

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Katedra geomatiky
Studijní program: Geodézie a kartografie



**Vývoj digitálního odometru a
tachometru na platformě Arduino**
**Digital odometer and speedometer
development on Arduino platform**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Vojtěch Remeš
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, PhD.
Rok: 2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Remeš Jméno: Vojtěch Osobní číslo: 475446
Zadávací katedra: Katedra geomatiky
Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor/specializace: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vývoj digitálního odometru a tachometru na platformě Arduino
Název bakalářské práce anglicky: Digital odometer and speedometer development on Arduino platform

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracování návrhu odvalovacího odměřovače délky s využitím úhlového detektoru
2. Řídící aplikace odměřovače na platformě Arduino
3. Testování zařízení.

Seznam doporučené literatury:


Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 15.2.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5.2022

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

22.2.2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje vývoj low-cost zařízení, které dokáže určovat relativní polohu v místní souřadnicové soustavě. Toho je docíleno pomocí čtení dvou inkrementálních rotačních elektrooptických enkodérů, z nichž jeden slouží k určování ujeté vzdálenosti a druhý k zjišťování úhlu vychýlení z jízdy přímým směrem. Zpracování příchozích signálů se provádí na desce Arduino, která také zajišťuje komunikaci s externím zařízením, a to pomocí Bluetooth modulu.

Klíčová slova

odometr, Arduino, rotační enkodér, IMU, Bluetooth

Abstract

This bachelor thesis describes the development of a low-cost device that can determine the relative position in the local coordinate system. This is achieved by reading two incremental rotary electro-optical encoders, one of which is used to determine the distance traveled and the other to determine the angle of deviation from moving in a straight line. Incoming signals are processed on the Arduino board, which also provides communication with an external device using a Bluetooth module.

Keywords

odometer, Arduino, rotary encoder, IMU, Bluetooth

Prohlášení

Já, Vojtěch Remeš, prohlašuji, že jsem autorem této bakalářské práce, kterou jsem napsal pod vedením Ing. Zdeňka Vyskočila, Ph.D., za použití zdrojů uvedených v seznamu.

V Deštném v Orlických horách dne

.....
Vojtěch Remeš

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a vstřícný přístup. Jeho znalosti a podnětné návrhy velkou měrou přispěly k úspěšnému dokončení této práce. Také bych chtěl poděkovat panu Jiřímu Emlerovi za pomoc při tvorbě fyzického modelu odometru a Ing. Janu Remešovi za nedocenitelné rady při vývoji ovládacího skriptu. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a přítelkyni za neustálou podporu nejen při psaní bakalářské práce.

Vojtěch Remeš

Obsah

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| Seznam použitých zkratk | vii |
| Seznam obrázků | viii |
| Seznam tabulek | ix |
| Úvod | 1 |
| 1 Teorie | 3 |
| 1.1 Pohyb v rovině | 3 |
| 1.1.1 Pohyb po přímce | 3 |
| 1.1.2 Pohyb po kružnici | 5 |
| 1.2 Pohyb v prostoru | 9 |
| 1.3 Výpočet rychlosti | 10 |
| 1.4 Chybový model | 10 |
| 2 Hardware a software | 13 |
| 2.1 Arduino | 13 |
| 2.2 Snímač úhlu | 14 |
| 2.3 Akcelerometr a gyroskop | 16 |
| 2.4 Bluetooth modul | 17 |
| 2.4.1 Odesílaná zpráva | 18 |
| 2.5 Napájení | 18 |
| 2.6 Tělo odometru | 18 |
| 2.7 Visual Studio Code | 18 |
| 2.7.1 PlatformIO | 19 |
| 3 Test odometru | 21 |
| 3.1 Návrh testů | 21 |
| 3.2 Realizace testů | 21 |
| Závěr | 27 |
| Bibliografie | 29 |
| Přílohy | 32 |
| A GIT repozitář | 32 |

Seznam použitých zkratek

GNSS Global Navigation Satellite System (globální navigační satelitní systém)

IMU Inertial measurement unit (inerciální měřicí jednotka)

NMEA National Marine Electronics Association (standard pro přenos dat)

USB Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)

I²C Inter Integrated Circuit (multi-masterová sériová sběrnice)

Seznam obrázků

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Model odometru | 4 |
| 1.2 | Speciální případ pohybu po kružnici | 5 |
| 1.3 | Obecný případ pohybu po kružnici | 8 |
| 1.4 | Náklony odometru | 9 |
| 1.5 | Rozměry měřicího zařízení | 11 |
| 2.1 | Arduino Mega 2560 - zdroj [6] | 14 |
| 2.2 | Kvadratický inkrementální enkodér (vlevo) a výstupní signál ze světelných závor (vpravo) — zdroj [12] | 16 |
| 2.3 | Použité úhlové snímače | 16 |
| 2.4 | Modul akcelerometru a gyroskopu — zdroj [19] | 17 |
| 2.5 | Bluetooth modul HC-05 — zdroj [21] | 17 |
| 2.6 | Prototyp odometru | 19 |
| 2.7 | Schéma zapojení | 20 |
| 2.8 | Prostředí Visual Studio Code s nástavbou PlatformIO | 20 |
| 3.1 | Návrh testovacích drah: dráha 1 (vlevo) a dráha 2 (vpravo) | 22 |
| 3.2 | Odometr připevněný na vozík | 23 |
| 3.3 | Vizualizace provedených měření | 24 |
| 3.4 | Porovnání opraveného a původního měření 1 | 24 |
| 3.5 | Porovnání opraveného a původního měření 2 | 25 |
| 3.6 | Porovnání opraveného a původního měření 3 | 25 |
| 3.7 | Porovnání opraveného a původního měření 4 | 26 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Uvažované parametry odometru pro výpočet výběrových směrodatných odchylek metodou Monte Carlo | 11 |
| 1.2 | Výsledky pro poloměr oblouku 5 metrů | 11 |
| 1.3 | Výsledky pro poloměr oblouku 10 metrů | 12 |
| 1.4 | Výsledky pro poloměr oblouku 50 metrů | 12 |
| 1.5 | Výsledky pro poloměr oblouku 250 metrů | 12 |
| 1.6 | Výsledky pro poloměr oblouku 1000 metrů | 12 |
| 1.7 | Výsledky pro poloměr oblouku 2000 metrů | 12 |
| 1.8 | Výsledky pro poloměr oblouku 3500 metrů | 12 |
| 1.9 | Výsledky pro úsečku | 12 |
| 2.1 | Technické parametry Arduino Mega 2560 Rev3 — zdroj [6] | 14 |
| 3.1 | Výsledky měření na testovací dráze 1 | 23 |

Úvod

Pro některé precizní práce při výstavbě je zásadní, aby stroje operující na stavbě znaly svou přesnou polohu. V dnešní době je za tímto účelem nejčastěji využíváno určování prostorové polohy pomocí GNSS. Principem takové metody je příjem rádiových signálů od alespoň čtyř družic a, na základě znalosti doby vyslání a příjmu signálu, určení vzdáleností mezi satelity a přijímačem. Při znalosti poloh družic v okamžiku vyslání signálu lze z určených vzdáleností spočítat prostorové souřadnice XYZ a opravu hodin přijímače. Měřené vzdálenosti jsou však nezanedbatelnou měrou ovlivněny systematickou chybou z nepřesného modelu atmosféry, kterou lze částečně vyloučit určováním relativní polohy — tedy pozice roveru¹ vůči referenčnímu přijímači. Poté určení polohy dosahuje dostatečné přesnosti [1].

Pro správné vyhodnocení přijímaného signálu je stěžejní, aby se od satelitu šířil bez překážky přímo k přijímači. Proto jsou GNSS obtížněji použitelné nebo nepoužitelné v zastavěných oblastech, pod mosty nebo v tunelech. V takových místech je nutné pro určení polohy využít některé doplňkové metody. V současnosti se užívá nejčastěji IMU, zařízení, jež měří a hlásí zrychlení, úhlovou rychlost a někdy i orientaci tělesa pomocí kombinace akcelerometrů, gyroskopů a někdy magnetometrů [2]. Další možností může být odometrické zařízení — kolečko, které je v kontaktu se zemí a ze svého otáčení a natáčení se vůči podélné ose vozidla dokáže určovat změny polohy vozidla — jehož návrhu a vývoji se bude tato práce věnovat.

Zadáním práce je návrh a vývoj prototypu low-cost digitálního odometru s přesností 10 cm v podélném směru a 100 cm ve směru příčném na 100 metrů ujeté délky. Zamýšlené užití odometru je jako doplňková metoda určení polohy silniční frézy hlavně v případě zhoršení kvality dat z přijímače GNSS.

Návrhu metody určování polohy pomocí odometrických snímačů se věnuje Portěš [3]. Aplikační rámec této práce je však významně odlišný, proto nebylo možné zde uvedené postupy zásadněji využít při vývoji odometru podle zadání této práce.

Přesnost stanovení polohy pomocí navrhovaného odometrického zařízení vychází jak z vnitřní přesnosti jednotlivých elektronických komponent — enkodérů a IMU — tak z přesnosti určení rozměrů odometru. Rozbory přesnosti a odvození postupu výpočtů změny polohy odometru, resp. vozidla, se nacházejí v Kapitole 1.

¹**Rover** je tradiční označení pohyblivého přijímače GNSS.



Pro jeho stabilitu jsem došel k rozhodnutí vyvíjet odometr jako dvouosý, složený z odvalovacího kolečka připevněného na závěsu, který je od kolečka o určitou vzdálenost předsazen. Pro měření ujeté vzdálenosti slouží kolečko, na jehož ose je připevněn jeden z rotačních enkodérů. K určení okamžité výchylky z jízdy přímým směrem je použit druhý rotační enkodér umístěný ve svislé ose závěsu kolečka. Úhly podélného a příčného náklonu, nutné pro správnou redukci z nevodorovnosti trajektorie, jsou získávány z inerciální měřicí jednotky, umístěné na těle odometru. Komunikaci odometru s nadřízenou jednotkou — v případě zamýšlené aplikace na silniční frézu by se jednalo o centrální počítač frézy, pro testování byl využit mobilní telefon — zajišťuje Bluetooth modul. Formát zprávy vysílané odometrem je autorským návrhem a vychází ze standardu NMEA 0183, široce používaném v oblasti určování polohy pomocí GNSS. Zpracování vstupů — z rotačních enkodérů a inerciální měřicí jednotky — a jejich přeměnění na výstupy obstarává jednoduchý jednodeskový počítač — Arduino. Použitému hardwaru a softwaru se věnuje Kapitola 2.

Kapitola 3 se věnuje testování fyzického modelu a interpretaci dosažených výsledků.

