



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO SPORTOVNÍ ANALÝZU VYUŽÍVAJÍCÍ SENZORY INERCIÁLNÍCH VELIČIN

MEASUREMENT UNIT FOR SPORTS ANALYSIS WITH INERTIAL SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN DUGAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL KUMPÁN

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|----------------------------------------------------|
| Ústav: | Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky |
| Student: | Bc. Martin Dugas |
| Studijní program: | Aplikované vědy v inženýrství |
| Studijní obor: | Mechatronika |
| Vedoucí práce: | Ing. Pavel Kumpán |
| Akademický rok: | 2017/18 |

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

Měřicí zařízení pro sportovní analýzu využívající senzory inerciálních veličin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podstatou práce je návrh měřicího zařízení s využitím MEMS snímačů inerciálních veličin. Měřicí zařízení bude sloužit pro kinematickou a dynamickou analýzu sportovního výkonu v rychlostní kanoistice.

Cíle diplomové práce:

- 1) Seznamte se se způsoby hodnocení techniky a výkonu v rychlostní kanoistice.
- 2) Na základě provedené rešerše navrhnete způsob měření a metodu vyhodnocení naměřených dat s využitím veličin měřených pomocí inerciálních snímačů.
- 3) Sestavte měřicí zařízení pro měření v rychlostní kanoistice.
- 4) Vyhodnoťte provedená měření.

Seznam doporučené literatury:

FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4th ed. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-6465-6.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom meracieho zariadenia využívajúceho inerciálne senzory veličín pre analýzu techniky a výkonu v rýchlostnej kanoistike. Kombináciou dát z trojosého akcelerometra a trojosého gyroskopu pomocou rozšíreného Kálmánovho filtra boli získané priebehy rýchlosti, náklonu, klopenia a kurzu lode a frekvencie pádlovania. Vypočítané hodnoty boli overené pomocou GPS. Ďalej boli identifikované parametre popisujúce dynamiku systému a tak bolo možné zahrnúť do analýzy aj dynamické veličiny ako sila a výkon záberu.

Abstract

Master's thesis is dealing with design of a measuring unit incorporating inertial sensors, used for analysis in canoe sprint. Data from a three-axis accelerometer and a three-axis gyroscope were combined using an extended Kalman filter, yielding speed, roll, pitch and yaw of the boat and stroke rate. Calculated values were verified by a GPS. Furthermore, parameters describing dynamic behaviour of the system were identified, allowing an inclusion of dynamic quantities like force and power into the analysis.

Klíčová slova

inerciálne senzory, inerciálne meracie zariadenie, kinematické veličiny, rozšírený Kálmánov filter, quaternion, identifikácia parametrov dynamického systému, rýchlostná kanoistika, športová analýza, analýza pohybu, Raspberry Pi Zero W

Keywords

inertial sensors, inertial measuring unit, kinematic quantities, extended Kalman filter, quaternion, dynamic system parameters identification, canoe sprint, sports analysis, movement analysis, Raspberry Pi Zero W

DUGAS, M. *Měřicí zařízení pro sportovní analýzu využívající senzory inerciálních veličin.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Kumpán.

Prehlasujem, že moju diplomovú prácu na tému „Měřicí zařízení pro sportovní analýzu využívající senzory inerciálních veličin“ som vypracoval samostatne, pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odborných článkov a zdrojov, ktoré sú všetky citované a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Bc. Martin Dugas

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu diplomovej práce Ing. Pavlovi Kumpánovi za cenné rady, pripomienky a ústretovosť pri vypracovaní práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať rodine a priateľom za psychickú podporu a všetkým ktorí nejakou mierou prispeli k lepšiemu priebehu vypracovania práce.

Bc. Martin Dugas

Obsah

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Úvod | 2 |
| 2 | Formulácia problému a ciele riešenia | 3 |
| 3 | Prehľad súčasného stavu poznania | 4 |
| 3.1 | Rýchlostná kanoistika | 4 |
| 3.2 | Hodnotenie techniky a výkonu v rýchlostnej kanoistike | 6 |
| 3.2.1 | Hydrodynamika lodí | 8 |
| 3.3 | Mikro-elektro-mechanické systémy a inerciálne senzory veličín | 13 |
| 3.3.1 | Senzory polohy, rýchlosti a zrýchlenia | 13 |
| 3.3.2 | Senzory magnetickej indukcie | 16 |
| 3.4 | Práce zaoberajúce sa hodnotením techniky a výkonu v kanoistike | 17 |
| 3.5 | Komerčné produkty hodnotenia techniky a výkonu v kanoistike | 18 |
| 4 | Analýza problému | 20 |
| 4.1 | Zhodnotenie rešeršných štúdií | 20 |
| 4.2 | Vymedzenie hraníc problému | 20 |
| 4.3 | Výber hardware | 20 |
| 4.4 | Súradnicové systémy a ich popis | 23 |
| 4.4.1 | Súradnicové systémy | 23 |
| 4.4.2 | Orientácia v priestore | 23 |
| 4.5 | Fúzia dát inerciálnych senzorov | 25 |
| 5 | Metóda riešenia problému | 26 |
| 5.1 | Konfigurácia mobilnej výpočtovej jednotky | 26 |
| 5.1.1 | Časovanie meracieho cyklu | 26 |
| 5.1.2 | Cyklus ovládania a spätnej väzby | 27 |
| 5.2 | Zostavenie fyzického zariadenia pre meranie v cieľových podmienkach | 28 |
| 5.2.1 | Súčiastky | 28 |
| 5.2.2 | Dizajn puzdra | 28 |
| 5.3 | Kalibrácia inerciálnej jednotky | 34 |
| 5.3.1 | Kalibrácia akcelerometra | 34 |
| 5.3.2 | Kalibrácia gyroskopu | 34 |
| 5.4 | Meranie dát | 35 |
| 5.5 | Kompenzácia náklonu v laterálnom zrýchlení | 35 |
| 5.6 | Fúzia dát | 36 |
| 5.6.1 | Rozšírený Kálmánov filter | 37 |
| 5.7 | Zrýchlenie | 40 |
| 5.8 | Rýchlosť | 40 |
| 5.9 | Vzdialenosť | 41 |
| 5.10 | Dynamika | 41 |
| 5.10.1 | Meranie dát pre identifikáciu dynamického systému | 41 |
| 5.10.2 | Identifikácia parametrov dynamického systému | 41 |
| 5.10.3 | Výpočet sily záberu | 41 |
| 5.10.4 | Určenie rýchlosti na základe dynamického modelu | 42 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------|-----------|
| 5.11 | Detekcia záberu | 43 |
| 6 | Prezentácia výsledkov riešenia | 45 |
| 6.1 | Vyhotovenie zariadenia | 45 |
| 6.2 | Meranie v cieľových podmienkach | 46 |
| 6.3 | Kinematické veličiny | 47 |
| 6.3.1 | Zrýchlenie | 47 |
| 6.3.2 | Rýchlosť | 48 |
| 6.3.3 | Vzdialenosť | 50 |
| 6.3.4 | Kolmé kinematické veličiny | 51 |
| 6.3.5 | Náklon, klopenie a kurz | 53 |
| 6.3.6 | Frekvencia pádlovania | 54 |
| 6.4 | Dynamické veličiny | 54 |
| 6.4.1 | Parametre dynamického systému | 54 |
| 6.4.2 | Sila záberu | 55 |
| 6.4.3 | Čas maximálnej sily | 56 |
| 6.4.4 | Výkon a práca záberu | 57 |
| 6.4.5 | Prejdená vzdialenosť na jeden záber | 58 |
| 6.4.6 | Symetria | 59 |
| 7 | Záver | 60 |
| | Literatúra | 61 |
| | Zoznam použitých skratiek a veličín | 66 |
| | Zoznam obrázkov | 72 |
| | Zoznam tabuliek | 73 |
| | Zoznam príloh | 74 |

1. Úvod

Zaopatrenie jedla, príbytku a dobrého zdravia bolo hlavným problémom ľudí v minulosti. Určite im nezostalo veľa energie a času na vzdelávanie, zábavu, kultúru či šport. No v západných a iných kultúrach však s rozvojom tento nedostatok pominul a spoločnosť si kľudne mohla začať užívať blahobyť ako prebytok potravy, energie, služieb a informácií. A práve vtedy vznikla moderná podoba športu, ako umelý prostriedok na porovnávanie ľudských schopností v nejakej aktivite jedincov, alebo skupín. S rozvojom v spoločnosti úmerne narastá konkurencieschopnosť. Je stále ťažšie sa v silnej konkurencii presadiť a v boji o víťazstvo rozhodujú malé detaily. Optimálne naladiť tieto detaily býva s pomocou iných ako nadštandardných metód nemožné a preto aj vďaka moderným technológiám sa môže z športu stať viac veda ako zábava. Tak tomu je dokonca aj v rýchlostnej kanoistike, ťažkom športe, ktorý sa v našich končinách neradí medzi veľmi populárne. V kanoistike atléti musia používať tzv. predĺžené ruky a nohy - pádlo a loď. Tento fakt má za následok zvýšené nároky na motorickú koordináciu a fyzickú pripravenosť. V kanoistike a všetkých športoch vo všeobecnosti ľudia ešte stále konajú veľmi intuitívne a nedá sa im to dať za zlé, pretože to je dobrý prostriedok pre posun vpred a práve toto stochastické, nepredvídateľné chovanie je dôvod, prečo ľudia tak milujú sledovať šport. Táto stránka je však pre samotného športovca, ktorý chce za každú cenu vyhrať, nechcený jav. Preto musí hľadať spôsoby ako nad situáciou získať čo najväčšiu kontrolu. Samotným sledovaním voľným okom vieme odhaliť nedokonalosti technickej či fyzickej zdatnosti športovca, no pre možnosť popísať ich číslami, hlbšie analyzovať a lepšie popísať potrebujeme iné spôsoby hodnotenia.

K tomu by mu mohli pomôcť nové technológie, ktoré sú stále dostupnejšie. V súčasnosti existujú rôzne prostriedky pre analýzu techniky a výkonu v kanoistike, no väčšina z nich je buď veľmi drahá, alebo vyžaduje podporný tím. Pre malé kluby, alebo ctižiadostivých športovcov chýba prostriedok, ktorý by dokázal priniesť užitočné informácie jeho používateľovi. V hojnosti využívané športové GPS nedokážu nahliadnuť do tajov vysokej dynamiky pádlovania, kdežto už menej používané tenzometrické silomery vyžadujú komplexnú inštaláciu.

Vzťah ku kanoistike a športu na strane jednej a k technike na strane druhej, bol motíváciou pre spojenie týchto skutočností pri výbere témy záverečnej práce. Jej cieľom bolo navrhnúť zariadenie, ktoré by prinieslo oproti ostatným systémom určité výhody. Pri návrhu išlo o jednotku využívajúcu senzory inerciálnych veličín. Jednotka bola navrhnutá na základe rešerše a osobných skúseností o hodnotení techniky a výkonu v kanoistike. Jednou z výhod by mala byť univerzálnosť použitia takéhoto zariadenia. Výhodou druhou by malo byť zahrnutie hodnotenia dynamiky, pričom merané veličiny by boli len kinematické, čo nie je v komerčných produktoch tohoto typu bežné. Keďže sa jedná o low-cost senzory, výrobná cena zariadenia by sa mala držať na nízkej úrovni, aj keď nízka cena nespádala do cieľov práce.

V tejto práci bude v ďalšej kapitole vyslovená formulácia problému, potom budú popísané teoretické poznatky získané počas rešerše, ktoré budú v ďalšej kapitole použité pre návrh metódy merania kinematických veličín. V ďalšej časti bude popísaný postup získania a vyhodnotenia týchto dát pomocou fyzického prototypu zariadenia. Na základe identifikácie parametrov dynamického systému bude analyzovaná aj dynamická stránka pádlovania. Výsledky práce budú na záver zhrnuté a bude vyslovené splnenie cieľov.

2. Formulácia problému a ciele riešenia

Cielom práce je, na základe zistených poznatkov o hodnotení techniky a výkonu v rýchlostnej kanoistike navrhnúť spôsob merania kinematických veličín, ktoré s HTVK súvisia. Objektom merania kinematiky nebudú jednotlivé časti tela športovca, ale pohyb jeho lode. Spôsobom merania sa rozumie výber HW a návrh SW zabezpečujúceho konfiguráciu elektronických súčiastok. Na kinematickú analýzu sa použijú elektronické súčiastky využívajúce senzory inerciálnych veličín. Taktiež je potrebné spôsob merania navrhnúť tak, aby bolo uskutočniteľné v cieľových podmienkach - na vode.

Navrhnutý spôsob merania bude experimentálne overený. Podľa dosiahnutých výsledkov vyhodnotenia kinematickej analýzy budú na základe identifikácie systému do problému zahrnuté aj dynamické veličiny.

3. Prehľad súčasného stavu poznania

3.1. Rýchlostná kanoistika

Rýchlostná kanoistika je názov športového odvetvia, ktoré sa zaraďuje do kategórie vodných športov, pri ktorých účastníci pretekajú na hladkej, kludnej vode na rôzne vzdialenosti. Kanoistické preteky sa delia podľa (každá disciplína je označená pomocou skratky):

1. *Typu lode:*

- Kanoe - K
- Kajak - C

2. *Pohlavia:*

- Muži - M
- Ženy - W

3. *Počtu osôb v lodi:*

- 1
- 2
- 4

4. *Vzdialenosti:*

- 200 m
- 500 m
- 1000 m
- 5000 m

Napríklad disciplína K2M 500 m znamená preteky dvojčajaku mužov, na vzdialenosť 500 m. [51]

Pomenovanie „kanoista“ zahŕňa jednak všeobecne atlétov vykonávajúcich RK (kanoistov aj kajakárov), ale aj konkrétnu disciplínu C (kanoe). Pomenovanie „kajakár“ sa vzťahuje len ku atlétom jazdiacim v disciplíne K (kajak). Keďže sa táto DP bude zaoberať primárne kajakármi, v priebehu textu sa bude slovo „kanoista“ vzťahovať všeobecne ku atlétom rýchlostnej kanoistiky (aj kajak aj kanoe).

Existujú teda dva typy lode, kanoe a kajak. V kanoe športovec kľačí na jednom kolene, druhou nohou opretou vpredu o dno lode a pádľuje na jednu stranu (vnútorná strana záberu), čo je strana nohy, na ktorej kľačí. Jeho pádlo má jeden list a vnútornou rukou ho uchopuje dole pri liste a vonkajšou za tzv. „táčko“, na opačnej strane pádla. Smer lode ovláda pomocou pádla, popri jednotlivých záberoch. Podľa pravidiel ICF (International Canoe Federation) je minimálna hmotnosť C1 14 kg a maximálna dĺžka 520 cm. Kanoistu pretekajúceho na C1 možno vidieť na obr. 3.1. [40]

V kajaku, na rozdiel od kanoe športovec sedí s nohami mierne pokrčenými a opretými vpredu o priečku. Pádľuje s dvojlistým pádlom na obe strany. Smer lode koriguje



Obr. 3.1: Martin Fuksa, pádlujúci na single kanoe. [29]

pomocou kormidla na trupe pri zadnej špičke lode, ktoré ovláda nohami cez jednoduchý kladkový systém. Dosahovaná priemerná rýchlosť počas pretekov je u kajakárov v porovnaní s kanoistami približne o 10% vyššia. Priemerná rýchlosť na 1000 m trati je v K1 približne 17 km/h a čas 3'30". Podľa pravidiel ICF je maximálna dĺžka K1 tiež 520 cm ale minimálna hmotnosť len 12 kg. Kajakára pretekajúceho na K1 možno vidieť na obr. 3.2. [40]

ICF pri organizácii medzinárodných pretekov uznáva konkrétne štyri vzdialenosti: 200, 500, 1000 a 5000 m. Pri všetkých dištanciách okrem 5000 m má každý účastník bójami vyznačenú svoju dráhu, kde týchto dráh je štandardne 9, pričom trať je rovná, bez akýchkoľvek zákrut či nehomogenít. Samotné preteky pozostávajú z rozjazd, medzijázd a finále, kde ich počet a postupový kľúč medzi nimi závisí od počtu účastníkov [51]. Na 5000 m trati všetci pretekári štartujú hromadne, počas pretekov absolvujú obrátky a dráhy jednotlivých pretekárov sa môžu ľubovoľne križovať, čo umožňuje tzv. jazdenie „na vlne“ a taktizovanie (obdoba jazdenia cyklistov v závetří za iným cyklistom, umožňujúce šetrenie energie).



Obr. 3.2: Tom Liebscher, pádlujúci na single kajaku. [49]

3.2. Hodnotenie techniky a výkonu v rýchlostnej kanoistike

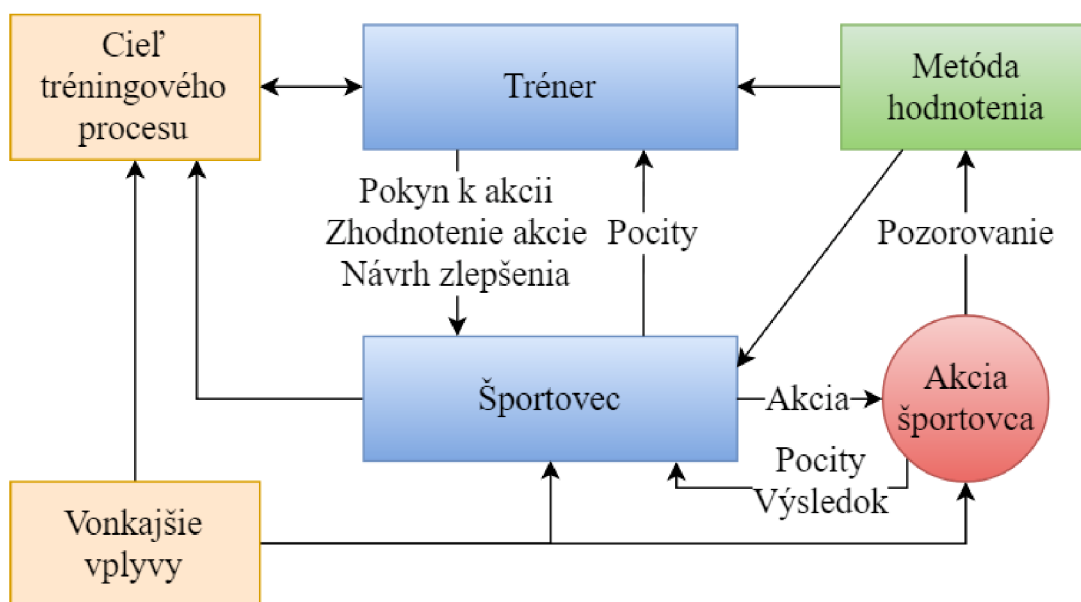
Rýchlostná kanoistika je technický, dynamický šport, pri ktorom sa vykonáva rytmický pohyb pádlovania, ktorého princípom je prejsť zadanú vzdialenosť v čo najkratšom čase. Na fyzickú stavbu kanoistov sú kladené veľké nároky, kde popri nadštandardnej sile a rýchlosti musia schopnosti športovca spĺňať aj vytrvalostné predpoklady, nakoľko už aj trvanie najkratšej disciplíny, na ktorú sa preteká je u elitných pretekárov zhruba 35 s, čo už zďaleka nie je šprintérska disciplína. Naopak aj pri najdlhších tratiach je vyžadovaná dobrá silová vybavenosť, kvôli veľkému hydrodynamickému odporu, ktorý je potrebné pri pohybe lode prekonávať. Spolu s výbornou fyzickou vybavenosťou sa na rýchlosti podieľa hlavne technika pádlovania. Dobrá technika má za následok dobrú efektívnosť prenosu výkonu do vody, správne využívanie biomechanickej stránky ľudského tela, ale aj minimalizáciu už spomínaného hydrodynamického odporu. Taktiež vo veľkej miere pomáha predchádzať zraneniam a udržiavať telo po fyziologickej stránke zdravé. Na celkovej výkonnosti pretekára sa takisto podieľa aj jeho psychická zdatnosť, je potrebná tzv. psychika víťaza. [23]

Pod pojmom perfektná technika sa dá rozumieť ideálny cyklický pohyb produkujúci maximálnu rýchlosť lode pri čo najmenšom výdaji energie. V kanoistike je dosiahnutie ideálnej techniky pádlovania extrémne obtiažna a komplexná úloha, vyžadujúca roky ťažkého a intenzívneho tréningu. Podstatne veľká časť tréningu je venovaná len a práve zdokonaľovaniu techniky, pričom je zvykom, že kanoisti sa snažia pádlovať správne na každom tréningu, počas celého jeho trvania. Pohyb kanoistu a ani pádla v priestore nie je

3. PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

obmedzený v žiadnom smere, ako napr. pri veslovaní, kde je veslo uchytené na lodi a jeho pohyb je obmedzený iba na rotačný. Uchytenie pohonného nástroja aj presne definuje rozdiel medzi pádlom a veslom a teda aj medzi kanoistom a veslárom. Pádlo nie je uchytené žiadnou časťou k lodi, kdežto veslo je. Preto je veľmi ľahké sklznúť z ideálnej kinematiky pohybu a dopúšťať sa chýb pri pádlovaní, ktoré všetky zhoršujú efektívnosť. Dnešný pohľad na ideálny model techniky vyplýva z fyzikálnych zákonov (hydrodynamiky, mechaniky, biomechaniky...). [23]

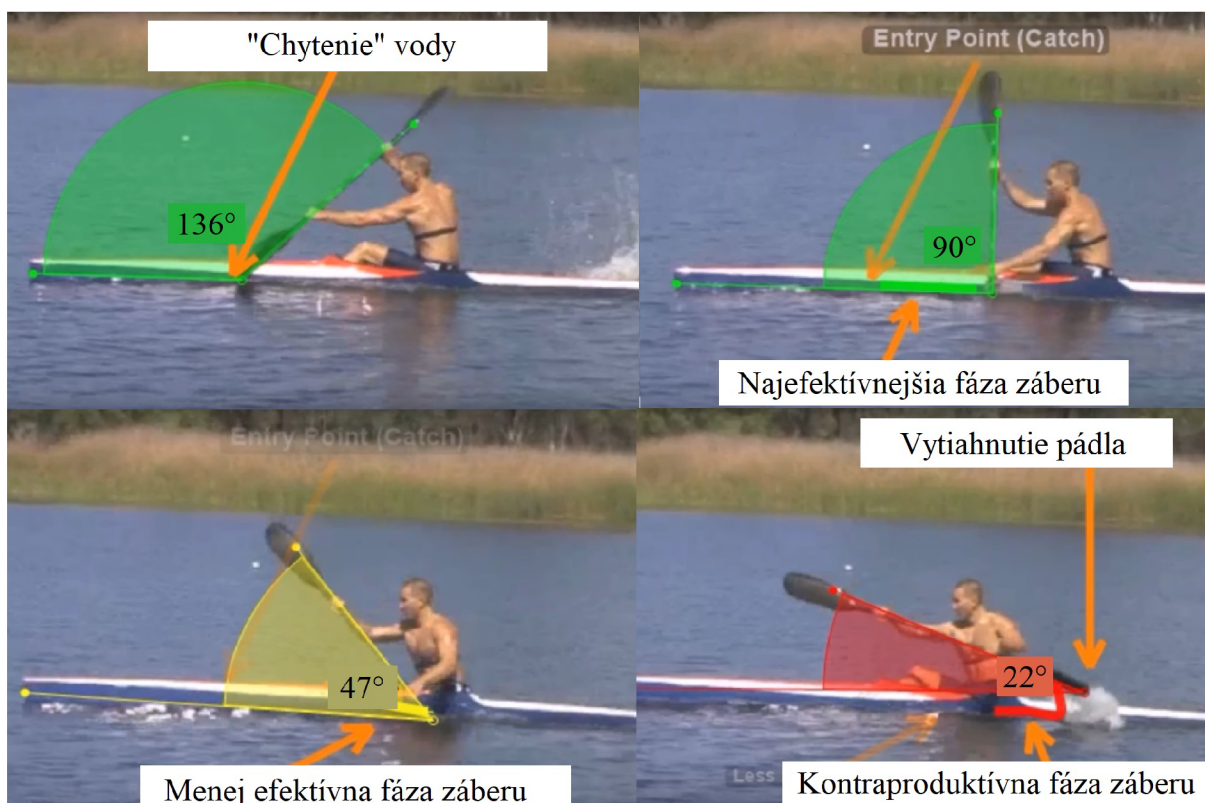
Najjednoduchšou metódou HTVK, bez ktorej sa nezaobíde ani v dnešnej modernej dobe žiaden kanoistický klub či športovec, je spätná väzba trénera. Tréner dá športovcovi pokyn k vykonaniu nejakej akcie, či už tréningovej jednotky, pretekov, alebo inej aktivity (regenerácia, apod.). Športovec ju na základe svojej motivácie a akútneho pocitu vykoná nejakým spôsobom. Z pozorovania tejto akcie, alebo z opisu samotného športovca tréner zhodnotí kvalitu prevedenia aktivity. Po zhodnotení tréner vysloví návrh pre zlepšenie jednotlivých častí vykonanej aktivity, podľa aktuálneho cieľa tréningového procesu a celkovej situácie. Tento návrh slúži ako spätná väzba pre športovca, ktorá má za následok skvalitnenie prípravy športovca - zrýchlenie rastu výkonnosti, alebo zvýšenie výkonnosti pri stagnácii. Zaradenie metódy hodnotenia možno vidieť na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Metodika tréningového procesu.

Ku hojne využívaným metódam hodnotenia výkonu samozrejme patrí meranie času a medzicasov na konkrétnych vzdialenostiach a pre okamžitú odozvu pre športovca slúžia veľmi obľúbené športové hodinky so zabudovaným GPS, ktoré ukazujú najmä aktuálnu rýchlosť, prejdenú vzdialenosť, čas a srdcovú frekvenciu. Metódou hodnotenia techniky môže byť napr. analýza videozáznamu športovca pri pádlovaní, či už na tréningu alebo pretekoch. Pri analýze videozáznamu sa hodnotí celkový pohyb športovca, na základe skúseností trénera, a/alebo sa meria kinematika rôznych častí tela, hlavne rúk, trupu a pádla v jednotlivých fázach záberu. Príklad takejto analýzy je zobrazený na obr. 3.4.

3.2. HODNOTENIE TECHNIKY A VÝKONU V RÝCHLOSTNEJ KANOISTIKE



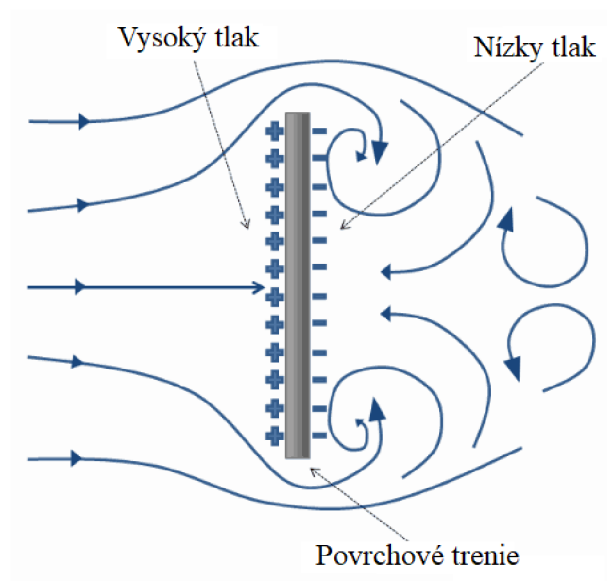
Obr. 3.4: Analýza techniky pomocou videozáznamu. [43]

Pre tvorbu pokročilejších metód HTVK musíme porozumieť základným princípom dynamiky, hydrodynamiky, biomechaniky, fyziológie, športovej psychológie a iným. Táto práca sa zoberá problémom hlavne zo stránky dynamiky a hydrodynamiky.

