat přesnost měření na počtu mikrofónů v poli. Druhým návrhem, který navrhnul další člen, bylo pozorovat přesnost měření v závislostech na frekvenci zvukového zdroje. Na obrázku níže je vidět simulované výsledky. První řada ukazuje směrovou charakteristiku mikrofónního pole v závislosti na frekvenci zvukového zdroje. Druhá potom ukazuje závislost směrové charakteristiky na počtu mikrofónů v poli.



Obr. 12.2 Simulované závislosti určujících směrových charakteristiky, pro lineární pole se 4 mikrofony, umístěnými na přední části robotického zařízení

Jak je vidět na předcházejícím obrázku, vykreslování směrové charakteristiky je závislé na frekvenci vysílajícího zvukového zdroje. První směrová charakteristika vykazuje velkou špičku, a tudíž větší množství potenciálních směrů odkud přichází zvukový signál. Toto je způsobeno tím, že není splněna podmínka pro zamezení antialiasingu. Prostřední obrázek vzkazuje mnohem ostřejší špičku směrové charakteristiky tzv. hlavní lalok, který takto udává mnohem přesnější informaci o možném směru zvukového zdroje. Zde v tomto grafu se nacházejí také dva postraní laloky, které nemají tak velkou intenzitu, aby mohly být brány jako směrodatné. Naproti tomu pokud je frekvence mnohem vyšší, dochází k vygenerování více hlavních laloků směrové charakteristiky a nelze jednoznačně určit, kterým směr přichází zvukový signál. Zobrazení závislosti frekvence zvukového zdroje na předpokládaném směru přicházejícího signálu, lze vyjádřit i v 3D souřadnicích. Takto lze vidět jednotlivé hlavní a postraní laloky, vznikající při různých frekvencích.



Obr. 12.3 Simulace lineárního pole, umístěného na přední části robota, ukazující závislost a přesnost určení na změně frekvence

Spodní řada obrázku pak určuje závislost směrové charakteristiky na počtu mikrofónů v mikronovém poli. Zde je konstantní frekvence zvukového zdroje a konstantní vzdálenosti mezi mikrofóny. Jak je vidět s přibývajícím počtem mikrofónů dochází k vytváření ostřejšího hlavního laloku, který určuje směr přicházejícího zvukového signálu. Na druhou stranu pokud narůstá počet mikrofónů, zvyšují se s nimi i náklady. Proto je nutné zvolit takový počet mikrofónů a vzdálenosti mezi nimi, tak aby mohly být pořizovací náklady nízké a zároveň, aby nebyla zhoršená kvalita měřící soustavy.

13 HARDWAROVÉ PROSTŘEDKY PRO ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Tato kapitola popisuje typy hardwarových prostředků pro záznam obrazu. Hardware je umístěn na mobilním objektu a bezdrátově přenáší obrazový signál do operátorského stanoviště.



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl:

-  Popis hardwarových prostředků pro záznam digitálního obrazu.
-  Popis komunikačních rozhraní digitální kamery.
-  Rozbor různých typů kamer.



Výklad

Pro záznam digitálního obrazu se používají digitální kamery. V současnosti se v digitálních kamerách používají čipy CCD (Charged Coupled Device) anebo CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Každá z uvedených technologií má své výhody i nevýhody. Výhodou CMOS čipů je značně levnější a rychlejší výrobní proces a také nižší spotřeba čipu. CCD čipy se naopak vyznačují vyšší světelnou citlivostí a tím také lepší kvalitou obrazu. Je však nutné poznamenat, že technologie CMOS se stále zlepšuje a rozdíly v kvalitě obrazu se tak srovnávají. Stručný přehled nejvýznamnějších výhod a nevýhod těchto čipů jsou uvedeny v následujícím textu.

CCD (Charged Coupled Device)

Výhody

- větší světelná citlivost
- nižší úroveň šumu
- vyšší kvalita obrazu
- vysoký dynamický rozsah

Nevýhody

- nebezpečí přetečení náboje při přexponování
- nutnost načíst vždy celý obraz z čipu
- vyšší energetická spotřeba
- nákladnější výroba
- vyšší cena

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

Výhody

- umožňuje integraci všech potřebných obvodů přímo na čip
- rychlejší a levnější standardní výrobní postup
- vysoká rychlost

Nevýhody

- nižší světelná citlivost
- větší úroveň šumu
- nižší kvalita obrazu

13.1 Komunikační rozhraní

Dalším důležitým kritériem při výběru digitální kamery je použité komunikační rozhraní. V praxi nejvýznamnější a nepoužívanější jsou následující standardy: USB 2.0, USB 3.0, FireWire, GigE a Camera Link. Každé z nich má určité výhody, ale také nevýhody. Volba vhodného rozhraní kamery závisí zejména na požadované rychlosti přenosu dat, délce kabelu, odolnosti proti rušení, standardizaci atd.

USB 2.0 / USB 3.0

Výhodou tohoto komunikačního rozhraní je zejména skutečnost, že se jedná o standardní rozhraní dostupné u všech stolních i průmyslových počítačů. Z toho plyne také nízká cena. Nevýhodou je pak chybějící standard pro průmyslové kamery. Tento problém ale řeší nové rozhraní USB 3.0. Rozhraní USB nabízí v porovnání s ostatními rozhraními střední propustnost. Zejména u staršího, ale dosud stále nejrozšířenějšího rozhraní USB 2.0 může docházet ke ztrátě obrazových dat v důsledku vysokého datového toku z kamery a absence vyrovnávací paměti. Nový standard USB 3.0 nabízí vyšší propustnost a tím i menší pravděpodobnost ztráty obrazových dat.

Tabulka 13.1 – Parametry komunikačního rozhraní USB

	USB 2.0	USB 3.0
Propustnost	60 MB/s teoretická, 24 MB/s skutečná	až 625 MB/s teoretická, 400 – 500 MB/s skutečná
Délka kabelu	5 m	5 m

FireWire

Největší výhodou rozhraní FireWire (IEEE 1394) je standard definující velice stabilní metodu pro výměnu dat mezi kamerami a počítačem. Což je důležité zejména pro velice

rychlé aplikace, kde je požadována vysoká přesnost. Rozhraní je pro průmyslové kamery velice dobře definované. Nevýhodou tohoto rozhraní je vyšší cena a menší délka používaných kabelů.

Tabulka 13.2 – Parametry komunikačního rozhraní FireWire

FireWire	
Propustnost	IEEE 1394a: 50MB/s teoretická, 37,5MB/s skutečná, max. 32MB/s pro jedno zařízení IEEE 1394b: 100MB/s teoretická, 75MB/s skutečná, max. 64MB/s pro jedno zařízení
Délka kabelu	4,5 m

GigE – Gigabit Ethernet

Gigabitový ethernet je v současnosti asi nejrozšířenější rozhraní používané v průmyslu pro strojové vidění. Jeho výhody oproti ostatním rozhraním jsou zejména maximální možná délka jednoho kabelu, která činí až 100 metrů, vysoká datová propustnost až 100 MB/s a jednoduché zapojení několika kamer k jednomu počítači. Jedná se o standardní rozhraní podporované všemi počítači, což přináší výhodu v podobě nízkých nákladů na realizaci tohoto zapojení. GigE Vision standard navíc nabízí přesně definovanou podporu pro všechny programy zabývající se zpracováním obrazu.

Tabulka 13.3 – Parametry komunikačního rozhraní GigE

GigE – Gigabit Ethernet	
Propustnost	125 MB/s teoretická, asi 100 MB/s skutečná,
Délka kabelu	100 m

Camera Link

Camera Link je velice rychlé a robustní rozhraní pro průmyslové použití. Toto rozhraní bylo navrženo speciálně pro účely průmyslových kamer, nabízí tedy vysokou datovou propustnost a vysokou bezpečnost. Všechny komponenty tohoto systému se musí přesně držet standardů Camera Link, od konektorů přes kabely a karty pro zachytávání obrazu. Tato skutečnost na druhou stranu vede k vysoké ceně celého systému Camera Link.