Kapitola 1

Teorie

Zadáním práce je sestrojít měřidlo, které dokáže z projeté trajektorie vypočítat polohu referenčního bodu v místní souřadnicové soustavě. Takové zařízení lze pak využít jako pomocnou metodu pro určování souřadnic silniční frézy, případně jako metodu hlavní při zhoršení kvality signálů z družic GNSS. Pro řešení této úlohy byl zvolen model odvalovacího kolečka s předsunutou osou závěsu, se dvěma rotačními elektrooptickými enkodéry v osách otáčení, jak je naznačeno na Obrázku 1.1.

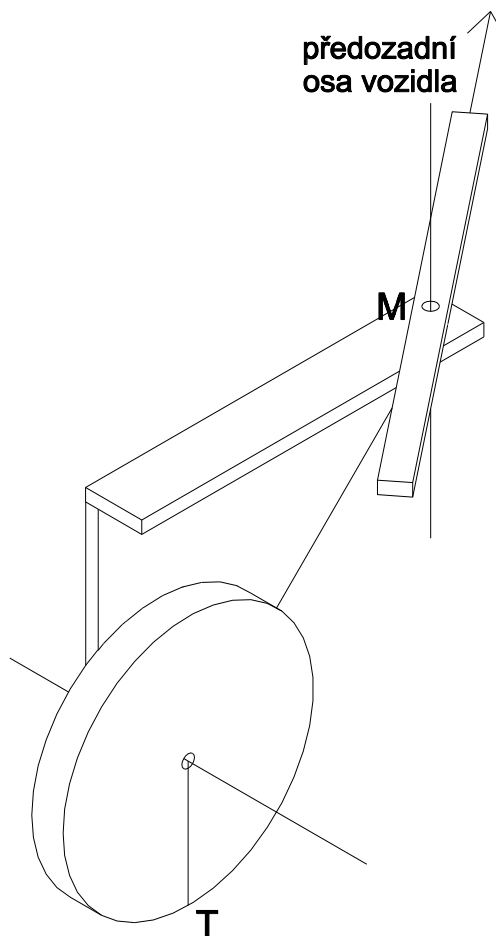
Jako referenční bod takového měřidla byl zvolen bod M , jehož poloha se vůči vztažnému bodu vozidla nebude v čase měnit. Místní pravotočivá souřadnicová soustava 0_{XYZ} je umístěna počátkem do bodu dotyku kolečka s povrchem před začátkem pohybu T_0 . Osa Y nechť je rovnoběžná s osou rotace kolečka, osa Z nechť směřuje do zenitu a osa X ve směru předozadní osy odometru. V této soustavě můžeme zapsat souřadnice referenčního bodu odometru jako $[\|T\vec{M}\|_{XY}; 0; \|T\vec{M}\|_{YZ}]_0$, kde $\|T\vec{M}\|_{XY}$ značí délku vektoru $T\vec{M}$, průvodiče referenčního bodu odometru M a bodu dotyku kolečka se zemí T , v rovině XY , $\|T\vec{M}\|_{YZ}$ délku vektoru $T\vec{M}$ v rovině YZ , přičemž je zřejmé, že vektor $T\vec{M}$ je daný konstrukcí odometru.

Pohyb bodu T v rovině XY charakterizuje určitá trajektorie, kterou lze vhodnou segmentací rozdělit na úseky pohybu po oblouku kružnice, případně po úsečce — tedy po kružnici s nekonečným poloměrem. Polohu referenčního bodu odometru lze poté spočítat ze známých rozměrů odometru. V následujících odstavcích jsou rozebrány jednotlivé případy podrobněji.

1.1 Pohyb v rovině

1.1.1 Pohyb po přímce

Tato část se zaměřuje na přímočarý pohyb odometru. Bude-li se pohybovat zařízení přímo kupředu, způsobí rotační pohyb kolečka a na něm připojené osy enko-



Obrázek 1.1: Model odometru

děru. Takový pohyb vybudí střídání vysokého a nízkého napětí na dvou signálových vodičích enkodéru a ze znalosti počtu pulzů na otočku a poloměru kolečka lze poté dopočítat ujetou vzdálenost jako

$$\begin{aligned} X_i^T &= X_0^T + \sum_{k=1}^{n_d} \left(r_k \frac{2\pi}{N_d} \cos \sigma_k \right) \\ Y_i^T &= Y_0^T + \sum_{k=1}^{n_d} \left(r_k \frac{2\pi}{N_d} \sin \sigma_k \right) \end{aligned} \quad (1.1)$$

kde index i slouží k označení výpočetní epochy, index T říká, že se jedná o polohu bodu T , n_d značí počet zaznamenaných impulzů enkodéru pro měření délky, N počet impulzů tohoto enkodéru na jednu otáčku a r_k je poloměr kolečka. Úhel σ , jež odpovídá úhlu inklinace, lze vypočítat jako

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \varphi_i \quad (1.2)$$

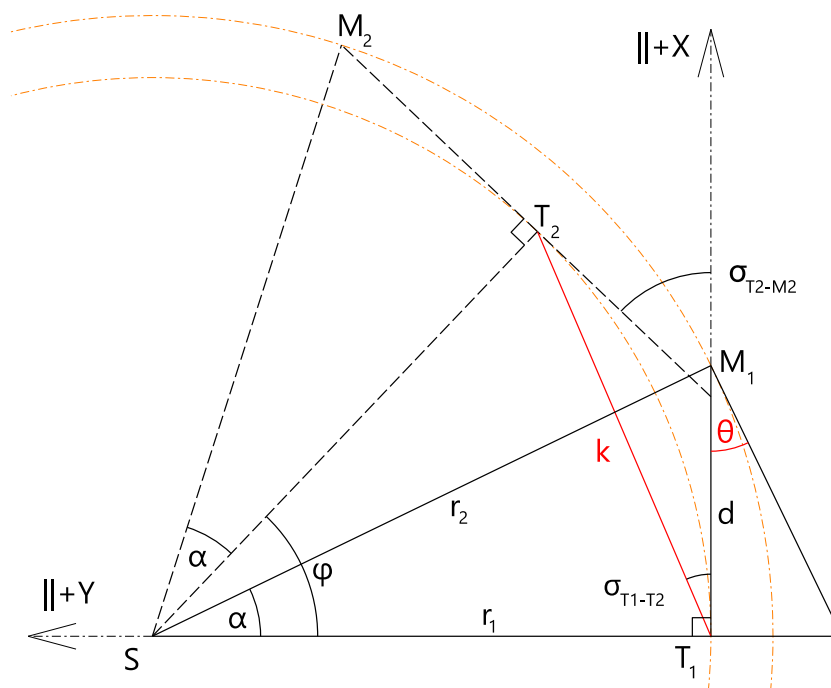
přičemž φ značí úhlové natočení odometru v referenčním souřadném systému při pohybu o diferenciální krok k a je v případě pohybu po úsečce numericky rovno 0.

1.1.2 Pohyb po kružnici

Při pohybu bodu T po kružnici je výpočet jeho polohy ze vstupů — čtení na úhlovém snímači vyjadřující natočení kolečka vůči předozadní ose vozidla a čtení na enkodéru na ose rotace kolečka — jen o málo složitější než výpočet pohybu po úsečce. Nejprve bude vyložen speciální případ, kdy předozadní osa vozidla — neboli referenční směr směrového enkodéru — je v každém okamžiku tečnou k trajektorii bodu M v bodě M . V závěru této části budou odvozeny vztahy pro obecnou úlohu, při které předozadní osa vozidla není tečnou k trajektorii bodu M .

Osa vozidla kolmá k normále trajektorie bodu M

Průmět situace speciálního případu do vodorovné roviny XY je znázorněn na Obrázku 1.2. Principem určení nové polohy je vyčíslení úhlu otočení odometru vůči lokální souřadnicové soustavě a následné opravení směrových úhlů délkových elementů právě o vyčíslenou hodnotu.



Obrázek 1.2: Speciální případ pohybu po kružnici

S zde značí střed kružnic trajektorií, M_1 , resp. M_2 průmět svislé osy otáčení přístroje do roviny XY a T_1 , resp. T_2 polohu bodu dotyku odvalovacího kolečka s povrchem T v časech t_1 , resp. t_2 . θ je měřený úhel natočení, z trojúhelníků lze také odvodit, že se jedná o úhel mezi spojnicemi bodů T_i a M_i se středem kružnice S v



čase t_i . Jeho velikost je funkcí poloměru kružnice po které se pohybuje odometr a vzdálenosti d , která je daná konstrukcí odometru. φ značí středový úhel mezi body T_1 a T_2 a odpovídá úhlu otočení odometru vůči lokální souřadnicové soustavě, $k = r_k \frac{2\pi \cdot n_d}{N_d}$ označuje délku diferenciálního kroku mezi těmito dvěma body a $\tan(\sigma_{T_1-T_2})$, resp. $\tan(\sigma_{T_2-M_2})$ značí směrnici přímky T_1T_2 , resp. T_2M_2 .

Každou další polohu bodu T_{i+1} lze určit jako

$$\begin{bmatrix} X_{T_{i+1}} \\ Y_{T_{i+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T_i} \\ Y_{T_i} \end{bmatrix} + k \cdot \begin{bmatrix} \cos \sigma_{T_i-T_{i+1}} \\ \sin \sigma_{T_i-T_{i+1}} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

a pro souřadnice bodu M_i je možné psát

$$\begin{bmatrix} X_{M_i} \\ Y_{M_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T_i} \\ Y_{T_i} \end{bmatrix} + d \cdot \begin{bmatrix} \cos \sigma_{T_i-M_i} \\ \sin \sigma_{T_i-M_i} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

přičemž úhel $\sigma_{T_i-M_i}$ lze vyjádřit jako

$$\sigma_{T_i-M_i} = \sigma_{T_{i-1}-T_i} + \frac{\varphi}{2} \quad (1.5)$$

Je zřejmé, že otočí-li se celý systém v matematicky kladném směru o úhel φ , zvětší se odpovídající směrové úhly o stejnou hodnotu

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \varphi \quad (1.6)$$

Velikost úhlu θ je úzce provázána jednak s rozměry odometru — délkou d — jednak s poloměry kružnic trajektorií. Jejich vztah lze vyjádřit rovnicí

$$r_1 = \frac{d}{\tan \theta} \quad (1.7)$$

a pro středový úhel φ platí

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{k}{2 \cdot r_1} \quad (1.8)$$

Dosazením z rovnic 1.8 a 1.7 lze snadno vyjádřit velikost středového úhlu φ v závislosti na známých a měřených veličinách jako

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta}{2d \cdot \cos \theta} \quad (1.9)$$