3.2.1. Hydrodynamika lodí

Na tuhé, pohybujúce sa teleso z cele ponorené v tekutine, pôsobí hydrodynamická sila, ktorá sa skladá z dvoch zložiek. Sú nimi tlaková sila a trecia sila. Tlaková sila vzniká ako súčet tlakového poľa pôsobiaceho na povrch telesa, pričom jednotlivé elementy tejto sily pôsobia vždy kolmo na jeho povrch. Pri pohybe, na prednú stranu telesa kvapalina pôsobí tlakovou silou väčšou ako na zadnej strane telesa. Toto vo výsledku spôsobuje tzv. tlakový odpor, ktorý pôsobí hlavne proti smeru pohybu. Ak je teleso nesymetrické voči osi, alebo roviny v ktorej sa pohybuje, alebo je tlakové pole nehomogénne, výslednica tlakovej sily nemusí smerovať len proti smeru pohybu, čo sa využíva napr. u lietadiel ako vztlaková sila. Tlakový odpor pre symetrické teleso je znázornený na obr. 3.5. [35]

Ďalšou formou odporu je tzv. vlnotvorný odpor, ktorý je tiež formou tlakového odporu a vzniká pri pohybe pevného telesa na rozhraní dvoch tekutín, čím toto rozhranie narúša a spôsobuje vznik vlnového obrazca. Malá časť hydrodynamickej tlakovej sily - vztlaková sila, na základe tvaru lode, pôsobí v smere nahor a spôsobuje malé zdvihnutie lode z vody, čím o malú časť znižuje celkový odpor. V kanoistike sú lode nadnášané hydrostatickou - výtlakovou silou, ale so stúpajúcou rýchlosťou sa pre nadnášanie lode stáva dôležitou aj vztlaková sila, čo sa prejavuje čiastočným kĺzaním po vode. [44] [47]



Obr. 3.5: Tlakový odpor. [19]

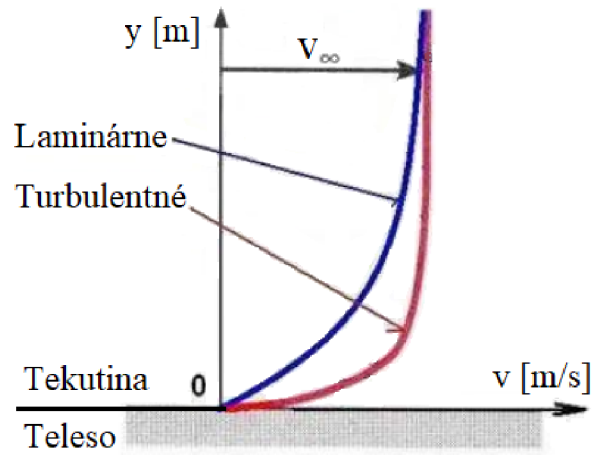
Trecia sila vzniká ako vzájomné trenie molekúl tekutiny o seba (vnútorné trenie), čo sa deje v medznej vrstve, ktorá je v bezprostrednej blízkosti ponoreného telesa a je vyvolaná jeho pohybom. Hrúbka tejto vrstvy pri kanoistike smerom od provy ku korme rastie, na začiatku je v nej prúdenie laminárne, ale postupom sa ďalej vplyvom rôznorodosti tlaku mení na turbulentné. Blízko pri prove začínajú vznikať víry. S prechodom od laminárneho k turbulentnému prúdeniu vo veľkej miere stúpa gradient rýchlosti (obr. 3.6), strihové napätie a teda aj odpor. Veľkosť tohto odporu závisí ešte od veľkosti zmáčanej plochy. Toto dokazuje vzťah 3.1 a obr. 3.6. Kde F_v značí vnútornú treciu silu na vrstvu, S plochu, η koeficient dynamickej viskozity a dv/dy gradient rýchlosti molekúl medznej vrstvy. V obr. 3.6 y značí vzdialenosť od telesa pohybujúceho sa v tekutine, v značí rýchlosť vrstvy tekutiny a v_∞ nulovú rýchlosť tekutiny. [47] [22]

$$F_v = -S\eta \frac{dv}{dy}, \quad (3.1)$$

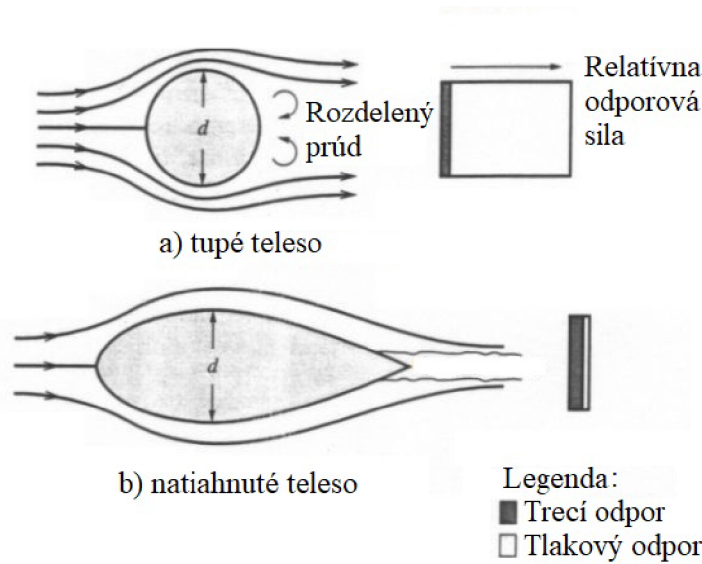
Ak chceme hydrodynamický odpor znížiť, musíme čo najviac znížiť obe jeho zložky. Ak chceme znížiť tlakový odpor, potrebujeme tvar telesa čo najviac „natahnúť“, čiže zvýšiť pomer dĺžky a priemeru L/D , do tvaru podobného kvapke. Čím viac ho ale predlžujeme, tým viac sa zväčšuje jeho povrch, čo zvyšuje trecí odpor. Preto existuje ideálny pomer L/D , ktorý prináša najlepší kompromis medzi tlakovým a trecím odporom. Možnosť redukcie tlakového odporu možno vidieť na obr. 3.7. Najlepší kompromis medzi pomerom dĺžky a priečného prierezu L/D na obr. 3.8, kde C vyjadruje koeficient hydrodynamického odporu pre jednotlivé zložky a v ich súčte. Cieľom je nájsť minimum čiernej krivky (súčtu zložiek). [35]

Ale plavidlá používané v kanoistike sú povrchové plavidlá, čo znamená, že sú z časti ponorené vo vode, z časti vo vzduchu. Preto na sústavu telies loď, kanoista a pádlo pôsobia okrem hydrodynamického odporu aj aerodynamický odpor. Aerodynamický odpor má obdobné vlastnosti ako hydrodynamický. No pre tak zložitý tvar ako je telo športovca, jeho oblečenie, pádlo a paluba lode trčiaci z vody sa jeho analýzou nebudeme zaoberať.

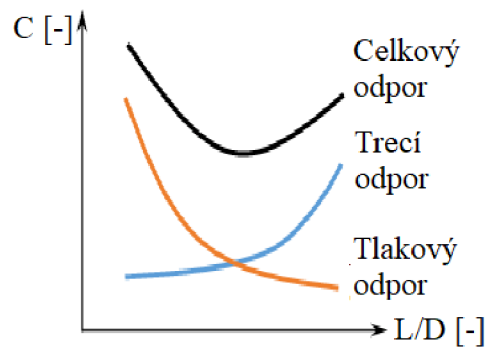
3.2. HODNOTENIE TECHNIKY A VÝKONU V RÝCHLOSTNEJ KANOISTIKE



Obr. 3.6: Laminárne a turbulentné prúdenie tekutiny okolo tuhého telesa. [22]



Obr. 3.7: Vplyv tvaru telesa na zložky hydrodynamického odporu. [15]



Obr. 3.8: Súčet zložiek hydrodynamického odporu a ich najlepší kompromis. [36]

3. PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

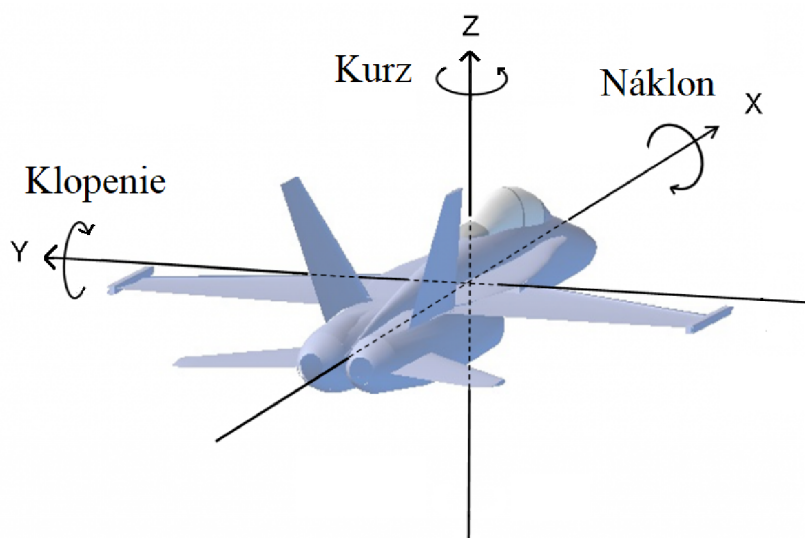
Navyše, v literatúre sa uvádza, že celkový odpor lode a kanoistu sa skladá približne z 93% z hydrodynamického odporu a z 7% z aerodynamického. [23] [44] [22]

Napriek zložitosti danej problematiky sa celkový odpor približne riadi rovnicou odporu obtekania tekutín (3.2) [37]:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A, \quad (3.2)$$

kde F_d značí odporovú silu, ρ hustotu tekutiny, v rýchlosť obtekania, A pričný prierez telesa a C_d koeficient odporu, ktorý sa určuje experimentálne, alebo numericky.

Pre jasnú orientáciu v rotáciách lode okolo jednotlivých osí si zadefinujeme nasledujúce názvoslovie, rovnako ako v letectve (obr. 3.9). Rotácia okolo osi X (pozdlžna os) - náklon, okolo osi Y (pričná os) - klopenie, okolo osi Z (zvislá os) - kurz. [4]



Obr. 3.9: Náklon, klopenie, kurz. [41]

Zdroje hydrodynamického odporu v kanoistike sa delia na:

1. *Pasívne* - veľkosť zmáčaného povrchu (najmä dĺžka lode, hmotnosť, tvar lode - pričný prierez, pomer šírky a ponoru), kvalita povrchu lode, viskozita a hustota vody (závisia na teplote a tlaku). Tieto parametre však kanoista nemá ako ovplyvniť, môže si iba vybrať vhodnú loď (tvar a veľkosť) a udržiavať si hmotnosť - málo podkožného tuku a dostatočný objem svaloviny, podľa disciplíny, na ktorú sa sústreďí. Ďalej sú nimi poveternostné vplyvy ako vietor, vlny, prúdy, dážď... [47]
2. *Aktívne* - nechcené náklony a nadmerné klopenie, pretože zvyšujú zmáčaný povrch lode a zhoršujú tvarovú funkciu obtekania, ďalej nadmerná zmena kurzu (hadenie, vlnenie sa), nadmerné pohyby v laterálnom či vertikálnom smere, ale aj nekonzistentná rýchlosť v smere pohybu. [47] [23]

Všetky tieto nechcené pohyby sú prítomné aj u najlepších kanoistov, no len do malej miery. Platí pravidlo, čím menej sú pri danej dynamike záberu výrazné, tým lepší kanoista. Základom správnej techniky je udržanie dynamickej momentovej rovnováhy vzhľadom k ťažisku celej sústavy. Ak dôjde k nerovnováhe, každá takáto disbalancia sa prejaví na zväčšení nechcených pohybov lode a navyše aj ku zhoršeniu efektivity prenosu sily do

3.2. HODNOTENIE TECHNIKY A VÝKONU V RÝCHLOSTNEJ KANOISTIKE

vody. Na udržanie momentovej rovnováhy je potrebná vynikajúca stabilita trupu kanoistu, preto práve stabilita je základným predpokladom k efektívnemu pádlovaniu. V opačnom prípade sa dá povedať, že kanoista pádluje technicky zle - uhýba sa záberu, koničkuje, nakláňa sa do strán, pádluje príliš impulzívne, nedodrížiava preferované uhly končatín, trupu a pádla... [23]

Tieto aspekty pádlovania majú negatívny vplyv predovšetkým na C_d , koeficient odporu. Navyše, chybná technika sa podpisuje aj na neefektívnom využití fyziológie človeka. Nesprávne zapájanie svalov spôsobuje zväčšenie energetického výdaja pri rovnakej rýchlosti, zvýšenie únavy a teda menší vydaný výkon pri danom energetickom fonde jedinca. Znovu, napr. v prípade ak kanoista disponuje nedostatočnou stabilitou, nemôže si dovoliť uvoľniť sa medzi zábermi, ale je nútený balansovať. Mohol by tak ušetriť trochu energie, ktorú by mohol využiť k zvýšeniu svojej rýchlosti.

Ako však z rovnice 3.2 vyplýva, odpor závisí približne od druhej mocniny rýchlosti. To znamená, že pri danej priemernej rýchlosti bude najvýhodnejšie pohybovať sa po celý čas trate čo najbližšie k tejto rýchlosti, aby bola hodnota stredného stratového výkonu čo najnižšia. Takéto nepravidelnosti v rýchlosti vznikajú jednak medzi jednotlivými zábermi a ešte v globálnej mierke, v priebehu trate (na začiatku vládze pretekár viac, tak ide rýchlejšie). Prvý zdroj nerovnomernosti rýchlosti sa dá znižovať zvyšovaním frekvencie pádlovania - skracovaním doby, počas ktorej je pádlo vo vzduchu a nepoháňa loď. Toto je však možné len do istej miery, pretože príliš vysoká frekvencia zhoršuje plynulosť pohybu a zvyšuje energetické nároky. Druhý zdroj by mal byť skúseným kanoistom eliminovaný takmer úplne, správnym rozložením síl.

Výnimku tvorí prvých cca 15 s pretekov. Je to tým, že práve v tomto časovom horizonte je zdrojom energetického krytia svalov fosfagén - kreatín fosfát (CP) a adenosín-tri-fosfát (ATP), ktoré sú najintenzívnejšími zdrojmi energie (poskytujú 100 % max. výkonu). Telo je, po dostatočnom oddychu zásobené týmito látkami práve na spomínaných 15 s. Pre športovca je výhodné tieto zdroje naplno využiť maximálnym šprintom, pretože po uplynutí tejto doby začne telo spoliehať na anaeróbnu glykolýzu a energia uschovaná práve v ATP a CP zostane nevyužitá. Navyše z taktických príčin je pre športovca potrebné rýchlo odštartovať, ak sa jedná napr. o dlhú trať, kde je nevýhodou pohybovať sa na chvoste štartového poľa vo vlnách. [17]

Za zmienku stojí, že dnešné tvary kajakov a kanoé sú veľmi blízko tvaru s najnižším možným odporom pri statickom obtekaní. Na druhej strane optimalizácia tvaru lode pre čo najnižší odpor pri praktickom použití - pri pádlovaní, kedy kanoista svojimi pohybmi aktívne vytvára zdroje hydrodynamického odporu, má stále svoje nedostatky. Dôvodom je väčšia zložitosť danej problematiky. Výrobcovia lodí sa snažia vyvíjať stále rýchlejšie a lepšie tvary lodí, takisto aj použité materiály a technológie. Napriek všetkým týmto okolnostiam sa dá povedať, že vývoj lodí je relatívne dokonaný a veľa miesta na zlepšovanie nezostalo. Preto sa treba sústrediť predovšetkým na samotný rozvoj výkonnostných a technických predpokladov športovcov.

3.3. Mikro-elektro-mechanické systémy a inerciálne senzory veličín

3.3.1. Senzory polohy, rýchlosti a zrýchlenia

Veličiny, ktoré chceme zmerať, môžu byť buď lineárne, alebo rotačné a môžu alebo nemusia byť periodické. Pre zistenie polohy, rýchlosti alebo zrýchlenia je potrebné zmerať aspoň jednu z týchto veličín, pretože prvou deriváciou polohy je rýchlosť a druhou zrýchlenie. Preto výpočtom vieme teoreticky získať zvyšné dve veličiny. V praxi sú však všetky elektrické zariadenia zaťažené šumom. Pri získavaní rýchlosti a zrýchlenia deriváciou polohy sa tento šum ešte znásobí a spôsobí značne zhoršené výsledky. Takisto aj pri meraní rýchlosti a vyhodnocovaní zrýchlenia je potrebné signál derivovať. Nevýhodou merania zrýchlenia a integrácie tohto signálu je sčítavanie chyby pri integrácií, čo v niektorých prípadoch použitie tohto spôsobu znemožňuje. Meranie zrýchlenia sa vykonáva zariadením zvaným akcelerometer. [20]

3.3.1.1. Akcelerometre

Akcelerometer sa zvyčajne skladá zo závažia (seizmickej hmoty) s hmotnosťou m s jedným stupňom voľnosti, pripevneného k podpore nosníkom, charakteristickou pružnosťou k a tlmením c . Zvyčajná dynamická rovnica $\ddot{x}m + \dot{x}c + xk = am$ [20] vedie k riešeniu, z ktorého vyplýva, že každý správne navrhnutý akcelerometer má pásmo platnej frekvencie a presne jedno jasné pásmo blízko rezonančnej frekvencie. V prvom pásme odozva akcelerometra zodpovedá skutočnému zrýchleniu bez zosilnenia vstupu, kdežto v druhom pásme zvyčajne, podľa veľkosti koeficientu útlmu dôjde ku znásobeniu odozvy. Toto pásmo je teda nepoužiteľné. Rozšírenie platného pásma sa dá doceliť napr. limitovaním rezonančných efektov zavedením tlmiaceho média, často silikónového oleja, alebo znížením hmotnosti závažia a teda zvýšením rezonančnej frekvencie, podľa rovníc 3.3 až 3.5 [42]. V obr. 3.10 možno vidieť frekvenčnú odozvu akcelerometra, kde f_{ref} značí referenčnú frekvenciu, pre ktorú je akcelerometer navrhnutý a f_n rezonančnú frekvenciu akcelerometra. [20]

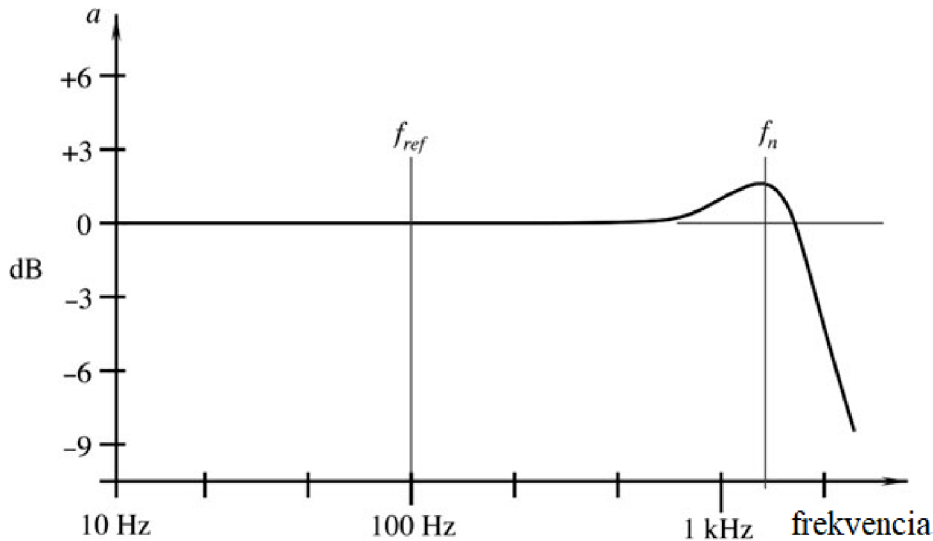
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3.3)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad (3.4)$$

$$\omega_d = \sqrt{(1 - \zeta^2)}\omega_n, \quad (3.5)$$

Základné veličiny charakterizujúce akcelerometer sú [20]:

1. *Citlivosť* - elektrická odozva na mechanický vstup, zvyčajne v $[V/ms^{-2}]$ alebo po ADC konverzií digitálny výstup v $[bit/ms^{-2}; bit/g]$.
2. *Frekvenčná odozva* - závislosť násobenia výstupu (alebo aj citlivosti) na vstupnej frekvencii, typická odozva s pásmami platnej a rezonančnej frekvencie je zobrazená na obr. 3.10.
3. *Rezanančná frekvencia* - u netlmených systémov sa môže výstup v rezonančnom pásme znásobiť až o 3-4 dB. Na druhej strane pri kriticky tlmených systémoch sa



Obr. 3.10: Typická odozva správne navrhnutého akcelerometra. [20]

tento jav nemusí očividne prejsť, ale aj tak dôjde ku chybnému odzvu senzora. V tomto prípade sa dá rezonančný stav detekovať fázovým posunom odzvy o 180° .

4. *Nulový výstup* - výstup senzora pri nulovom vstupe, teda pre statickú polohu takú, že aktívna os je kolmá na gravitačné zrýchlenie.
5. *Linearita* - aká blízka ideálnej, lineárnej odzvy je odzva v pracovnom rozsahu senzora.

Pri výbere akcelerometra pre konkrétne použitie treba vziať do úvahy viaceré aspekty: očakávaná amplitúda zrýchlenia, pracovná teplota, frekvenčný rozsah, požadovaná presnosť merania, linearita, veľkosť, dostupný zdroj napätia, očakávané poveternostné podmienky, preťaženie, možnosť ovplyvnenia poľami akustickými, elektrickými alebo elektromagnetickými, uzemnenie kontaktného telesa. V dnešnej dobe sa najmä kvôli cene a spoľahlivosti najčastejšie využívajú akcelerometre na kapacitnej, piezorezistívnej alebo piezoelektrickej báze. [20]

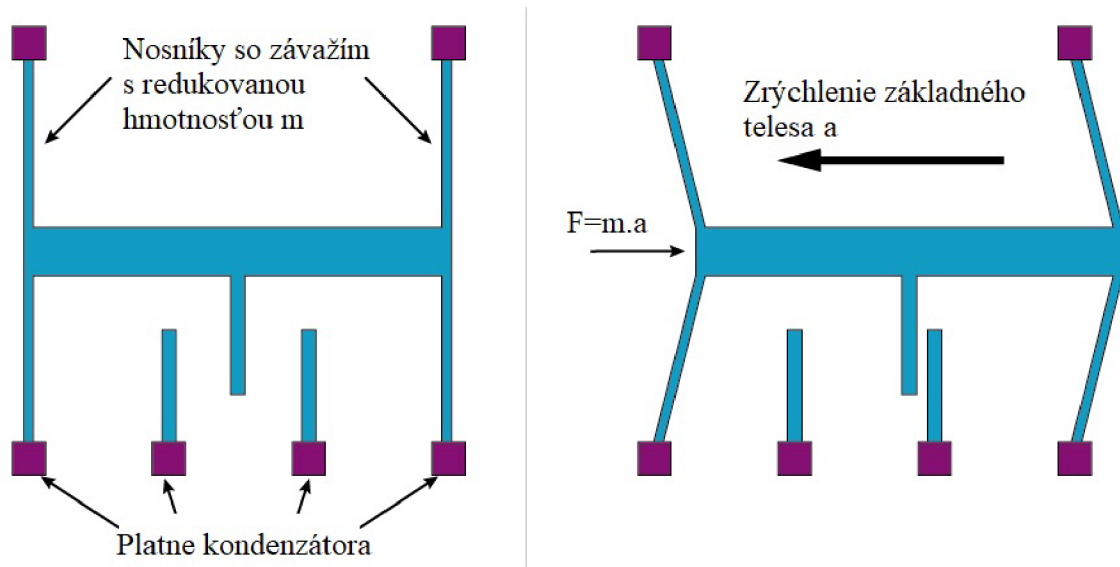
Kapacitné akcelerometre

Pri zisťovaní zrýchlenia sa používa spomínané závažie, ktoré pri zmene pohybu mešká za základným telesom (obalom senzoru). Toto meškание sa prejaví ako vychýlenie z rovnovážnej polohy a našou úlohou je určiť mieru tohto vychýlenia. Zvyčajne sa tak robí spôsobom ako na obr. 3.11.

Pri zrýchlení telesa akcelerometra sa závažie vychýli z rovnovážnej polohy, čo zmení vzdialenosť d protilahlých dosiek kondenzátora, čo má za následok zmenu kapacity C podľa rovnice 3.6. [27]

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}, \quad (3.6)$$

Vychýlenie závažia zvyčajne nepresahuje $20 \mu\text{m}$. Dva protilahlé kondenzátory sú pripojené na el. obvod a zmena kapacity sa v praxi prejaví ako zmena napätia, ktoré je potom



Obr. 3.11: Princíp funkcie kapacitného akcelerometra. [11]

výstupom senzora. Celé zariadenie je vložené do kremíkovej dosky. Takto skonštruované senzory sú citlivé na zmenu teploty a nesprávne určenie kapacity použitých kondenzátorov. [20]

Piezorezistívne akcelerometre

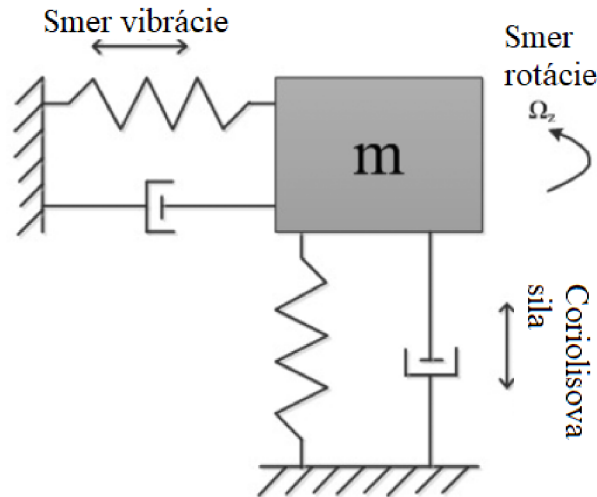
Piezorezistívne akcelerometre takisto obsahujú závažie, ktoré je ale uchytené na elasticom kĺbe, na ktorom sú aj na vonkajšej aj na vnútornej strane nalepené tenzometrické elementy. Miera zmeny ich odporu zodpovedá zrýchleniu. Tento typ akcelerometra sa je charakteristický veľmi širokým frekvenčným spektrom od skoro 0 Hz až po 13 kHz. [20]

Piezoelektrické akcelerometre

Ako už názov napovedá, piezoelektrické akcelerometre využívajú ako snímací prvok piezoelektrický jav. Kryštál je vložený medzi závažie a obal. Závažie pri zrýchlení pôsobí mechanickou silou na kryštál, ktorého pnutie je priamo konvertované na el. náboj. Frekvenčný rozsah sa pohybuje od 2 Hz až po 5000 Hz. Je odolný voči teplote do 120 °C. [20]

3.3.1.2. Gyroskopy

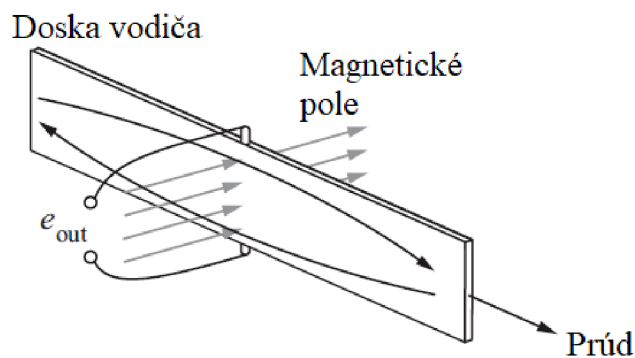
U MEMS gyroskopov sa k detekcii rotácie nevyužíva gyroskopický moment, ale Coriolisova sila. V tele senzora sa nachádza lineárne vibrujúci element, ktorý keď pôsobením vonkajšej sily začne rotovať v ose kolmej na os vibrácie, naň začne pôsobiť coriolisova sila kolmá na tieto dva smery. Táto sila je úmerná rýchlosti rotácie a meria sa rovnakým spôsobom ako tomu býva u lineárnych akcelerometrov. Gyroskopy teda nemerajú zrýchlenie ako je tomu u akcelerometrov ale uhlovú rýchlosť. Princíp Coriolisovho efektu používaného u gyroskopov je zobrazený na obr. 3.12. [20]



Obr. 3.12: Princíp funkcie MEMS gyroskopu. [46]

3.3.2. Senzory magnetickej indukcie

V mnohých aplikáciách je potrebné poznať absolútnu orientáciu zariadenia. Tá sa dá získať meraním magnetickej indukcie poľa zeme. Veľkosť mag. indukcie sa u MEMS senzorov určuje pomocou Hallovho javu. Ten vraví, že na náboj pohybujúci sa v mag. poli pôsobí sila, smerujúca kolmo na smer pohybu častice aj smeru mag. poľa. V praxi sa ako pohybujúci sa náboj používa elektrický prúd v tenkej doske, ktorá keď je vložená do mag. poľa (nesmie s ním byť rovnobežne), elektróny začnú byť vychyľované do strany. Toto vychýlenie sa dá zistiť meraním elektrického napätia na bočných stranách dosky. Je treba podotknúť, že smer a veľkosť magnetického poľa sa líši podľa geografickej polohy a preto je potrebné s týmto rátať pri zisťovaní orientácie. Tieto senzory sa nezaraďujú do kategórie inerciálnych senzorov, keďže nevyužívajú žiadnu seizmickú hmotu. [25]



Obr. 3.13: Princíp Hallovho javu. [25]

3.4. Práce zaoberajúce sa hodnotením techniky a výkonu v kanoistike

Práca Johna Bakera ([10]) sa zaoberá základnými princípmi efektivity pádlovania. Spomína silový reťazec voda, pádlo, človek, sedačka a priečka, cez ktoré sa prenáša sila, ktorá akceleruje loď. Hnacia sila na liste pádla sa skladá z odporovej sily a vztlakovej sily, aj keď je otázne, akou mierou sa ktorá sila podieľa na pohone. Spomína využitie metódy CFD pre analýzu hydrodynamiky lodí a pádiel. Kritizuje súčasné metódy merania sily vydané športovcami, ktoré sa zaoberajú iba jej veľkosťou ale nie smerom. Hodnotí obtiažnosť vyhodnocovania výkonu v kanoistike, napriek zdanlivo jednoduchému princípu športu.