Tabulka 13.4 – Parametry komunikačního rozhraní Camera Link

Camera Link	
Propustnost	Základní (24 bitů) – až 255 MB/s Střední (48 bitů) – až 510 MB/s Plná (64 bitů) – až 680 MB/s Rozšířená (80 bitů) – až 850 MB/s
Délka kabelu	až 10 m pro 85 MHz, delší kabel pro nižší frekvence

Robot je již jednou kamerou osazen, je tedy třeba zvážit, zda danou kameru ponechat, anebo ji nahradit jinou kamerou, případně systémem se dvěma kamerami. V další části textu budou zhodnocena výše zmíněná komunikační rozhraní a představeny vybrané kamery, které by mohly být pro tento model použity.

Pro použití v rámci této studie se jako nejvhodnější rozhraní jeví rozhraní GigE nebo rozhraní USB. Zejména díky jednoduchosti realizace tohoto rozhraní na robotu. Robot sestavený na Katedře automatizační techniky a řízení je již rozhraním Ethernet i rozhraním USB vybaven. Na druhou stranu rozhraní použité na modelu nabízí jen velice nízkou datovou propustnost. Bylo by tedy vhodné robota upravit a doplnit o rychlejší komunikační rozhraní.

Další výhodou pro volbu rozhraní GigE je možnost připojení více kamer. Bylo by tedy možné připojit dvě kamery pro stereoskopické vidění.

13.2 Digitální kamera iDS UI-1225LE

Pro účely této práce by bylo možné použít například digitální kameru iDS UI-1225LE (obr. 2.1). Jedná se o velice kompaktní černobílou digitální kameru s rozhraním USB 2.0 a závitem C-Mount. Podrobnější specifikace této kamery lze nalézt v tabulce (tabulka 2.5). Výhodou této kamery jsou její malé rozměry, nízká hmotnost a také možnost vyjmutí kamery z pouzdra, což umožňuje lepší zabudování kamery do požadovaného systému a ještě více snižuje její rozměry a hmotnost.

Tabulka 13.5 – Parametry digitální kamery iDS UI-1225LE

Komunikační rozhraní	USB
Závit pro objektiv	C-Mount, CS-Mount
Technologie snímače	CMOS
Rozlišení (h x v)	752 x 480
Počet bitů na pixel	8bit (10bit ADC)
Typ rozlišení	širokoúhlé
Velikost snímače	1/3"
Clona	globální
Snímací frekvence	87 fps
Expoziční čas	80 μ s až 5,5 s
AOI mód	horizontální i vertikální
Krytí pouzdra	IP30
Rozměry (v x š x h)	44 x 44 x 25,4 mm
Hmotnost	32 g
Napájení	USB



Obr. 13.1
Digitální kamera iDS UI-1225LE

13.3 Digitální kamera Basler acA640-100gm

Další variantou by mohlo být použití digitální kamery Basler acA640-100gm. Tato průmyslová kamera nabízí oproti předchozí kameře robustnější pouzdro a možnost připojení a napájení po ethernetu (PoE). Podrobnější parametry této kamery jsou opět uvedeny v tabulce (tabulka 13.6).

Tabulka 13.6 – Parametry digitální kamery Basler acA640-100gm

Komunikační rozhraní	GigE
Závít pro objektiv	C-Mount, CS-Mount
Snímač	Sony ICX618
Technologie snímače	Progressive Scan CCD
Rozlišení (h x v)	659 x 494
Počet bitů na pixel	12bit
Velikost snímače	1/4"
Clona	globální
Snímací frekvence	100 fps
Krytí pouzdra	IP30
Rozměry (v x š x h)	60,3 x 29 x 29 mm
Hmotnost	90 g
Napájení	PoE nebo 12 VDC



Obr. 13.2 – Digitální kamera Basler acA640-100gm

13.4 Objektiv Lensagon CVM40100

K oběma kamerám by bylo možné připojit objektiv Lensagon CVM40100 (obr. 2.3) s manuálním zoomem a ostřením. Parametry tohoto objektivu uvádí následující tabulka (tabulka 13.7).

Tabulka 13.7 – Parametry objektivu Lensagon CVM40100

Formát obrazu	1/2"
Závít	C-Mount
Ohnisková vzdálenost	4 ~ 10 mm
Clona	1,6 ~ zavřeno (manuální s aretací)
M.O.D	0,2 m
Zoom a ostření	Manuální s aretací
Zorný úhel při 1/2" (horizontální)	87,2° ~ 44,4°
Hmotnost	85 g



Obr. 13.3 – Objektiv Lensagon CVM40100

14 ZPRACOVÁNÍ OBRAZOVÝCH SIGNÁLŮ

Se stále rostoucím výkonem běžných procesorů, DSP a rostoucím výkonem a kvalitou digitálních kamer je možné používat zpracování obrazových dat z těchto kamer pro prostorovou orientaci různých mobilních zařízení.

V tomto případě bude prostorová orientace robotu založena na kombinaci zpracování obrazových dat z digitální kamery připevněné na robotu a na zpracování zvukových signálů. Tato kapitola se zabývá zpracováním obrazových dat a návrhem možností rozpoznávání objektů v obraze.



Čas ke studiu: 6 hodin



Cíl:

-  Popis digitálního obrazu a jeho reprezentace.
-  Typy digitálních obrazů.
-  Barevné prostory.
-  Metody zpracování obrazu.
-  Popis softwarových prostředků pro zpracování obrazu.



Výklad

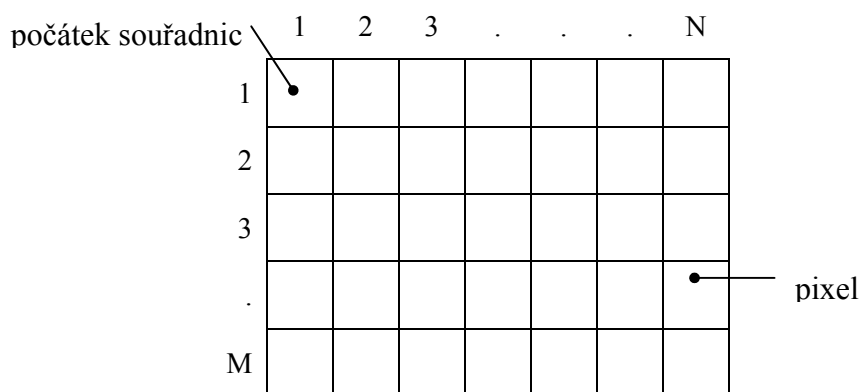
14.1 Digitální obraz a jeho reprezentace

Obraz můžeme definovat jako dvourozměrnou funkci $f(x,y)$, kde x a y jsou prostorové souřadnice a amplituda funkce f pro každou tuto dvojici souřadnic vyjadřuje intenzitou daného bodu obrazu. Pro vyjádření intenzity monochromatických obrazů se často používá termín stupně šedi. Barevné obrazy jsou tvořeny kombinací jednotlivých složek obrazu barevného systému. Například barevný systém RGB sestává ze tří monochromatických obrazů, jež vyjadřují červenou (R), zelenou (G) a modrou (B) složku.

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1,N) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & f(2,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M,1) & f(M,2) & \dots & f(M,N) \end{bmatrix} \quad (34)$$

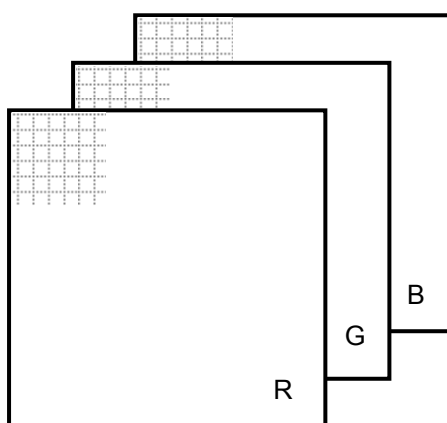
Obecně funkce $f(x,y)$ může být spojitá jak v souřadnicích x , y , tak i v amplitudě. Převod takového obrazu do digitální formy vyžaduje digitalizaci souřadnic i amplitudy. Digitalizaci hodnot souřadnic nazýváme vzorkování a digitalizaci amplitud kvantování. Pokud jsou hodnoty souřadnic x , y i amplituda funkce f diskrétní hodnoty, nazýváme takový obraz digitálním obrazem.