Dosazením do rovnic 1.6 a 1.3 je poté možné získat vztah mezi souřadnicemi bodu dotyku kolečka s povrchem a měřenými veličinami

$$X_{T_{i+1}} = X_{T_i} + r_k \cdot n_d \frac{2\pi}{N_d} \cdot \cos \left(\sigma_{T_{i-1}-T_i} + 2 \arcsin \frac{r_k \cdot n_d \frac{2\pi}{N_d} \cdot \sin \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)}{2d \cdot \cos \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)} \right) \quad (1.10)$$



$$Y_{T_{i+1}} = Y_{T_i} + r_k \cdot n_d \frac{2\pi}{N_d} \cdot \sin \left(\sigma_{T_{i-1}-T_i} + 2 \arcsin \frac{r_k \cdot n_d \frac{2\pi}{N_d} \cdot \sin \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)}{2d \cdot \cos \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)} \right) \quad (1.11)$$

obdobně lze zapsat vztah pro souřadnice bodu M

$$X_{M_i} = X_{T_i} + d \cdot \cos \left(\sigma_{T_{i-1}-T_i} + \arcsin \frac{r_k \cdot n_d \frac{2\pi}{N_d} \cdot \sin \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)}{2d \cdot \cos \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)} \right) \quad (1.12)$$

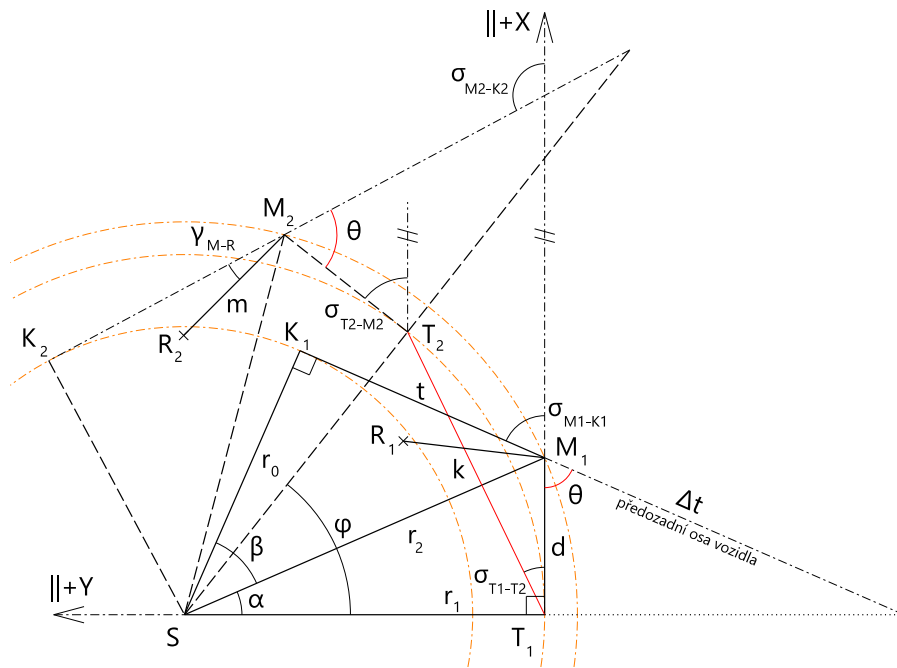
$$Y_{M_i} = Y_{T_i} + d \cdot \sin \left(\sigma_{T_{i-1}-T_i} + \arcsin \frac{r_k \cdot n_d \frac{2\pi}{N_d} \cdot \sin \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)}{2d \cdot \cos \left(n_s \frac{2\pi}{N_s} \right)} \right) \quad (1.13)$$

kde r_k je poloměr odvalovacího kolečka, n_d počet zaznamenaných pulzů enkodéru umístěného na ose kolečka a N_d počet pulzů tohoto enkodéru na jednu otáčku. $\sigma_{T_{i-1}-T_i}$ značí úhel mezi kladnou větví osy x a spojnicí bodů T_{i-1} a T_i , n_s je počet zaznamenaných pulzů — neboli čtení — na směrovém enkodéru a N_s značí rozlišení tohoto snímače, tedy počet pulzů na jednu otáčku. Nakonec vodorovná vzdálenost mezi enkodéry nese označení d .

Osa vozidla v obecné poloze k normále trajektorie bodu M

Není-li však dodržena podmínka tečnosti předozadní osy vozidla k trajektorii bodu M v tomto bodě, výpočet středového úhlu φ se opět zesložití. Odvození postupu výpočtu vychází z Obrázku 1.3

S zde značí střed kružnic trajektorií a K_1 , resp. K_2 polohu bodu na předozadní ose vozidla, pro jehož trajektorii je řečená osa v každém okamžiku tečná. M_1 , resp. M_2 označují průmět svislé osy otáčení přístroje do roviny XY a T_1 , resp. T_2 polohu bodu T — bod dotyku odvalovacího kolečka s povrchem. R_1 , resp. R_2 značí referenční bod frézy vůči kterému vztahuje svou pozici. Úhel mezi spojnicemi bodů T_i a M_i se středem kružnic S_i je značen α_i a úhel mezi spojnicemi bodů M_i a K_i se středem kružnic S_i je značen β_i . Vodorovnou vzdálenost mezi svislou osou odometru v bodě M a bodem dotyku T reprezentuje znak d , vodorovnou vzdálenost mezi body M a K znak t a m vodorovnou vzdálenost mezi body M a R . φ_i značí středový úhel mezi body T_{i-1} a T_i a k_i délku diferenciálního kroku mezi těmito dvěma body. Směrnice přímk T_1T_2 , T_2M_2 a M_2K_2 lze vyjádřit jako $\tan(\sigma_{T_1-T_2})$, $\tan(\sigma_{T_2-M_2})$ resp. $\tan(\sigma_{M_2-K_2})$. γ_{M-R} je úhel mezi předozadní osou vozidla a spojnicí bodu připevnění odometru M a referenčního bodu frézy R . Nakonec r_0 , r_1 a r_2 značí poloměry kružnic po kterých se důležité body systému pohybují.



Obrázek 1.3: Obecný případ pohybu po kružnici

Pro souřadnice bodu R lze psát

$$\begin{bmatrix} X_{R_i} \\ Y_{R_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{M_i} \\ Y_{M_i} \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} \cos \sigma_{M_i-R_i} \\ \sin \sigma_{M_i-R_i} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

kde $\sigma_{M_i-R_i} = \sigma_{T_i-M_i} + \theta + \gamma_{M-R}$. Následně pro vzdálenost Δt platí

$$\Delta t = \frac{d}{\cos \theta} \quad (1.15)$$

Ze čtyřúhelníku $\square STMR$ lze zjistit, že měřený úhel $\theta = \alpha + \beta$ a platí

$$r_0 = \frac{t + \Delta t}{\tan \theta} \quad (1.16)$$

dále

$$r_2 = \sqrt{r_0^2 + t^2} \quad (1.17)$$

$$r_1 = \sqrt{r_2^2 - d^2} \quad (1.18)$$

Postupným dosazením předchozích vztahů do rovnice 1.8 a krátkou úpravou je možné získat závislost mezi velikostí úhlu φ a známými a měřenými veličinami

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta}{2 \cdot (d \cdot \cos \theta + t)} \quad (1.19)$$

Nakonec dosazením do rovnic 1.6, 1.3 a 1.4, resp. 1.14 lze získat vztahy mezi



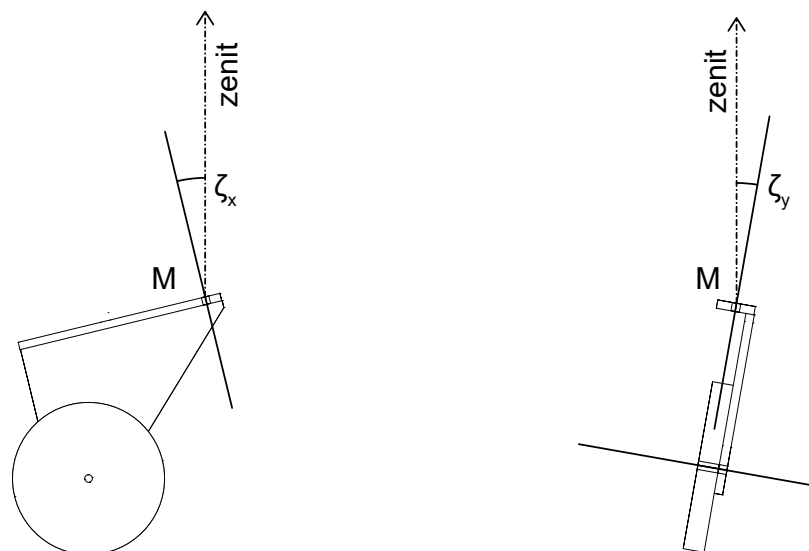
souřadnicemi referenčního bodu vozidla a měřenými a známými veličinami.

$$\begin{aligned}
 X_{R_n} = & X_{T_0} + \sum_{i=1}^n \left[k_i \cdot \cos \left\{ \sigma_0 + \sum_{j=1}^i \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_j}{2(d \cdot \cos \theta_j + t)} \right] \right\} \right] \\
 & + d \cdot \cos \left\{ \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_i}{2(d \cdot \cos \theta_i + t)} \right] + \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_n}{2(d \cdot \cos \theta_n + t)} \right\} \\
 & + m \cdot \cos \left\{ \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_i}{2(d \cdot \cos \theta_i + t)} \right] + \theta_n + \gamma_{M-R} \right\} \quad (1.20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{R_n} = & Y_{T_0} + \sum_{i=1}^n \left[k_i \cdot \sin \left\{ \sigma_0 + \sum_{j=1}^i \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_j}{2(d \cdot \cos \theta_j + t)} \right] \right\} \right] \\
 & + d \cdot \sin \left\{ \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_i}{2(d \cdot \cos \theta_i + t)} \right] + \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_n}{2(d \cdot \cos \theta_n + t)} \right\} \\
 & + m \cdot \sin \left\{ \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_i}{2(d \cdot \cos \theta_i + t)} \right] + \theta_n + \gamma_{M-R} \right\} \quad (1.21)
 \end{aligned}$$

1.2 Pohyb v prostoru

Výše odvozené vztahy platí pro pohyb v rovině, lze ale předpokládat pohyb silniční frýzy realizovaný v prostoru, a proto je nutné některé veličiny redukovat z vlivů okamžitých náklonů odometru — podélného ζ_x a příčného ζ_y , viz Obrázek 1.4.