Gomes a kolektív ([6]) opisujú analýzu priebehu sily aplikovanej na pádlo elitnej ženskej kajakárky. Tenzometrické pásky boli inštalované na na pravú aj ľavú stranu rúčky pádla do roviny v smere záberu ale aj do roviny kolmej na ňu. Takýto systém pomáha lepšie vyhodnocovať sily pôsobiace na pádlo počas záberu, medzi nimi aj vplyv tvaru, veľkosti listu, natočenia listu apod. Autor sa sústreďí na tvar funkcie priebehu sily v prvom zábere po štarte z miesta a dvoch ďalších. Okrem sily normálovej na smer pohybu listu vo vode na pádlo vplyvom vztlakovej sily pôsobí aj sila na ňu kolmá smerom von zo záberu. Toto je spôsobené tzv. wingovým tvarom listu, ktorého účel je zvýšiť efektivitu prenosu sily do vody.

V ďalšej práci Gomesa a spol. ([5]) spomínajú použitie 3-osého akcelerometra v single kajakoch a v posádkach. porovnáva použitie akcelerometra oproti od GPS, ktoré v komerčnej sfére dosahujú frekvencie len 10 Hz. Navyše, GPS nám nedáva žiadne informácie o laterálnom a vertikálnom pohybe. Porovnáva priebehy zrýchlenia vo všetkých troch osiach v K1, K2 a K4, pričom konštatuje, že použitie akcelerometra je prospešný nástroj na nahliadnutie do intracyklickej rýchlosti počas záberu.

Gomes a spol. ([33]) v nadväznosti na predchádzajúcu prácu analyzuje vplyv frekvencie pádlovania na tvar priebehu sily využitím tenzometra a akcelerometra. V tréningovom tempe bol priebeh zvonovitého tvaru. So stúpajúcou frekvenciou sa amplitúda zväčšovala a skracovalo sa trvanie záberu. Pri maximálnej frekvencii je tvar viac obdĺžnikový, čo znamená, že nárast sily po vložení listu do vody je rýchly a takisto vybratie listu po maximálnom impulze sily je rýchle. Takýto obrazec by mal byť cieľom kajakárov počas pretekov a maximálneho tempa. Definuje kvalitatívne smerodajný pomer F_{peak}/F_{mean} . Pri obdĺžnikovom priebehu sily je tento pomer rovný 1, pri trojuholníkovom 0,5. Ďalším dôležitým faktorom je čas od ponorenia listu potrebný na dosiahnutie maximálnej sily F_{peak} . Zvyšujúca sa frekvencia má pozitívny vplyv na čas medzi aplikáciou sily a počiatkom akcelerácie, veľkosť impulzu sily pri rovnakej maximálnej sile a na rýchle vybratie pádla z vody, ktoré má za následok spomaľovanie lode. Celkovo vysoká frekvencia spôsobuje zvýšenie efektivity eliminovaním neefektívnych častí záberu a sústredením sa na tie efektívne.

Aitken a Neal ([8]) už v roku 1992 zostrojili senzor sily, takisto v podobe tenzometrov na pádla, ale uchovávanie informácii bolo zabezpečené pomocou FM pásky. Do tejto doby sa kanoistická technika hodnotila pomocou analýzy videozáznamu. Okrem merania síl na pádla boli použité tenzometre aj na určenie rýchlosti kajaku. Bolo to dosiahnuté prilepením senzora na vonkajšie dno lode a zaznamenávanie zmeny tlaku. Získané dáta boli štatisticky vyhodnotené a graficky prezentované.

3.5. KOMERČNÉ PRODUKTY HODNOTENIA TECHNIKY A VÝKONU V KANOISTIKE

Bifaretti a kolektív ([16]) sa venovali vývoju bezdrôtového systému kvantifikácie dynamiky pádlovania zobrazovaného v reálnom čase. Ten sa skladal z tenzometra umiestneného na priečke merajúceho silové pôsobenie na ňu, z 10 Hz GPS prijímača pre určenie prejdenej vzdialenosti a rýchlosti, 3-osého akcelerometra a 3-osého gyroskopu. Druhá časť bol opäť tenzometer umiestnený na pádle. Každá z týchto častí bola spracovaná mikrokontrolérom, pripojeným technológiou Bluetooth na terminálne zariadenie, mobil, alebo tablet. Použitá IMU bola Invensense MPU6050. Pre zobrazenie dát real-time bola vyvinutá aplikácia pre Android smartphone, pre dodatočné spracovanie dát na PC bol tiež vyvinutý SW.

Doktorská práca ([52]) sa zaoberá vývojom podobného systému ako [16]. Zariadenie sa skladá z jednotky upevnenej na pádle, merajúcej silu a inerciálne veličiny (akcelerometer a gyroskop), jednotky uloženej v lodi zbierajúcej dáta z tlakových senzorov v priečke a sedačke a obsahujúcej ešte 9-DOF IMU a GPS modul. Výhodou jednotky umiestnenej na pádle bola jej použiteľnosť na ľubovoľnom pádle (po kalibrácii). Väčšina podobných tenzometrov je umiestnená na konkrétnom pádle ale v kanoistike športovci využívajú veľa typov, tvarov a veľkostí pádiel. K týmto dvom jednotkám bola použitá ešte kalibračná jednotka, určená pre rýchlu a jednoduchú kalibráciu silových senzorov. Synchronizované dáta zo všetkých senzorov boli zasielané pomocou Bluetooth na mobilný telefón, s taktiež špecificky vyvinutou aplikáciou pre tento účel.

3.5. Komerčné produkty hodnotenia techniky a výkonu v kanoistike

Okrem športových GPS hodínok sú dostupné ďalšie komerčné riešenia pomáhajúce skvalitniť spätnú väzbu pri tréningu a po ňom. DigiTrainer 2.0 ([14]), obr. 3.14, je kompaktný výrobok od maďarskej spoločnosti Polaritás, ktorý v sebe spája použitie GPS, 3-DOF akcelerometra, Bluetooth a pripojiteľnosť merača srdcovej frekvencie. Je dizajnovaný pre použitie s kajakom, kanoe, veslicou, skifom, dračou loďou, alebo iným plavidlom.



Obr. 3.14: Polaritás DigiTrainer 2.0 [14]

3. PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

V reálnom čase zobrazuje čas, tep, aktuálnu rýchlosť, prejdenú vzdialenosť, dopredné zrýchlenie, frekvenciu pádlovania, stranovú symetriu. Pomocou BT je možné spárovať DigiTrainer s PC vďaka čomu môže tréner tiež v reálnom čase sledovať všetky tieto dáta, napr. na motorovom člne.

V súčasnosti sa na vrcholných podujatiach ICF využíva sledovanie a zaznamenávanie priebehu pretekov pomocou GPS zariadení. Je umožnené sledovať naživo rozdiely v prejdenej vzdialenosti medzi jednotlivými pretekármi a uchovať pre neskoršiu analýzu informácie ako priebeh rýchlosti a frekvencie pádlovania počas pretekoch. Bohužiaľ na webe nebolo možné nájsť bližšie informácie o tomto systéme.

Systém rovnakého princípu je ZigBee - GPS sledovací systém pre veslárske preteky ([53]). Na veslice, skify sa umiestnia mobilné GPS prijímače, ktoré dokáže bezdrôtovo komunikovať s centrálnou jednotkou, pripojenou k PC. Mobilné jednotky sú osadené LCD pre použitie na tréningu a prijímanie inštrukcií, dát od trénera apod.

4. Analýza problému

4.1. Zhodnotenie rešeršných štúdií

V rámci rešeršných štúdií boli získané poznatky o princípoch maximalizácie účinnosti kanoistickej techniky a výkonu s ohľadom na metódu hodnotenia pomocou kinematických veličín. Bolo zistené, že sa treba sústrediť na priebeh rýchlosti počas trate, symetriu záberu, stabilitu lode, impulz sily záberu a v prípade posádok na synchronizáciu impulzu. Ďalej boli získané poznatky o meraných veličinách inerciálnymi senzormi. Bežne používané IMU využívajú viac druhov senzorov, väčšinou sa spájajú výhody akcelerometra, gyroskopu a magnetometra, čo spolu tvorí 9-DOF jednotku. U akcelerometrov sa využíva časová stabilita, naopak trpia vysokým šumom a nie sú vhodné na určenie rýchlej zmeny orientácie. Gyroskopy sú náchylné na drift¹, ale sú vhodné na zachytenie rýchlej zmeny orientácie. Magnetometer sa využíva k absolútnemu určeniu kurzu (yaw), ktorý sa nedá pomocou akcelerometra zistiť. Niekedy sú doplnené o teplomer alebo tlakomer. Teplomer býva užitočný najmä v prípade low-cost senzorov, ktoré zvyknú trpieť výraznou teplotnou nestabilitou. 9-DOF jednotky sú vhodné na určenie orientácie v priestore, najmä v prípadoch keď merané teleso nepodstupuje akceleráciu. Určovanie rýchlosti, či polohy býva zatažené chybou, keďže chyba zrýchlenia sa po integrácií sčíta.

4.2. Vymedzenie hraníc problému

Pre hodnotenie techniky a výkonu v kanoistike pomocou modulu IMU musí byť zostavené zariadenie, ktoré dokáže s dostatočnou presnosťou zachytiť merané kinematické veličiny, ktoré budú v digitálnej podobe uložené pre neskoršie spracovanie. Toto zariadenie musí mať relatívne malé rozmery a hmotnosť aby neovplyvňovalo výkony podávané športovcom. Keďže bude používané v kanoistike, musí byť odolné voči vode a musí byť použiteľné na všetkých typoch lodí. Primárne bude zariadenie používané na K1, sekundárne na K2 a K4 a prípadne aj na C1, C2 alebo C4. Zariadenie nemusí byť prispôsobené na užívateľsky prívetivú manipuláciu, keďže sa neplánuje obsluha zariadenia osobou inou, ako autorom práce. Dĺžka jednotlivých meraní nebude zvyčajne presahovať viac ako dĺžku jedného meraného úseku, čo by nemalo byť viac ako 5 minút. V niektorých prípadoch môže meranie trvať počas celej tréningovej jednotky (1 až 2 hodiny).

4.3. Výber hardware

Cieľovou kategóriou výberu IMU boli low-cost, 6-DOF, alebo 9-DOF senzory. Keďže predmetom práce nebol návrh DPS, musel byť zakúpený senzor už inštalovaný spolu aj s potrebnými elektrickými komponentami na DPS, aby mohol byť jednoducho pripojený pomocou prepájacích káblov s programovateľnou doskou s mikroprocesorom. Ako aplikačná doska bolo vybrané Raspberry Pi Zero W, ktoré svojim širokým využitím elegantly spája svety použitia integrovaných obvodov s prijateľným užívateľským rozhraním. RPi sa používa s Micro SD pamäťovou kartou, na ktorú sa predinštaluje operačný systém

¹Tzv. skĺznutie výstupu od skutočnej veličiny pri nulovom vstupe.

Raspbian². Jeho CPU beží na frekvencii 1 GHz a veľkosť RAM je 1 GB. Je zaobstarané pripojiteľnosťou cez Wi-Fi, Bluetooth a micro USB na jednej strane a GPIO pinmi na strane druhej [24]. Konfigurácia IMU a aj jej samotná prevádzka bude naprogramovaná z RPi v jazyku Python, ktorý je veľmi mocným nástrojom, pričom zachováva intuitivitu vysokoúrovňového programovania. MEMS senzory boli zakúpené 3 kusy:

1. Adafruit NXP Precision 9-DOF Breakout [31]
2. Adafruit LSM9DS0 9-DOF Breakout [2]
3. Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor [1]

Všetky moduly sú 9-DOF (akcelerometer, gyroskop, magnetometer). Primárne sa uvažovalo iba s použitím akcelerometra a gyroskopu. Ich základné mechanické, elektrické a magnetické charakteristiky možno vidieť v tab. 4.1. Najdôležitejšími parametrami sú parametre nenulového vstupu, teplotnej stability a nelinearity. Predpokladá sa, že pre danú aplikáciu stačí vzorkovacia frekvencia 100 Hz. Pre meranie bol vybratý modul Adafruit NXP IMU, pretože disponoval najlepšimi charakteristikami nenulového vstupu a jeho charakteristiky boli najlepšie popísané v datasheete výrobcu. Uvedené senzitivity v 4.1 sú platné pre najmenšie pracovné rozsahy, šum pre ODR 100 Hz. Charakteristiky nepresností predstavujú typické hodnoty, ktoré môžu byť záporné, či kladné.

²Raspbian je OS založený na báze Debian-u (UNIX), pričom jeho všetky súčasti sú open-source.

4.3. VÝBER HARDWARE

| | NXP | STM | Bosch | |
|--------------------|----------------|------------------------|----------------|-------------------|
| Typ senzora | Akcelerometer | | | |
| Označenie | FXOS8700CQ | LSM9DS0 | BNO055 | Jednotky |
| ADC | 14 | 14 | 16 | <i>bit</i> |
| Rozsah | $\pm 2/4/8$ | $\pm 2/4/8/16$ | $\pm 2/4/8/16$ | <i>g</i> |
| Senzitivita | 0,244 | 0,061 | 1 | <i>mg/lsb</i> |
| Teplotný drift | 0,01 | 1,5% abs. | 0,03 | <i>%/K</i> |
| Nelinearita | 0,5 | - | - | <i>% rozsahu</i> |
| Zero-G offset | 30 | 60 | 80 | <i>mg</i> |
| Offset tepl. drift | 0,2 | 0,5 | 1 | <i>mg/K</i> |
| ODR | 1,5-800 | 3-1600 | 100 | <i>Hz</i> |
| Hustota šumu | 126 | - | 150 | $\mu g/\sqrt{Hz}$ |
| Typ senzora | Gyroskop | | | |
| Označenie | FXAS21002C | LSM9DS0 | BNO055 | |
| ADC | 16 | 16 | 16 | <i>bit</i> |
| Rozsah | $\pm 250-2000$ | $\pm 245-2000$ | $\pm 125-2000$ | <i>dps</i> |
| Senzitivita | 7,8 | 8,75 | 62,5 | <i>mdps/lsb</i> |
| Teplotný drift | 0,08 | 2% abs. | 0,03 | <i>%/K</i> |
| Nelinearita | 0,5 | - | 0,05 | <i>% rozsahu</i> |
| Zero-rate offset | 0,4 | 10 | 1 | <i>dps</i> |
| Offset tepl. drift | 0,02 | 0.05 | 0,015 | <i>dps/K</i> |
| ODR | 12,5-800 | 95-760 | 100 | <i>Hz</i> |
| Hustota šumu | 0,025 | - | 0,1 | dps/\sqrt{Hz} |
| Typ senzora | Magnetometer | | | |
| Označenie | FXOS8700CQ | LSM9DS0 | BNO055 | |
| ADC | 16 | 16 | 16 | <i>bit</i> |
| Rozsah | ± 1200 | $\pm 2/4/8/12 gauss$ | ± 1300 | μT |
| Senzitivita | 0,1 | 0,08 <i>mgauss/lsb</i> | 0,3 | $\mu T/lsb$ |
| Teplotný drift | 0,1 | 3% abs. | 0,01 | <i>%/K</i> |
| Nelinearita | 1 | - | 1 | <i>% rozsahu</i> |
| Zero-flux offset | 10 | - | 40 | μT |
| Offset tepl. drift | 0,8 | - | 0,23 | $\mu T/K$ |
| ODR | 1,5-800 | 3-100 | - | <i>Hz</i> |
| Hustota šumu | 0,6 | - | 1 | μT |
| Pracovná teplota | -40 – 85 | | | $^{\circ}C$ |
| Teplomer | áno | áno | nie | |
| I2C | áno | áno | áno | |
| SPI | áno | áno | nie | |
| Cena (Adafruit) | 15 | 20 | 35 | \$ |

Tabuľka 4.1: Základné charakteristiky zakúpených senzorov. [31] [2] [1]

4.4. Súradnicové systémy a ich popis

Pre charakter riešenej úlohy je potrebné mať jasne zadané súradnicové systémy, popis ich natočenia a prevody medzi nimi. Sú definované 2 súradnicové systémy.

4.4.1. Súradnicové systémy

4.4.1.1. Globálny súradnicový systém

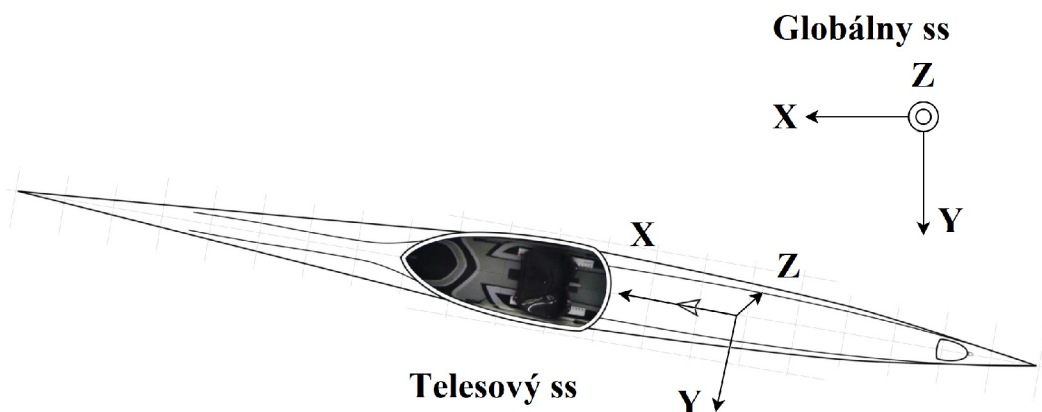
Počiatok globálneho súradnicového systému sa nachádza v mieste štartu merania, jeho os z smeruje kolmo nahor, os x v smere plavebnej dráhy a podľa pravotočivého systému, os y smeruje na ľavú stranu, ak sa pozeráme v smere osi x. Vektory (4.1) a matice (4.2) vzťahujúce ku globálnemu ss sú označené horným indexom g .

$$\mathbf{a}^{(g)} = [1 \quad 5 \quad -4 \quad 0] \quad (4.1)$$

$$\mathbf{A}^{(g)} = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 1 \\ 5 & -4 & 2 \\ 3 & 1 & 8 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

4.4.1.2. Telesový súradnicový systém

Telesový ss je totožný so súradnicovým systémom použitej IMU, a teda je pevne spojený s loďou. V kludovej a vodorovnej polohe smeruje os Z nadol, os X v doprednom smere a os Y v laterálnom smere doľava. Vektory a matice sú označené horným indexom t . Zavedenie súradnicových systémov je znázornené na obr. 4.1



Obr. 4.1: Telesový a globálny súradnicový systém. [54]

4.4.2. Orientácia v priestore

Pre popis orientácie vektoru, či telesa v danom súradnicovom systéme existuje viacero metód.

4.4. SÚRADNICOVÉ SYSTÉMY A ICH POPIS

4.4.2.1. Eulerove uhly

Prirodzený spôsob určenia orientácie je pomocou Eulerových uhlov, načrtnutých už v sekcií 3.2.1, na obr. 3.9. Orientácia je určená postupným otáčaním o daný uhol okolo jednotlivých ôs ss, obvykle v poradí „ZYX“. V angličtine sa tieto uhly nazývajú yaw (Z, kurz), pitch (Y, klopenie), roll (X, náklon). Bežne sú používané napr. v letectve a námorníctve. V hraničných polohách však tento systém trpí singularitou, nazývanou tzv. Gimbal lock, kedy sa dve z troch ôs stotožnia a matematicky sa stratí jeden stupeň voľnosti. [55]

4.4.2.2. Rotačná matica

Rotačná matica slúži na rotáciu vektora zo ss a do b [55]. Definujme maticu 3x3:

$$\mathbf{R}^{(ab)} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_x & \cos \alpha_y & \cos \alpha_z \\ \cos \beta_x & \cos \beta_y & \cos \beta_z \\ \cos \gamma_x & \cos \gamma_y & \cos \gamma_z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

kde uhly α_i znamenajú uhol osi X ss a k jednotlivým osiam ss b , uhly β_i a γ_i analogicky pre osi Y, Z. Otočenie vektora z a do b sa potom vypočíta ako [55]:

$$\mathbf{r}^{(b)} = \mathbf{R}^{(ab)} \mathbf{r}^{(a)} \quad (4.4)$$

pričom pri takomto úkone ostáva zachovaná dĺžka vektora. [55]

4.4.2.3. Quaterniony

Oblúbeným nástrojom pre popis a výpočet orientácie telesa je tzv. quaternion $q \in \mathbb{H}$. Je definovaný ako súčet štyroch prvkov, z ktorých práve tri sú z komplexnej roviny, $q_0 \in \mathbb{R}$; $q_{1-3} \in \mathbb{R}^3$. [7]

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k \quad (4.5)$$

Dá sa definovať aj ako štvorprvkový vektor [7]:

$$q = [q_s \quad \mathbf{q}_r]^T = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T \quad (4.6)$$

Quaternionu q konjugovaný quaternion q^* je taký, že [7]:

$$q^* = [q_0 \quad -\mathbf{q}_r]^T \quad (4.7)$$

Jednotkový quaternion je definovaný, tak, že jeho norma je rovná 1 [7]:

$$\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} = 1 \quad (4.8)$$

Násobenie dvoch quaternionov sa riadi produkčným pravidlom podľa [7]:

$$q \times r = \begin{bmatrix} r_0q_0 - r_1q_1 - r_2q_2 - r_3q_3 \\ r_0q_1 + r_1q_0 - r_2q_3 + r_3q_2 \\ r_0q_2 + r_1q_3 + r_2q_0 - r_3q_1 \\ r_0q_3 - r_1q_2 + r_2q_1 + r_3q_0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Rotácia okolo vektora $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ o uhol $\theta/2$ sa dá pomocou quaternionu vyjadriť ako [7]

$$q = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \\ \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Potom rotácia $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ o uhol θ , sa vypočíta nasledovným vzťahom [7]:

$$\mathbf{v}' = \left[q \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{v} \end{bmatrix}^T q^* \right]_{(2,3,4)} \quad (4.11)$$

kde indexy (2, 3, 4) znamenajú 2. až 4 prvok z výsledného štvorprvkového quaternionu. Takáto transformácia sa nazýva alibi. Opačom alibi je alias transformácia, ktorá nerotuje vektor, ale samotný ss a je vyjadrená vzťahom [7]:

$$\mathbf{v}' = \left[q^* \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{v} \end{bmatrix}^T q \right]_{(2,3,4)} \quad (4.12)$$

Výhodou quaternionov je jednoduchý popis orientácie telesa v priestore, jeho rotácia sa vykonáva obyčajným násobením a netrpia singularitou ako tomu je u Eulerových uhlov.

Prepočet Eulerových uhlov do quaternionov (v sekvencií ZYX) je vyjadrený pomocou vzťahu 4.13 [13]:

$$q = \begin{bmatrix} \cos(\phi/2) \cos(\theta/2) \cos(\psi/2) + \sin(\phi/2) \sin(\theta/2) \sin(\psi/2) \\ \sin(\phi/2) \cos(\theta/2) \cos(\psi/2) - \cos(\phi/2) \sin(\theta/2) \sin(\psi/2) \\ \cos(\phi/2) \sin(\theta/2) \cos(\psi/2) + \sin(\phi/2) \cos(\theta/2) \sin(\psi/2) \\ \cos(\phi/2) \cos(\theta/2) \sin(\psi/2) - \sin(\phi/2) \sin(\theta/2) \cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

kde $\phi; \theta; \psi$ značia náklon, klopenie a kurz. V opačnom prípade sa Eulerove uhly získajú z rovnice 4.14 [7]

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1^2 + q_2^2)) \\ \text{asin}(2(q_0q_2 - q_3q_1)) \\ \text{atan2}(2(q_0q_3 + q_1q_3), 1 - 2(q_2^2 + q_3^2)) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

kde funkcia atan2 je rovnaká ako atan s tým rozdielom, že je definovaná na celom intervale $\langle -\pi; \pi \rangle$. [7]

4.5. Fúzia dát inerciálnych senzorov

Keďže cieľom je zistiť zrýchlenie, rýchlosť a orientáciu lode v priestore, bolo potrebné použiť metódu vhodnú pre fúziu dát senzorov inerciálnych veličín. Z nameraných dát bola čo najpresnejšie určená orientácia lode, vďaka čomu bolo možné odčítať od merania akcelerometra gravitačný vektor a získať tak zrýchlenie nezaťažené gravitáciou. Takisto samotná informácia o natočení lode je cenným prostriedkom pre analýzu v kanoistike. Pre výpočet orientácie bol zvolený rozšírený Kálmánov filter, ktorý je vhodný pre nelineárne systémy, ktorým popis natočenia v priestore určite je. V algoritme KF sa využíva porovnanie odhadu stavu na základe modelu s naozajstným meraním stavu. Podľa vlastností systému dochádza k ideálnemu výberu hodnoty, ktorá sa nachádza medzi týmito dvomi stavmi. KF využíva pre čo najpravdepodobnejšie výsledky štatistickú analýzu, kde sú stavové veličiny definované ako náhodné, s normálnym rozdelením o nulovej strednej hodnote μ a rozptyle σ . Pri návrhu KF je nutné mať znalosti o modeli systému. Pre linearizáciu v pracovných bodoch sa využíva Jakobián systému. [50]

5. Metóda riešenia problému

5.1. Konfigurácia mobilnej výpočtovej jednotky

Pre nastavenie a komunikáciu s IMU bola upravená open-source knižnica voľne dostupná na internete [38]. Komunikácia prebiehala cez I2C, s frekvenciou hodín 400 kHz. Knižnica bola v programovacom jazyku Python 3 a boli v nej obsiahnuté základné nastavenia pre komunikáciu a zapisovanie do registrov IMU. Okrem toho bolo potreba vyriešiť niektoré ďalšie problémy.

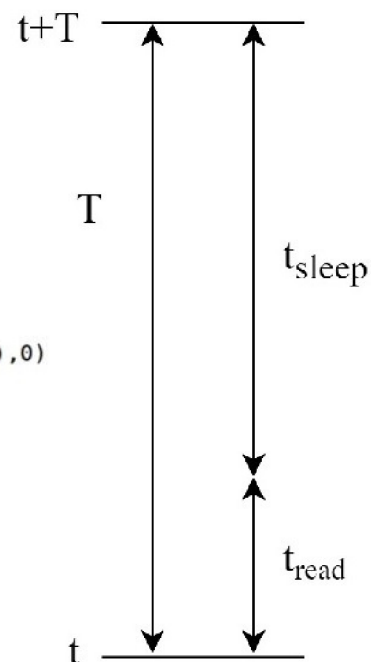
5.1.1. Časovanie meracieho cyklu

Hlavným problémom pri čítaní dát bol fakt, že jeden cyklus netrval vždy rovnakú dobu ale tento čas mierne kolísal. Preto bolo potrebné zaistiť, že systém „spal“ iba po dobu ktorá sa rovná:

$$t_{sleep} = T - t_{read} \quad (5.1)$$

kde t_{sleep} je doba spánku medzi čítaniami dát, T je vzorkovacia perióda a t_{read} je doba, ktorú trvalo čítanie a ukladanie dát zo senzorov. Funkcia (do_every) zabezpečujúca čítanie dát v pravidelných intervaloch bez sumácie sklzu aj s jej grafickou reprezentáciou je zobrazená na obr. 5.1. Jej podfunkcia g_tick generuje čas t_{sleep} . Potom opäť funkcia do_every uspí systém na túto dobu a zavolá inú funkciu kde je zadané čítanie a ukladanie dát. Vzorkovacia frekvencia pri vykonaných experimentoch bola 200 Hz.

