

ČVUT v Praze

PROTOTYP

**Přenosný modulární systém MoCap pro záznam a
vyhodnocování stavu příslušníků armády a záchranářů**

TM05000017-V1

Autoři:

Ing. Volf Petr

Ing. Hejda Jan Ph.D.

doc. Ing. Kutílek Patrik, Ph.D.

Ing. Hýbl Ján

Ing. Sokol Marek

Číslo projektu: TM05000017

Identifikační číslo výsledku: TM05000017-V1

Typ výsledku: Gprot - Prototyp

Projekt „Přenosný modulární MoCap systém pro záznam a hodnocení stavu příslušníků ozbrojených sil a záchranářů“ č. TM05000017 je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu DELTA 2“

Odpovědný pracovník: Ing. Ján Hýbl, PROKYBER

KLADNO 12/2024

Jazyk výsledku: CZE

Hlavní obor: FS - Lékařská zařízení, přístroje a vybavení

Uplatněn: ANO

Název výsledku česky:

Přenosný modulární systém MoCap pro záznam a vyhodnocování stavu příslušníků armády a záchranářů

Název výsledku anglicky:

Portable modular MoCap system for recording and evaluating the condition of members of the army and first responders

Popis výstupu/výsledku z návrhu projektu TM05000017 TAČR DELTA 2, v CZ:

Prototyp v podobě nositelného (IMU MEMS) a stacionárního (kamery, stabilizační platformy) zařízení vzájemně se synergicky doplňujících tak, aby bylo možné rychle a spolehlivě zaznamenávat data v terénu dle konkrétních potřeb příslušníků armády a první respondenti. Senzorová měření budou přenášena přes Ethernet nebo Wi-Fi do místního datového úložiště a InfluxDB. Architektura systému umožní paralelní synchronní sběr dat z více senzorových systémů.

Popis výstupu/výsledku z návrhu projektu TM05000017 TAČR DELTA 2, v EN:

The prototype in the form of wearable (IMU MEMS) and stationary (cameras, stability platforms) equipment synergistically complementing each other, so that it is possible to record quickly and reliably data in the field according to the specific needs of members of the army and first responders. Sensor measurements will be transmitted via Ethernet or Wi-Fi to the local data storage and InfluxDB. The system architecture will allow parallel synchronous data acquisition from multiple sensor systems.

Abstrakt k výsledku česky:

Prototyp je elektromechanický přístroj složený ze tří celků, v podobě jednoho nebo více nositelných IMU, dvou stacionárních kamer a jedné více stabilometrických platforem vzájemně se synergicky doplňujících tak, aby bylo možné rychle a spolehlivě zaznamenávat data v terénu dle konkrétních potřeb příslušníků armády a IZS. Senzorová měření jsou přenášena skrze USB, Wi-Fi nebo BLE rozhraní do mobilního počítače s InfluxDB. Architektura systému umožní paralelní synchronní sběr dat z více senzorových systémů.

Abstrakt k výsledku anglicky:

The prototype is an electromechanical device consisting of three units, in the form of one or more wearable IMUs, two stationary cameras and one or more stabilometric platforms, synergistically complementing each other so that it is possible to quickly and reliably record data in the field according to the specific needs of military and first responders. Sensor measurements are transmitted via USB, Wi-Fi or BLE interface to a mobile computer with InfluxDB. The system architecture will enable parallel synchronous data collection from multiple sensor systems.

Klíčová slova česky:

zdraví; pohyb; senzor; výcvik; fyzická aktivita; armáda; zásahové jednotky

Klíčová slova anglicky:

health; motion; sensor; training; physical activity; army; first responders

Vlastník výsledku: **Univerzita obrany,**

Fakulta vojenských technologií (IČO 60162694) - 100%

Lokalizace: **Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií**

Licence: **Ano**

Licenční poplatek: **Ne**

Ekonomické parametry:

Trh obsahuje pouze dílčí systémy navrženého řešení, které neumožňují souběžný monitoring pohybových a silových dat a jejich zpracování a využití k hodnocení charakteristik pohybu osob během výcviku. Realizace se zaměřuje na strukturu zařízení optimalizovaného pro komplexní záznam charakteristik pohybu osob během výcviku. Tímto umožňuje začátečníkům výcviku z příslušníků armády a IZS hodnotit kvalitu držení těla během výcviku a po nasazení. Zařízení umožňuje synchronní záznam z několika principiálně odlišných MoCap systémů. Obdobné zařízení není jako celek na trhu dostupné. Ekonomické přínosy vyplývají z možnosti nejen uplatnění při výcviku ale i sledování postury po nasazení a během aktivní služby, což vede k optimalizaci výcviku a úpravám profesních pohybových návyků aktivních složek.

Tržní uplatnitelnost dílčích částí systému je kontinuálně sledována komerčními partnery. Příklad uplatnitelnosti dílčího systému stabilometrických platforem je popsán v kap. 3.2

Kategorie nákladů: **výše nákladů $\leq$ 4 mil. Kč.**

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	4
SEZNAM TABULEK	6
1. OBECNÉ INFORMACE K HARDWARE	7
1.1. POPIS STRUKTURY SYSTÉMU	7
1.2. KOMUNIKACE MEZI KOMPONENTAMI HW	9
1.3. CHARAKTERISTIKY POUŽITÉHO PC	9
2. PODSYSTÉM NOSITELNÝCH SENZORŮ	11
2.1. CHARAKTERISTIKY PODSYSTÉMU NOSITELNÝCH SENZORŮ	11
2.2. REALIZOVANÉ ŘEŠENÍ	12
3. PODSYSTÉM STACIONÁRNÍCH SENZORŮ	22
3.1. KAMEROVÝ SYSTÉM	22
3.1.1. HARDWARE KAMEROVÉHO SYSTÉMU	22
3.1.2. SOFTWARE KAMEROVÉHO SYSTÉMU	24
3.2. STABILOMETRICKÉ PLATFORMY	30
3.2.1. KONSTRUKCE SILOMĚRNÉ PLOŠINY	33
3.2.2. SENZORY SILOMĚRNÉ PLOŠINY	36
3.2.3. ELEKTRICKÉ OBVODY SILOMĚRNÉ PLOŠINY	38
3.2.4. SOFTWARE SILOMĚRNÉ PLOŠINY	44
ZDROJE	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: V praxi otestovaný model prototypu Přenosného modulárního systému MoCap pro záznam a vyhodnocování stavu příslušníků armády a záchranářů.
- Obr. 2: V praxi otestovaný prototyp Přenosného modulárního systému MoCap pro záznam a vyhodnocování stavu příslušníků armády a záchranářů.
- Obr. 3: Zkonstruovaný prototyp MoCap4AFR-MoCap senzoru absolutní orientace v prostoru v 3D tištěné krabičky z flexibilního filamentu.
- Obr. 4: Schéma zapojení elektrických obvodů senzoru pro záznam pohybu MoCap4AFR-MoCap, detail zapojení chytrého senzoru absolutní orientace v prostoru BNO055.
- Obr. 5: Schéma zapojení elektrických obvodů senzoru pro záznam pohybu MoCap4AFR-MoCap, detail zapojení mikrokontroléru, antény a konektoru SD karty.
- Obr. 6: Schéma zapojení elektrických obvodů senzoru pro záznam pohybu MoCap4AFR-MoCap, detail zapojení primárních napájecích obvodů, USB a bateriového napájení.
- Obr. 7: Model PCB navrženého senzoru MoCap4AFR-MoCap.
- Obr. 8: Vyrobený a osazený PCB senzoru MoCap4AFR-MoCap.
- Obr. 9: Model krabičky senzoru MoCap4AFR-MoCap s páskem na ruku.
- Obr. 10: Model krabičky senzoru MoCap4AFR-MoCap s otvory na popruh.
- Obr. 11: Model víčka obou typů krabiček senzoru MoCap4AFR-MoCap.
- Obr. 12: Senzor MoCap4AFR-MoCap v krabičce s popruhem kolem pasu.
- Obr. 13: Naměřená data akcelerace osy X senzoru MoCap4AFR-MoCap pohybových aktivit dřepy, a stoj s rukama v horizontální poloze a vertikální poloze
- Obr. 14: Naměřená data akcelerace osy Y senzoru MoCap4AFR-MoCap pohybových aktivit dřepy, a stoj s rukama v horizontální poloze a vertikální poloze
- Obr. 15: Naměřená data akcelerace osy Z senzoru MoCap4AFR-MoCap pohybových aktivit dřepy, a stoj s rukama v horizontální poloze a vertikální poloze
- Obr. 16: Kamera Flir Blackfly® S BFS-U3-23S3C-C
- Obr. 17: USB hub Flir U3H419E1
- Obr. 18: Vývojový diagram algoritmu kamerového systému
- Obr. 19: 6pinové GPIO pro potřeby synchronizace mezi kamerami
- Obr. 20: Propojení primární (master) a sekundární (slave) kamery
- Obr. 21: Fyzické propojení synchronizačního signálu se sondou osciloskopu
- Obr. 22: Synchronizační signál kamer
- Obr. 23: Ukázka synchronizovaného snímání kalibračních snímků
- Obr. 24: Detekce anatomických bodů pravé a levé kamery
- Obr. 25: Detekce anatomických bodů pravé a levé kamery
- Obr. 26: Zobrazení koordinátů levého a pravého palce ruky