Výsledkem digitalizace obrazů jsou matice reálných čísel, které obsahují M řádků a N sloupců. Říkáme, že obraz je velikosti $M \times N$, kde každý element tohoto pole odpovídá jednomu pixelu obrazu. Používají se dva základní způsoby definice počátku souřadnic pro digitální obrazy. Často je počátek souřadnic definován v bodě $(x,y) = (0,0)$. Naproti tomu například Image Processing Toolbox v MATLABu definuje počátek souřadnicového systému v bodě $(r,c) = (1,1)$. Schematické znázornění souřadného systému pro monochromatický obraz představuje obr. 14.1.



Obr. 14.1 Souřadný systém používaný v IPT

Monochromatické obrazy se v MATLABu ukládají jako dvourozměrná pole, zatímco barevné obrazy se ukládají do vícerozměrných polí, kde každé pole představuje jednu barevnou složku (např. RGB viz obr. 14.2). Každý pixel barevného obrazu je tedy tvořen odpovídajícími pixely všech jeho komponent. Image Processing Toolbox používá pro ukládání barevných obrazů buď formát RGB, nebo je ukládá jako indexované obrazy.



Obr. 14.2 Složení RGB obrazu z jednotlivých komponent

14.2 Typy digitálních obrazů

Jak už bylo uvedeno v předchozí kapitole, digitální obraz je v počítači uložen jako pole (matice) dat. Způsob uložení hodnot v těchto polích a jejich rozsah závisí na typu obrazu. V prostředí MATLAB se například obrazy dělí do následujících skupin:

- binární (černobílé) obrazy – obsahují pouze diskrétní hodnoty 0 a 1, kde 0 představuje černou (pozadí) a hodnota 1 představuje bílou (objekt).
- indexované (pseudo-barevné) obrazy – se skládají ze dvou matic, datové matice a matice barevné mapy. Hodnoty v datové matici odkazují na barevnou mapu.
- monochromatické obrazy – obraz ve stupních šedi, obsahuje hodnoty intenzity v rozsahu 0 (černá) až 255 (bílá), pro osmibytový datový typ.
- barevné obrazy – jsou vyjádřeny trojrozměrnou maticí, reprezentující jednotlivé barevné složky obrazu (R, G, B).

Rozsah hodnot uložených v jednotlivých pixelech obrazových polí závisí na použitém datovém typu. MATLAB a Image Processing Toolbox podporují celou řadu datových typů. Jejich výčet a příslušné rozsahy hodnot lze nalézt v tabulce (tabulka 14.1).

Tabulka 14.1 Datové typy podporované v MATLAB a Image Processing Toolbox

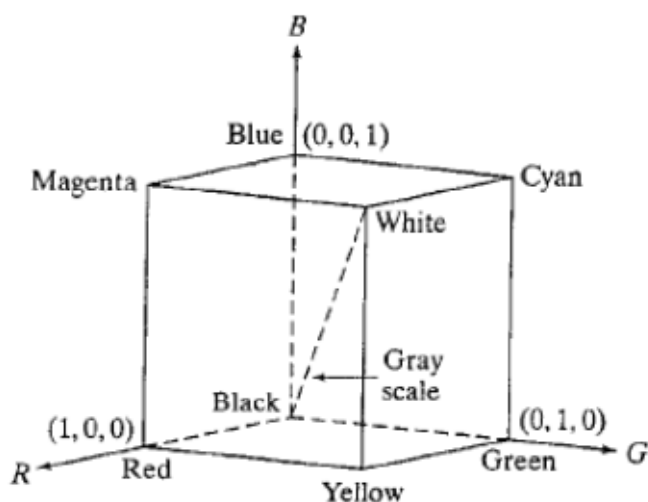
Název	Popis
double	čísla s plovoucí desetinnou čárkou v rozsahu přibližně -10^{308} až 10^{308} (8 bytů na element).
unit8	osmibitové celé číslo bez znaménka v rozsahu 0 až 255 (1 byte na element).
unit16	šestnáctibitové celé číslo bez znaménka v rozsahu 0 až 65535 (2 byty na element).
unit32	dvaatřicetibitové celé číslo bez znaménka v rozsahu 0 až 4294967295 (4 byty na element).
int8	osmibitové celé číslo se znaménkem v rozsahu -128 až 127 (1 byt na element).
int16	šestnáctibitové celé číslo se znaménkem v rozsahu -32768 až 32767 (2 byty na element).
int32	dvaatřicetibitové celé číslo se znaménkem v rozsahu -2147483648 až 2147483647 (4 byty na element).
single	Single-precision čísla s plovoucí desetinnou čárkou v rozsahu přibližně -10^{38} až 10^{38} (4 byty na element).
char	Textové znaky (2 byty na element).
logical	Lgické hodnoty, jen 0 nebo 1 (1 byte na element).

14.3 Barevné prostory

Barevný obraz nemusí být vždy uložen jen jako kombinace barevných složek červené, zelené a modré, ale existuje velké množství dalších různých barevných prostorů. Každý z barevných prostorů vyjadřuje výsledný obraz jiným způsobem a každý barevný model je vhodný pro jiné účely. Například pro zobrazovací jednotky počítačových obrazovek nebo projektorů se používá model RGB (aditivní způsob míchání barev), v tiskárnách se zase používá barevný model CMYK (subtraktivní míchání barev) atd. Pro účely strojového vidění a rozpoznávání obrazu se často používá např. model HSV, který odpovídá více lidskému vnímání barev.

Barevný model RGB

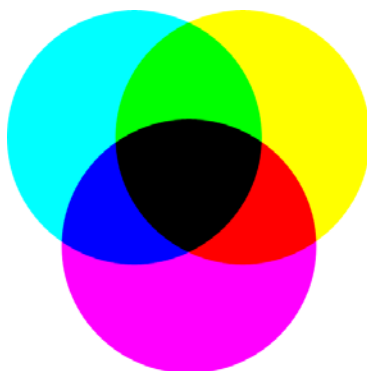
Jde o aditivní způsob míchání barev. Barevný model RGB je vyjádřen tzv. RGB krychlí (obr. 14.3), kde kolmé hrany udávají škálu barevných složek. Každý bod se skládá z červené, zelené a modré komponenty. Pokud mají všechny komponenty stejnou hodnotu, výsledkem je obraz ve stupních šedi (viz obrázek).



Obr. 14.3 – Barevný model RGB [10]

Barevný model CMYK

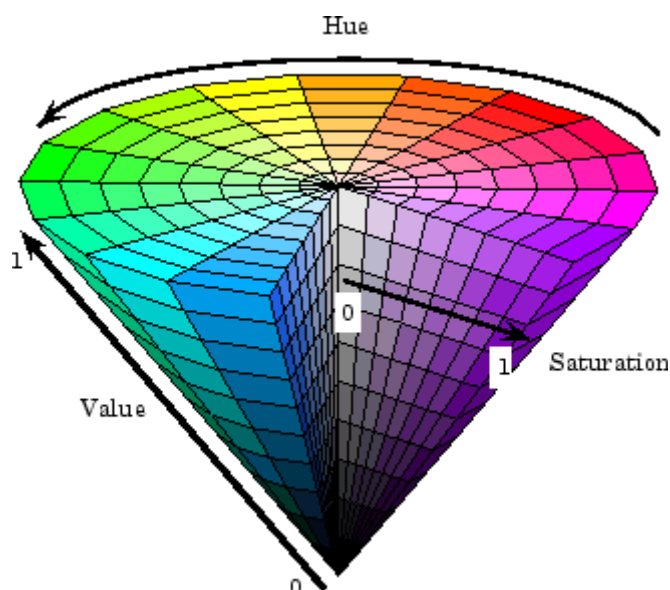
Na rozdíl od RGB modelu se jedná o subtraktivní míchání barev (obr. 14.4) používané především u reprodukčních zařízení, jako jsou tiskárny. Model CMYK obsahuje čtyři základní barvy: azurovou (Cyan), purpurovou (Magenta), žlutou (Yellow) a černou (Key).