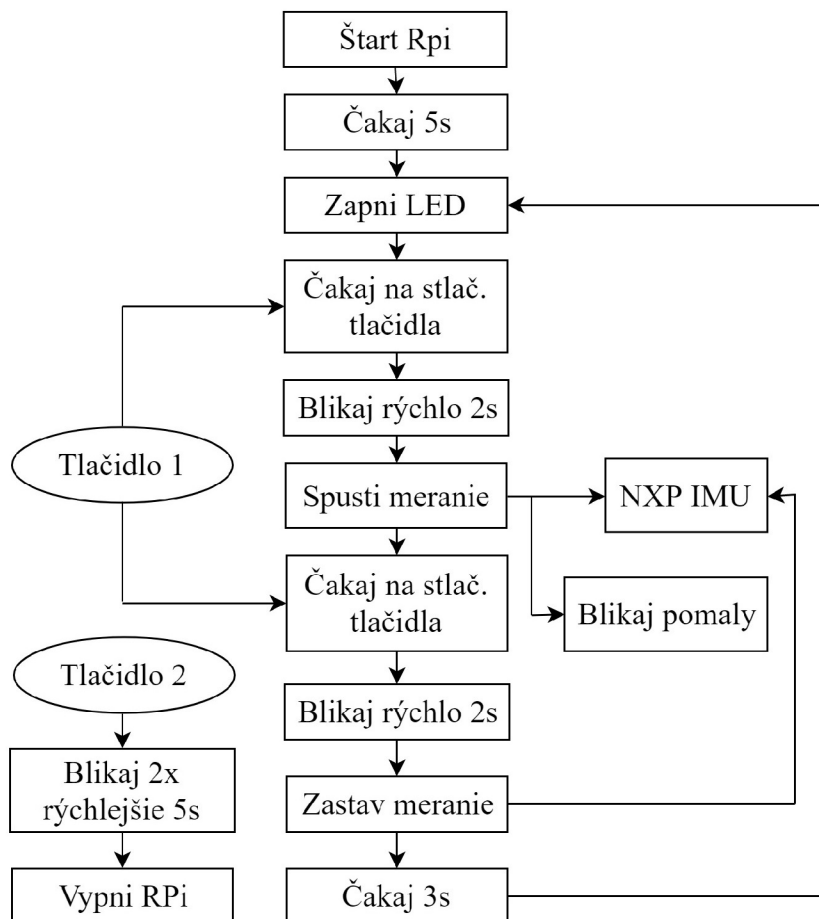
```
def do_every(f,period,r):
    def g_tick():
        t = time.perf_counter()
        count = 0
        while True:
            count += 1
            yield max(t + count*period - time.perf_counter(),0)
    g = g_tick()
    for _ in range(r):
        time.sleep(next(g))
        f()
```



Obr. 5.1: Funkcia časovania čítania dát.

5.1.2. Cyklus ovládania a spätnej väzby

Ďalším dôležitým prvkom bolo zabezpečenie spustenia merania fyzickým tlačidlom a dodanie spätnej väzby používateľovi. Ďalej bolo umožnené druhým tlačidlom vypnúť RPi. Toto je znázornené na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Cyklus ovládania a spätnej väzby.

Takto získané dáta sa uložili spolu aj s niektorými sprievodnými informáciami (čas spustenia, čas zastavenia merania, teplota, vzorkovacia frekvencia, rozsah senzorov) do súboru vo formáte csv. Dáta sa potom preniesli pomocou vzdialeného prístupu cez Wi-Fi do PC.

5.2. Zostavenie fyzického zariadenia pre meranie v cieľových podmienkach

5.2.1. Súčiastky

Pre spoľahlivé meranie a jednoduché zaobchádzanie boli vybrané nasledujúce elektrické komponenty:

1. *Raspberry Pi Zero W V1.1* - mikropočítač Raspberry Pi Zero W V1.1, s inštalovaným elektrickým zdrojom ZeroLiPo.
2. *IMU* - primárnou inerciálnou jednotkou je modul Adafruit NXP Precision 9DoF Breakout. Je možné vymeniť ho za modul Adafruit LSM9DS0.
3. *pamäťová karta typu Micro SD*
4. *Batéria Black Magic* - lítium-polymérová, 3,7 V batéria s kapacitou 1300 mAh/4,81 Wh.
5. *Prepájacie káble* - female-female prepájacie káble pre piny s rozstupom 0,1 ”.
6. *Mikrospínač* - 2x dvojpólový mikrospínač s rozmermi 5x6x6 mm (VxŠxD).
7. *LED* - 1x kruhová LED s priemerom 3 mm.
8. *Odpor* - 1x elektrický odpor o hodnote $R = 330 \Omega$.

Schéma zapojenia všetkých súčiastok okrem batérie je zobrazená na obr. 5.3. Batéria bola pripojená na elektrickom zdroji priletovanom na RPi. Spojenie RPi a IMU je nasledovné (najprv piny RPi, potom piny IMU):

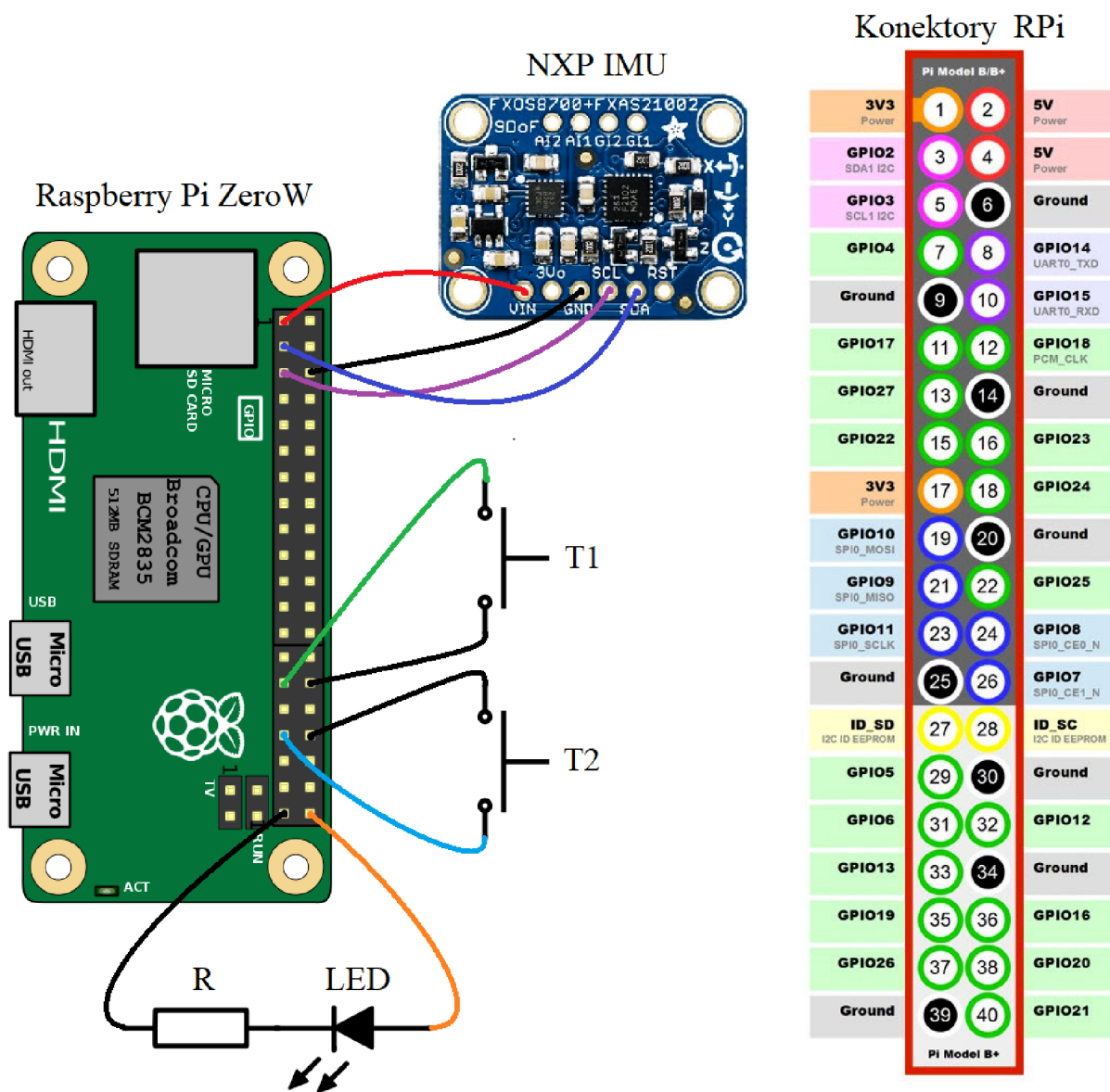
1. Pin 1, 3V3 - Vin
2. Pin 6, Gnd - Gnd
3. Pin 3, SDA I2C - SDA
4. Pin 5, SCL I2C - SCL

Tieto časti museli byť chránené puzdrom, čo je rozobrané v nasledujúcej podkapitole.

5.2.2. Dizajn puzdra

Puzdro nesúce meracie zariadenie musí zabezpečiť spoľahlivý chod jednotlivých súčiastok. Okrem toho, z dôvodu že zariadenie je určené pre rýchlostnú kanoistiku, musí spĺňať určité požiadavky:

1. *Ortogonálne uloženie IMU* - z dôvodov zníženia pravdepodobnosti dopustenia sa chyby spôsobenej nepresným uložením je dobré, aby IMU bola počas merania uložená v súlade s lokálnym ss lode. Teda aby jednotlivé osi IMU boli rovnobežné s jednotlivými osami ss lode.



Obr. 5.3: Schéma zapojenia. [12] [3] [28]

2. *Bezpečné a tuhé uloženie súčiastok vnútri puzdra* - počas pohybov lode pri pádlovaní sa nesmie stať, aby sa nejaká zo súčiastok pohla a ohrozila by tak správny chod IMU. Takisto aby sa pri prípadnom pohybe žiadna zo súčiastok nepoškodila.
3. *Možnosť opätovného uzatvárania* - pre prípadnú potrebu výmeny nejakej zo súčiastok, dobitie batérie, alebo pri sprievodných procedúrach spojených s vývojom zariadenia je potrebné, aby uzatvorenie puzdra krytom nebolo trvalé, ale zato musí byť spoľahlivé.
4. *Vyberateľnosť súčiastok* - takisto uloženie súčiastok vnútri puzdra nesmie byť trvalé, ale musí byť umožnené vybratie jednotlivých súčiastok.
5. *Vodotesnosť* - z dôvodu prostredia, v akom sa kanoistika vykonáva je nutné aby puzdro zabezpečilo ochranu súčiastok proti vode, prachu, prípadne iným poveternostným vplyvom. Je treba podotknúť, že zariadenie pri výkone nebude ponorené

5.2. ZOSTAVENIE FYZICKÉHO ZARIADENIA PRE MERANIE V CIELOVÝCH PODMIENKACH

vo vode, ale dostane sa naň voda iba vo forme jemného špliechania, prípadne dažďa. V nepravdepodobnom prípade, ak by sa kajakár náhodou prevrátil, by mohlo dôjsť k úplnému ponoreniu puzdra na krátky okamih (< 10 s). Toto spĺňa norma stupňa ochrany IPx4. Podľa [45] je takto uložený elektrospotrebič odolný voči striekajúcej vode vo všetkých smeroch.

6. *Relatívne malé rozmery a hmotnosť* - aby samotné používanie zariadenia neovplyvnilo výkony podávané športovcom, je nutné aby jeho rozmery nezasahovali do jeho dráhy pohybu a nevytvárali signifikantný zdroj aerodynamického odporu. Takisto jeho hmotnosť nesmie výrazne zvýšiť hmotnosť celej sústavy, kvôli ovplyvneniu dynamiky sústavy. (< 500 g; $< 200 \times 150 \times 150$ mm)
7. *Bezpečné a tuhé uchytenie puzdra na ľubovoľnom type lode* - keďže použitie zariadenia nie je obmedzené iba na jednu konkrétnu loď, musí byť jednoducho odnímateľné. Z rovnakých dôvodov ako v ad 2., musí byť uchytenie na lodi tuhé a spoľahlivé. Takisto nesmie dôjsť ku strate zariadenia v podobe utopenia. Výhodou, ale nie podmienkou je, ak bude mať celé zariadenie výtlak väčší ako jeho hmotnosť (bude plávať na hladine vody).
8. *Umožnenie spúšťania merania bez potreby otvárania puzdra* - z dôvodu praktickosti používania musí byť kajakár schopný spustiť a zastaviť meranie v ľubovoľnom čase počas tréningu. Toto opatrenie takisto šetrí pamäť výpočtovej jednotky, keďže umožňuje chod len v potrebných časových intervaloch.
9. *Spätná väzba o úspešnom spustení merania* - aby sa náhodou, nejakou chybou HW, SW, alebo nesprávnou manipuláciou nestalo, že používateľ v domnení spustí alebo vypne meranie, no v skutočnosti k tomuto nedôjde.

5.2.2.1. Varianty puzdra

Voľba realizácie puzdra pozostávala zo štyroch hlavných možností:

1. *Potravinová dóza* - všetky súčiastky by sa vložili do vodotesnej potravinovej dózy, bežne dostupnej v obchodoch s domácimi alebo kuchynskými potrebami.
Výhody: nízka cena (cca 2-5 EUR), jednoduchosť zaobstarania, priehľadný materiál, jednoduché otváranie a zatváranie, empiricky overená dobrá vodeodolnosť.
Nevýhody: Nespoľahlivé a zložité uchytenie súčiastok vnútri dózy a aj samotnej dózy na lodi, hrozba zbytočne veľkých rozmerov, obtiažne spúšťanie merania.
2. *Elektroinštalčná krabica* - podobné riešenie ako u potravinovej dózy, tentokrát ale už trochu „profesionálnejšie riešenie“, keďže u elektroinštalčných krabíc sa uvádza stupeň vodotesnosti.
Výhody: nízka cena (cca 2-10 EUR), široký výber rozmerov a prevedení, spoľahlivá vodotesnosť.
Nevýhody: nepriehľadný materiál, nutnosť uzatvárania krytu pomocou skrutiek, takisto nespoľahlivé a zložité uchytenie súčiastok aj krabice, zbytočne veľké rozmery, obtiažne spúšťanie merania.

3. *Vodotesné puzdro na športové/volnočasové aktivity* - s príchodom akčných kamier a nárastom nárokov ľudí brať si svoju elektroniku všade, aj do nepriaznivých podmienok sa rozšírili vodotesné puzdrá pre všetky druhy elektroniky, hlavne akčných kamier a mobilných telefónov. Tieto puzdrá sú často dizajnované s uchycujúcimi prvkami ako prísavkami, otvormi na skrutky apod.

Výhody: ľahké a rýchle uzatváranie krytu, možnosť vodotesného fyzického prepojenia s okolitým prostredím (tlačidlo), priehľadný materiál, možnosť jednoduchého uchytienia na lodi, garantovaná vodotesnosť.

Nevýhody: vyššia cena (cca 20-50 EUR), relatívne malý výber rozmerov, zložité a nespoľahlivé uchytienie súčiastok vo vnútri.

4. *Puzdro vlastného návrhu* - medzi možnosťami fakulty spadala aj výroba vlastného návrhu puzdra pomocou aditívnych technológií výroby. Takto by sa dali isté požiadavky pre puzdro ľahko dodržať a tvar by sa plne prispôbil potrebám.

Výhody: jednoduché a spoľahlivé uchytienie súčiastok vnútri, ale aj puzdra na lodi, malé rozmery, jednoduché spúšťanie, účelový dizajn.

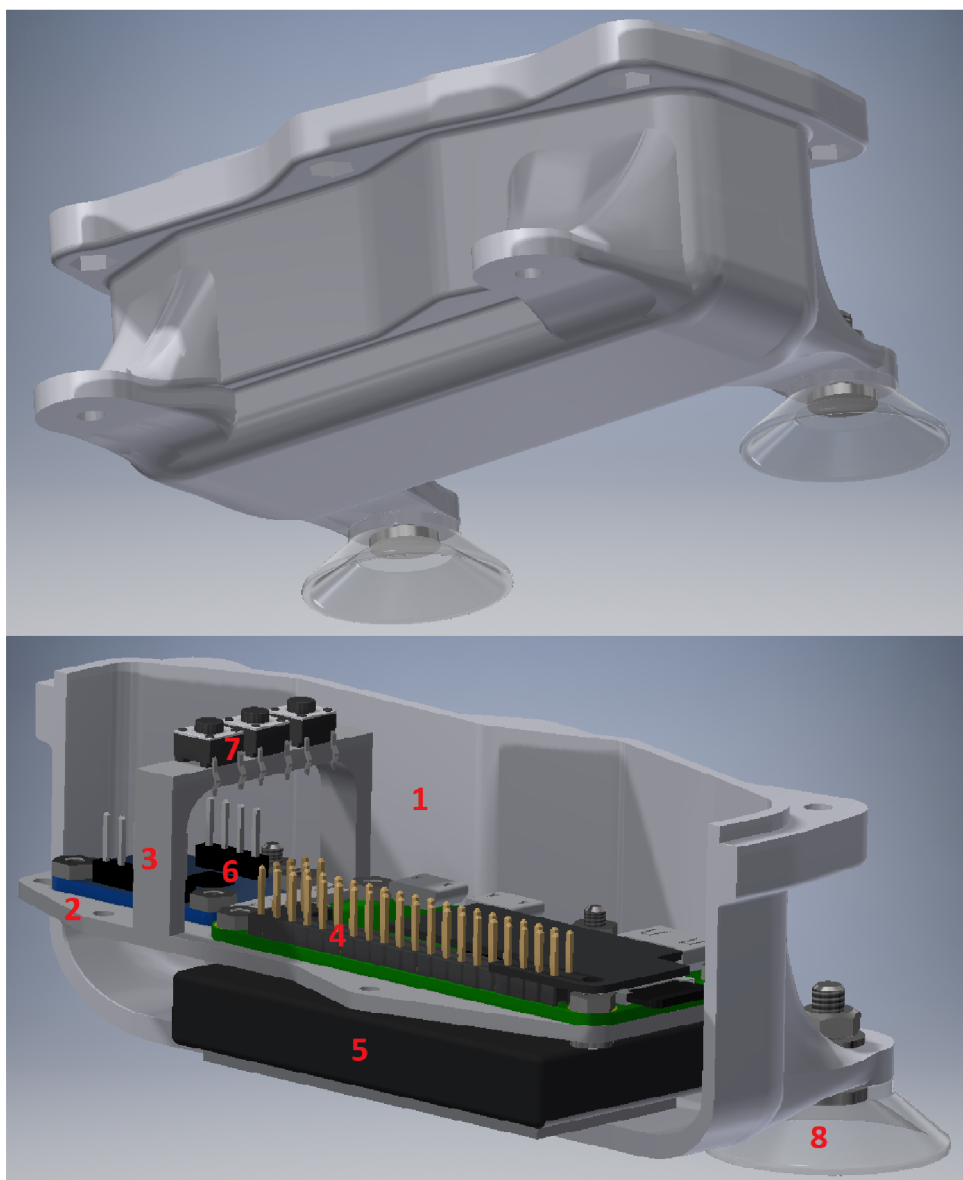
Nevýhody: otázná cena, nutnosť návrhu puzdra, nepriehľadný materiál, otázná vo-deodolnosť, nutnosť uzatvárania krytu skrutkami.

U všetkých možnostiach je nutné zaobstarať dodatočné súčiastky potrebné hlavne na montáž a uchytienie, ale aj funkcionality. U niektorých viac, u niektorých menej. Priehľadný materiál by zaručil jednoduchú spätnú väzbu pomocou LED diódy. Z horeuvedených riešení bola zvolená možnosť číslo 4, teda vlastný návrh puzdra vyrobený aditívnymi technológiami výroby na 3D tlačiarňi, a to hlavne z dôvodu dobrého uloženia súčiastok a malých rozmerov.

V programe Autodesk Inventor boli vypracované dva návrhy 3D modelu puzdra. Prvý návrh je vyobrazený na obr. 5.4, ktorý však kvôli nutnosti zložitejšej tlače nebol zvolený. Na obr. 5.4 možno vidieť aj spôsob uloženia súčiastok, ktorý je rovnaký ako u vyrobenej verzii:

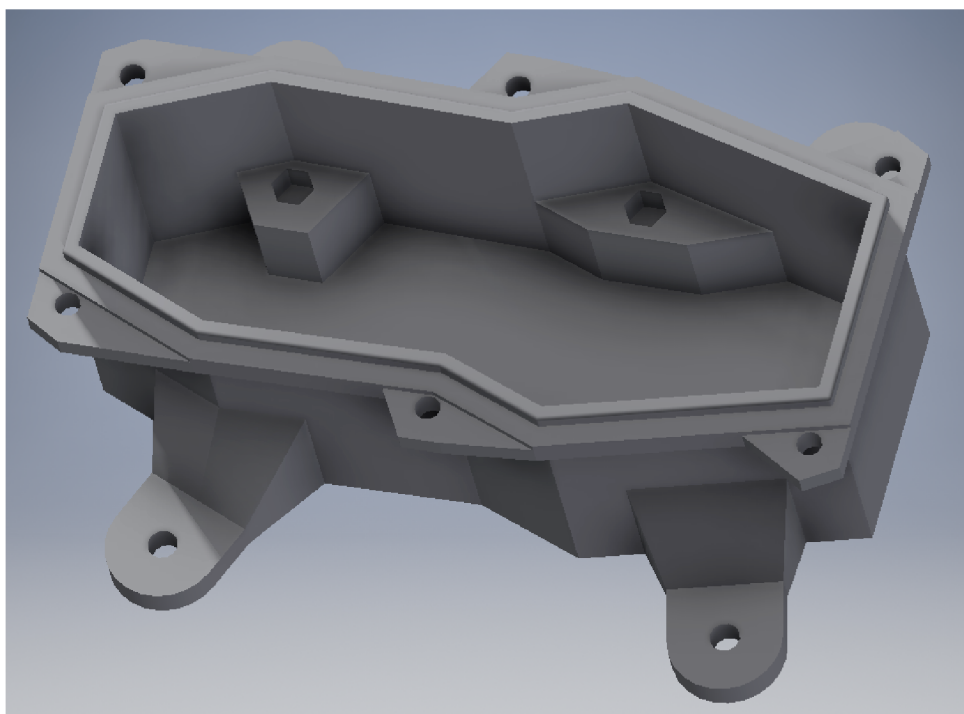
1. *Vanička*
2. *Doska*
3. *Mostík*
4. *Raspberry Pi Zero W*
5. *Batéria*
6. *Adafruit NXP IMU*
7. *Mikrospínače*
8. *Prísavky*

Obrázky 5.5, a 5.6 zobrazujú návrh, ktorý bol vytlačený a používal sa pri meraní na vode. Vytlačených častí bolo dokopy štyri, vanička, veko, doska a mostík. Vo vaničke sa nachádzajú hexagonálne otvory, do ktorých sa vlepili dištančné skrutky s priemerom

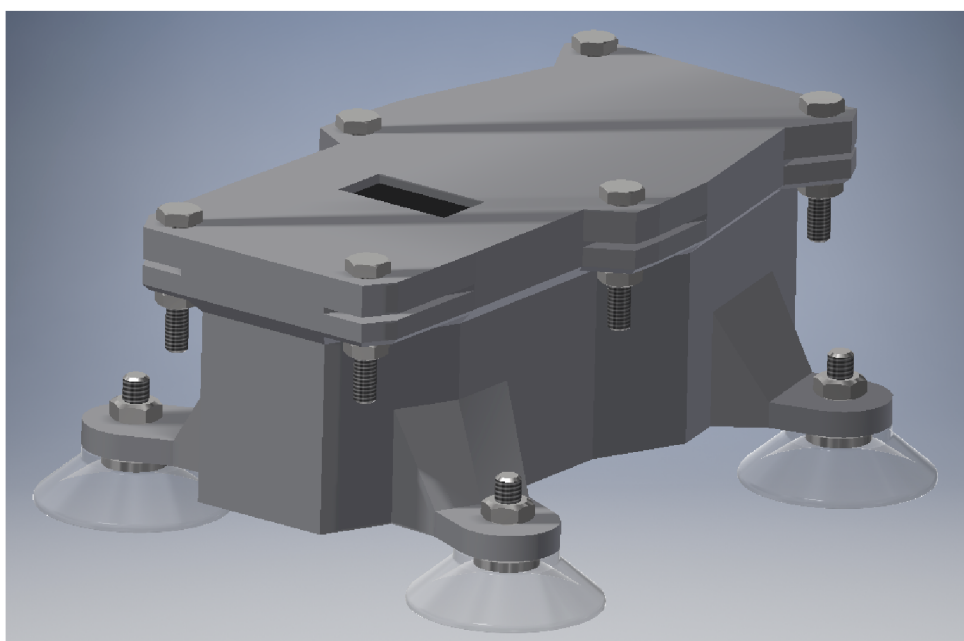


Obr. 5.4: Variant 1, oblý.

závitu 2,5 mm. Tieto dištančné skrutky slúžia na uchytenie dosky so súčiastkami. Na dno vaničky bol prilepený suchý zips, pričom jeho druhá polovica bola prilepená na batériu, čím sa zaistilo nepohyblivé uloženie batérie na dne vaničky. Na dosku bol prilepený mostík nesúci mikrosplínače a LED diódu. Raspberry a IMU modul boli priskrutkované na dosku. Vo veku sa nachádza otvor (okienko), ktorý slúži na stláčanie tlačidiel. Do zárezu pri okienku vo vnútornej strane veka bolo vlepene tesnenie zo silikónu, cez ktoré sa stláčajú tlačidlá a svieti LED dióda. Tesnenie zabezpečujúce vodeodolnosť z toho istého materiálu bolo tiež prilepené v mieste výrezu pri okienku a po priskrutkovaní veka bolo upevnené mechanickou silou medzi vaničkou a vekom. Na nožičky boli priskrutkované prísavky, ktoré slúžia na rýchle a spoľahlivé uchytenie na lodi. Na vaničku a veko bolo aplikovaný náter z epoxidovej živice zabezpečujúci vodeodolnosť samotného tlačeneho materiálu, ktorý môže byť porózny. Prepájacie káble boli priletované k jednotlivým pomocným súčiastkám (spínače, LED dióda).



Obr. 5.5: Variant 2, hranatý, pohľad zhora.



Obr. 5.6: Variant 2, hranatý, s vekom, pohľad ISO.

5.3. Kalibrácia inerciálnej jednotky

Pre meranie bola zvolená IMU Adafruit NXP. Jej príprava na meranie je popísaná v 5.3.1 a 5.3.2.

5.3.1. Kalibrácia akcelerometra

Akcelerometer bol kalibrovaný pri výrobe v továrni, no po inštalácii na DPS sa tepelnou záťažou mohla táto kalibrácia narušiť, preto bolo potrebné vykonať recalibráciu. Kalibrácia prebiehala podľa [21]. Akcelerometer bol uložený do 6 rôznych polôh tak, že os Z bola smerovaná rovnobežne s gravitačným zrýchlením, najprv v smere, potom proti smeru \mathbf{g} . Zvyšné 4 polohy boli rovnaké, ale už pre osi X a potom Y . V týchto polohách bol akcelerometer v klude, ani ním nebolo hýbané, ani otáčané. Týmto spôsobom sa porovnal výstup akcelerometra s referenčným zrýchlením o známej hodnote $\|\mathbf{g}\| = 9.80655 \text{ m/s}^2$. Na základe výstupov, získaných priemerom po istej dobe merania pre rôzne osi a polaritu boli vypočítané smernice a chyby pri nulovom vstupe. Úprava citlivosti sa získa zo vzťahu [21]:

$$G_i = \frac{2/s_a}{a_{i+} - a_{i-}} \quad (5.2)$$

kde a_i značí výstupy ôs X, Y, Z v pozitívnom a negatívnom smere, $s_a = 1/4096$ je citlivosť pri príslušnom rozsahu $R = \pm 2g$, získaná z datasheetu. Odchýlka pri nulovom vstupe sa vypočíta [21]:

$$B_{ai} = \frac{1}{s_a} \frac{-(a_{i+} + a_{i-})}{a_{i+} - a_{i-}} \quad (5.3)$$

kde B_{ai} značí bias/odchýlku pri nulovom vstupe pre jednotlivé osi. Výsledný model akcelerometra po kalibrácii je nasledovný [34]:

$$\mathbf{a} = \mathbf{G}_a \mathbf{S}_a (\mathbf{f}_a - \mathbf{b}_a) = \begin{bmatrix} G_x & 0 & 0 \\ 0 & G_y & 0 \\ 0 & 0 & G_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a & 0 & 0 \\ 0 & s_a & 0 \\ 0 & 0 & s_a \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} f_{ax} \\ f_{ay} \\ f_{az} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \\ B_{az} \end{bmatrix} \right) \quad (5.4)$$

kde f_{ai} je surový výstup akcelerometra a \mathbf{a} je recalibrovaný výstup. [34]

5.3.2. Kalibrácia gyroskopu

Podobný postup bol zvolený aj pre gyroskop, ale keďže nebola k dispozícii žiadna známa referenčná hodnota uhlovej rýchlosti, bol gyroskop kalibrovaný len na nulový vstup. Hodnoty biasu sa získajú jednoducho, položením senzora v kludovej polohe na istý čas a spriemerovaním nameraných údajov. Výsledný model gyroskopu [34]:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{S}_g (\mathbf{u}_g - \mathbf{b}_g) = \begin{bmatrix} s_g & 0 & 0 \\ 0 & s_g & 0 \\ 0 & 0 & s_g \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} u_{gx} \\ u_{gy} \\ u_{gz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{gx} \\ B_{gy} \\ B_{gz} \end{bmatrix} \right) \quad (5.5)$$

kde $\boldsymbol{\omega}$ je vektor uhlových rýchlostí s_g značí senzitivitu gyroskopu, získanú z datasheetu, u_{gi} surové výstupy a B_{gi} hodnoty biasu. [34]

Tento postup kalibrácie bol vykonaný pri teplote 0°C a 20°C . Hodnoty \mathbf{G}_a , \mathbf{b}_a a \mathbf{b}_g sú uvedené v tab. 5.1. U akcelerometra nie je badateľná silná teplotná závislosť, mierne

| veličina | 0°C | 20°C | Jednotky |
|----------|--------|-------|----------|
| B_{ax} | 70,5 | 66 | bit |
| B_{ay} | -105,4 | -98,3 | bit |
| B_{az} | 182,7 | 177,1 | bit |
| G_x | 1,006 | 1,005 | - |
| G_y | 0,993 | 0,993 | - |
| G_z | 1,007 | 1,008 | - |
| B_{gx} | -17,1 | 24,3 | bit |
| B_{gy} | 158,1 | 289,9 | bit |
| B_{gz} | -7,5 | -22,3 | bit |

Tabulka 5.1: Teplotná závislosť kalibračných hodnôt senzorov.

odchýlky môžu byť spôsobené nepresnosťou ortogonálneho uloženia. Toto by u gyroskopu problém byť nemal, ale je vidno, že jeho drift je veľmi citlivý na teplotu, hlavne pre os Y. Magnetometer nakoniec nebol použitý, pretože hodnota kurzu nebola pre charakter riešenej úlohy podstatná a bola určená iba z merania gyroskopu a preto nebol ani kalibrovaný.