Obr. 27: Realizovaný prototyp siloměrné plošiny

Obr. 28: Výrobní výkres konstrukce siloměrné plošiny

Obr. 29: Ukázka vhodného konstrukčního profilu samonosného rámu

Obr. 30: Siloměrná plošina o rozměrech 300 x 500

Obr. 31: Siloměrná plošina o rozměrech 700 x 800

Obr. 32: Použitý tenzometrický snímač Zemic L6E/200kg C3 v hodnotě 1500 Kč s DPH (převzato z technické dokumentace snímače od výrobce Zemic)

Obr. 33: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení ADC převodníků.

Obr. 34: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení mikrokontroléru STM32.

Obr. 35: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení komunikačního modulu ESP32, který komunikuje s počítačem skrze Wi-Fi 2,4 GHz.

Obr. 36: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení napájecích obvodů a USB-C konektoru.

Obr. 37: Osazená deska plošných elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog.

Obr. 38: Zapojení dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog v siloměrné plošině

Obr. 39: Záznam tenzometrického senzoru do InfluxDB v SW pro záznam a zpracování pohybových dat ze stabilometrických platforem

Obr. 40: GUI SDK pro zobrazení polohy COM v SW pro záznam a zpracování pohybových dat ze stabilometrických platforem

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Minimální požadavky na PC pro tvorbu požadovaného lokálního datového serveru.

Tab. 2: Parametry nositelného senzoru IMU 9DoF v provedení na zápěstí nebo na opasku podrobná technická specifikace

Tab. 3: Cenová kalkulace komponent PCB senzoru MoCap4AFR-MoCap.