Obr. 14.4 – Princip subtraktivního míchání barev

Barevný model HSV

Barevný model HSV vyjadřuje obraz jako kombinaci odstínu (hue), sytosti (saturation) a hodnoty jasu (value). Tento barevný model je blíže způsobu jakým lidé vnímají barvy. Odstín je v modelu vyjádřen jako úhel okolo barevného jehlanu (obr. 14.5), kde hodnota 0° vyjadřuje červenou. Hodnota jasu je vyjádřena na ose barevného kužele. Hodnota 0 představuje černou, zatímco hodnota 1 představuje bílou. Sytost je vyjádřena vzdáleností od osy kužele. Všechny parametry HSV modelu jsou v rozsahu 0 až 1.



Obr. 14.5 – Barevný model HSV [25]

14.4 Metody zpracování obrazu

Zpracováním obrazu je oblast, kterou se zabývá řada pracovišť a univerzit po celém světě. V posledních letech se zpracování obrazových dat postupně stává nedílnou součástí mnoha průmyslových aplikací od kontroly výrobků až po bezpečnostní a asistenční systémy v automobilech. Bylo již navrženo mnoho metod a algoritmů pro zpracování obrazových dat. V rozsahu této práce není možný výčet všech způsobů práce s obrazovými daty. Budou zde vybrány jen některé metody, které byly vyzkoušeny v rámci této studie.

14.4.1 Blob analysis

Technika zvaná “blob analysis” je založená na detekci oblastí v obraze, které mají odlišné okolí. Pro tyto oblasti je možné vypočítat různé parametry popisující jejich tvar a následně tyto vypočtené hodnoty filtrovat a vybrat tak oblasti (objekty), které splňují požadovaná kritéria. Jako vstup pro tyto funkce je vyžadován binární obraz. MATLAB nabízí několik funkcí usnadňující výpočty oblastí v obraze a jejich parametrů. Mezi tyto funkce patří *bwlabel()* a *regionprops()*. První z nich, *bwlabel()*, slouží k označení (očíslování) jednotlivých oblastí (blobs). Pomocí další funkce, *regionprops()*, pak můžeme počítat různé parametry označených oblastí. Přehled nabízených parametrů je zobrazen v tabulce (tabulka 14.2).

Tabulka 14.2 – Parametry popisující tvar nabízené v IPT

Area	Eccentricity	FilledImage	PixelIdxList
BoundingBox	EquivDiameter	Image	PixelList
Centroid	EulerNumber	MajorAxisLength	Solidity
ConvexArea	Extent	MinorAxisLength	SubarrayIdx
ConvexHull	Extrema	Orientation	
ConvexImage	FilledArea	Perimeter	

Používají se tzv. popisy tvarů (Shape descriptors) k sestavení popisu hledaného objektu. Tyto popisy je třeba volit s ohledem na změny polohy objektu v obraze (zvětšení/zmenšení, rotace). Ideální jsou takové popisy, které jsou nezávislé na velikosti a rotaci hledaného objektu v obraze. Příkladem často používaného popisu tvaru, který není ve funkci *regionprops()* zastoupen je například tzv. Form faktor. Vztah pro výpočet tohoto popisu tvaru je následující

$$F = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (35)$$

kde A = Area, neboli počet pixelů daného objektu, p = perimeter, neboli obvod objektu.

Příklady hodnot vypočtených pro různé tvary objektů v obraze jsou znázorněny na následujícím obrázku (obr. 14.6). Z obrázku je vidět, jak se vypočtená hodnota Form factor pro různé tvary objektů mění. Hodnota 1 představuje dokonalý kruh, čím méně se zkoumaný objekt podobá kruhu, tím se vypočtená hodnota Form factor blíží k nule.



Obr. 14.6 – Příklady vypočtených hodnot Form factor pro různé tvary objektů

Na základě takto vypočtených hodnot různých popisů tvarů lze stanovit kritéria, která musí hledaný objekt splňovat. Tímto lze z obrazu odfiltrout nechtěné objekty anebo naopak vybrat jen určité objekty, se kterými budeme dále pracovat.

14.4.2 Pattern recognition

Pomocí této techniky lze pro vybrané objekty vypočíst podobnost s požadovanou vzorovou množinou a tím objekt klasifikovat. Pro sestavení vzorové množiny lze použít například matici hodnot popisů tvaru hledaného objektu. Existuje velké množství technik výpočtu používaných pro pattern recognition. Jednou z možností je výpočet vzdálenosti zkoumaného objektu od vzorové množiny. Nejjednodušší metodou je výpočet Euklidovské vzdálenosti dle následujícího vzorce

$$d_E = \sqrt{(X - Y)^T (X - Y)} \quad (36)$$

kde X je referenční (vzorová) množina a Y je zkoumaný objekt

Přesnější je však použití Mahalanobisovy vzdálenosti, která počítá i s korelací datové množiny a je tím pádem nezávislá na měřítku. Vzorec pro výpočet Mahalanobisovy vzdálenosti je následující

$$d_M(Y, X) = \sqrt{(Y - X)^T \Sigma^{-1} (Y - X)} \quad (37)$$

jako u Euklidovské vzdálenosti i zde je X referenční množina a Y je zkoumaný objekt, symbol Σ představuje kovarianční matici, kde $\sigma_{11}^2, \sigma_{22}^2, \dots, \sigma_{nn}^2$ jsou variance referenční množiny X.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \dots & \sigma_{1n}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \dots & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Příklad referenční množiny pak může vypadat následovně

$$X = \begin{bmatrix} S_1 & Ecc_1 & Ex_1 & F_1 & AP_1 \\ S_2 & Ecc_2 & Ex_2 & F_2 & AP_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_M & Ecc_M & Ex_M & F_M & AP_M \end{bmatrix} \quad (39)$$

jedná se o množinu sestavenou s pěti popisů tvaru (Solidity - S, Eccentricity - Ecc, Extent - Ex, Form factor - F, Axis Proportion - AP), které jsou uvedeny ve sloupcích matice. Řádky této matice pak představují jednotlivé vzorové objekty (1 až M).

Pro zkoumaný objekt se vypočtou stejné parametry, které vytvoří následující vektor

$$Y = [S \quad Ecc \quad Ex \quad F \quad AP] \quad (40)$$

Výsledkem výpočtu Mahalanobisovy vzdálenosti zkoumaného objektu od referenční množiny je číslo v rozsahu od 0 do nekonečna. Pokud je výsledkem 0 znamená to, že zkoumaný symbol je identický se vzorem. Naopak pokud je výsledkem vysoké číslo anebo se výsledek blíží k nekonečnu, znamená to, že zkoumaný objekt je naprosto odlišný od referenční množiny. Lze tak určit, do jaké míry je zkoumaný objekt podobný (anebo odlišný) od referenční množiny. Pro klasifikaci zkoumaného objektu je pak možné stanovit maximální hodnotu Mahalanobisovy vzdálenosti, pro kterou bude objekt přiřazen ke hledané množině.

V Matlabu je možné Mahalanobisovu vzdálenost počítat jednoduše pomocí funkce mahal(), která má následující syntaxi

```
>> d = mahal(X, Y);
```

kde d je vypočtená Mahalanobisova vzdálenost, X je referenční množina a Y zkoumaný objekt. X a Y musí mít stejný počet sloupců (stejný počet parametrů), ale mohou se lišit v počtu řádků (X může obsahovat více referenčních vzorů).