5.4. Meranie dát

Skompletizované zariadenie bolo pripevnené na lodi testovacieho subjektu a v potrebných intervaloch bolo spúšťané meranie so vzorkovacou frekvenciou 200 Hz. Subjekt absolvoval rôzne zmerané úseky s vysokou aj nízkou intenzitou. Zameranie pri experimentoch bolo na 200 m trať, pri ktorej je zo všetkých oficiálnych dištancií najväčšia ako dynamika, tak aj kinematika (rýchlosť a zrýchlenie).

5.5. Kompensácia náklonu v laterálnom zrýchlení

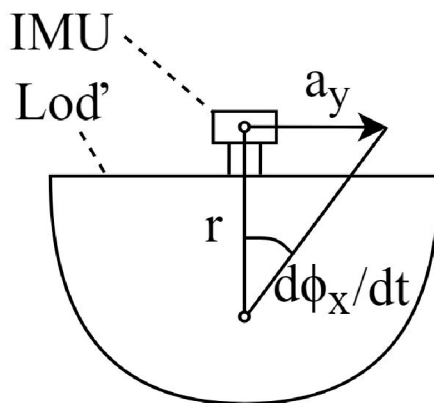
Keďže meracie zariadenie nie je umiestnené v ťažisku sústavy loď a kajakár, všetky rotácie lode sa prejavujú parazitným pohybom meracieho zariadenia. Najviac je na to citlivá os Y a rotácia okolo X, pretože veľkosti náklonu dosahujú najväčšie hodnoty. Na obr. 5.7 je znázornený priečny prierez kajaku a vplyv uhlového zrýchlenia v osi X na parazitné zrýchlenie v osi Y, $d\phi/dt$ značí uhlové zrýchlenie v osi X a r vzdialenosť osi X k IMU. Uhlové zrýchlenie náklonu sa prejavuje v osi Y parazitným zrýchlením o veľkosti:

$$a_{yRoll} = -r \frac{d\phi}{dt} \quad (5.6)$$

V rovnici je znamienko mínus, pretože kladný smer $d\phi/dt$ zodpovedá zápornému smeru zrýchlenia v osi Y. Výsledné zrýchlenie a_y je potom:

$$a_y = a_{yOrig} - a_{yRoll} \quad (5.7)$$

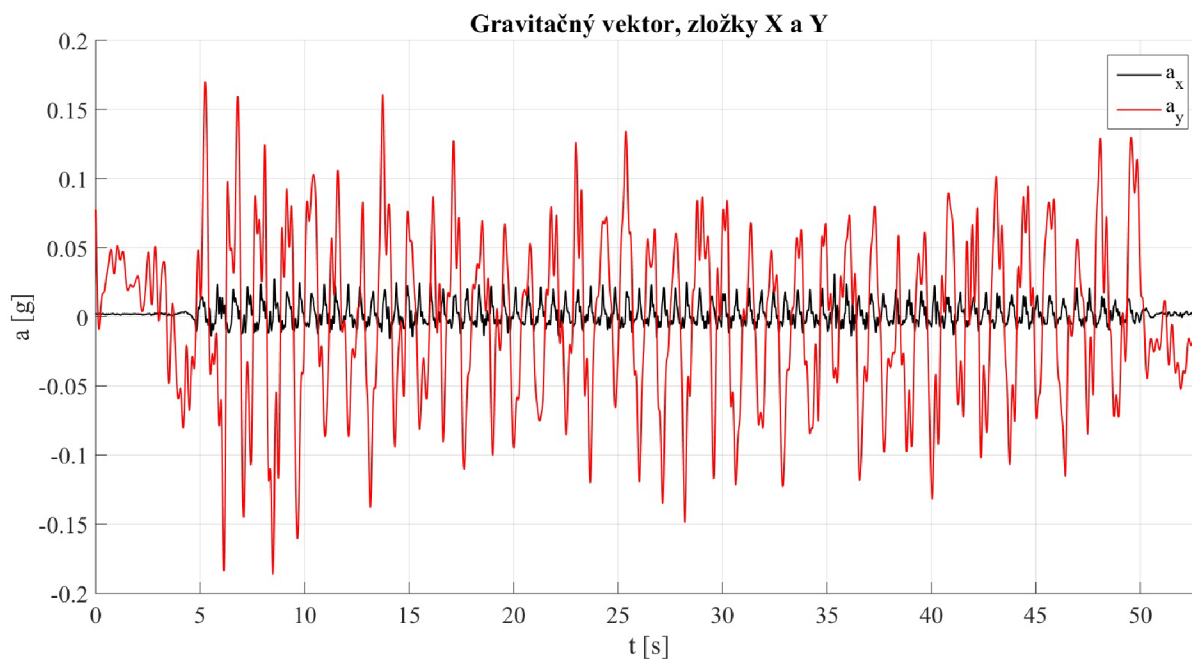
kde a_{yOrig} značí nekompenzované meranie akcelerometra v osi Y. Veľkosť r je však neznáma a bolo treba ju približne určiť prekladáním dvoch kriviek, a_{yOrig} a $-rd\phi/dt$. Táto hodnota bola určená ako $r = 15 \text{ cm}$. Kompensácia pre rotácie v osiach Y a Z nebola vykonaná pretože sú malé ($< 3^\circ$).



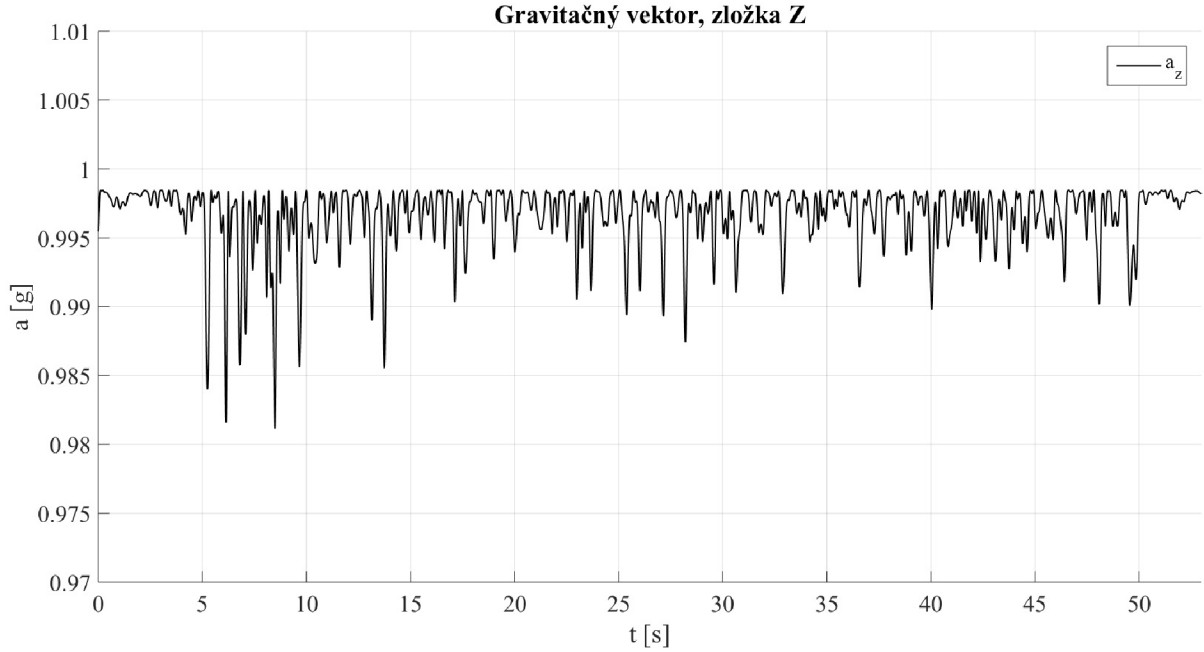
Obr. 5.7: Parazitné zrýchlenie spôsobené uhlovým zrýchlením náklonu lode.

5.6. Fúzia dát

Pre hodnotenie techniky a výkonu v kanoistike je potrebné z dát získať hlavne dopredné zrýchlenie, rýchlosť a rotácie okolo jednotlivých osí, teda natočenie v priestore - Eulerove uhly. Pre získanie orientácie bol použitý diskretný rozšírený Kálmánov filter, pričom orientácia bola vyjadrená pomocou quaternionov. Pretože je u gyroskopu zlá teplotná stabilita biasu, bol implementovaný cyklus korigujúci aj práve túto hodnotu. Vstupom do KF boli zmerané uhlové rýchlosti a na korekciu bol použitý vektor gravitačného zrýchlenia. Gravitačné zrýchlenie bolo získané odčítaním priemeru zrýchlenia v jednotlivých osiach, filtráciou typu dolná priepusť so zlomovou frekvenciou 11 Hz a opätovným pričítaním priemeru. Vstupné priebehy gravitačného zrýchlenia sú zobrazené na obr. 5.8 a 5.9. Postup fúzie dát je znázornený na obr. 5.10.



Obr. 5.8: Vstupný gravitačný vektor v osiach X a Y do KF.



Obr. 5.9: Vstupný gravitačný vektor v osi Z do KF.

5.6.1. Rozšírený Kálmánov filter

Postup KF bol vypracovaný podľa [9] a [39]. Stavový vektor v čase k vyzerá nasledovne [39]:

$$\mathbf{x}_k = [\mathbf{q}_k \quad \boldsymbol{\omega}_k \quad \mathbf{b}_{g|k}]^T \quad (5.8)$$

kde \mathbf{q}_k je stavový quaternion, $\boldsymbol{\omega}_k$ uhlová rýchlosť a \mathbf{b}_g bias gyroskopu.

5.6.1.1. Predikcia

Predikcia stavového vektora, pričom vstupnými veličinami je meranie gyroskopu $\mathbf{u}_{g|k}$ a predchádzajúci stav \mathbf{x}_k , v čase $k + 1$ je [39]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{f}(k, \mathbf{x}_k, \mathbf{u}_{g|k}) \quad (5.9)$$

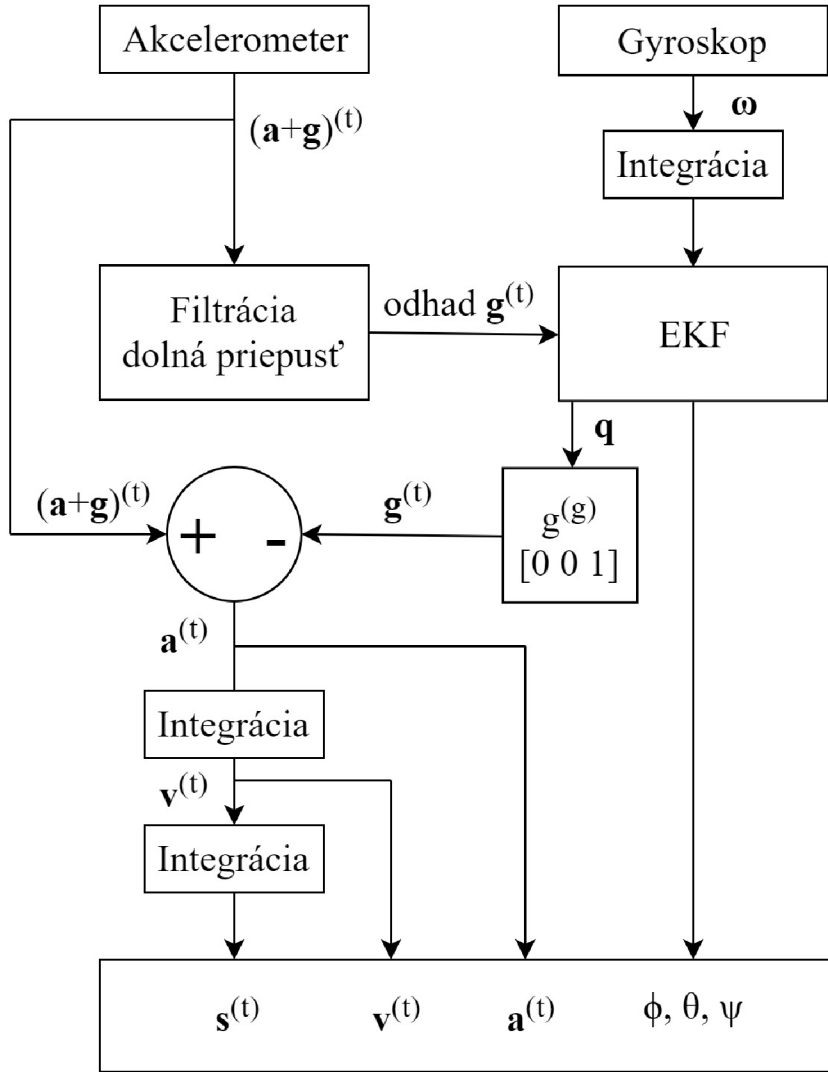
kde $\mathbf{f}(k, \mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$ je propagačná funkcia stavu a skladá sa z troch podfunkcií (5.10 až 5.12) [39]:

$$\mathbf{q}_{k+1}^{(gt)} = \mathbf{q}_k^{(gt)} + \Delta t \frac{1}{2} \mathbf{q}_k^{(gt)} \times \left[0 \quad \boldsymbol{\omega}_k^{(t)} \right]^T \quad (5.10)$$

kde $\frac{1}{2} \mathbf{q}_k^{nb} \times \left[0 \quad \boldsymbol{\omega}_k^{(t)} \right]^T$ predstavuje deriváciu quaternionu $\dot{\mathbf{q}}_k$ z globálneho do telesového ss a \times značí násobenie dvoch quaternionov podľa rovnice 4.9. Táto rovnica má význam integrácie uhlových rýchlostí.

$$\boldsymbol{\omega}_{k+1}^{(t)} = \mathbf{u}_{g|k} - \mathbf{b}_{g|k} \quad (5.11)$$

$$\mathbf{b}_{g|k+1} = (1 - \lambda \Delta t) \mathbf{b}_{g|k} \quad (5.12)$$



Obr. 5.10: Fúzia dát prostredníctvom EKF.

kde λ je korelačný časový faktor biasu. Rovnica 5.11 odčítava bias gyroskopu, ktorý je predikovaný v rovnici 5.12. Predikcia kovariačnej matice stavu $\hat{\mathbf{P}}_{k+1}$ [39]:

$$\hat{\mathbf{P}}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q} \quad (5.13)$$

kde \mathbf{Q} je matica procesného šumu, \mathbf{P}_k matica kovariácie stavu v predchádzajúcom kroku a \mathbf{F}_k je Jakobián funkcie $\mathbf{f}(k, \mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$, ktorý slúži na linearizáciu systému v pracovnom bode kroku k [39]:

$$\mathbf{F}_k = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}_q^{(gt)}}{\partial \mathbf{q}^{(gt)}} & \frac{\partial \mathbf{f}_q^{(gt)}}{\partial \boldsymbol{\omega}^{(t)}} & \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \frac{\partial \mathbf{f}_\omega^{(t)}}{\partial \mathbf{b}_g} \\ \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \frac{\partial \mathbf{f}_{b_g}}{\partial \mathbf{b}_g} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Predikcia merania - vektoru gravitačného zrýchlenia získaného filtráciou hodnôt z akcelerometra sa vypočíta rotáciou gravitačného zrýchlenia $[0 \ 0 \ 1]^T [g]$ z globálneho do predpovedaného telesového ss, pomocou transformácie typu alias [39]:

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{h}(k+1, \hat{\mathbf{q}}_{k+1}^{(gt)}) = \left[\hat{\mathbf{q}}_{k+1}^{(gt)*} [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \hat{\mathbf{q}}_{k+1}^{(gt)} \right]_{(2,3,4)}^T \quad (5.15)$$

Matica kovariácie pre meranie \mathbf{a} [39]:

$$\mathbf{S} = \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{P}}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R} \quad (5.16)$$

kde \mathbf{R} je matica kovariácie šumu merania a \mathbf{H}_{k+1} je Jakobián funkcie $\mathbf{h}(k+1, \hat{\mathbf{q}}_{k+1}^{(gt)})$, ktorý slúži taktiež na linearizáciu, tentokrát ale funkcie merania v kroku k [39]:

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} = \left[\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}^{(gt)}} \quad \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \boldsymbol{\omega}^{(t)}} \quad \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{b}_g^{(t)}} \right] \quad (5.17)$$

5.6.1.2. Korekcia

Korekcia predpovedaného stavu je vykonaná na základe merania - vektora gravitačného zrýchlenia. Reziduál predikcie a merania, nám dáva informáciu o tom, aký veľký rozdiel je medzi predikovaným stavom a meraním [39]:

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{a}_{k+1} - \mathbf{z}_{k+1} \quad (5.18)$$

Kalmanovo zosilnenie, ktoré predstavuje mieru, z akou veríme meraniu, či modelu, sa vypočíta z [39]:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \hat{\mathbf{P}}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{S}^{-1} \quad (5.19)$$

potom odhad stavového vektora [39]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1} + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1} \quad (5.20)$$

a nový odhad kovariačnej matice stavu [39]:

$$\mathbf{P}_{k+1} = \hat{\mathbf{P}}_{k+1} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{S} \mathbf{K}_{k+1}^T \quad (5.21)$$

V každom kroku bol stavový aj predikčný quaternion normalizovaný tak, aby bol jednotkovým quaternionom, aby sa zaistila ortonormalita transformácií. [26]

5.6.1.3. Inicializácia

Inicializácia stavových veličín a určenie konštánt boli vykonané nasledovným spôsobom [39]:

1. *Stavové veličiny* - počiatočný stav quaternionu \mathbf{q}_{init} bol odhadnutý z prvých 20 vzoriek merania akcelerometra, keď bola loď v klude a vektor gravitačného zrýchlenia nebol narušený pohybovým zrýchlením, pričom počiatočný kurz bol zvolený ako nulový. Počiatočný náklon a klopenie lode sa vypočítali zo vzťahov [48]:

$$\phi = \text{atan2}(a_y, a_z) \quad (5.22)$$

5.7. ZRÝCHLENIE

$$\theta = \operatorname{atan} 2(-a_x, \sqrt{a_y^2 + a_z^2}) \quad (5.23)$$

Takto vypočítané uhly boli transformované pomocou 4.13 do podoby quaternionu. Počiatočný stav $\boldsymbol{\omega}_{init}$ bol zvolený nulový. Počiatočný stav biasu gyroskopu bol zvolený priemer meraní gyroskopu \mathbf{u}_g počas celej doby merania.

2. *Matice* \mathbf{Q} , \mathbf{R} - boli určené na základe merania šumu gyroskopu a akcelerometra. Tieto hodnoty boli potom upravené podľa pozorovania správania EKF.
3. *Matica kovariácie stavu* \mathbf{P} - bola určená počiatočným odhadom a potom upravená iteračným spôsobom. Priemerné hodnoty \mathbf{P} z prvého priechodu EKF boli vložené ako \mathbf{P}_{init} do druhého priechodu EKF, apod.

Takýmto spôsobom sa podarilo získať presnejšiu orientáciu lode v priestore. Eulerove uhly získame opäť konverziou popísanou v rovnici 4.14.

5.7. Zrýchlenie

Rotáciou gravitačného vektora $[0 \ 0 \ 1]^T [g]$ z globálneho do telesového ss pomocou transformácie alias sa získa gravitačný vektor popísaný v telesovom ss (5.24), ktorý sa môže odčítať od merania akcelerometra. Touto úpravou (5.25) sa zistí hodnota zrýchlenia telesa nezaťaženého gravitáciou. [39]

$$\mathbf{g}^{(t)} = \left[\hat{\mathbf{q}}^{(gt)*} [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \mathbf{q}^{(gt)} \right]_{(2,3,4)}^T \quad (5.24)$$

$$\mathbf{a}^{(t)} = \mathbf{a} - (\mathbf{g})^{(t)} \quad (5.25)$$

Opačnou transformáciou (alibi), rotáciou $\mathbf{a}^{(t)}$ do globálneho ss sa vypočíta zrýchlenie v globálnom ss $\mathbf{a}^{(g)}$ podľa 5.26:

$$\mathbf{a}^{(g)} = \left[\hat{\mathbf{q}}^{(gt)} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{a}^{(t)} \end{bmatrix} \mathbf{q}^{(gt)*} \right]_{(2,3,4)}^T \quad (5.26)$$

5.8. Rýchlosť

Výpočet telesovej, prípadne globálnej rýchlosti prebiehal pomocou numerickej integrácie, s interpoláciou medzi nameranými hodnotami podľa 5.28 [30]:

$$\mathbf{v}_k^{(i)} = \sum_{n=1}^k \Delta t \frac{\mathbf{a}_{n-1}^{(i)} + \mathbf{a}_n^{(i)}}{2} \quad (5.27)$$

kde (i) znamená príslušný ss, Δt vzorkovaciu periódu a k krok výpočtu. Takto vypočítaná rýchlosť trpí konštantným driftom, ktorý bol potlačený filtrom typu horná priepusť s veľmi malou zlomovou frekvenciou (0,00005 Hz), ktorý odstránil nenulový výstup akcelerometra v kludovom stave a ešte odčítaním priemeru vypočítaného zrýchlenia. Toto bolo možné urobiť z dôvodu, že počiatočná aj konečná rýchlosť merania boli nulové. Napriek tomuto opatreniu bol stále malý drift v priebehu rýchlosti prítomný.

5.9. Vzdialenosť

Vzdialenosť sa získa obdobným spôsobom ako rýchlosť [30]:

$$\mathbf{s}_k^{(i)} = \sum_{n=1}^k \Delta t \frac{\mathbf{v}_{n-1}^{(i)} + \mathbf{v}_n^{(i)}}{2} \quad (5.28)$$

5.10. Dynamika

5.10.1. Meranie dát pre identifikáciu dynamického systému

Dynamická rovnica v osi X je s istými zanedbaniami nasledovného tvaru, podľa 3.2:

$$ma_x + bv_x^n = F_p \quad (5.29)$$

kde m je hmotnosť sústavy, b je súhrnný koeficient odporu, n je mocnina rýchlosti a F_p je sila v smere osi X od pádla. Istými zanedbaniami sa rozumie predpoklad konštantného b , zanedbanie vplyvu vetra, prípadne prúdu. Cieľom identifikácie sú súhrnný koeficient odporu a mocnina rýchlosti. Keďže silu od pádla nevieme so zariadením priamo merať, pre identifikáciu boli použité dáta také, že testovací subjekt nepádloval a teda $F_p = 0$. Rovnica 5.29 sa potom redukuje na tvar:

$$ma_x + bv_x^n = 0 \quad (5.30)$$

Aby bola dĺžka intervalu počas ktorého platí rovnica 5.30 čo najdlhšia, subjekt sa rozbehol na maximálnu rýchlosť, po ktorej dosiahnutí prestal pádlovať a dosplýval až do malej rýchlosti ($< 2 \text{ km/h}$). Počas tohto testu bola dosiahnutá maximálna rýchlosť zhruba 20 km/h . Namerané priebehy rýchlostí boli porovnané s dátami zmeranými pomocou GPS.

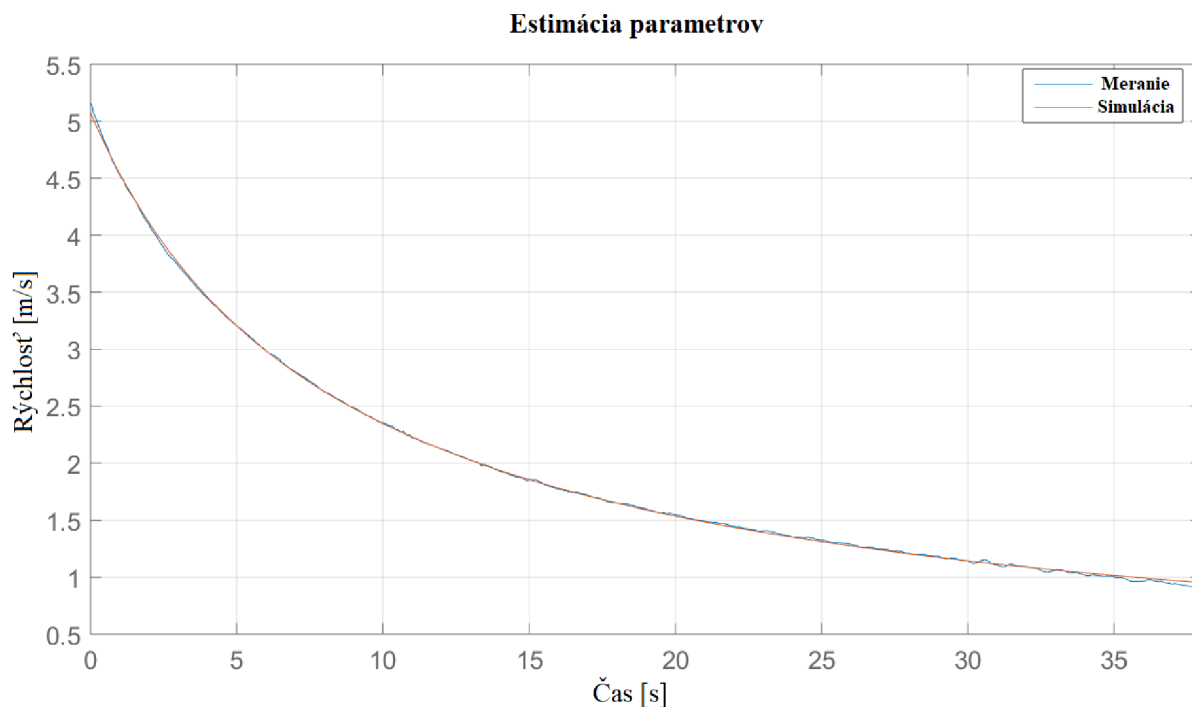
5.10.2. Identifikácia parametrov dynamického systému

Z dát získaných spôsobom popísaným v 5.10.1 boli identifikované parametre pomocou nástroja Parameter Estimation Toolbox v prostredí Matlab/Simulink. Tento toolbox využíva metódu nelineárnych najmenších štvorcov pre minimalizáciu chyby. Pre estimáciu bolo použitých 6 datasetov. Príklad porovnania simulovaného priebehu s estimovanými parametrami a reálneho merania rýchlosti je zobrazený na obr. 5.11. Treba dodať, že pre každý iný tvar lode a hmotnosť pretekára je potrebné vykonať meranie v 5.10.1 a estimáciu zvlášť, pretože tieto faktory najviac ovplyvňujú parametre dynamického systému.

5.10.3. Výpočet sily záberu

Z rovnice 5.29 vyplýva, že ak je známy priebeh stavovej veličiny a_x a v_x a všetky konštanty m^1 , b a n (predpokladá sa, že tieto parametre sú konštantné), je možné vypočítať silu, ktorá tento priebeh stavových veličín spôsobila. Rýchlosť záberu sa v skutočnosti veľmi blízko rovná rýchlosti lode, pretože pri pádlovaní dochádza len k veľmi malému preklzu listu pádla smerom dozadu. Tento jav sa v žargóne nazýva chytenie (anglicky: catch) a

¹Hmotnosť bola zmeraná odvážením test. subjektu tesne po tréningu, spolu aj s loďou a pádlom.