Obrázek 1.4: Náklony odometru

Při zavedení okamžitých náklonů jak je naznačeno na Obrázku 1.4 je možné přímo redukovat z náklonu ζ_x měřenou šikmou vzdálenost označenou k , stejně jako šikmou délkou d . Obdobně lze redukovat poloměr kružnice — v obecné poloze — po



které se odometr pohybuje, z náklonu ζ_y . Redukce zavedené do vztahů 1.20 a 1.21 lze zapsat jako

$$\begin{aligned} X_{R_n} = X_{T_0} + \sum_{i=1}^n \left[k_i \cdot \cos \zeta_{xi} \cdot \cos \left\{ \sigma_0 + \sum_{j=1}^i \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_j}{2(d \cdot \cos \theta_j + t) \cdot \cos \zeta_{yj}} \right] \right\} \right] \\ + d \cdot \cos \zeta_{xn} \cdot \cos \left\{ \sigma_{T_{n-1}-T_n} + \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_n}{2(d \cdot \cos \theta_n + t) \cdot \cos \zeta_{yn}} \right\} \\ + m \cdot \cos \{ \sigma_{T_n-M} + \theta_n + \gamma_{M-R} \} \quad (1.22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{R_n} = Y_{T_0} + \sum_{i=1}^n \left[k_i \cdot \cos \zeta_{xi} \cdot \sin \left\{ \sigma_0 + \sum_{j=1}^i \left[2 \cdot \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_j}{2(d \cdot \cos \theta_j + t) \cdot \cos \zeta_{yj}} \right] \right\} \right] \\ + d \cdot \cos \zeta_{xn} \cdot \sin \left\{ \sigma_{T_{n-1}-T_n} + \arcsin \frac{k \cdot \sin \theta_n}{2(d \cdot \cos \theta_n + t) \cdot \cos \zeta_{yn}} \right\} \\ + m \cdot \sin \{ \sigma_{T_n-M} + \theta_n + \gamma_{M-R} \} \quad (1.23) \end{aligned}$$

1.3 Výpočet rychlosti

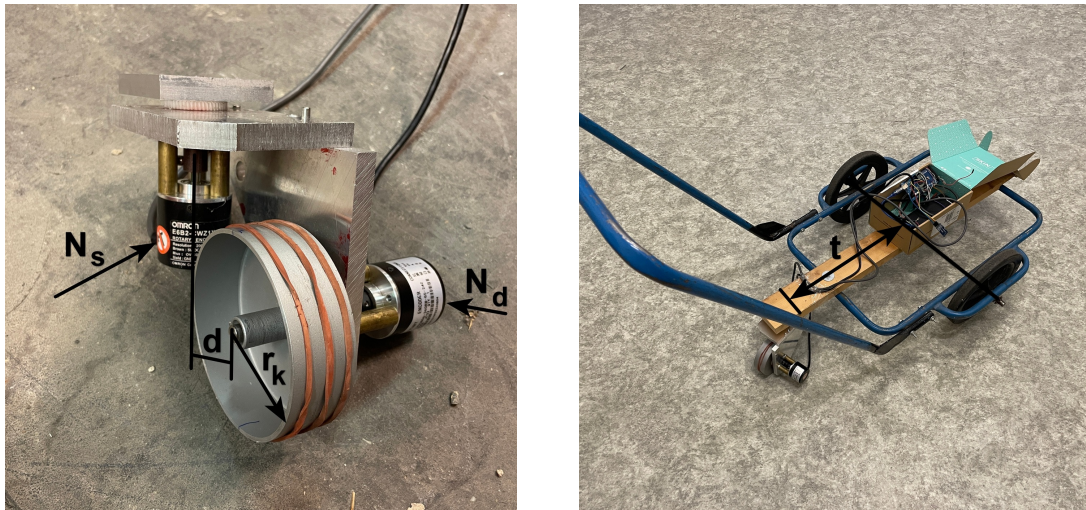
Výpočet rychlosti je při znalosti ujeté dráhy již poměrně jednoduchý, vzhledem ke skutečnosti, že desky Arduino disponují vlastním oscilátorem schopným měřit dostatečně přesně uplynulý čas [4]. V principu stačí ujetou dráhu podělit rozdílem časů mezi prvním a druhým odesláním zprávy nadřazené jednotce, tedy periodou pro kterou jsou počítány posuny vozidla.

1.4 Chybový model

Pro relativní rozsáhlost výpočetních vzorců bylo přistoupeno k určení přesnosti uvažovaného modelu pomocí metody Monte Carlo¹.

Lze předpokládat měření rozměrů odometru — tedy délek d , t a m — s přesností 1 mm. Protože přesnost určení poloměru kolečka r_k se do výsledné ujeté délky promítne zásadním způsobem, je předpokládáno dosažení řádově vyšší přesnosti 0,1 mm. Počet pulzů enkodérů na otáčku je považován za bezchybný. Enkodér LPD3806, použitý pro měření ujeté délky, zaznamená za jednu otáčku 360 pulzů a snímač OMRON E6B2-CWZ1X, který byl použit pro určování výchylky z jízdy přímým směrem, má rozlišení 2000 pulzů za otáčku. Pro zvýšení přesnosti určení

¹„Metodami Monte Carlo se nazývají numerické metody řešení matematických úloh pomocí modelování náhodných veličin a statistického odhadu jejich charakteristik.“ [5]


Obrázek 1.5: Rozměry měřicího zařízení

úhlu natočení odometru je uvažováno detekování vzestupných i sestupných hran směrového snímače a tedy zdvojnásobení jeho rozlišení na 4000 pulzů za otáčku.

Byl proveden výpočet pro vybrané poloměry oblouků. Ujetá délka byla vždy 100 m, s přesností jednoho výpočetního kroku $k = 9,60$ mm. Přestože to pro některé poloměry oblouků znamená vykroužení půlky, celé nebo několika celých kružnic, ujetá délka se nemění kvůli možnosti porovnání souborů mezi sebou. Soubor, pro nějž se výběrová směrodatná odchylka počítala, měl 10 000 prvků. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

| veličina | hodnota | směrodatná odchylka |
|-----------|----------|---------------------|
| d | 100,0 mm | 1,0 mm |
| t | 400,0 mm | 1,0 mm |
| m | 0,0 mm | 1,0 mm |
| r_k | 50,00 mm | 0,10 mm |
| N_d | 360 | 0 |
| n_d | 11 | 1,0 |
| N_s | 4000 | 0 |
| ζ_x | 0,000° | 0,017° |
| ζ_y | 0,000° | 0,017° |

Tabulka 1.1: Uvažované parametry odometru pro výpočet výběrových směrodatných odchylek metodou Monte Carlo

| Poloměr oblouku r | | 5 m |
|---------------------|--------|--------|
| n_s | 63,7 | 1,0 |
| X^2 | 4,60 m | 0,07 m |
| Y^2 | 3,05 m | 0,18 m |

Tabulka 1.2: Výsledky pro poloměr oblouku 5 metrů

²Teoreticky správná hodnota souřadnice, řešená analyticky



| Poloměr oblouku r | | 10 m |
|-------------------|---------|--------|
| n_s | 31,8 | 1,0 |
| X^2 | -5,52 m | 0,16 m |
| Y^2 | 18,34 m | 0,14 m |

Tabulka 1.3: Výsledky pro poloměr oblouku 10 metrů

| Poloměr oblouku r | | 50 m |
|-------------------|---------|--------|
| n_s | 6,4 | 1,0 |
| X^2 | 45,42 m | 0,17 m |
| Y^2 | 70,89 m | 0,12 m |

Tabulka 1.4: Výsledky pro poloměr oblouku 50 metrů

| Poloměr oblouku r | | 250 m |
|-------------------|---------|--------|
| n_s | 1,3 | 1,0 |
| X^2 | 97,44 m | 0,11 m |
| Y^2 | 19,77 m | 0,12 m |

Tabulka 1.5: Výsledky pro poloměr oblouku 250 metrů

| Poloměr oblouku r | | 1000 m |
|-------------------|---------|--------|
| n_s | 0,3 | 1,0 |
| X^2 | 99,93 m | 0,12 m |
| Y^2 | 5,01 m | 0,11 m |

Tabulka 1.6: Výsledky pro poloměr oblouku 1000 metrů

| Poloměr oblouku r | | 2000 m |
|-------------------|----------|--------|
| n_s | 0,2 | 1,0 |
| X^2 | 100,05 m | 0,12 m |
| Y^2 | 2,50 m | 0,12 m |

Tabulka 1.7: Výsledky pro poloměr oblouku 2000 metrů

| Poloměr oblouku r | | 3500 m |
|-------------------|----------|--------|
| n_s | 0,1 | 1,0 |
| X^2 | 100,08 m | 0,12 m |
| Y^2 | 1,43 m | 0,13 m |

Tabulka 1.8: Výsledky pro poloměr oblouku 3500 metrů

| Jízda po úsečce | | |
|-----------------|----------|--------|
| n_s | 0,0 | 1,0 |
| X^2 | 100,10 m | 0,12 m |
| Y^2 | 0,00 m | 0,13 m |

Tabulka 1.9: Výsledky pro úsečku

Kapitola 2

Hardware a software

Tato kapitola blíže představuje použité součástky, jakož i software, jež byl využit k vývoji ovládacího skriptu. Také popisuje tvorbu fyzického modelu odometru.

2.1 Arduino

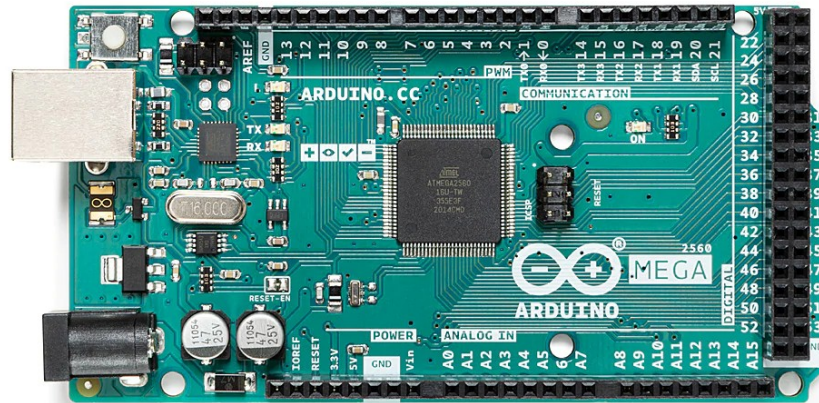
Arduino je open-source elektronická platforma založená na jednoduše použitelném hardwaru a softwaru. Už od svého zrodu na Ivrea Interaction Design Institute se mělo jednat o jednoduchý nástroj na vytváření prototypů pro studenty bez hlubších zkušeností s programováním nebo elektronikou. Brzy se komunita rozrostla, což dalo vzniknout novým výzvám a potřebám, jimž se desky začaly přizpůsobovat. Rozšířila se nabídka produktů pro aplikace IoT¹, nositelná zařízení nebo 3D tisk. Také vznikly různé variace jednoduché 8-bitové desky — např. Arduino Nano nebo Arduino Mega [6].