14.4.3 Zpracování obrazu ve frekvenční oblasti

Další možností zpracování obrazu je převod obrazu do frekvenční oblasti. K tomuto převodu se používá Fourierova transformace, která převádí signál z časové oblasti do oblasti frekvenční. Obecně se spojitá Fourierova transformace počítá podle následujícího vzorce:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (41)$$

kde funkce $x(t)$ je originál a výsledek transformace $X(\omega)$ je obraz. Podmínkou je, aby funkce $x(t)$ byla po částech spojitá s konečným počtem bodů nespojitosti. Integrál funkce $|x(t)|$ musí být konečný. Zpětná Fourierova transformace se vypočte dle následujícího vzorce:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (42)$$

Protože počítače nepracují se spojitými signály, ale zpracovávají signály vzorkované, používá se Diskrétní Fourierova transformace. Dalším rozdílem při zpracování signálů v počítači je fakt, že každý záznam má konečnou délku. Počítáme tedy N bodovou DFT podle vzorce:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (43)$$

Zpětnou DFT pak vypočteme následovně:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (44)$$

Při výpočtu DFT pro vstupní signál o počtu vzorků N je nutné provést N^2 komplexních násobení a sčítání těchto dílčích výsledků. Urychlení výpočtu přineslo objevení algoritmu rychlé Fourierovy transformace (FFT). Princip urychlení výpočtu spočívá v rozdělení řady vzorků signálu na vzorky se sudým a lichým pořadím. Podmínkou je, aby počet vzorků byl roven mocnině dvou. DFT pro N vzorků je tímto nahrazena dvěma dílčími DFT zvlášť pro liché a sudé vzorky, jejichž počet je tedy $N/2$. Výběr každého druhého vzorku se nazývá decimace. Rozlišujeme dvojí způsob výpočtu FFT: metoda decimace v čase a metoda decimace ve frekvencích.

Při výpočtu DFT pro poloviční počet vzorků $N/2$ je zapotřebí $(N/2)^2 = N^2/4$ komplexních násobení a sčítání. Dvě dílčí DFT s počtem vzorků $N/2$ tedy vyžadují $N^2/2$ uvedených operací. FFT tedy vyžaduje o polovinu operací méně. Jelikož je počet vzorků roven mocnině dvou $N = 2^m$ lze tuto redukci opakovat m -krát a výsledný počet komplexních násobení a sčítání je jen $mN = N \log_2 N$. Tento algoritmus se nazývá Cooley-Tukey algoritmus FFT.

Při výpočtech DFT pro obrazová data se používá dvourozměrná diskretní Fourierova transformace (2D-DFT). Obraz o rozměrech $M \times N$ pixelů můžeme pak označit jako funkci

$$f(x, y) \text{ pro } x = 0, 1, 2, \dots, M-1 \text{ a } y = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

Dvourozměrná diskretní Fourierova transformace funkce f se pak vypočte dle vztahu

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M + vy/N)} \quad (45)$$

pro $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$ a $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Výsledné obdélníkové pole $M \times N$ je nazýváno jako frekvenční obdélník.

Inverzní diskretní dvourozměrná Fourierova transformace je dána vztahem

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M + vy/N)} \quad (46)$$

pro $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$ a $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$. V některých formulacích DFT se výraz $1/MN$ uvádí před rovnicí transformace a v některých před rovnicí inverze. Zde uvedené rovnice s výrazem před inverzí odpovídají implementaci Fourierovy transformace v MATLABU.

Hodnota transformace v počátku frekvenční oblasti (např. $F(0,0)$) se nazývá stejnosměrná složka Fourierovy transformace. Stejnosměrná složka je rovna $M \times N$ násobku průměrné hodnoty $f(x, y)$.

I pokud je funkce $f(x, y)$ reálná, její transformace je obecně komplexní. Základní metodou vizuální analýzy transformace je výpočet spektra a jeho zobrazení jako obrazu. Jestliže $R(u, v)$

a $I(u,v)$ představují reálnou a imaginární složku $F(u,v)$, Fourierovo spektrum je pak definováno jako

$$|F(u,v)| = \sqrt{R^2(u,v) + I^2(u,v)} \quad (47)$$

Fáze transformace je definována jako

$$\phi(u,v) = \tan^{-1} \left[\frac{I(u,v)}{R(u,v)} \right] \quad (48)$$

Předchozí dvě funkce mohou být použity pro vyjádření komplexní funkce $F(u,v)$ v polární formě

$$F(u,v) = |F(u,v)|e^{j\phi(u,v)} \quad (49)$$

Výkonové spektrum je definováno jako mocnina amplitudy

$$P(u,v) = |F(u,v)|^2 = R^2(u,v) + I^2(u,v) \quad (50)$$

Pro účely vizualizace není důležité, jestli zobrazíme $|F(u,v)|$ nebo $P(u,v)$.

Jestliže $f(x,y)$ je reálná, její Fourierova transformace je oboustranně symetrická podle počátku, to znamená

$$F(u,v) = F^*(-u,-v) \quad (51)$$

což naznačuje, že Fourierovo spektrum je také symetrické podle počátku.

$$|F(u,v)| = |F(-u,-v)| \quad (52)$$

To může být znázorněno pomocí přímého dosazení do rovnice pro $F(u,v)$

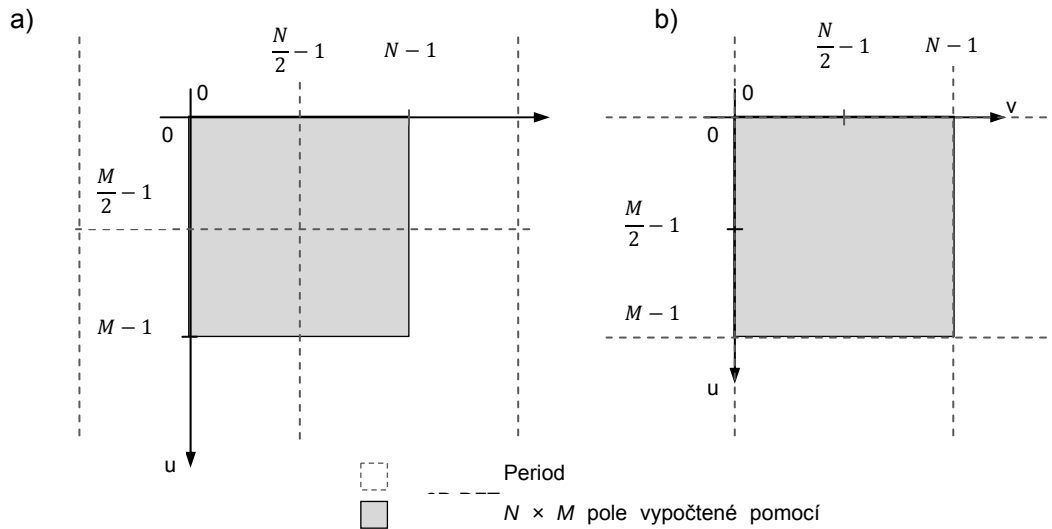
$$F(u,v) = F(u+M,v) = F(u,v+N) = F(u+M,v+N) \quad (53)$$

Jinými slovy, diskretní Fourierova transformace je nekonečně periodická v obou směrech u a v s periodicitou určenou M a N . Periodicita je také vlastností inverzní DFT

$$f(u,v) = f(u+M,v) = f(u,v+N) = f(u+M,v+N) \quad (54)$$

Což znamená, že obraz získaný inverzní Fourierovou transformací je také nekonečně periodický. Periodicita je matematickou vlastností DFT a její transformace. Použitím DFT však počítáme jen jednu periodu, tudíž pracujeme s polem o velikosti $M \times N$.

Otázka periodicity je důležitá pro způsob vnímání jak výsledná data DFT souvisí s periodami transformace. Princip periodicity dvourozměrné Fourierovy transformace znázorňuje následující obrázek (obr. 14.7). Šedá plocha představuje pole dat obdržených při výpočtu 2D DFT, čárkovaně jsou ohraničené periodicky opakující se pole transformace. Z obrázku je patrné, že data vypočtená 2D DFT obsahují čtyři čtvrtiny period střetávajících se ve středu vypočteného pole (obr. 14.7). Vizuální analýza spekter se zjednodušuje přesunem dat do počátku transformace, do středu frekvenčního obdélníku (obr. 14.7 b). To může být provedeno vynásobením $f(x,y) \cdot (-1)^{x+y}$ před výpočtem 2D DFT.