Obr. 5.11: Estimácia parametrov b a n .

je dosiahnutý „wingový“ tvarom pádla s veľkým hydrodynamickým odporom v smere záberu. Výkon P a práca W sa potom rovná:

$$P_k = F_k v_{x|k} \quad (5.31)$$

$$W_k = \sum_{n=1}^k P_n \Delta t \quad (5.32)$$

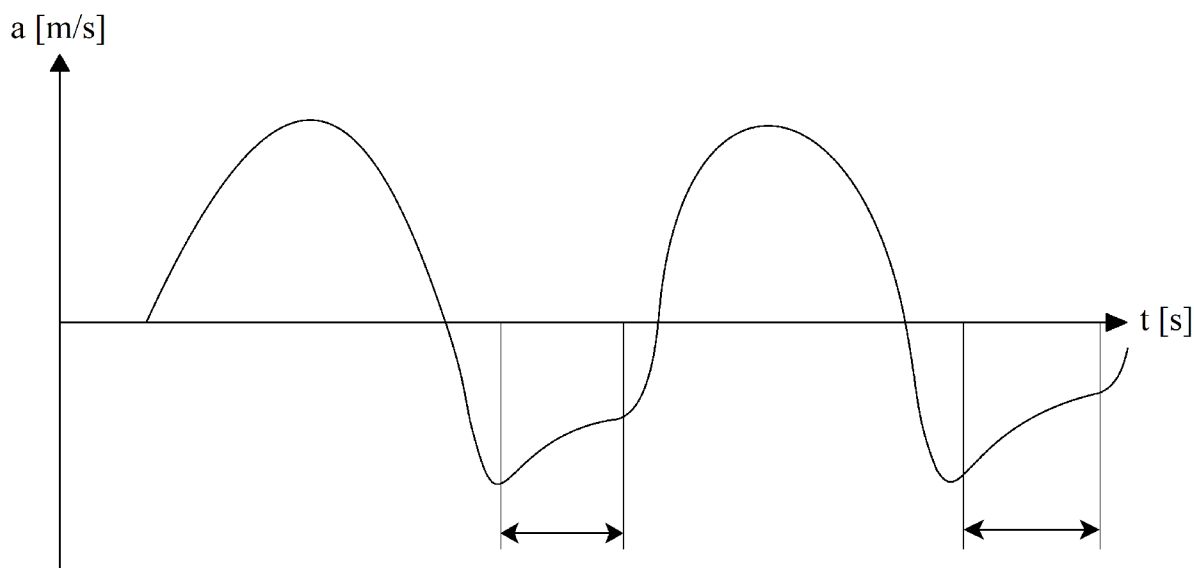
kde k znamená diskretný krok.

5.10.4. Určenie rýchlosti na základe dynamického modelu

Rýchlosť získaná integráciou zrýchlenia je náchylná na sumáciu chýb, preto bolo užitočné vypočítanú rýchlosť porovnať s rýchlosťou vypočítanou inou metódou. Táto metóda sa spolieha na približné určenie parametrov dynamického systému a opäť na rovnicu 3.2. Za podmienky $F_p = 0$, ktorá platí aj medzi jednotlivými zábermi vieme približne zistiť rýchlosť podľa hodnoty zrýchlenia, respektíve veľkosti spomaľovania lode. Tento interval bol identifikovaný pomocou podmienok:

1. $a < 0$
2. $\frac{da}{dt} > 0$

To znamená, že muselo dochádzať k spomaľovaniu lode a zároveň muselo opisovať krivku asymptoticky sa blížiacu k 0. Toto je graficky znázornené na obr. 5.12, kde sú vyznačené spomínané intervaly. Krivka reprezentuje generický priebeh zrýchlenia lode v osi X počas pádlovania, zobrazené sú dva zábery. Potom sa rýchlosť vypočíta zo vzťahu 5.33.



Obr. 5.12: Intervaly medzi zábermi.

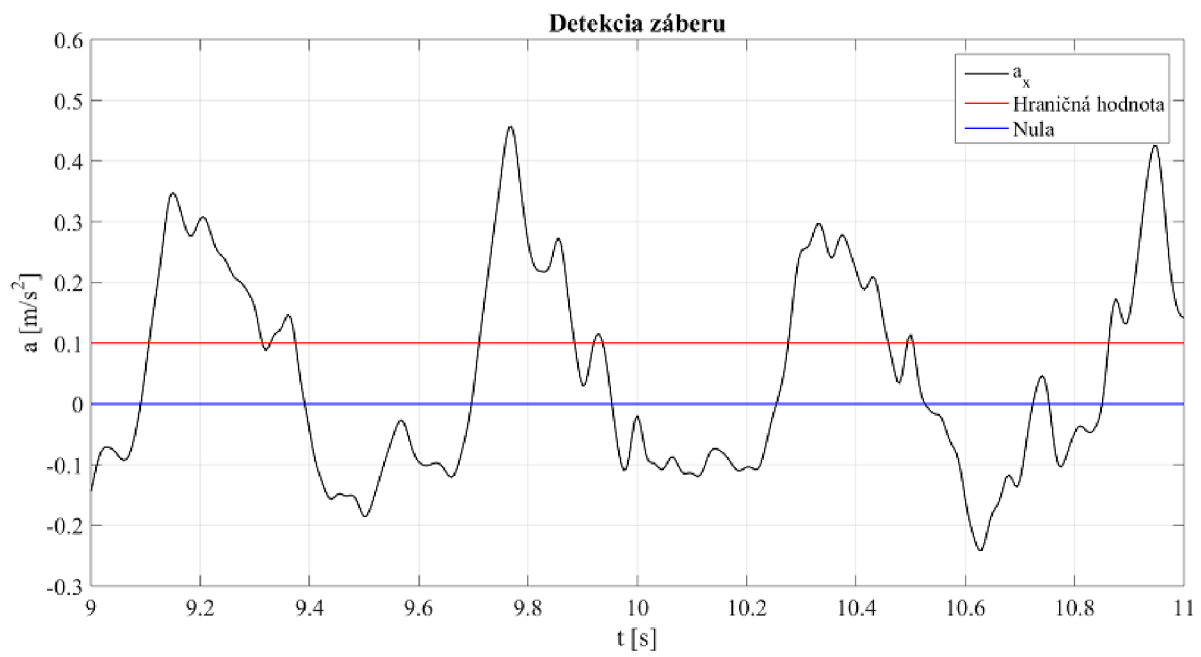
$$v_{mod} = \left(\frac{-ma}{b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.33)$$

Aby sa zo zašumeného merania akcelerometra dala táto krivka identifikovať, bolo potrebné signál upraviť filtrom typu dolná priepusť o zlomovej frekvencii 2 Hz.

5.11. Detekcia záberu

Pre vyhodnotenie bolo potrebné rozdeliť meraný interval na jednotlivé zábery a každý analyzovať zvlášť. Toto bolo dosiahnuté detekciou prechodu zrýchlenia zo zápornej do kladnej hodnoty a prekročením istej hraničnej hodnoty. V obr. 5.13 možno vidieť princíp detekcie počiatku záberu v priesečníku zrýchlenia s nulovou hodnotou. Na potvrdenie, že sa naozaj jedná o záber, ale nie len šum, musela sledovaná krivka prekročiť aj istú hraničnú hodnotu. V čase približne 10,7 s vidno, že síce k prekonaniu nuly došlo, ale tento moment nebol detekovaný ako počiatok záberu, pretože podmienka prekročenia hranice nebola splnená. Ako počiatok bol zvolený moment v čase približne 10,9 s.

5.11. DETEKCIA ZÁBERU

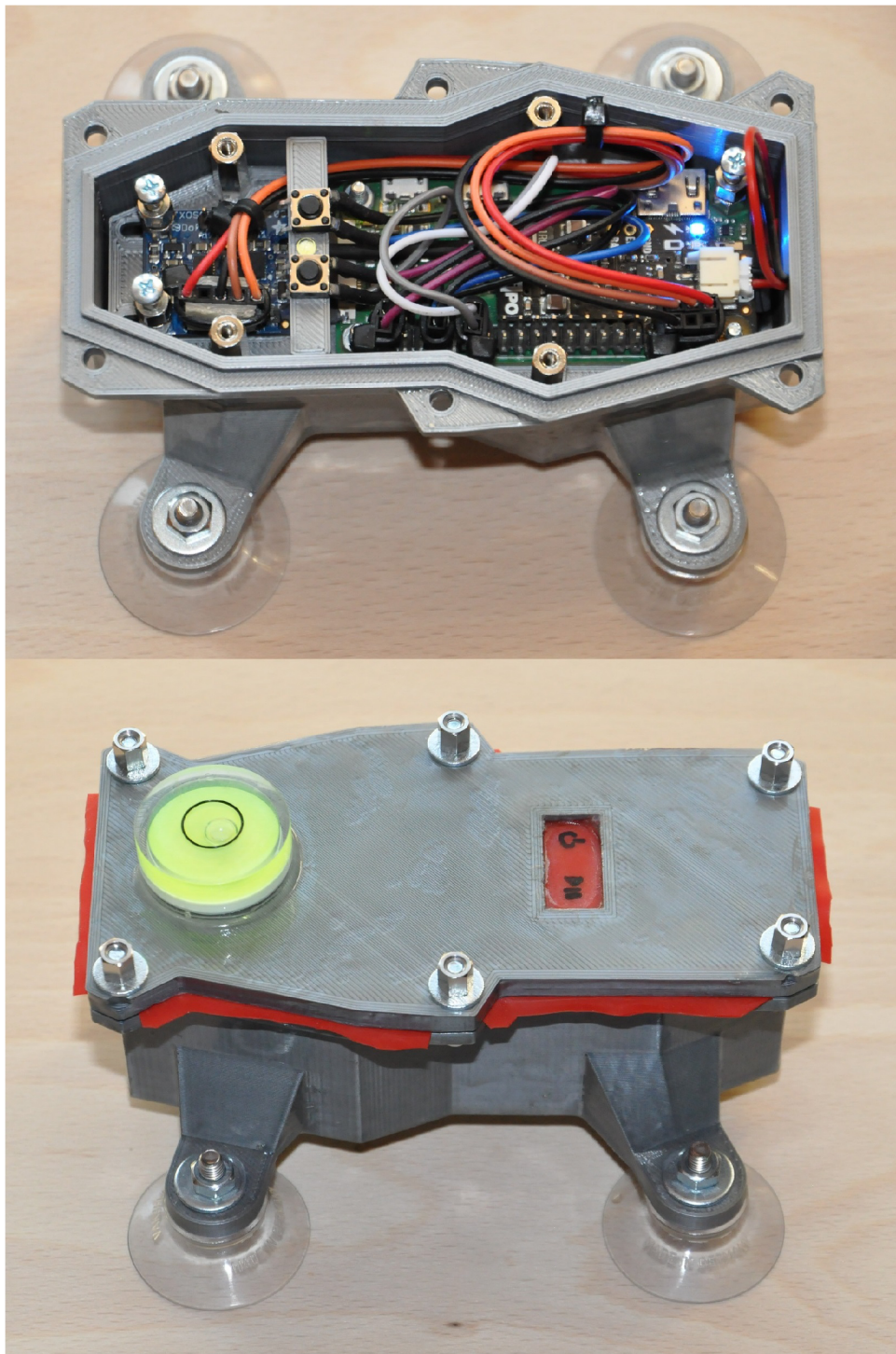


Obr. 5.13: Detekcia jednotlivých záberov.

6. Prezencia výsledkov riešenia

6.1. Vyhotovenie zariadenia

Všetky súčiastky boli vyhotovené a prototyp zariadenia bol zložený zo všetkými súčiastkami. Finálny produkt možno vidieť na obr. 6.1.



Obr. 6.1: Vnútorne rozloženie zariadenia a uzatvorené puzdro.

6.2. Meranie v cieľových podmienkach

Potrebné merania boli úspešne vykonané na vode, pričom nedošlo ku poškodeniu žiadnej z elektrických komponent. Experiment prebiehal na umelo vytvorenej vodnej ploche určenej pre organizáciu vrcholných kanoistických podujatí, na veľkom Zemníku v Bratislave. Jeden z testovacích subjektov je zobrazený na obr. 6.2, počas jeho tréningovej jednotky pár dní pred kvalifikačnými pretekmi. Výkonnosť sa zaraďuje do reprezentácie Slovenska na vrcholných svetových podujatiach ako majstrovstvá sveta, či svetové poháre. Keďže potom nemohlo byť požadované aby sa tesne pred dôležitými pretekmi unavoval početnými testami s meracím zariadením, dáta zobrazené vo výsledkoch boli zmerané jeho menej výkonným kolegom, ktorý sa zaraďuje do amatérskej kategórie mužov.



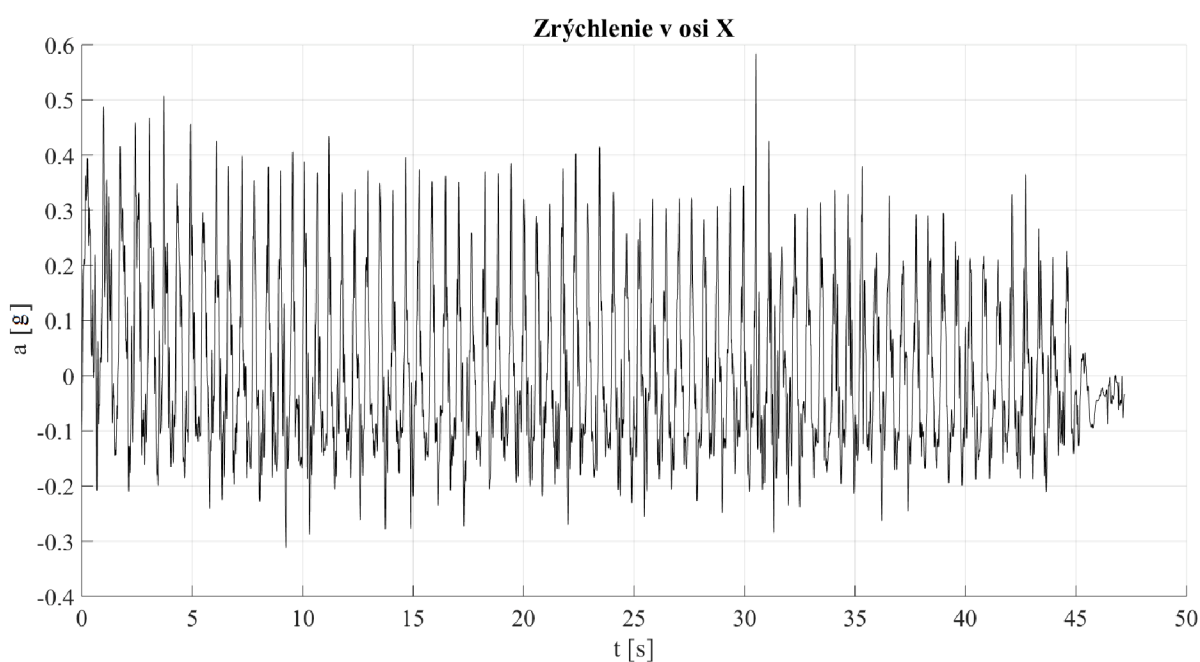
Obr. 6.2: Samuel Baláz počas tréningu s meracím zariadením.

6.3. Kinematické veličiny

Počas testov boli zmerané a vyhodnotené kinematické veličiny pomocou metód popísaných v kapitole 5. Pre meranie dát bol použitý Python, nainštalovaný na aplikačnej doske Raspberry Pi Zero W a vyhodnotenie dát bolo vykonané na osobnom počítači v prostredí Matlab. Všetky zobrazené dáta boli zmerané na 200 m trati, ktorá trvala približne 45 s.

6.3.1. Zrýchlenie

Výsledné zrýchlenie lode vypočítané odčítaním gravitačného vektora od zmeraného zrýchlenia, v smere osi X je zobrazené na obr. 6.3. Zrýchlenie je tesne po štarte cca počas prvých 5 s prevažne kladné, čo značí akceleráciu lode do traťovej rýchlosti, potom sa stabilizuje a kmitá okolo 0.

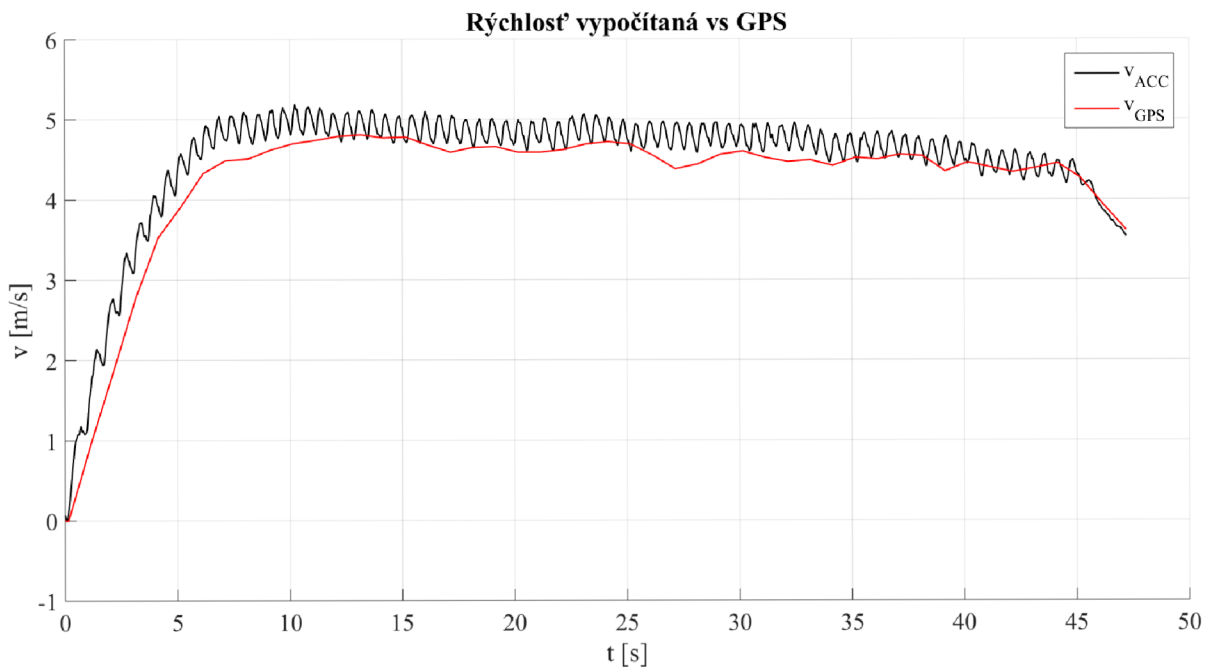


Obr. 6.3: Priebeh zrýchlenia v smere osi X.

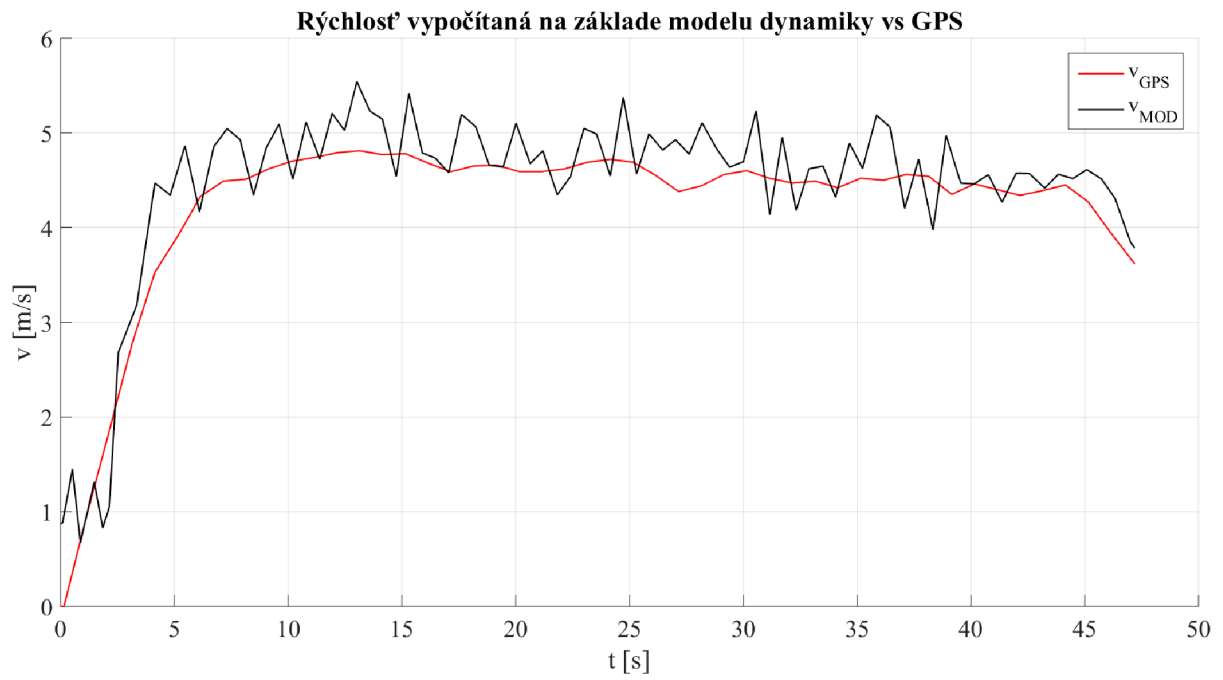
6.3. KINEMATICKÉ VELIČINY

6.3.2. Rýchlosť

Rýchlosť lode je znázornená na obr. 6.4. V tomto obr. je rýchlosť porovnaná s referenčnou rýchlosťou získanou z GPS. Použité GPS bolo Garmin Forerunner 230, so vzorkovacou frekvenciou 1 Hz [18]. Zatiaľ čo GPS je spoľahlivejším zdrojom informácie o rýchlosti, so svojou nízkou vzorkovacou frekvenciou nedokáže zobraziť intracyklickú rýchlosť, v čom vynikajú zase senzory inerciálnych veličín. Vo výpočte rýchlosti pomocou IMU dochádza k miernemu sklzu z referenčnej rýchlosti získanej pomocou GPS. Na druhej strane, odozva GPS na zmenu rýchlosti je tiež pomalšia ako u IMU. Na obr. 6.5 je zobrazené porovnanie rýchlosti získanej na základe znalosti dynamiky popísanej v sekcii 5.10.4 a rýchlosti z GPS. Síce sa jedná o kinematickú veličinu, na jej výpočet bolo potrebné zahrnúť aj dynamiku, ktorá bola estimovaná pomocou identifikácie parametrov. Výpočet je vykonaný iba raz za jeden záber, čiže je závislý od frekvencie pádlovania. Tento spôsob nie je vhodný na meranie pri malých rýchlostiach (<8 km/h), keďže je citlivý na šum, ktorý je pri malých rýchlostiach a teda aj zrýchleniach v porovnaní s meranými veličinami signifikantný. Hodnoty majú pomerne veľký rozptyl, ale poskytujú referenciu pre overenie absolútnej rýchlosti.



Obr. 6.4: Priebeh rýchlosti v smere osi X.

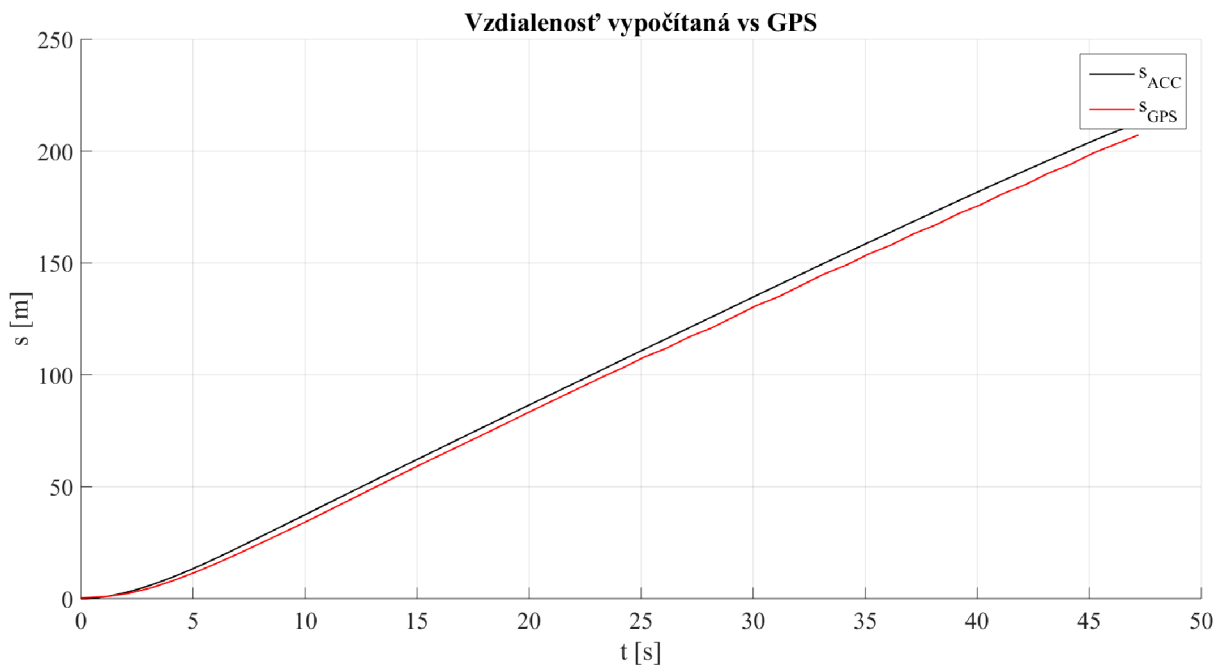


Obr. 6.5: Výpočet rýchlosti na základe dynamického modelu.

6.3. KINEMATICKÉ VELIČINY

6.3.3. Vzďialenosť

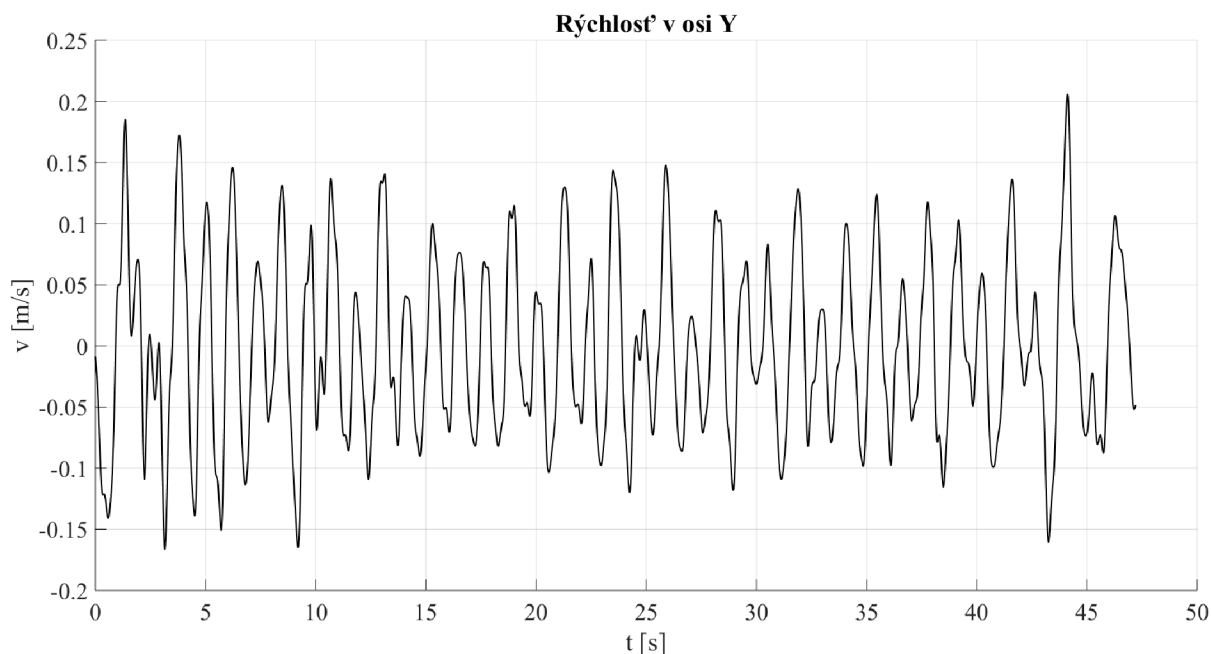
Integráciou rýchlosti bola vypočítaná prejdená vzdialenosť, znázornená na obr. 6.6, kde je opäť porovnaná s meraním GPS. Opäť je prítomný mierny sklz z referenčnej hodnoty GPS. Vzdialenosť 200 m bola podľa IMU prekonaná približne o 1 s skôr ako u GPS. Pri väčších vzdialenostiach by začala byť táto chyba signifikantná a informácie o prejdenej vzdialenosti takmer nepoužiteľné. Merané úseky boli vždy vykonané na známej vzdialenosti vyznačenej oficiálnymi bójami, ktoré ohraničujú dráhu kanoistického kanála.