Vývojové prostředí kombinuje několik funkcí — mj. správa knihoven a desek, vestavěný kompilátor² nebo prostředí pro programování — díky nimž je ovládání Arduina jednoduché a intuitivní. V programovacím jazyce Wiring, frameworku v jazyce C++, lze v integrovaném kódovacím editoru napsat program pro mikrokontrolér desky. Arduino IDE (Integrated Development Environment) může být spuštěno v operačních systémech Windows, Linux i macOS [9]. Za účelem vývoje ovládacího software lze však využít i jiných dostupných editorů zdrojového kódu, za zmínku stojí například PlatformIO³. Nejen pro jednoduchost ovládání se kolem platformy Arduino shromáždila celosvětová komunita tvůrců — studentů, umělců, programátorů a kutilů — ze které vzešlo obrovské množství znalostí dostupných online, například na blogu nebo fóru [6].

¹„**Internet of Things** je v informatice označení pro síť fyzických zařízení [...], která jsou vybavena elektronikou, senzory a síťovou konektivitou [...]“ [7]

²„**Kompilátor** [...] slouží pro překlad algoritmů zapsaných ve vyšším programovacím jazyce do jazyka nižšího, nejčastěji [...] strojového kódu.“ [8]

³<https://platformio.org/>



Obrázek 2.1: Arduino Mega 2560 - zdroj [6]

Pro potřeby této práce byla zvolena deska Arduino Mega 2560, jež má 54 vstupně/výstupních digitálních pinů, 16 analogových vstupních pinů, 4 hardwarové sériové porty, oscilátor s frekvencí 16 MHz, možnost připojení pomocí USB a resetovací tlačítko (viz Obrázek 2.1). Podrobné technické parametry lze dohledat v Tabulce 2.1 nebo ve zdroji [6].

| | |
|---------------------------|-----------|
| Provozní napětí | 5 V |
| Doporučené vstupní napětí | 7-12 V |
| Digitální I/O piny | 54 |
| Analogové vstupy | 16 |
| Paměť Flash | 256 KB |
| Frekvence hodin | 16 MHz |
| Délka | 101.52 mm |
| Šířka | 53.3 mm |

Tabulka 2.1: Technické parametry Arduino Mega 2560 Rev3 — zdroj [6]

2.2 Snímač úhlu

Inkrementální rotační enkodér je elektromechanické zařízení se dvěma výstupními signály, A a B, které mění svou hodnotu při pohybu zařízení. Oba signály — vůči sobě fázově posunuty — dohromady označují jak výskyt, tak směr pohybu. Některé enkodéry mají dodatečný výstupní signál, typicky značený Z, který slouží

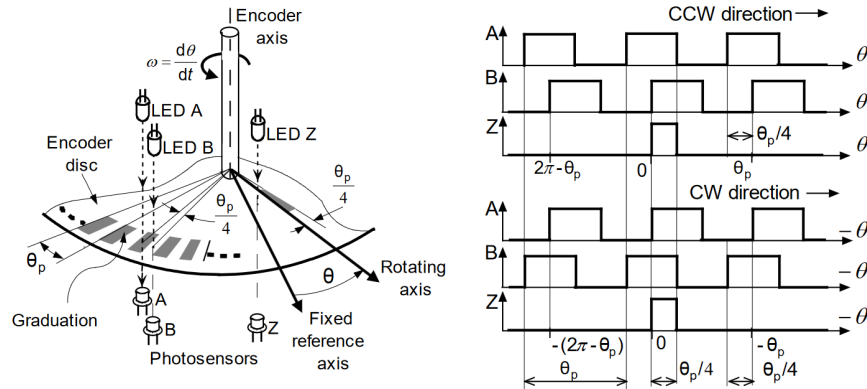


k zjišťování umístění vůči konkrétní referenční poloze. Na rozdíl od absolutních, inkrementálních enkodér neslouží ke čtení absolutní polohy, ale pouze k zjišťování změn v natočení a pro každou zjištěnou změnu i její směr. Pro určení absolutní polohy je tedy nutné zpracovávat tyto signály na jiném zařízení, např. desce Arduino, jež bude polohu enkodéru počítat. Čtení změn polohy inkrementálních rotačních enkodérů je prakticky okamžité, a proto jsou vhodné k monitorování vysokorychlostních mechanismů téměř v reálném čase. Díky tomu se inkrementální enkodéry často využívají při potřebě precizního měření nebo pro kontrolu pozice a rychlosti [10].

„Optoelektrický inkrementální enkodér sestává ze dvou hlavních částí. První, pohyblivou část snímače představuje optický disk mechanicky navázaný k měření výchylce. Statickou část snímače tvoří čtecí zařízení umístěné na statoru zařízení. Optický disk obsahuje přesný počet rysek, daný rozlišením, kterými může světelný tok procházet, nebo se odrážet, na fotocitlivé prvky. Při otáčení disku tak dochází k přerušování (modulaci) světelného toku, který je fotodetektory převáděn na elektrický signál. Zdrojem světla bývají diody LED. Pro převod dopadajícího světelného toku na elektrický signál, výše naznačeným principem, rozlišujeme dva způsoby snímání, a sice prosvětlovací (transmisní) a odrazový (reflexní). Další možnost vyhodnocení posuvu měřítka představuje interferenční způsob. Pohybem rysek měřítka dochází ke změně fáze difraktovaných světelných vln, které spolu dále interferují. Na základě změn světelných intenzit dopadajících na fotodetektory vyhodnocujeme posun měřítka.“ [11]

„Snímač na základě svého logického stavu generuje jako výstup logickou nulu, resp. jedničku. Takto můžeme detekovat vzestupnou (přechod $0 \rightarrow 1$), resp. sestupnou (přechod $1 \rightarrow 0$) hranu a jejich sčítáním získat informaci o natočení nebo posunutí. Problém však nastane v okamžiku, kdy dojde ke změně směru. Pokud použijeme pouze jednu optickou závoru, nejsme schopni získat informaci o směru. Tuto informaci lze ale získat použitím dvou optických snímačů, které jsou vůči sobě fázově posunuty o $\pi/2$. Takovému enkodéru se říká kvadraturní. Na základě toho, zda u kvadraturního enkodéru detekujeme pouze jeden, nebo oba typy hran, získáváme buď dvojnásobné, nebo čtyřnásobné rozlišení enkodéru vůči počtu pulsů v jednom signálu.“ [3]

Při vývoji prototypu odometru byly využity dva inkrementální enkodéry. Prvním je OMRON E6B2-CWZ1X (viz Obrázek 2.3a) s rozlišením 2000 pulsů na otáčku, jež se uplatnil pro měření výchylky z přímého směru. Druhý enkodér, který nese označení LPD3806 a má rozlišení 360 pulsů na otáčku, byl použit pro měření ujeté vzdálenosti. Podrobné technické parametry jsou uvedeny ve zdrojích [13] pro první snímač a [14] pro snímač druhý.



Obrázek 2.2: Kvadraterní inkrementální enkodér (vlevo) a výstupní signál ze světelných závor (vpravo) — zdroj [12]



(a) OMRON E6B2-CWZ1X — zdroj [15]

(b) LPD3806 — zdroj [14]

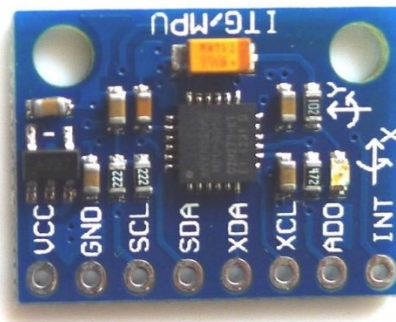
Obrázek 2.3: Použité úhlové snímače

2.3 Akcelerometr a gyroskop

Akcelerometr je nástroj, který měří vlastní akceleraci. Vlastní akcelerace je rychlost změny rychlosti tělesa v jeho vlastním okamžitém klidovém rámci. To je odlišné od souřadnicového zrychlení, tedy zrychlení ve fixním souřadnicovém systému. Proto by kupříkladu akcelerometr v klidu na povrchu Země naměřil zrychlení dané tíží, $g = 9,81m/s^2$. Naopak, akcelerometr ve volném pádu by nenaměřil nic [16]. Akcelerometry se používají pro měření statického gravitačního zrychlení, které umožňuje stanovit úhel vychýlení měřeného objektu od svislice, a také pro měření dynamického zrychlení v důsledku otřesů, pohybu, úderu nebo vibrací. Konstrukčně můžeme hovořit o akcelerometrech jednoosých, dvouosých nebo tříosých, které jsou soustavou tří na sebe vzájemně kolmých akcelerometrů [17].

Pro konstrukci odometru byl vybrán modul s tříosým akcelerometrem a tříosým gyroskopem od firmy Eclipsera, viz Obrázek 2.4. Tato součástka byla použita kvůli

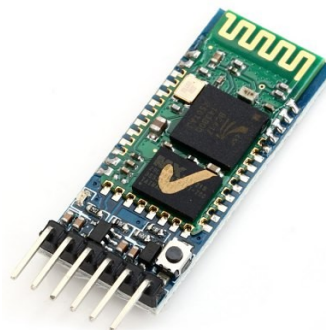
měření náklonů ve směru pohybu odometru, pro redukci šikmé měřené délky na vodorovnou, a ve směru kolmém k pohybu, pro redukci poloměru kružnice v obecné poloze, po níž se odometr pohybuje, do vodorovné roviny. Použitý modul „komunikuje s Arduino deskou přes rozhraní I²C a obsahuje DMP (digital motion processor), který v reálném čase přepočítává naměřené hodnoty akcelerometru a gyroskopu na jednotlivé složky rotačního pohybu v ose X, Y a Z.“ [18]



Obrázek 2.4: Modul akcelerometru a gyroskopu — zdroj [19]

2.4 Bluetooth modul

Propojení s nadřazeným zařízením je zprostředkováno pomocí Bluetooth modulu HC-05 (viz Obrázek 2.5). Jedná se o „snadno použitelný modul Bluetooth SPP (Serial Port Protocol), určený pro transparentní nastavení bezdrátového sériového připojení. Jeho komunikace probíhá přes sériovou linku, což umožňuje snadné propojení s kontrolérem nebo počítačem. Bluetooth HC-05 modul umožňuje přepínat mezi režimem master a slave, tedy je možné jej využívat jak pro příjem tak odesílání dat.“ [20]



Obrázek 2.5: Bluetooth modul HC-05 — zdroj [21]



2.4.1 Odesílaná zpráva

Formát odesílané zprávy je autorským návrhem, který vychází ze standardu NMEA 0183. Schéma tohoto formátu má tvar

$$\$SNODO, tttt, ddd.d, s.ssss, r.rr * cc < CR > < LF >$$

kde 'SNODO' je označení vysílané zprávy, 'tttt' je čas od stanovení počátku souřadnicového systému v sekundách, 'ddd.d' značí ujetou dráhu od posledního vyslání zprávy v milimetrech, 's.ssss' směrnik této dráhy, tedy úhel mezi kladnou větví osy x a spojnicí koncových bodů dráhy, v radiánech a 'r.rr' okamžitou rychlost v metrech za sekundu. Za znakem '*' následuje kontrolní součet, tvořený hexadecimálním zápisem bytu, který vznikne jako exklusivní disjunkce (XOR⁴) ASCII hodnot všech znaků mezi \$ a *. Poslední dva znaky zprávy představují symbol pro nový řádek v sériové komunikaci — ASCII symbol pro návrat vozíku a přechod na novou řádku.