Obr. 14.7 – Schématické znázornění periodicity dvourozměrné DFT

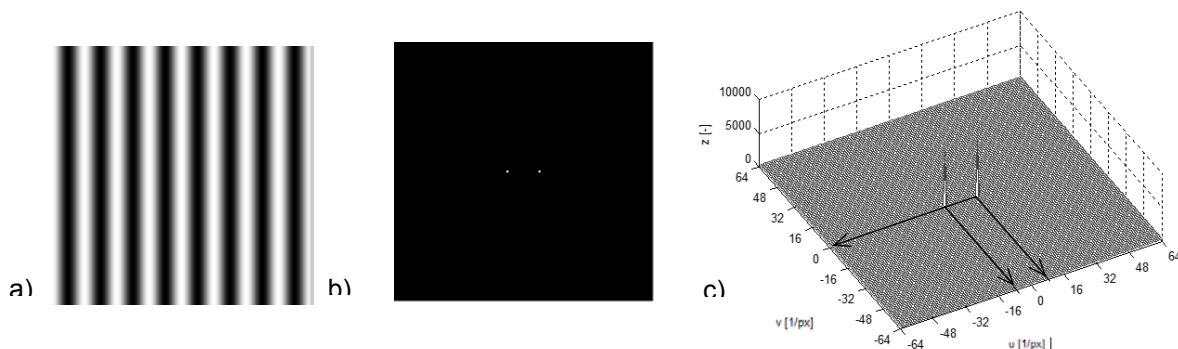
14.4.4 Vlastnosti dvourozměrné DFT

Pro lepší seznámení s vlastnostmi dvourozměrné FT byl vytvořen soubor základních vzorových obrázků a jejich Fourierova transformace. Jelikož v některých případech je DC složka natolik dominantní, je pro některá spektra uvedeno i zobrazení v logaritmické stupnici. Použité obrázky byly generovány ve stupních šedi v rozlišení 128 x 128 pixelů s 8 bitovou hloubkou. Černému pozadí odpovídá hodnota 0 a bílému objektu odpovídá hodnota 255. V programu MATLAB byla vypočtena 2D DFT a vykresleny výsledky.

Prvními generovanými obrázky byly pruhy tvořené funkcí cosinus (obr. 14.8 a)

$$f(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi x \cdot 8}{129}\right) \quad (55)$$

Jelikož Fourierova transformace vyjadřuje obraz pomocí kombinace harmonických signálů, je výsledná spektrální mapa této funkce velice jednoduchá. Obsahuje dvě špičky odpovídající frekvenci střídání pruhů v obraze (obr. 14.8 b, c). Z 3D pohledu je možné odečíst i počet pruhů v obraze.

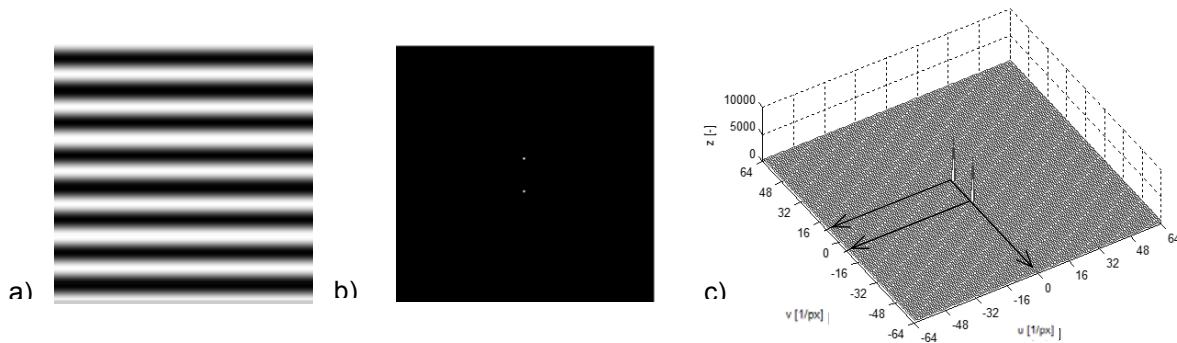


Obr. 14.8 – Funkce cosinus (5.11) a její DFT (b – 2D obraz, c – 3D pohled)

Pro porovnání je vykreslena stejná funkce otočená o 90° (obr. 14.9 a).

$$f(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi y \cdot 8}{129}\right) \quad (56)$$

Z výsledných spekter (obr. 14.9 b, c) je vidět, že špičky se nacházejí ve směru střídání pruhů. Při otočení původního obrazu se stejným způsobem otočí i jeho spektrální mapa.

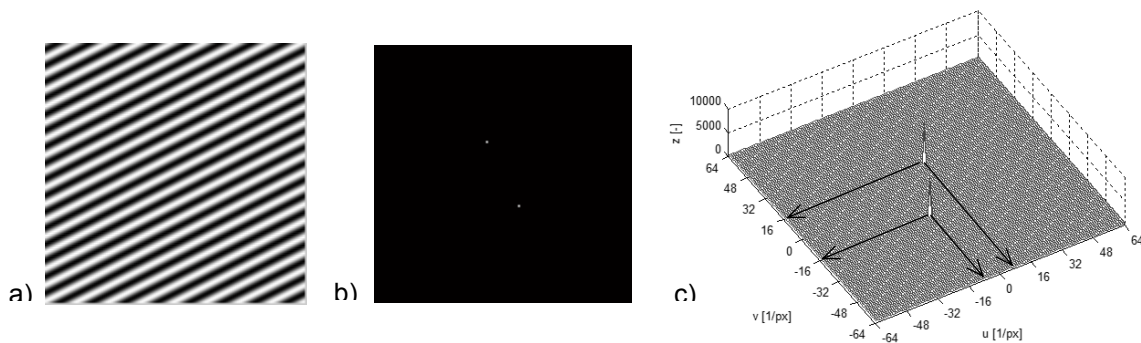


Obr. 14.9 – Funkce cosinus (5.12) a její DFT (b – 2D obraz, c – 3D pohled)

Pokud vykreslíme následující funkci

$$f(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi(8x + 16y)}{129}\right) \quad (57)$$

dostaneme v každém směru obrazu jiný počet přechodů (obr. 14.10 a) což lze vyčíst i z vypočtených spekter (obr. 14.10 b, c).

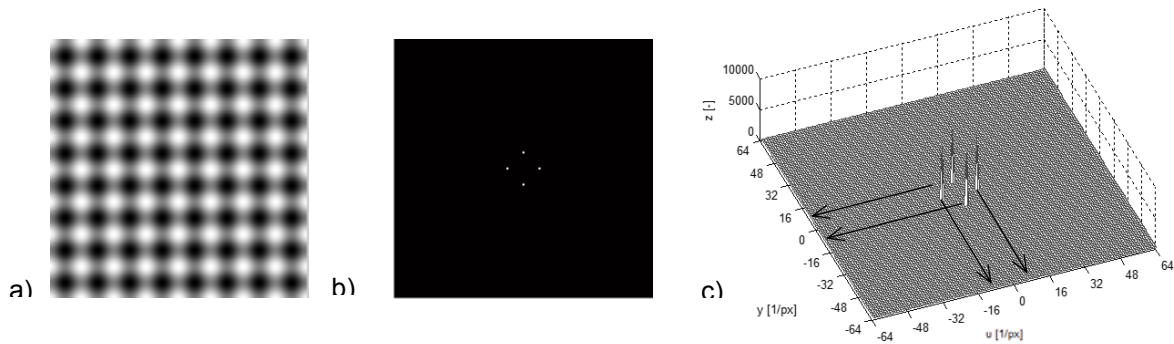


Obr. 14.10 – Funkce (5.13) a její DFT (b – 2D obraz, c – 3D pohled)

Dalším obrazcem je kombinace kosinusových funkcí v obou osách (obr. 14.11 a)