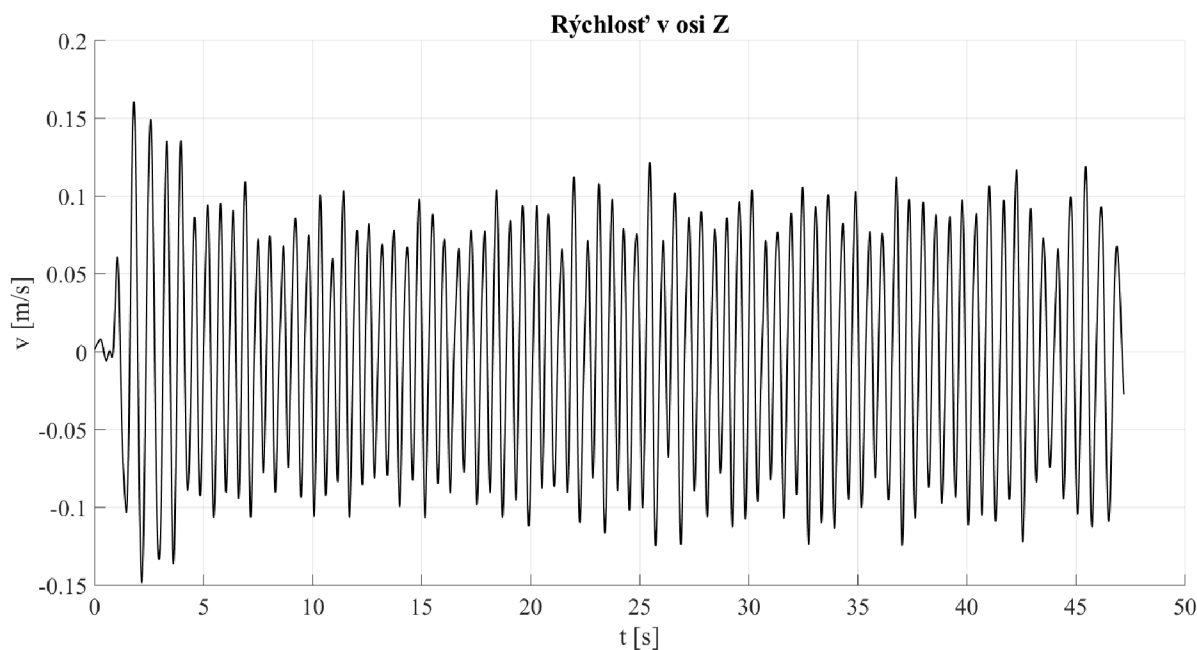
Obr. 6.6: Priebeh prekonanej vzdialenosti.

6.3.4. Kolmé kinematické veličiny

Priebehy rýchlosti v osiach Y a Z sú znázornené na obr. 6.7 a 6.8. Tieto rýchlosti sú dôležitým ukazovateľom nechcených pohybov negatívne pôsobiacich na hydrodynamický odpor lode. Vo všeobecnosti platí, že čím sú menšie, tým efektívnejšie sa loď pohybuje prostredím. Ich efektívna hodnota počas meraného úseku je uvedená v tab. 6.1.



Obr. 6.7: Rýchlosť lode v laterálnom smere - Y.



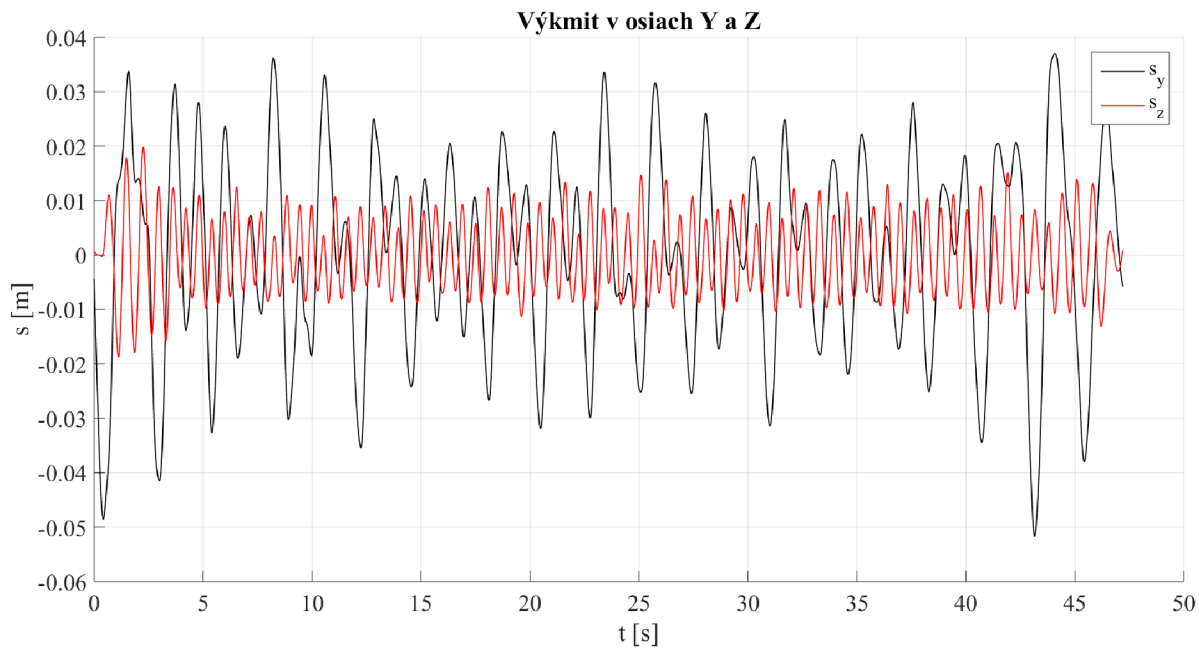
Obr. 6.8: Rýchlosť lode vo vertikálnom smere - Z.

6.3. KINEMATICKÉ VELIČINY

| Veličina | Hodnota | Jednotky |
|-------------|---------|----------|
| $v_{y,RMS}$ | 0.073 | m/s |
| $v_{z,RMS}$ | 0.067 | m/s |

Tabuľka 6.1: Efektívne hodnoty rýchlostí v osi Y a Z.

S kolmými rýchlosťami lode súvisí aj veľkosť kmitu, ktorý pri tomto pohybe vykoná. Pohyby lode v osiach Y a Z sú zobrazené na obr. 6.9. Taktiež platí, že čím menšie sú, tým efektívnejší je pohyb lode. Priemerne amplitúdy kmitov dosahujú hodnoty 3 až 4 cm v osi Y a 1 až 2 cm v osi Z.



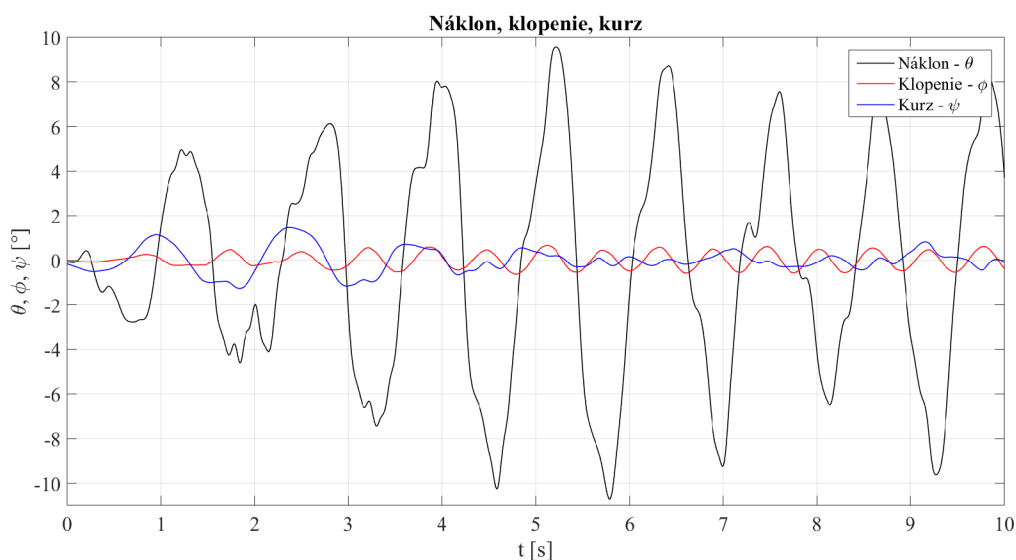
Obr. 6.9: Výkmity lode v smere Y a Z.

6.3.5. Náklon, klopenie a kurz

Ďalšími dôležitými indikátormi sú rotácie lode. Z tvaru kajaku vyplýva, že je najnáchylnejší na náklony, ktoré sú v porovnaní s klopením a kurzom veľké. Ich priebeh, pre prehľadnosť iba počas prvých 10 s je znázornený na obr. 6.10. Z obrázku je možné identifikovať, že prvý záber bol na ľavú stranu a že pri malej rýchlosti je zmena kurzu najväčšia, kvôli tomu, že loď nie je v tomto smere stabilizovaná obtekaním vody. Klopenie je konzistentné a nedochádza uňho k veľkým rozptylom. Počas pádlovania dochádzalo k náklonu až do hodnoty 10° , čo by malo byť pre dobrú efektívnosť minimalizované. Kladné hodnoty náklonu a kurzu znamenajú záber pravou rukou. Efektívne hodnoty rotácií sú uvedené v tab. 6.2.

| Veličina | Hodnota | Jednotky |
|----------------|---------|----------|
| ϕ_{RMS} | 4,60 | $^\circ$ |
| θ_{RMS} | 0,33 | $^\circ$ |
| ψ_{RMS} | 0,35 | $^\circ$ |

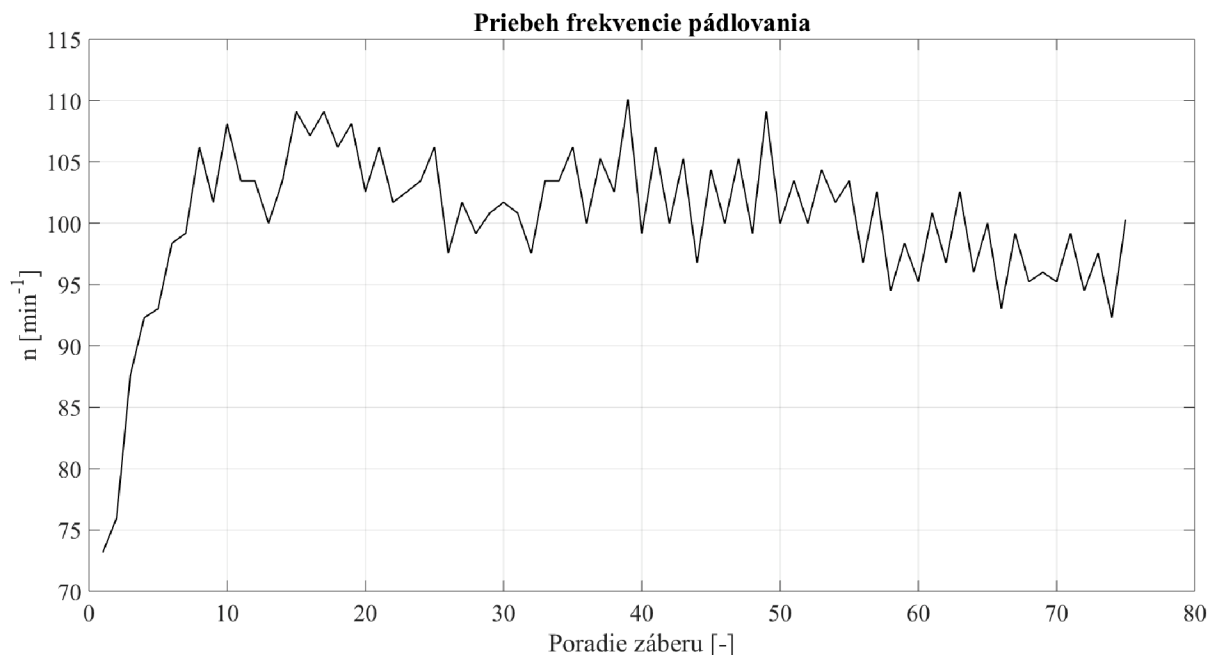
Tabuľka 6.2: Efektívne hodnoty náklonu, klopenia a kurzu.



Obr. 6.10: Náklon, klopenie, kurz.

6.3.6. Frekvencia pádlovania

Často spomínaným faktorom HTVK je práve frekvencia pádlovania a zvolenie čo najlepšieho kompromisu. Príliš nízka frekvencia je zdrojom nerovnomernosti pohybu, čo núti kajakára sa pri každom zábere rozbehnúť o trochu viac ako keby pádloval rýchlejšie. Príliš vysoká frekvencia je náročná na motorické schopnosti a vyžaduje energiu potrebnú pre nadmerný pohyb končatín. Pribeh frekvencie na meranom úseku je zobrazený na obr. 6.11. Záberov bolo v meranom úseku na 200 m trati 75. Frekvencia tesne po štarte stúpa z hodnoty 75 /min a po rozbehnutí lode sa dostáva na ustálenú maximálnu hodnotu a vplyvom únavy ku koncu klesá.



Obr. 6.11: Pribeh frekvencie pádlovania počas úseku.

6.4. Dynamické veličiny

6.4.1. Parametre dynamického systému

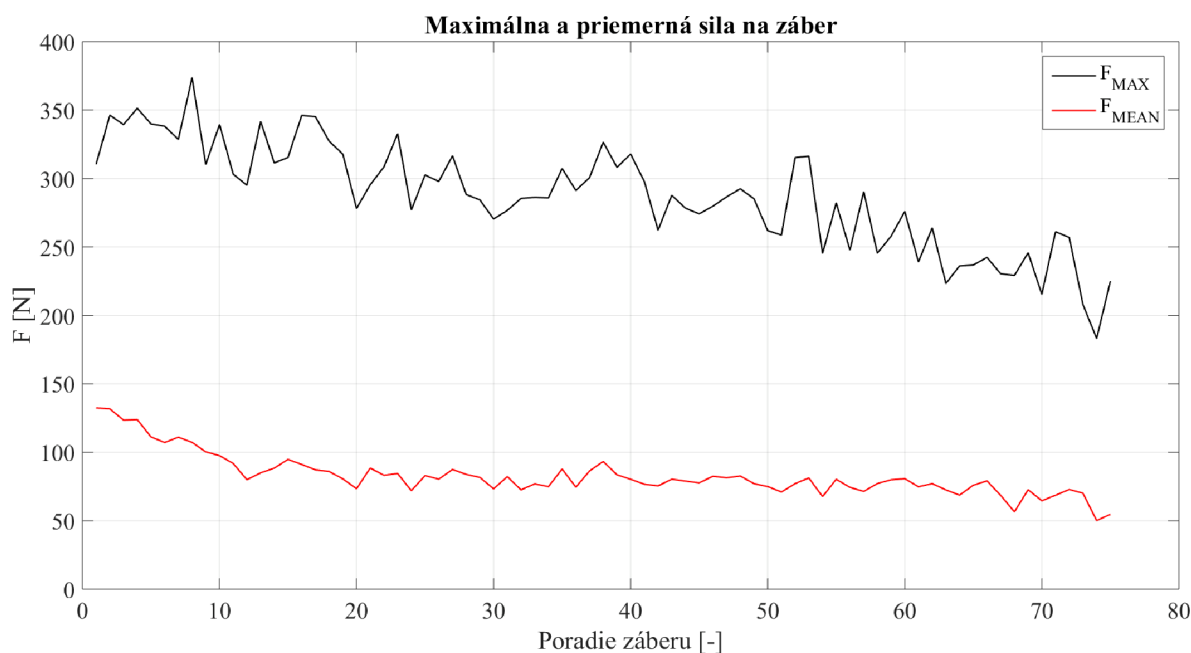
Parametre dynamického systému boli estimované a sú uvedené v tab. 6.3. Na uvedené hodnoty b a n má vplyv veľký počet faktorov, ako napr. vietor, viskozita vody, hmotnosť sústavy, prúd vody, tvar lode, atď. Presnosť určenia týchto parametrov je citlivá na podmienky, v ktorých kajakár pádluje. Bohužiaľ neboli k dispozícii žiadne overené hodnoty týchto parametrov, napr. od výrobcu lodí. Identifikácia prebiehala na kludnej vode s miernym vetrom, pričom dáta použité na IPDS boli z pohybu proti vetru, aj po vetre.

| Veličina | Hodnota | Jednotky |
|----------|---------|------------|
| b | 2,642 | Ns^2/m^2 |
| n | 1,95 | - |

Tabuľka 6.3: Identifikované parametre dynamického systému.

6.4.2. Sila záberu

Pomocou uvedených parametrov bolo možné ku kinematickej analýze pridať aj dynamickú. Pribeh sily v smere osi X vydanej kajakárom, je zobrazený na obr. 6.12. Priemerná max. sila na záber bola 284 N a priemer priemernej sily bol 82 N. Pre kontrolu, publikácia [8] uvádza priemernú hodnotu maximálnej sily na 500 m trati u subelitného kajakára pre ľavú ruku 200,6 N, pre pravú 213,5 N. Treba ešte uviesť, že do vyobrazených hodnôt nie je zahrnutá doba medzi zábermi, ale iba samotné zábery. Na štarte, keď loď ešte nedosiahla cestovnú rýchlosť je sila najväčšia, počas trate si drží ustálenú hodnotu a ku koncu začína vplyvom únavy kajakára klesať. V článku [33] autor tvrdí, že priemerná a maximálna sila by mali byť čo najbližšie, aby sa dosiahlo obdĺžnikového priebehu sily.

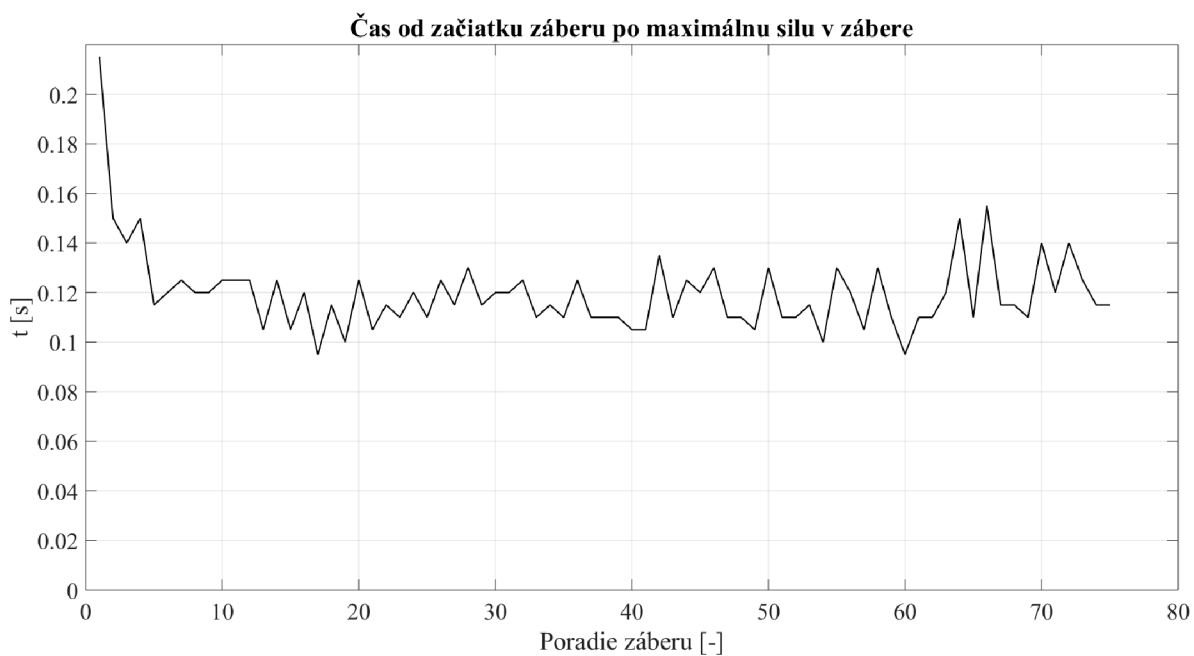


Obr. 6.12: Pribeh maximálnej dosiahnutej a priemernej sily pre jednotlivé zábery.

6.4. DYNAMICKÉ VELIČINY

6.4.3. Čas maximálnej sily

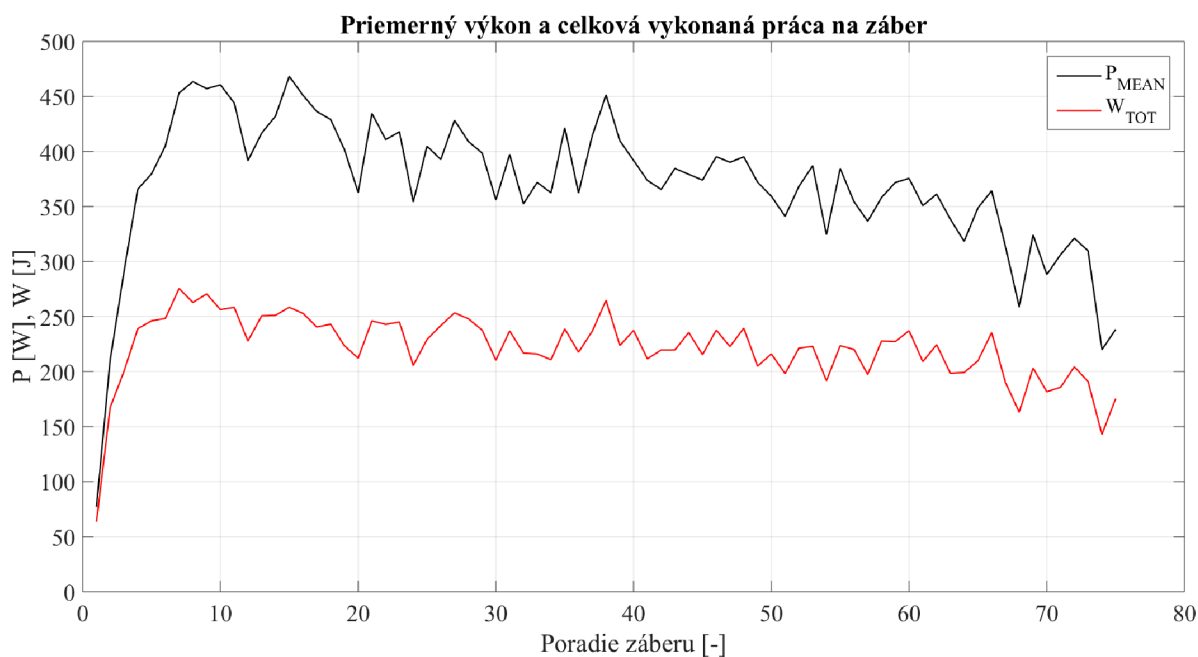
V nadväznosti na predchádzajúce tvrdenie o obdĺžnikovom priebehu sily je zobrazený aj čas od začiatku záberu po dosiahnutie maximálnej sily v zábere - t_{maxF} . Toto je vyobrazené na obr. 6.13. Po štarte pri malej rýchlosti je evidentne veľký t_{maxF} , potom sa stabilizuje a ku koncu opäť vplyvom únavy veľmi málo narastá.



Obr. 6.13: Čas po dosiahnutie maximálnej sily v zábere.

6.4.4. Výkon a práca záberu

Dôležitejšími ukazovateľmi ako sila záberu sú výkon a celková energia vložená do pohybu lode (práca). Výkon na rozdiel od sily berie do úvahy aj energiu vydanú na pohyb, nie len namáhanie sa kajakára¹. Pribeh priemerného výkonu a celková práca vykonaná na dopredný pohyb lode počas jednotlivých záberov sú zobrazené na obr. 6.14. Výkon nie je hneď pri štarte maximálny, ako tomu je u sily, ale postupne narastá až približne po dosiahnutie maximálnej rýchlosti. Potom opäť drží svoju hodnotu a ku koncu tiež klesá vplyvom únavy. Práca má veľmi podobný priebeh, oproti výkonu a sile zahŕňa aj dĺžku záberu, nie len veľkosť dynamického pôsobenia. Cieľom efektívneho pádlovania je vynaložiť čo najmenšiu prácu pri čo najväčšej rýchlosti.



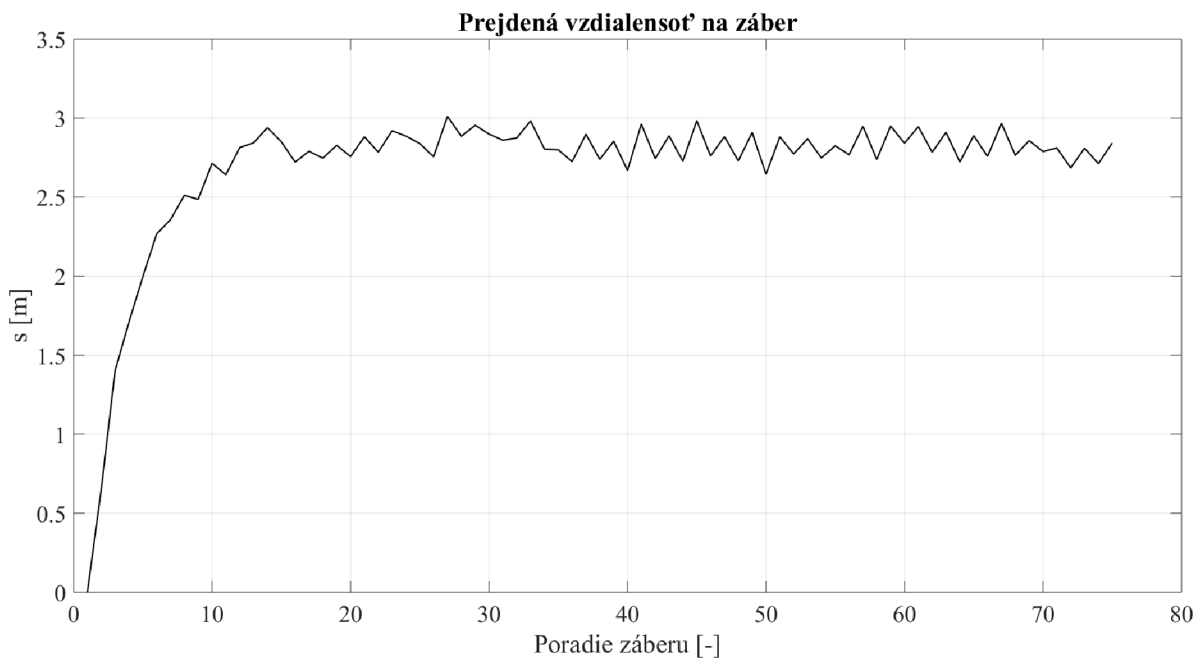
Obr. 6.14: Priebehy priemerného výkonu a celkovej vykonanej práce na záber.

Z obr. 6.14 a 6.12 je badateľné, že sila kajakára je najdôležitejšia práve pri štarte a rozbehu lode, ale pre dosiahnutie maximálnej rýchlosti je lepším ukazovateľom práve výkon, ktorý s ňou úzko súvisí. Preto na 200 m dištanciách nevyhrávajú najsvalnatejší kajakári, ktorí disponujú veľkou silou, ale najvýbušnejší, ktorí dosiahnu vyššiu traťovú rýchlosť.

¹Sval ľudského tela spotrebuje energiu aj napriek tomu, že žiadnu prácu nevykoná, napr. pri pôsobení sily pri nulovej rýchlosti.

6.4.5. Prejdená vzdialenosť na jeden záber

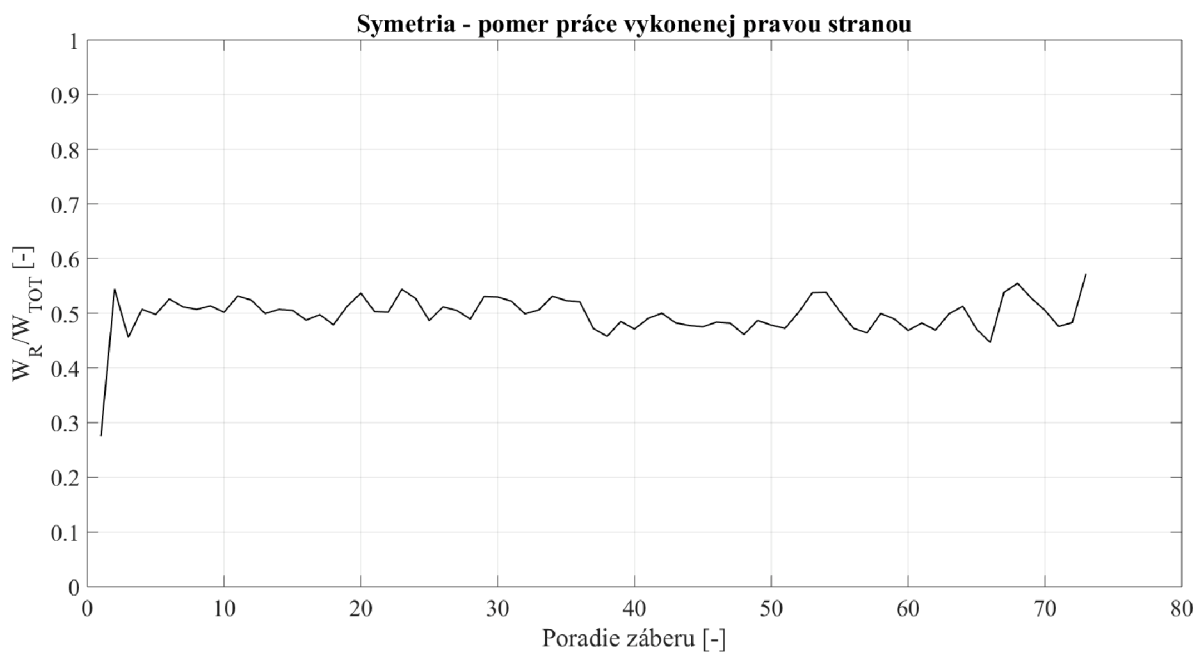
Pre dobrú efektivitu pádlovania je dôležité dosiahnuť tzv. kĺzanie lode, aby na jeden záber prešla čo najväčšiu vzdialenosť - s_1 . Na obr. 6.15 je zobrazená táto vzdialenosť pre každý záber. Pri analýze obr. 6.4, 6.11, 6.12 a aktuálneho si možno všimnúť fakt, že frekvencia, sila, aj rýchlosť ku koncu úseku klesajú, kdežto s_1 nie. To znamená, že na daný úsek spraví kajakár približne rovnaký počet záberov, ale musí sa snažiť ich spraviť čo najrýchlejšie, aby bol čo najrýchlejší.