2.5 Napájení

Jako každé elektornické zařízení, i tento přístroj potřebuje ke své funkci zdroj elektrické energie. Napětí je přivedeno pomocí USB A-B kabelu z powerbanky⁵ do Arduino desky, která následně napájí připojené periferie.

2.6 Tělo odometru

Tělo odometru je tvořeno kovovými pláty, jak lze vidět na Obrázku 2.6. Osička úhlového snímače LPD3806 je pevně spojena s rotační osou kolečka a osička enkodéru OMRON zase s vozidlem, přičemž těla obou enkodérů jsou přišroubována k nepohyblivé části těla odometru.

Zapojení jednotlivých periférií k Arduino desce je provedeno podle návrhu na Obrázku 2.7.

2.7 Visual Studio Code

Pro vývoj ovládacího skriptu byl zvolen editor zdrojového kódu Visual Studio Code „vyvíjený společností Microsoft pro operační systémy Windows, Linux a macOS. Obsahuje podporu pro GIT, zvýraznění syntaxe, kontextový našeptávač a pod-

⁴„Exklusivní disjunkce je logická operace, jejíž hodnota je pravda, právě když každá vstupní hodnota nabývá, v porovnání s ostatními vstupy, unikátní hodnotu.“ [22]

⁵„**Powerbanka** je záložní zdroj elektrické energie skládající se z jednoho či více akumulátorů a stejnosměrného měniče.“ [23]



Obrázek 2.6: Prototyp odometru

poru pro ladění⁶ a refaktorizaci⁷. Zdrojový kód je svobodný software pod licenci MIT. Sestavené verze nabízené přímo Microsoftem jsou freeware⁸ obsahujícím telemetrii⁹, ale existuje i komunitně sestavovaná varianta VSCodium. Editor je naprogramovaný v JavaScriptu a TypeScriptu.“ [28]

2.7.1 PlatformIO

Použitou nástavbou Visual Studio Code pro vývoj aplikací pro Arduino je ukrajinský nástroj PlatformIO, volně dostupný na webu¹⁰ nebo na Microsoft Marketplace. „Jedinečná filozofie PlatformIO nabízí vývojářům moderní integrované prostředí, které funguje napříč platformami, podporuje mnoho různých sad pro vývoj softwaru nebo frameworků¹¹ a zahrnuje sofistikované ladění, testování jednotek, analýzu kódu a vzdálenou správu. Je navržen tak, aby maximalizoval flexibilitu a

⁶ „**Ladění** je v informatice metodický postup pro nalézání a snižování množství chyb v počítačových programech [...] tak, aby fungoval, jak se předpokládá.“ [24]

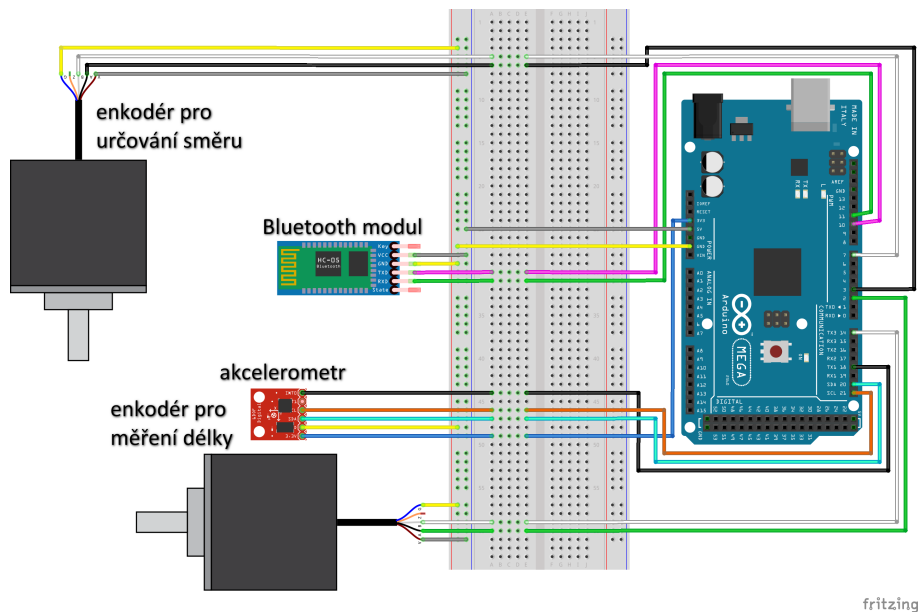
⁷ „**Refaktorování** je disciplinovaný proces provádění změn v softwarovém systému takovým způsobem, že nemají vliv na vnější chování kódu, ale vylepšují jeho vnitřní strukturu s minimálním rizikem vnášení chyb. Při refaktorování se provádí malé až primitivní změny, ale celkový efekt je velký, a to v podobě čistšího, průhlednějšího a čitelnějšího kódu.“ [25]

⁸ „**Freeware** je software, který je distribuován bezplatně.“ [26]

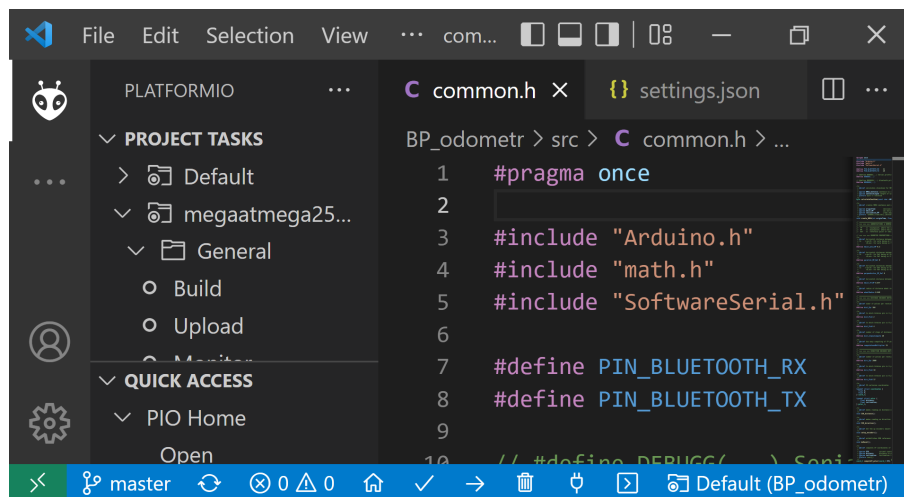
⁹ „**Telemetrie** je technologie umožňující měření na dálku a dálkový přenos dat.“ [27]

¹⁰ <https://platformio.org>

¹¹ „**Framework** (aplikační rámec) je softwarová struktura, která slouží jako podpora při programování a vývoji a organizaci jiných softwarových projektů.“ [29]



Obrázek 2.7: Schéma zapojení



Obrázek 2.8: Prostředí Visual Studio Code s nastavbou PlatformIO

možnost volby pro vývojáře, kteří mohou používat buď grafické editory nebo editory příkazového řádku nebo obojí.“ [30] Na Obrázku 2.8 je ukázka prostředí v němž byl ovládací software vyvíjen.

Kapitola 3

Test odometru

Na začátku této kapitoly je rozebrán návrh testů pro ověření vlastností odometru. Následuje popis vlastního provedení testů a v závěru kapitoly jsou získaná data interpretována.

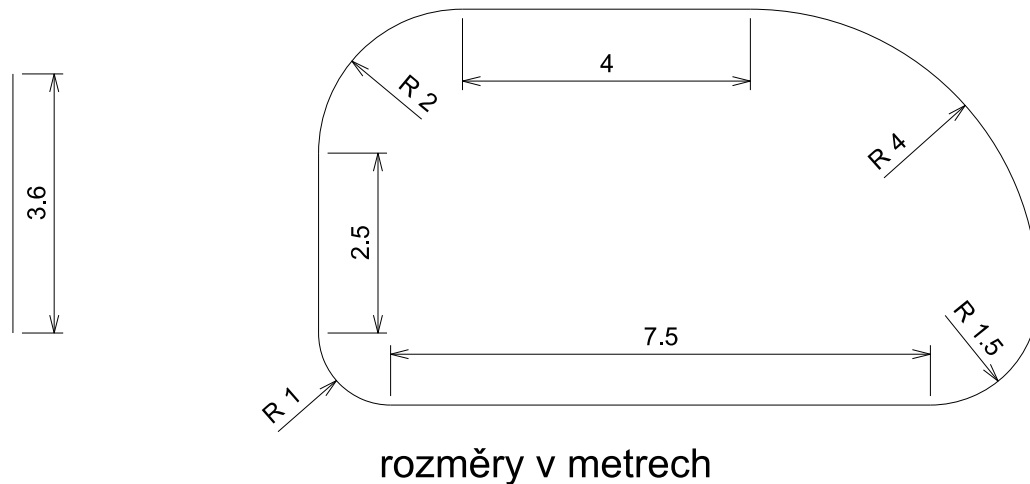
3.1 Návrh testů

Pro možnost testování vlastností odometru byl tento připevněn pomocí prkna na dvoukolý vozík, jak vidno na Obrázku 3.2. Jelikož výše popsany postup výpočtu umožňuje počítat změny polohy pro jakýkoliv bod vozidla, pevně spojený s bodem M odometru, byl pro snadné vyhodnocení získaných dat jako referenční bod vozidla určen střed pravého kolečka vozíku. Byly určeny dvě testovací dráhy, z nichž první má podobu úsečky a slouží k ověření správnosti výpočtu ujeté vzdálenosti. Druhá dráha sestává z kombinace úseků přímých a částí kružnic, přičemž začátek splývá s koncem, opět pro zjednodušení interpretace získaných dat. Návrh testovacích drah je zobrazen na Obrázku 3.1. Aby bylo možné ověřit správnost redukce k referenčnímu bodu vozidla, bylo navrženo projet druhou testovací dráhu pravým kolečkem vozíku nejprve v matematicky kladném směru a následně ve směru opačném.