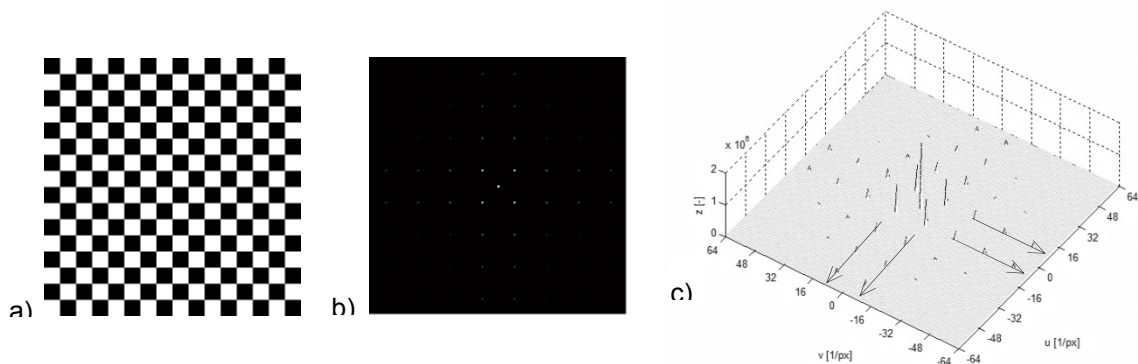
$$f(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi x \cdot 8}{129}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y \cdot 8}{129}\right) \quad (58)$$

Tentokrát se ve spektrální mapě objeví čtyři špičky odpovídající frekvencím v obou směrech x a y (obr. 14.11 b, c).



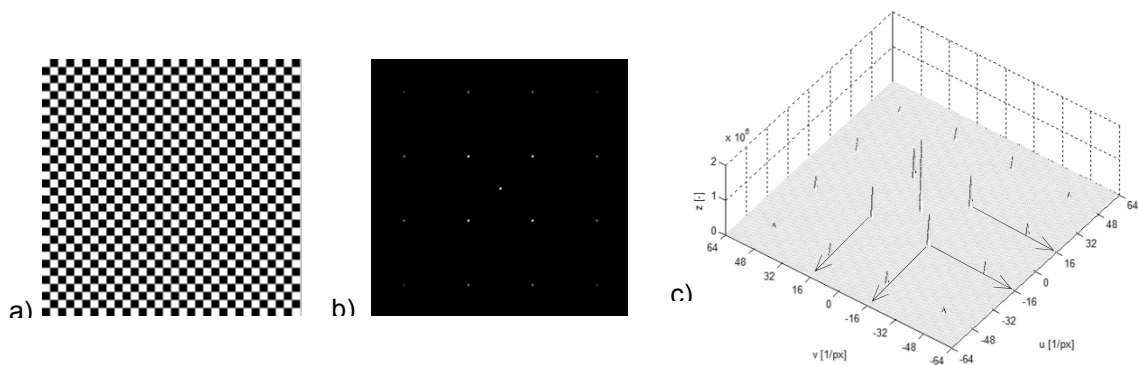
Obr. 14.11 – Funkce (5.14) a její DFT (b – 2D obraz, c – 3D pohled)

Dalším generovaným obrazcem je černobílá šachovnice se čtverci o rozměru 8 x 8 pixelů (obr. 14.12 a). Jelikož tento obraz obsahuje ostré přechody, dostaneme po transformaci složitější spektrum než v předchozích případech. Ve spektrálních mapách se, na rozdíl od spektrální mapy z obrázku obr. 14.11, zobrazí několik periodicky opakujících se špiček (obr. 14.12 b, c). Bod ve středu spektrální mapy se nazývá stejnosměrná (DC) složka. I v tomto případě je možné z výsledného spektra vyčíst počet čtverců v jedné řadě (viz. obr. 14.12 c).



Obr. 14.12 – Šachovnice (a) a její DFT (b – 2D obraz, c – 3D pohled)

Pro porovnání byla generovaná další šachovnice s menšími čtverci o rozměrech 4 x 4 pixelů (obr. 14.13 a). Ze spektrálních map (obr. 14.13 b, c) je možné vyčíst vyšší frekvenci opakování prvků v obraze (špičky ve spektru se nachází dále od středu spektrální mapy).



Obr. 14.13 – Šachovnice (a) a její DFT (b – 2D obraz, c – 3D pohled)

14.5 Softwarové prostředky

K tvorbě aplikací pro zpracování obrazu lze využít mnoho různých softwarových nástrojů. Z nejznámějších jsou to například MATLAB v kombinaci s různými knihovnami jako jsou Image Processing Toolbox a Image Acquisition Toolbox, dále pak LabVIEW a Vision Builder, Control Web a VisionLab. Tyto nástroje nabízí spoustu již hotových funkcí pro usnadnění tvorby aplikací určených pro zpracování obrazových dat. K dispozici je také otevřená knihovna pro zpracování obrazových dat OpenCV. Tyto knihovny jsou dostupné v jazyce C a C++, ale také Python a Octave.

Jelikož se na Katedře automatizační techniky a řízení věnuje nejvíce lidí Matlabu, bude pro tuto studii zřejmě nejvhodnější toto prostředí. Dále v textu bude MATLAB a jeho knihovny pro zpracování obrazu blíže představen.

MATLAB

Jedná se zejména o výkonný nástroj pro technické výpočty. Jeho výhoda při zpracování obrazu spočívá v rozsáhlé sadě funkcí pro zpracování mnohorozměrových polí. Pro zpracování obrazu je určena knihovna Image Processing Toolbox, která nabízí velké množství funkcí pro práci s obrazovými daty. K doplnění funkcí je však možná kombinace i s dalšími toolboxy.

Pro zpracování obrazu jsou nejvýznamnější následující dva Toolboxy:

- Image Acquisition Toolbox
- Image Processing Toolbox

S těmito Toolboxy je samozřejmě možné využít o mnoho dalších toolboxů jako například Signal Processing Toolbox a další. Pro zjištění jaké Toolboxy máme v systému nainstalovány, můžeme použít příkaz *ver*. Tento příkaz zobrazí informace o spuštěné verzi Matlabu včetně seznamu všech nainstalovaných toolboxů a čísla jejich verze.

Image Processing Toolbox je sbírkou funkcí, které rozšiřují možnosti prostředí MATLAB v práci s obrazovými daty. Image Processing Toolbox podporuje široký rozsah operací pro zpracování obrazu, mezi které patří:

- prostorové obrazové informace
- morfologické operace
- blokové operace
- lineární filtrování a návrh filtrů
- transformace
- analýza obrazu a zvětšování
- zápis obrazu
- operace s oblastí zájmu

Signal Processing Toolbox poskytuje algoritmy pro analogové i digitální zpracování signálů. Toolbox lze využít pro vizualizaci signálu v časové a frekvenční oblasti, výpočet FFT pro spektrální analýzu, návrh FIR a IIR filtrů, realizaci konvoluce, modulace, převzorkování a dalších technik zpracování signálů. Umožňuje zobrazovat a měřit signály, navrhovat digitální filtry a analyzovat spektrální okna.

Image Acquisition Toolbox slouží k získávání obrazových dat pomocí různých zařízení. Podporuje následující funkce:

- získávání obrazu prostřednictvím mnoha typů zařízení pro získávání obrazu od profesionálních zařízení až po USB webkamery
- zobrazování náhledu živého videopřenosu
- spouštění záznamu (zahrnuje externí spouštěcí hardware)
- konfiguraci funkce zpětného volání, která se vykoná, pokud nastane určitá událost
- přenesení obrazových dat do MATLAB Workspace

Od MATLABu verze 2008b vyžaduje Image Acquisition Toolbox licenci i pro Image Processing Toolbox.

15 ZÁVĚR

Případová studie řeší možnosti komunikace, měření veličin a prostorovou orientaci mobilních objektů. Jako mobilní objekt je v tomto případě uvažován robot. Na katedře ATŘ 352 máme k dispozici robotické stavebnice a rovněž již vytvořeného robota, který vzniknul ze studentské práce. Oblast ovládání mobilních objektů (robotů) a určitá samoregulace mobilního objektu v prostoru tak, aby byl schopen vyhnout se překážkám je zajímavé téma, které má uplatnění v praxi. Takové roboty můžeme vidět např. u záchranných hasičských sborů, pyrotechnických jednotek apod. Prostě tam, kde nemůže člověk, byť z jakéhokoli důvodu (především životu nebezpečného prostředí) je nasazen právě robot.