Tab. 4: Společné parametry vyrobených prototypů siloměrných plošin

Tab. 5: Parametry siloměrné plošiny o rozměrech 300 x 500

Tab. 6: Parametry siloměrné plošiny o rozměrech 700 x 800

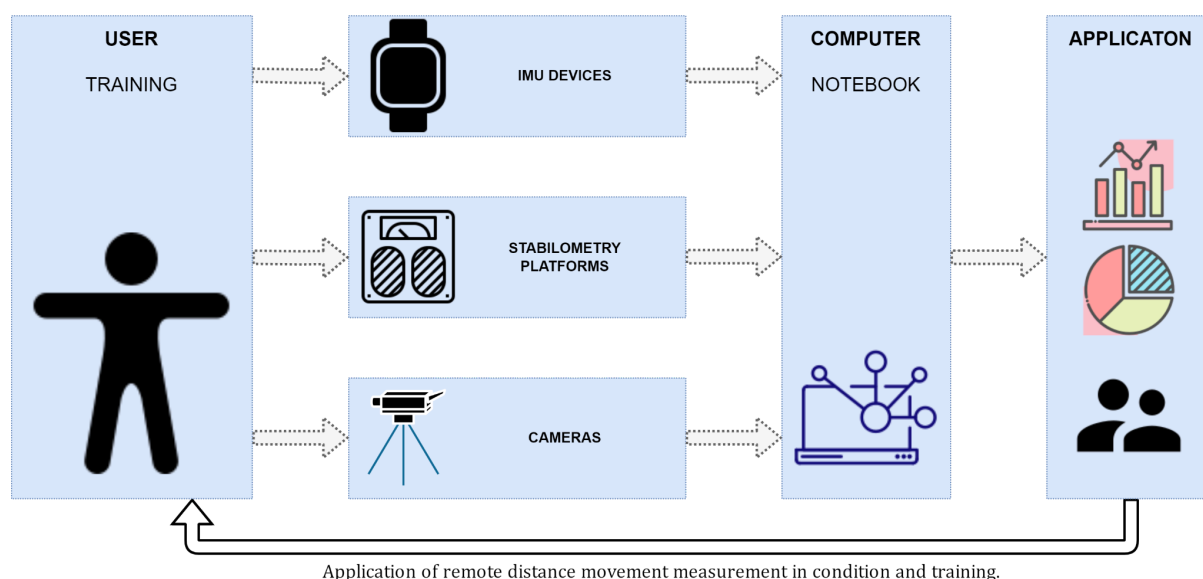
Tab. 7: Vybrané snímače sil pro stabilometrické platformy

1. OBECNÉ INFORMACE K HARDWARE

1.1. POPIS STRUKTURY SYSTÉMU

Přenosný modulární systém MoCap pro záznam a vyhodnocování stavu příslušníků armády a záchranářů (dále v textu i pod označením “Přenosný modulární MoCap systém”), využívá kombinaci senzorů, vyvinutých v projektu Přenosný modulární MoCap systém pro záznam a hodnocení stavu příslušníků ozbrojených sil a záchranářů. Sensory jsou rozděleny do 3 podsystemů.

Vytvořený a otestovaný model v praxi (Obr. 1) popisuje tok a zpracování informací z pohybových IMU 9DoF senzorů měřících zrychlení v trojdimenzionálním systému (Obr. 1, IMU DEVICES), siloměrných platform měřící sílu (Obr. 1, STABILOMETRY PLATFORMS) a kamerových systémů (Obr. 1, CAMERAS).



Application of remote distance movement measurement in condition and training.

Obr. 1: V praxi otestovaný model prototypu Přenosného modulárního systému MoCap pro záznam a vyhodnocování stavu příslušníků armády a záchranářů.

Na základě navrženého modelu byl vyroben jeden prototyp přenosného modulárního MoCap systému, vyobrazený v sestavě s 1 stabilometrickou platformou v Obr. 2. Přenosný modulární MoCap systém prioritně řeší již dříve identifikované technické problémy při používání systémů pro evidenci a hodnocení zdatnosti v praxi:

1. Přenosný modulární MoCap systém spojuje 3 běžně používané technologie pro záznam pohybu a tím vytváří jednu jednotnou technickou platformu pro evidenci a

vyhodnocování způsobilosti ozbrojených sil a příslušníků integrovaného záchranného systému,

2. Přenosný modulární MoCap systém je stavěn s ohledem na cenu jako substitut k nákladným technickým platformám pro evidenci a vyhodnocování zdatnosti ozbrojených sil a příslušníků integrovaného záchranného systému. Položkové rozpočty jsou uvedeny v jednotlivých kapitolách.
3. Přenosný modulární MoCap systém podporuje vzájemnou kompatibilitu systémů MoCap pomocí souboru nástrojů pro vývoj software dostupných. SDK budou po k dispozici po skončení projektu v GitHub repozitářích.



Obr. 2: V praxi otestovaný prototyp Přenosného modulárního systému MoCap pro záznam a vyhodnocování stavu příslušníků armády a záchranářů.