3.2 Realizace testů

Nejprve je nutné přiblížit vnitřní strukturu ovládacího software, především způsob určení referenčního směru směrového enkodéru. Ten spočívá v jízdě přímo na určenou vzdálenost a pravidelném zaznamenávání čtení na směrovém enkodéru. Následně je z takto zaznamenaných čtení určen průměr, o jehož hodnotu jsou poté opravována veškerá čtení směrového enkodéru.

V prostorách suterénu budovy C fakulty stavební ČVUT bylo provedeno vytyčení první, tedy přímé, testovací dráhy a na ní proveden test odometru. Už při

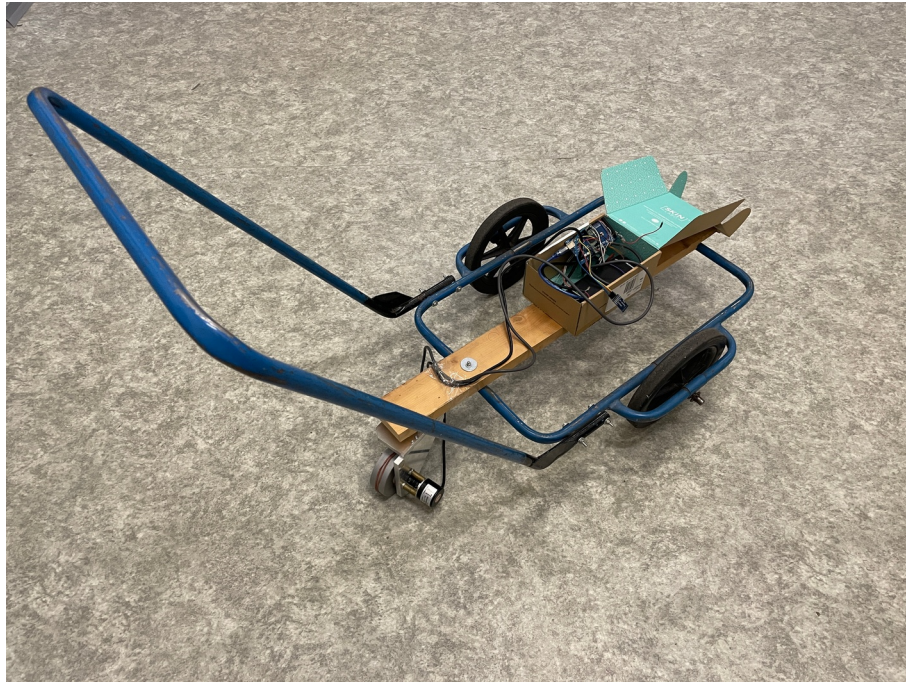


Obrázek 3.1: Návrh testovacích drah: dráha 1 (vlevo) a dráha 2 (vpravo)

kalibraci směrového enkodéru byla patrná nestabilita jeho čtení, zejména při otřesech. Tím je myšleno náhodné vyslání posloupnosti pulzů, nezávislé na rotaci odometru, jež svým charakterem zcela znehodnocuje získaná data. Následná vizualizace získaných dat tento problém potvrdila, viz Obrázek 3.3. Byly provedeny několikeré úpravy zařízení pro eliminaci chyb způsobené nedokonalými kontakty jak v samotném snímači, tak v zapojení, nicméně žádná z provedených úprav nevedla k úplnému odstranění tohoto závažného problému.

Byl proveden pokus o opravu získaných dat, který vycházel z předpokladu, že získaná chyba je pro určitý časový úsek konstantní. Proto byly úhlové hodnoty opraveny nejprve o úhel z první zprávy pro natočení prvního úseku do osy x a následně o $(i-1)$ násobek rozdílu úhlu mezi první a druhou vyslanou zprávou, kde i značí pořadové číslo vyslané zprávy. Popsaná metoda jistě vede k lepším výsledkům, viz Obrázky 3.4, 3.5, 3.6 a 3.7. Bohužel, tyto výsledky jsou silně ovlivněny tím, které náhodné chyby se projeví mezi prvním a druhým vysláním zprávy.

Na druhou stranu, snímač pro určení ujeté vzdálenosti tímto problémem nebyl tolik ovlivněn a získaná data při zohlednění přesnosti určených veličin odpovídala předpokladu, o čemž je možné se přesvědčit v Tabulce 3.1. Relativně velký rozptyl měřených hodnot je daný i nešťastně řešeným způsobem realizování dráhy, kdy okamžik projetí startem i cílem byl určen "od oka".

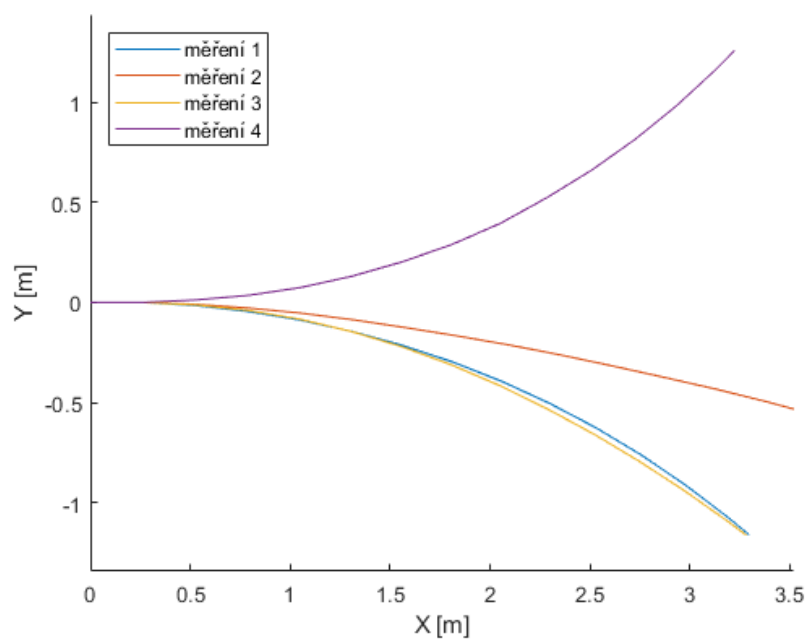


Obrázek 3.2: Odometr připevněný na vozík

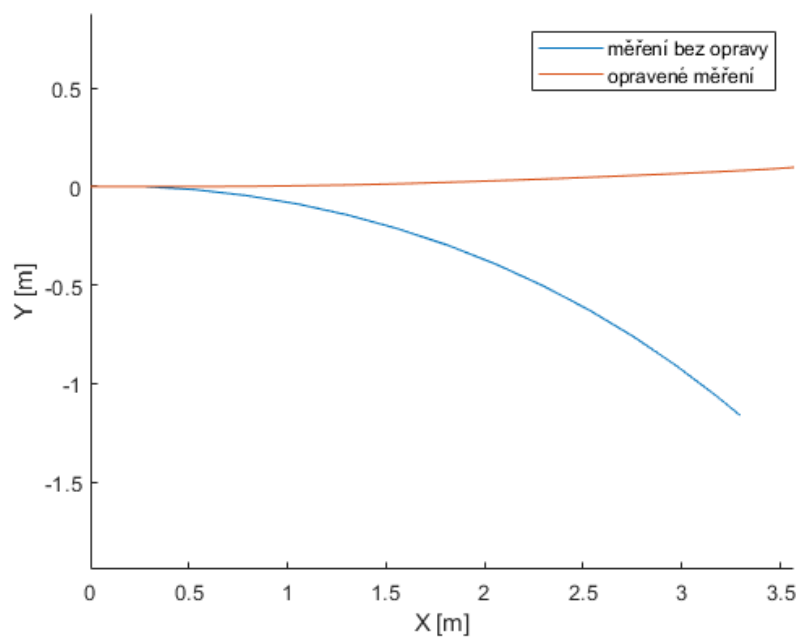
| délka dráhy | 3,600 m |
|-------------|---------|
| měření 1 | 3,612 m |
| měření 2 | 3,605 m |
| měření 3 | 3,589 m |
| měření 4 | 3,605 m |

Tabulka 3.1: Výsledky měření na testovací dráze 1

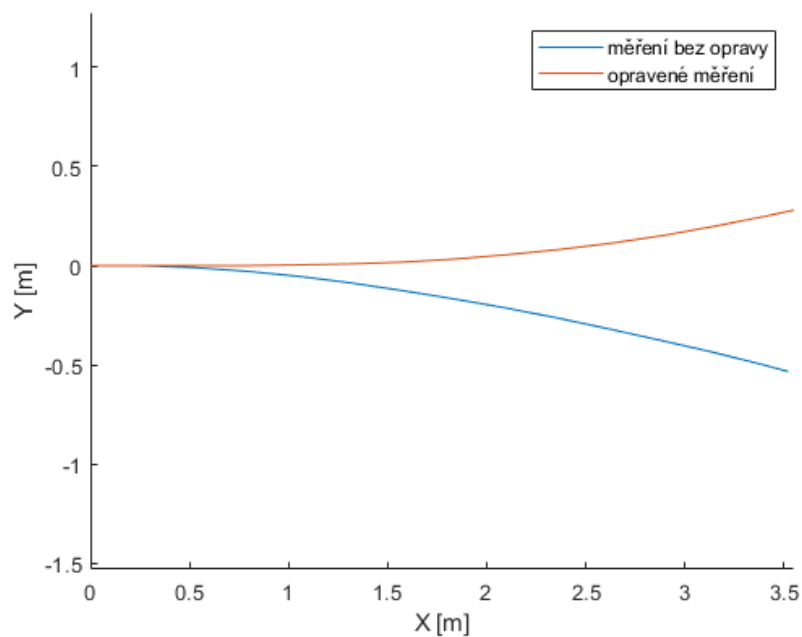
Kvůli neúplnému odstranění výše diskutované nedokonalosti měřicího zařízení bylo od testování na druhém polygonu upuštěno a lze jen konstatovat nevhodnost použitého snímače k uvažované aplikaci. Problém, při zachování konstrukce odometru, by bylo možné řešit například užitím absolutního rotačního enkodéru, jež umožňuje určovat absolutní úhel natočení, oproti inkrementálnímu, který dokáže pouze určovat změnu a její směr, jak je popsáno v Kapitole 2.