Práce na studii byl týmový a každý člen týmu dostal za úkol řešit a věnovat se dané problematice, která mu není cizí a je v ní odborník. Studie popisuje týmový návrh struktury mobilního objektu, který vychází z potřeb pro orientaci mobilního objektu v prostoru. Tímto byly definovány typy snímačů, které bude mobilní objekt potřebovat, včetně rozboru bezdrátové komunikace s operátorským stanovištěm (operátorem - člověkem). Práce popisuje již dostupné robotické stavebnice a vytvořeného robota na katedře ATŘ 352. Na těchto robotech, jako dostupných objektech, byly testovány snímače, bezdrátový přenos veličin, připojení kamerového systému a mikrofónů. Jako vhodný standard pro přenos měřených veličin byl vybrán standard IEEE 802.15.4. Ten ovšem nelze použít pro přenos velkého objemu dat, jako např. k přenosu dat z kamerového systému. Zde je nutné použít bezdrátový standard z vyšší datovou rychlostí. V úvahu proto přichází standard IEEE 802.11n.

Základem navrženého mobilního objektu je signálový procesor. Ten zpracovává informace z připojených snímačů v real-time a předává je do bezdrátového modulu. Na signálový procesor jsou kladeny vysoké požadavky, z hlediska pracovního taktu procesoru a tedy především jeho rychlosti. V práci uvádíme dva možné typy signálových procesorů, které by byly pro tyto účely velmi vhodné. Řešíme také problematiku číselných formátů v procesoru, práci a čísla v pevné a plovoucí řádové čárce.

V dalších kapitolách se týmově zabýváme metodami zpracování zvukových a obrazových signálů. Tyto signály jsou vedle mechanických senzorů hlavní senzory, které slouží k orientaci robota v prostoru. Zaměřujeme se na popis metod lokalizace akustických signálů a tedy zjištění zdroje akustického signálu. Z těchto dat jsme schopni zjistit směr přicházejících signálů a následně také polohu mobilního objektu vůči zdrojům signálu. Z hlediska zpracování obrazu jsme se zaměřili na dostupné hardwarové prostředky (kamery), které by byly pro orientaci mobilního objektu vhodné. Jedná se o digitální kamery s vhodným komunikačním rozhraním pro signálový procesor. Popisujeme obecně zpracování obrazových signálů, digitální obraz a jeho reprezentaci, jaké jsou typy digitálních obrazů a barevných prostorů. Nechybí také rozbor metod pro zpracování obrazu, jako Blobanalysis, Pattern recognition apod., včetně softwarových prostředků, které obsahují knihovny pro zpracování obrazu, nebo zpracování obrazu dovolují.

16 LITERATURA

- [1] BASLER. Basler acA640-100gm, Camera Specification. [online]. available from www: <URL: http://www.baslerweb.com/media/documents/BD00054701_Basler_acA640-100gm_EMVA_Standard_1288.pdf>.
- [2] BASLER, Comparison of the Most Common Digital Interface Technologies. [online]. available from www: <URL: http://www.baslerweb.com/news/data/4/9/0/7/BAS1108_Interfaces.pdf>.
- [3] BROUGHTON, S. A., BRYAN, K., *Discrete Fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing*, Willey, 2008, ISBN 978-0-470-29466-6.
- [4] CAE SOFTWARE &SYSTEMS [online]. Aero acoustic noise in a wind tunnel. [2011-05-10], available from www: < <http://www.cae-systems.de/en/products/noise-inspector/examples.html>>.
- [5] CROSSBOW MDA, *MTS Sensor boards Users Manual* [online]. [cit. 2012-05-05], available from www: <URL: http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MTS_MDA_Datasheet.pdf>.
- [6] CROSSBOW MODULE MICAZ [online]. [cit. 2012-06-05], available from www: <URL: http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz_datasheet.pdf>.
- [7] DOSTÁLEK, P., *Embedded systém pro lokalizaci zdroje zvuku. Disertační práce.*, Zlín, 2009.
- [8] DOUGLAS SELF. [online]. Acoustic Location and Sound Mirrors. [2011-05-09], available from www: <<http://www.douglas-self.com/MUSEUM/COMMS/ear/ear.htm>>.
- [9] DUFEK, P., *Hyperbolické radarové systémy Tamara a Věra*, Ostrava, 2010. PDF formát.
- [10] GONZALEZ, WOODS, EDDINS, *Digital Image Processing Using MATLAB*, Second Edition, 827 s., Gatesmark Publishing, 2009, ISBN 978-0-9820854-0-0.
- [11] HORYMÍR, R. *Využití bezdrátové technologie pro konfiguraci a monitorování reálných úloh*. Ostrava 2010. Diplomová práce. VŠB – TU Ostrava.
- [12] IDS IMAGING DEVELOPMENT SYSTEM, *USB UI-1225LE Specification*. [online]. available from www: <URL: <http://ids-imaging.com/>>.

- [13] KUPKA, J., Přenos zvukových signálů do vnitřního ucha přes okrouhlé okénko. Diplomová práce., Brno, 2010.
- [14] LEGO MINDSTORMS, aktualizace 2010, [online], [cit. 2010], dostupné z WWW <URL: <http://mindstorms.lego.com/eng/default.aspx>>.
- [15] LEGO, LEGO® Education, aktualizace 2010, [online], [cit. 2010], dostupné z WWW <URL: <http://www.legoeducation.us/global.aspx>>.
- [16] LENSATION, *CVM40100 Specification*. [online]. available from www: <URL: <http://www.lensation.de/>>.
- [17] MAHDAL, M. 2011. *Průmyslové sítě WLAN s podporou inteligentní instrumentace*, disertační práce 2011. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FS, kat. 352.
- [18] MICROCHIP . *PIC 32MXX/4XX DATA SHEET* [online].[cit. 2012-06-08]. Dostupný z WWW: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/61143H.pdf> >.
- [19] SENSIRION SHT11 [online]. *Humidity and temperature sensor*. [online], [cit. 2012-05-10]. available from www: <URL: http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf>.
- [20] TAOS TSL 2550 [online]. *Light intensity sensor*. [online], [cit. 2012-05-11], available from www: <URL: <http://home.comet.bg/datasheets/Taos/TSL2550-e75.pdf>>.
- [21] TELEDYNE DALSA, *CMOS vs. CCD*. [online], [cit. 2012-05-11], available from www: <URL: http://www.teledynedalsa.com/public/corp/CCD_vs_CMOS_Litwiller_2005.pdf>.
- [22] TELEDYNE DALSA, *CCD vs. CMOS: Facts and Fiction*. [online], [cit. 2012-05-11], available from www: <URL: <http://www.teledynedalsa.com/>>.
- [23] TEXAS INSTRUMENTS. *C2000-TEACHING-ROM* [online].[cit. 2012-06-08]. Dostupný z WWW: < <http://www.ti.com/ww/eu/university/roms.html> >.
- [24] TEXAS INSTRUMENTS. *DSP28-IQ-MATH LIBRARY* [online].[cit. 2012-05-19]. Dostupný z WWW: < <http://www3.dogus.edu.tr/ucini/DSPArithmeticTutorial.pdf> >.
- [25] THE MATHWORKS, *Product Help*, MATLAB R2008b.
- [26] TINYOS. Web Pages of Producer [online]. [cit. 2012-05-04], available from www: <URL: www.tinyos.net>.
- [27] TŮMA, J., *Signal Processing, Kapitoly o zpracování signálů*, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, Ostrava – Poruba, březen 2008, [pdf].
- [28] TŮMA, J., *Signal Processing*, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, Ostrava – Poruba, 2009, ISBN 978-80-248-2114-6.

-
- [29] WI-FI ALLIANCE [online]. [cit. 2012-05-03], dostupné na adrese: <URL: <http://www.wi-fi.org/>>.
- [30] ZAVADIL, J. *Zpracování zvukových a obrazových signálů s cílem jejich dekompozice na různé zdroje*. Ostrava 2012, Teze disertační práce, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Katedra automatizační techniky a řízení.