Obr. 6.15: Vzdialenosť prejdená na jeden záber.

6.4.6. Symetria

Vplyvom dominancie jednej strany u ľudí, aj v kanoistike dochádza pri pádlovaní k asymetrii. Na obr. 6.16 je znázornený pomer práce vykonanej pravou stranou k práci vykonanej oboma stranami za posledné dva zábery. Hodnoty väčšie ako 0,5 znamenajú prevahu pravej strany, menšie ako 0,5 lavej. Nízka hodnota na začiatku úseku je spôsobená tým, že prvý záber bol na ľavú ruku.



Obr. 6.16: Symetria pádlovania vyjadrená pomerom vykonanej práce.

7. Záver

V rámci diplomovej práce boli preskúvané metódy hodnotenia techniky a výkonu v rýchlostnej kanoistike, s ohľadom na možnosti použitého druhu senzora.

Tieto poznatky boli využité pri návrhu meracieho zariadenia, ktoré využívalo senzory inerciálnych veličín. Skladalo sa z 9-DOF jednotky pripojenej k aplikačnej doske Raspberry Pi Zero W. Aby bolo zariadenie použiteľné v kanoistike, puzdro zariadenia bolo vodotesné.

Bol navrhnutý 3D model puzdra a jeho reálna verzia bola vyrobená pomocou aditívnych technológií výroby. Ostatné súčiastky boli zakúpené a zložené do finálneho prototypu, ktorý bol použitý pri meraní kinematických veličín. Správa a chod IMU jednotky a ukladanie dát bolo naprogramované v jazyku Python. Týmto spôsobom obdržané kinematické veličiny boli spracované a analyzované v prostredí Matlab.

Z priebehu nameraných veličín boli identifikované parametre dynamického systému a do analýzy bola zahrnutá aj dynamika pádlovania. Vyhodnotená data boli hlavne rýchlosť, rotácie loďe, pohyby kolmé na smer pohybu, frekvencia pádlovania, sila, výkon a práca záberu a symetria pádlovania. Priebehy rýchlosti a vzdialenosti boli overené pomocou GPS. Všetky ciele tak boli splnené.

Nedostatkom metódy hodnotenia je obtiažnosť overenia vyhodnotených dát. Okrem priebehov rýchlosti a vzdialenosti nebolo možné zmerať dáta nijakým spôsobom overiť, iba porovnať s výsledkami cudzích prácí. Otázne sú hodnoty zmeraných parametrov dynamického systému, pri ktorých výpočte boli zavedené značné zanedbania ďalších vplyvov. Pre získanie absolútnych hodnôt dynamiky pádlovania je metóda spochybniteľná, ale výsledky je možné porovnať medzi sebou, čiže prináša relatívnu referenciu. Výhodou však oproti presnejším tenzometrickým silomerom zostáva fakt, že navrhnuté zariadenie je použiteľné na ľubovoľnom type loďe a nepridáva mŕtvu hmotnosť na pádlo. Spresnenie dynamických veličín by mohlo byť dosiahnuté po získaní presného modelu hydrodynamiky lodí od ich výrobcov, ktorí v rámci vývoja tento výskum robia. Tieto údaje sú však zvyčajne obchodným tajomstvom. Po vykonaní dostatočného počtu meraní by sa dala definovať závislosť parametrov dynamického systému na hmotnosti a type loďe. Napriek neurčitej presnosti výpočtu dynamiky prekvapivo dobre fungoval výpočet rýchlosti na základe dynamického modelu.

Ďalšou možnosťou vývoja by bolo použitie a fúzia dát aj zo senzora GPS, aby bola vypočítaná rýchlosť doplnená o absolútnu referenciu.

Taktiež použitie RPi pre správu IMU prináša do tejto problematiky univerzálnosť a obrovské možnosti ďalšieho vývoja. Algoritmy spracovania dát by sa dali implementovať priamo do zariadenia a pomocou displeja, či bezdrôtového prenosu by bola športovcovi dodávaná aj okamžitá spätná väzba. Spomínaný bezdrôtový prenos by sa dal využiť aj k doručeniu dát trénerovi sprevádzajúceho zverca na motorovom člne.

Všetky súčiastky okrem puzdra boli ľahko dostupné v internetových obchodoch a preto je zariadenie ľahko replikovateľné. Ak by bol vyhodnocovací algoritmus preprogramovaný do iného jazyka, napr. Python, bol by všetok použitý SW bezplatne dostupný na internete. Ďalším rozšírením by mohlo byť porovnanie rôznych výkonnostných skupín, juniorov, či žien. Zaujímavé by bolo aj použitie tohto zariadenia v posádkach K2 či K4, kde sa vyžaduje synchronizácia všetkých členov posádky a analyzovať rozdiely časov impulzov u jednotlivých členov posádky. Taktiež by bolo zaujímavé použiť toto zariadenie u veslárov, či na dračích lodiach.

Literatúra

- [1] Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor. *Adafruit* [online]. New York City: Adafruit, 2015, 2015-04-22 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor/overview>
- [2] Adafruit LSM9DS0 Accelerometer + Gyro + Magnetometer 9-DOF Breakouts. *Adafruit* [online]. New York City: Adafruit, 2014, 2014-08-04 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-lsm9ds0-accelerometer-gyro-magnetometer-9-dof-breakouts/overview>
- [3] Adafruit Precision NXP 9-DoF B. In: *Micro Robotics* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.robotics.org.za/AF3463>
- [4] Aircraft principal axes. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2015 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_principal_axes
- [5] GOMES, Beatriz, Nuno VIRIATO, Ross SANDERS, Filipe CONCEIÇÃO, Mário VAZ a João Paulo VILAS-BOAS. Analysis of single and team kayak acceleration. In: *ISBS-Conference Proceedings Archive*. 2011, 1(1). ISSN 1999-4168.
- [6] GOMES, Beatriz, Nuno VIRIATO, Ross SANDERS, Philippe CONCEIÇÃO, J. Paulo VILAS-BOAS a Mário VAZ. *Analysis of the on-water paddling force profile of an elite kayaker*. Porto, 2011/01/01, 11 (supl 2).
- [7] MADGWICK, Sebastian. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report x-io and University of Bristol (UK)*. 2010, 25.
- [8] AITKEN, David A. a Robert J. NEAL. An On-Water Analysis System for Quantifying Stroke Force Characteristics during Kayak Events. *International Journal of Sport Biomechanics*. 1992, 8(2), 165-173. DOI: 10.1123/ijsb.8.2.165. ISSN 0740-2082. Dostupné také z: <http://journals.humankinetics.com/doi/10.1123/ijsb.8.2.165>
- [9] MUNGUÍA, Rodrigo a Antoni GRAU. A Practical Method for Implementing an Attitude and Heading Reference System. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014, 11(4), s. 62-. DOI: 10.5772/58463. ISSN 1729-8814. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.5772/58463>
- [10] BAKER, John. Biomechanics of paddling. In: *ISBS-Conference Proceedings Archive*. 2012, 1(1). ISSN 1999-4168.
- [11] Capacitive accelerometer operation. In: *GlobalSpec: Powered by IEEE GlobalSpec* [online]. 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://insights.globalspec.com/article/1263/specifying-an-accelerometer-function-and-applications>
- [12] Circuit Notes Raspberry Pi Pinout Diagram | Circuit Notes. In: *Jameco Electronics* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.jameco.com/Jameco/workshop/circuitnotes/raspberry-pi-circuit-note.html>

LITERATÚRA

- [13] Conversion between quaternions and Euler angles. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2016 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Conversion_between_quaternions_and_Euler_angles
- [14] Digitrainer. *Braća-sport* [online]. Budapest, 2012 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://paddles.braca-sport.com/accessories/digitrainer.html>
- [15] Drag comparison. In: *The Science Pundit* [online]. 2010 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://thesciencepundit.blogspot.sk/2010/04/air-friction-myths.html>
- [16] BIFARETTI, S., V. BONAIUTO, L. FEDERICI, M. GABRIELI a N. LANOTTE. E-kayak: A Wireless DAQ System for Real Time Performance Analysis. *Procedia Engineering* [online]. 2016, 147, 776-780 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.319. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816307664>
- [17] ANDERSON, J. Energy Systems in Sport and Exercise. *Sports fitness advisor* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.sport-fitness-advisor.com/energysystems.html>
- [18] Forerunner 230. *Garmin* [online]. 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://buy.garmin.com/en-US/US/p/523893>
- [19] Form Drag — Pressure Drag. In: *Nuclear Power* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/what-is-drag-air-and-fluid-resistance/form-drag-pressure-drag/>
- [20] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, 2010. ISBN 978-144-1964-663.
- [21] PEDLEY, Mark. *High-Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer: AN4399*. 2. Freescale Semiconductors, 2015. Dostupné také z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4399.pdf
- [22] JANALÍK, Jaroslav. *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje*. Ostrava, 2008. Učebnice. Technická Univerzita Ostrava.
- [23] SZANTO, Csaba. *ICF Coaches Education Programme: Canoe Sprint : Level 2 and 3 : Coaching Manual*. Lausanne: International Canoe Federation, 2010.
- [24] Introducing Raspberry Pi Zero W. *The MagPi Magazine* [online]. Raspberry Pi, 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/magpi/pi-zero-w/>
- [25] ADAMS, Thomas M. a Richard A. LAYTON. *Introductory MEMS: fabrication and applications*. New York: Springer, c2010. ISBN 03-870-9511-X.
- [26] KUMPÁN, P. *Jednotka pro analýzu pohybu závodních plavců*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta Strojního Inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

- [27] Kondenzátor (elektrotechnika). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2012 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [https://sk.wikipedia.org/wiki/Kondenz%C3%A1tor_\(elektrotechnika\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Kondenz%C3%A1tor_(elektrotechnika))
- [28] Location of connectors and main ICs. In: *Wikiwand* [online]. Wikiwand [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/en/Raspberry_Pi
- [29] Martin Fuksa C1. In: *Kanoe.cz* [online]. Balint Vekassy ICF, 2016 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: http://www.kanoe.cz/img/rychlost/2016/mata_me_balint1.jpg
- [30] GUICHARD, David. Numerical Integration. *Calculus: early transcendentals* [online]. Department of Mathematics, Whitman College [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.whitman.edu/mathematics/calculus_online/section08.06.html
- [31] NXP Precision 9DoF Breakout. *Adafruit* [online]. New York City: Adafruit, 2017, 2017-04-14 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/nxp-precision-9dof-breakout/overview>
- [32] VADAI, G., G. MAKAN, Z. GINGL, R. MINGESZ, J. MELLÁR, T. SZÉPE a A. CSAMANG-. On-water measurement and analysis system for estimating kayak paddlers' performance. In: *2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2013, s. 131-136.
- [33] GOMES, Beatriz B., Nuno V. RAMOS, Filipe A.V. CONCEIÇÃO, Ross H. SANDERS, Mário A.P. VAZ a João Paulo VILAS-BOAS. Paddling Force Profiles at Different Stroke Rates in Elite Sprint Kayaking. *Journal of Applied Biomechanics* [online]. 2015, 31(4), 258-263 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.1123/jab.2014-0114. ISSN 1065-8483. Dostupné z: <http://journals.humankinetics.com/doi/10.1123/jab.2014-0114>
- [34] CHOTAŠ, K. *Polohový a kurzový referenční systém*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Stanislav Klusášek, Ph.D.
- [35] Pressure Drag. *How things fly?* [online]. Washington: Smithsonian National Air and Space Museum [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://howthingsfly.si.edu/aerodynamics/pressure-drag>
- [36] Coeficiente de arrastre. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2014 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre
- [37] GREIF, Vladimír. *Prúdenie plynov a kvapalín - aero- a hydrodynamika*. Bratislava: Katedra inžinierskej geológie, 2015. Dostupné také z: <http://www.kaeg.sk/wp-content/uploads/2014/09/Fyzika-8-plyny-a-kvapaliny-2015.pdf>
- [38] WALCHKO, Kevin J. *Python drivers for Adafruit Precision NXP 9-DOF*. MIT, 2017. Dostupné také z: https://github.com/MomsFriendlyRobotCompany/nxp_imu
- [39] STROHMEIER, M. *Quaternion based Extended Kalman Filter*. 1. Würzburg: Universität Würzburg, 2016. Dostupné také z: https://wuecampus2.uni-wuerzburg.de/moodle/pluginfile.php/1109745/mod_resource/content/1/QEKF_Floatsat_WS16.pdf

LITERATÚRA

- [40] Rio 2016 Canoe Sprint Format and Rules. *International Canoe Federation* [online]. Lausanne: International Canoe Federation, 2016 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://www.canoeicf.com/olympic-canoe-sprint-format-and-rules>
- [41] Roll, pitch, yaw. In: *CHRobotics* [online]. [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www.chrobotics.com/library/understanding-quaternions>
- [42] Second-order systems. *Modeling dynamics and control* [online]. Massachusetts: MIT, 2005, s. 25-50 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-003-modeling-dynamics-and-control-i-spring-2005/readings/notesinstalment2.pdf>
- [43] HOUSE, Morgan. Sprint Kayak Stroke Analysis. In: *YouTube* [online]. 2.12.2016 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=e8mKZOfJS1Y>
- [44] DA ROCHA BARROS, Francisco Lobato. *Study of Kayak Hull Design on Calm Water Resistance*. Fevereiro, 2015. Diplomová práca. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [45] Stupeň ochrany krytom. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Stupeň_ochrany_krytom
- [46] XIA, Dunzhu, Cheng YU a Lun KONG. The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology. *Sensors* [online]. 2014, 14(1), 1394-1473 [cit. 2018-05-06]. DOI: 10.3390/s140101394. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/1/1394>
- [47] The Shape of the Canoe. *Green Valley Boat Works* [online]. Ontario [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.greenval.com/shape_part1.html
- [48] PEDLEY, Mark. *Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer: AN3461*. 6. 2013. Dostupné také z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3461.pdf>
- [49] Tom Liebscher K1. In: *Kanu Club Dresden* [online]. Dresden: Kanu Club Dresden, 2016 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://kc-dresden.de/aktuelles/europameister-k1-500m -gl%C3%BCckwunsch-tom-liebscher>
- [50] GREPL, Robert. *Úvod do Kalmanova filtru*. 2. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2014.
- [51] What is Canoe Sprint?. *International Canoe Federation* [online]. Lausanne [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.canoeicf.com/discipline/canoe-sprint>
- [52] STURM, Dennis. *Wireless Multi-Sensor Feedback Systems for Sports Performance Monitoring: Design and Development: Design and Development*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2012. Disertace. KTH Royal Institute of Technology. Vedoucí práce Lars-Åke Brodin.

- [53] SIMÕES, N. D., J. L. GONÇALVES, M. L. CAEIRO, M. J. BOAVIDA a F. D. CARDOSO. ZigBee/GPS tracking system for rowing races. In: *2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool*. 2011, s. 1-4. DOI: 10.1109/EUROCON.2011.5929248.
- [54] 3D Kayak Design. In: *3dkayakdesign* [online]. UK: Liam Heath [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.3dkayakdesign.com/>
- [55] HOJDÍK, Matej. *9DOF modul pro měření orientace v prostoru*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

Zoznam použitých skratiek a veličín

| | |
|------|----------------------------------------------|
| 3D | trojdimenzionálny |
| ADC | analog to digital conversion |
| C1 | single kanoe |
| CFD | computer fluid dynamics |
| CPU | central processing unit |
| DAC | digital to analog conversion |
| DOF | degrees of freedom |
| DPS | doska plošných spojov |
| FM | frequency modulation |
| (g) | globálny súradnicový systém |
| GPIO | general purpose input/output |
| GPS | global positioning system |
| HTVK | hodnotenie techniky a výkonu v kanoistike |
| HW | hardware |
| I2C | inter-integrated circuit |
| ICF | International Canoe Federation |
| IMU | inertial measurement unit |
| IPDS | identifikácia parametrov dynamického systému |
| K1 | single kajak |
| LCD | liquid crystal display |
| MEMS | micro-electro-mechanical system |
| ODR | output data-rate |
| OS | operačný systém |
| PC | personal computer |
| RAM | random access memory |
| RK | rýchlostná kanoistika |
| RPi | Raspberry Pi |

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A VELIČÍN

| | |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| SPI | serial peripheral interface |
| SW | software |
| ss | súradnicový systém |
| (t) | telesový súradnicový systém |
| USB | universal serial bus |
| a | zrýchlenie [m/s^2] |
| a_{i+} | výstup akcelerometra v pozitívnom smere gravitácie [bit] |
| a_{i-} | výstup akcelerometra v negatívnom smere gravitácie [bit] |
| \mathbf{a}_k | meranie akcelerometra v kroku k |
| a_x | zrýchlenie v osi X [m/s^2] |
| a_{yOrig} | nekompenzované zrýchlenie v osi Y [m/s^2] |
| a_{yRoll} | fiktívne zrýchlenie v Y spôsobené náklonom [m/s^2] |
| A | priečna plocha telesa [m^2] |
| b | súhrnný koeficient hydrodynamického odporu [Ns^2/m^2] |
| \mathbf{b}_a | vektor biasu akcelerometra |
| \mathbf{b}_g | vektor biasu gyroskopu |
| $\mathbf{b}_{g k}$ | vektor stavového biasu gyroskopu v kroku k |
| B_{ai} | bias akcelerometra [bit] |
| B_{gi} | bias gyroskopu [bit] |
| c | tlmenie [Ns/m] |
| C | kapacita kondenzátora [F] |
| C_d | koeficient hydrodynamického odporu [$-$] |
| d | vzdialenosť dosiek kondenzátora [m] |
| D | priemer [m] |
| f | frekvencia [Hz] |
| \mathbf{f} | propagačná funkcia stavu |
| \mathbf{f}_q | propagačná funkcia stavového quaternionu |
| \mathbf{f}_ω | propagačná funkcia stavovej uhlovej rýchlosti |

| | |
|--------------------------|---------------------------------------------------------|
| \mathbf{fb}_g | propagačná funkcia stavového biasu gyroskopu |
| \mathbf{f}_a | vektor surového výstupu akcelerometra |
| f_{ai} | surový výstup akcelerometra |
| f_n | prirodzená frekvencia [Hz] |
| f_{ref} | referenčná frekvencia platného pásma akcelerometra [Hz] |
| F | sila [N] |
| F_d | odporová sila [N] |
| \mathbf{F}_k | jakobián propagačnej funkcie |
| F_{mean} | stredná sila záberu [N] |
| F_{peak} | maximálna sila záberu [N] |
| F_p | sila záberu [N] |
| F_v | sila vnútorného trenia kvapaliny [N] |
| g | gravitačné zrýchlenie [m/s^2] |
| \mathbf{G}_a | matica gainu akcelerometra |
| G_i | gain akcelerometra [-] |
| \mathbf{h} | propagačná funkcia merania |
| \mathbf{H}_k | jakobián propagačnej funkcie merania |
| k | tuhosť [N/m] |
| \mathbf{K}_k | Kálmánovo zosilnenie v kroku k |
| L | dĺžka [m] |
| m | hmotnosť [kg] |
| n | mocnina rýchlosti [-] |
| P | výkon [W] |
| \mathbf{P}_{init} | inicializácia matice kovariácie stavu |
| \mathbf{P}_k | matica kovariácie stavu v kroku k |
| $\hat{\mathbf{P}}_{k+1}$ | predikcia matice kovariácie stavu |
| q | quaternion |
| \mathbf{Q} | matica kovariácie šumu vstupu |

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A VELIČÍN

| | |
|----------------------|-----------------------------------------------------|
| q^* | konjugovaný quaternion |
| q_0 | skalárna časť quaternionu [-] |
| q_{1-3} | vektorová časť quaternionu [-] |
| \mathbf{q}_{init} | inicializácia stavového quaternionu |
| q_s | skalárna a časť quaternionu [-] |
| \mathbf{q}_r | vektorová časť quaternionu |
| \mathbf{q}_k | vektor stavového quaternionu v kroku k |
| $\dot{\mathbf{q}}_k$ | derivácia quaternionu |
| r | vzdialenosť zariadenia od osi náklonu [m] |
| \mathbf{r} | všeobecný vektor |
| \mathbf{r}_k | reziduál v kroku k |
| \mathbf{R} | matica kovarácie šumu merania |
| $\mathbf{R}^{(ab)}$ | rotačná matica z a do b |
| s | vzdialenosť [m] |
| s_1 | vzdialenosť prejdená na jeden záber [m] |
| s_a | citlivosť akcelerometra [$g/l\text{sb}$] |
| S | plocha [m^2] |
| \mathbf{s}_k | vektor vzdialenosti v kroku k |
| \mathbf{S} | matica kovariácie merania |
| \mathbf{S}_a | matica citlivosti akcelerometra |
| \mathbf{S}_g | matica citlivosti gyroskopu |
| t | čas [s] |
| T | vzorkovacia perióda [s] |
| t_{maxF} | čas po dosiahnutie maximálnej sily v zábere [s] |
| t_{read} | doba čítania dát [s] |
| t_{sleep} | doba spánku systému medzi čítaním dát [s] |
| \mathbf{u}_g | matica surového výstupu gyroskopu |
| $\mathbf{u}_{g k}$ | vektor vstupu gyroskopu v kroku k |

| | |
|--------------------|------------------------------------------------------|
| u_{gi} | surový výstup gyroskopu pre os i [bit] |
| v | rýchlosť [m/s] |
| v_{mod} | rýchlosť získaná z modelu dynamiky [m/s] |
| v_x | rýchlosť v osi X [m/s] |
| v_{yRMS} | efektívna hodnota rýchlosti v osi Y [m/s] |
| v_{zRMS} | efektívna hodnota rýchlosti v osi Z [m/s] |
| \mathbf{v}_k | vektor rýchlosti v kroku k |
| W | práca [J] |
| W_R | práca vykonaná pravou stranou za jeden záber [J] |
| W_{TOT} | práca vykonaná za jeden záber [J] |
| x | všeobecná súradnica vzdialenosti [m] |
| $\hat{\mathbf{x}}$ | predikcia stavového vektora |
| \mathbf{x}_k | stavový vektor kálmánovho filtra |
| y | všeobecná súradnica vzdialenosti [m] |
| z | všeobecná súradnica vzdialenosti [m] |
| \mathbf{z}_k | vektor predikcie merania |
| α_i | uhol medzi súradnicovými systémami |
| β_i | uhol medzi súradnicovými systémami |
| γ_i | uhol medzi súradnicovými systémami |
| Δt | perióda vzorkovacej frekvencie |
| ϵ_0 | permitivita vákua [F/m] |
| ϵ_r | relatívna permitivita [–] |
| ζ | koefficient útlmu [–] |
| η | koefficient dynamickej viskozity [Ns/m^2] |
| ϕ | uhol náklonu (roll) [rad] |
| ϕ_{RMS} | efektívna hodnota náklonu [$^\circ$] |
| ψ | uhol kurzu (yaw) [rad] |
| ψ_{RMS} | efektívna hodnota kurzu [$^\circ$] |

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A VELIČÍN

| | |
|-----------------|---------------------------------------------------|
| ρ | hustota [kg/m^3] |
| θ | uhol klopenia (pitch) [rad] |
| θ_{RMS} | efektívna hodnota klopenia [$^\circ$] |
| μ | stredná hodnota normálneho rozdelenia [$-$] |
| ν | koefficient kinematickej viskozity [m^2/s] |
| σ | štandardná odchýlka normálneho rozdelenia [$-$] |
| ω | vektor uhlových rýchlostí |
| ω_k | vektor stavových uhlových rýchlostí v kroku k |
| ω_{init} | inicializácia stavovej uhlovej rýchlosti |
| ω_n | vlastná uhlová rýchlosť [rad/s] |
| ω_d | tlmená uhlová rýchlosť [rad/s] |

Zoznam obrázkov

| | | |
|------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Martin Fuksa, pádlujúci na single kanoe. [29] | 5 |
| 3.2 | Tom Liebscher, pádlujúci na single kajaku. [49] | 6 |
| 3.3 | Metodika tréningového procesu. | 7 |
| 3.4 | Analýza techniky pomocou videozáznamu. [43] | 8 |
| 3.5 | Tlakový odpor. [19] | 9 |
| 3.6 | Laminárne a turbulentné prúdenie tekutiny okolo tuhého telesa. [22] | 10 |
| 3.7 | Vplyv tvaru telesa na zložky hydrodynamického odporu. [15] | 10 |
| 3.8 | Súčet zložiek hydrodynamického odporu a ich najlepší kompromis. [36] | 10 |
| 3.9 | Náklon, klopenie, kurz. [41] | 11 |
| 3.10 | Typická odozva správne navrhnutého akcelerometra. [20] | 14 |
| 3.11 | Princíp funkcie kapacitného akcelerometra. [11] | 15 |
| 3.12 | Princíp funkcie MEMS gyroskopu. [46] | 16 |
| 3.13 | Princíp Hallovoho javu. [25] | 16 |
| 3.14 | Polaritás DigiTrainer 2.0 [14] | 18 |
| 4.1 | Telesový a globálny súradnicový systém. [54] | 23 |
| 5.1 | Funkcia časovania čítania dát. | 26 |
| 5.2 | Cyklus ovládania a spätnej väzby. | 27 |
| 5.3 | Schéma zapojenia. [12] [3] [28] | 29 |
| 5.4 | Variant 1, oblý. | 32 |
| 5.5 | Variant 2, hranatý, pohľad zhora. | 33 |
| 5.6 | Variant 2, hranatý, s vekom, pohľad ISO. | 33 |
| 5.7 | Parazitné zrýchlenie spôsobené uhlovým zrýchlením náklonu lode. | 36 |
| 5.8 | Vstupný gravitačný vektor v osiach X a Y do KF. | 36 |
| 5.9 | Vstupný gravitačný vektor v osi Z do KF. | 37 |
| 5.10 | Fúzia dát prostredníctvom EKF. | 38 |
| 5.11 | Estimácia parametrov b a n . | 42 |
| 5.12 | Intervaly medzi zábermi. | 43 |
| 5.13 | Detekcia jednotlivých záberov. | 44 |
| 6.1 | Vnútorne rozloženie zariadenia a uzatvorené puzdro. | 45 |
| 6.2 | Samuel Baláž počas tréningu s meracím zariadením. | 46 |
| 6.3 | Priebeh zrýchlenia v smere osi X. | 47 |
| 6.4 | Priebeh rýchlosti v smere osi X. | 48 |
| 6.5 | Výpočet rýchlosti na základe dynamického modelu. | 49 |
| 6.6 | Priebeh prekonanej vzdialenosti. | 50 |
| 6.7 | Rýchlosť lode v laterálnom smere - Y. | 51 |
| 6.8 | Rýchlosť lode vo vertikálnom smere - Z. | 51 |
| 6.9 | Výkmity lode v smere Y a Z. | 52 |
| 6.10 | Náklon, klopenie, kurz. | 53 |
| 6.11 | Priebeh frekvencie pádlovania počas úseku. | 54 |
| 6.12 | Priebeh maximálnej dosiahnutej a priemernej sily pre jednotlivé zábery. | 55 |
| 6.13 | Čas po dosiahnutí maximálnej sily v zábere. | 56 |
| 6.14 | Priebehy priemerného výkonu a celkovej vykonanej práce na záber. | 57 |
| 6.15 | Vzdialenosť prejdená na jeden záber. | 58 |
| 6.16 | Symetria pádlovania vyjadrená pomerom vykonanej práce. | 59 |

Zoznam tabuliek

| | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Základné charakteristiky zakúpených sensorov. [31] [2] [1] | 22 |
| 5.1 | Teplotná závislosť kalibračných hodnôt sensorov. | 35 |
| 6.1 | Efektívne hodnoty rýchlosti v osi Y a Z. | 52 |
| 6.2 | Efektívne hodnoty náklonu, klopenia a kurzu. | 53 |
| 6.3 | Identifikované parametre dynamického systému. | 54 |

Zoznam príloh

1. Zdrojový kód pre meranie dát v prostredí Python
2. Zdrojový kód pre analýzu dát v prostredí Matlab