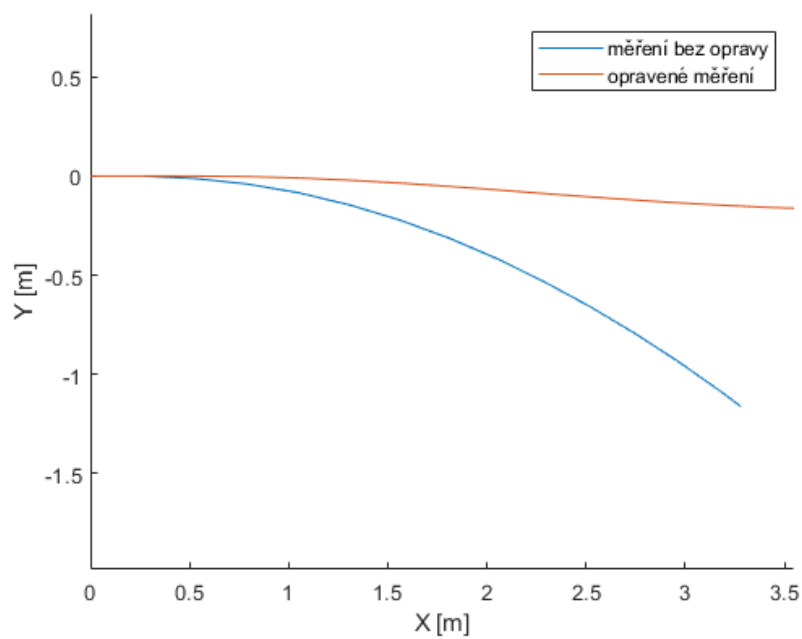
Obrázek 3.3: Vizualizace provedených měření



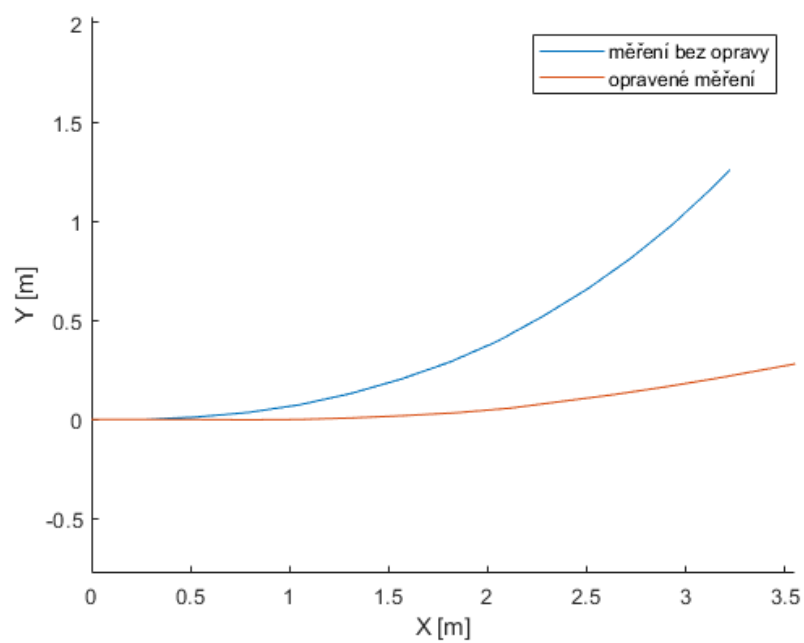
Obrázek 3.4: Porovnání opraveného a původního měření 1



Obrázek 3.5: Porovnání opraveného a původního měření 2



Obrázek 3.6: Porovnání opraveného a původního měření 3



Obrázek 3.7: Porovnání opraveného a původního měření 4

Závěr

Cílem této bakalářské práce byl vývoj digitálního low-cost odometru. Takový úkol se skládal z několika částí. Nejprve bylo nutné ujasnit si, jaký model odometrického zařízení bude nejvhodnější pro zamýšlenou aplikaci. Vzhledem k požadavku určovat změny v 2D prostoru, nikoliv jen ujetou délku, jako nejúčelnější se jevil model taženého odvalovacího kolečka. Takový návrh umožňuje umístit rotační enkodéry na osu kolečka — pro snímání ujeté délky — a do závěsu kolečka — kvůli určování natočení kolečka vůči předozadní ose vozidla. Dalším stěžejním bodem této práce bylo navrhnout postup výpočtu změn polohy vozidla z měřených veličin a následně vybrat komponenty, které se využijí pro tvorbu fyzického modelu.

Základem měřicího zařízení jsou dva snímače úhlu a deska Arduino. Dalšími užitými součástkami jsou akcelerometr, Bluetooth modul a powerbanka. Akcelerometr slouží k výpočtům redukce měřených veličin z podélného a příčného náklonu, Bluetooth modul ke komunikaci s nadřazeným zařízením. Důvodem k použití powerbanky je napájení Arduino desky a periférií, aby bylo možné zařízení používat bez propojení s počítačem.

Nemálo úsilí a času zabral vývoj a ladění ovládacího skriptu pro Arduino. Což bylo nepochybně způsobeno malou obeznameností autora jak s programováním v jazyce Wiring, tak s principy psaní přehledného a čistého kódu. Zde však velmi pomohly moudré rady zkušenějších a z celého projektu si tak autor odnáší cenný náhled do problematiky programování.

Následný test vytvořeného modelu ukázal některé jeho nedostatky. Z těch zásadních bych chtěl upozornit na zjištěnou nestabilitu enkodéru použitého k určování natočení odometru vůči předozadní ose vozidla. Ta svým charakterem zásadním způsobem znehodnocuje získaná měření. Možných řešení tohoto problému je více, nabízí se použití jiného inkrementálního enkodéru, méně náchylného na vibrace, nebo absolutního rotačního enkodéru, který je však řádově dražší. Dalším řešením by mohlo být vyhledávání skoků ve čtení směrového enkodéru a následná filtrace získaných dat.

Kvůli výše diskutované chybě hardwaru byly provedeny testy jen v omezené míře a tak nebylo možné plně ověřit teoretickou přesnost uvedenou v Kapitole 1. Předpokládanou přesnost je možné zásadně zvýšit použitím kolečka s větším po-



loměrem nebo přesnějším určením jeho průměru. Je zřejmé, že zvětšení ostatních rozměrů odometru by také přispělo k navýšení přesnosti výsledku, avšak menší měrou než přesnější určování ujeté vzdálenosti.

Mám za to, že většina cílů práce byla splněna. Byl vytvořen teoretický i fyzický model odměřovacího zařízení, pro něž byla vyvinuta řídicí aplikace a proběhlo částečné testování vytvořeného zařízení. Rád bych v budoucnu dokončil vývoj prototypu — ať už užitím jiného hardwaru nebo využitím nějaké formy filtrace získávaných dat. Následně bych rád otestoval vlastnosti funkčního prototypu.

Bibliografie

1. ŠTRONER, Martin. *Globální navigační satelitní systémy* [online] [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/wp-content/uploads/2022/01/GNSS_obs.pdf.
2. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Inertial measurment unit* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inertial_measurement_unit&oldid=1083981921.
3. PORTEŠ, Petr. *Návrh a realizace odometrických snímačů pro mobilní robot s Ackermannovým řízením* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148080. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
4. *Arduino Mega 2560 Rev3: Product Reference Manual* [online]. Monza: Arduino, 2022-05-13 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/static/f30129a7afd7cf783b72da530526a832/A000067-datasheet.pdf>.
5. DŘÍMAL, Jiří; TRUNEC, David; BRABLEC, Antonín. *Úvod do metody Monte Carlo* [online]. Brno, 2006 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/~trunec/mc.pdf>.
6. *Arduino* [online]. c2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc>.
7. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Internet věcí* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Internet_v%C4%9Bc%C3%AD&oldid=20069864.
8. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Překladač* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C5%99eklada%C4%8D&oldid=20075018>.
9. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Arduino* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Arduino%5C&oldid=20933612>.



10. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Incremental Encoder* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2021 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Incremental_encoder%5C&oldid=1058942821.
11. ŠINDELÁŘ, Michal. *Kalibrace snímačů úhlu* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=146178. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
12. INCZE, Ioan Iov; NEGREA, Alin; IMECS, Maria; SZABÓ, Csaba. *Incremental Encoder Based Position and Speed Identification: Modeling and Simulation* [online]. 2010 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://www.acta.sapientia.ro/acta-emeng/C2/emeng2-3.pdf>.
13. *Incremental [...] Rotary Encoder E6B2-C* [online]. OMRON, c2017 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2693580.pdf>.
14. *Sensor - LPD3806 - Optical Rotary Encoder* [online] [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <http://domoticx.com/sensor-lpd3806-optical-rotary-encoder/>.
15. *Industrial Automation | OMRON, Europe* [online]. c2021 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://industrial.omron.eu/en/home>.
16. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Accelerometer* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Accelerometer&oldid=1084605120>.
17. *Jak funguje a k čemu slouží akcelerometr?* [Online] [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/22568/jak-funguje-a-k-cemu-slouzi-akcelerometr/>.
18. *Gyroskop + akcelerometr* [online]. Havlíčkův Brod: Eclipsera, c2016 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/134/1500635992.pdf>.
19. *Arduino gyroskop + akcelerometr* [online]. [B.r.] [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/830-iic-i2c-gyroskop-akcelerometr-modul-mpu-6050.html>.
20. *HC-05 Bluetooth Module: User's manual* [online] [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-148.1.pdf>.
21. *Bluetooth modul HC-05* [online] [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1005-bluetooth-modul-hc-05.html>.



22. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Exkluzivní disjunkce* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Exkluzivn%C3%AD_disjunkce&oldid=20374032.
23. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Powerbanka* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Powerbanka&oldid=19269616>.
24. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Ladění* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lad%C4%9Bn%C3%AD_\(programov%C3%A1n%C3%AD\)&oldid=20330277](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lad%C4%9Bn%C3%AD_(programov%C3%A1n%C3%AD)&oldid=20330277).
25. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Refaktorování* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Refaktorov%C3%A1n%C3%AD&oldid=21074479>.
26. *Wikipedie: otevřená encyklopedie: Freeware* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Freeware&oldid=20494359>.
27. *Wikipedie: otevřená encyklopedie: Telemetrie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Telemetrie&oldid=20029376>.
28. *Wikipedie: otevřená encyklopedie: Visual Studio Code* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Visual_Studio_Code&oldid=21174602.
29. *Wikipedie: otevřená encyklopedie: Framework* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Framework&oldid=19264637>.
30. *What is PlatformIO?* [Online]. c2014-2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://docs.platformio.org/en/latest/what-is-platformio.html>.

Přílohy

A GIT repozitář

Zdrojové kódy řídicího skriptu pro odometr a skriptu pro výpočet přesnosti metodou Monte Carlo jsou volně dostupné.

https://github.com/theremias/BP_odometr/releases/tag/v1.0