1.2. KOMUNIKACE MEZI KOMPONENTAMI HW

Topologie propojení komponent byla zvolena hvězdicová, tedy jeden přenosný počítač (Obr. 1, COMPUTER a Obr. 2. laptop na stole), na kterém je nainstalován backend v jazyce Python, který komunikuje s jednotlivými subsystémy a sbírá data, která ukládá na datový server, realizovaný v podobě InfluxDB. Počítač zajišťuje:

- komunikaci se senzory subsystémů,
- sběr dat,
- konfiguraci senzorů a jejich synchronizaci,
- úpravu dat pro jejich dlouhodobé uložení,
- vzdálený dohled a podporu.

Aplikace systému pro záznam využívá více procesorových jader tak, aby počítač v reálném čase s latencí pod 100 ms umožňoval:

- stahovat data skrze USB3 rozhraní a ukládat,
- vizualizovat data,
- ukládat data na HDD,
- zpracovávat data.

IMU DEVICES jsou s počítačem propojeny skrze Bluetooth rozhraní, kteří bylo zvoleno pro jeho nízkou energetickou spotřebu. STABILOMETRY PLATFORMS senzory jsou připojeny pomocí USB 2.0 rozhraní do počítače. USB 2.0 zároveň poskytuje napájecí napětí pro provoz siloměrných plošin. Kamery subsystému CAMERAS jsou připojeny skrze USB3 HUB od výrobce kamer.

1.3. CHARAKTERISTIKY POUŽITÉHO PC

Systém je připojen na lokální datový server, který je vytvořen pomocí přenosného PC typu laptop. Požadavky na PC jsou dány aplikacemi pro zpracování časových řad a obrazových dat. Na počítači musí být nainstalovaná InfluxDB, databáze časových řad (time-series database) navržená pro ukládání, dotazování a vizualizaci velkého množství dat s časovým razítkem. Požadavky pro produkční prostředí InfluxDB:

1. CPU: 4–8 jader (dle počtu klientů a dotazů)
2. RAM: 8–16 GB (pro vyšší zátěž může být více)
3. Disk: SSD o velikosti 100+ GB (záleží na velikosti dat a retenci)

Požadavky na záznam a zpracování obrazu jsou:

1. CPU: 8 jader
2. RAM: 16-32 GB
3. Disk: SSD o velikosti 100+ GB

4. Dedikovaná grafická karta alespoň karty NVIDIA GeForce RTX 4060

Požadavky IMU jednotek a stabilometrických plošin:

1. BLE 5 s podporou LE
2. Wi-Fi 2,4 GHz

Na základě stanovených požadavků byla sestavena Tab 1: minimální požadavky na PC pro tvorbu požadovaného lokálního datového serveru.

Tab. 1: Minimální požadavky na PC pro tvorbu požadovaného lokálního datového serveru.

Komponenta	Název
CPU	Intel Core i7 Raptor Lake
Monitor	max úhlopříčka 16"
Operační paměť	16GB DDR4
GPU	NVIDIA GeForce RTX 4060
Pevný disk	SSD 256GB M.2 (R/W 1000 MB/s)
Rozhraní	USB 3.2 Gen 1, USB-C
Bezdrátové rozhraní	Wi-Fi 2,4 GHz, BLE

Koncem roku 2024 byly na trhu nejlevnější dostupné kompatibilní notebooky splňující minimální požadavky (Tab. 1.):

- ASUS ROG Zephyrus G16 GU603VV,
- Lenovo LOQ 15IRX9,
- MSI Katana 15 B13VFK,
- Acer Nitro V 15 Black,
- Lenovo LOQ 15IRX9,
- Lenovo LOQ 15ARP9,
- MSI Katana 15 B13VFK-1868XCZ.

Notebooky jsou dostupné v průměrné ceně za 28 000 CZK s DPH (k roku 2024). Tyto konfigurace se jeví jako dostatečné.

2. PODSYSTÉM NOSITELNÝCH SENZORŮ

Podsystém nositelných senzorů pro měření posturální stability a hodnocení pohybových aktivit se skládá z jednoho nebo soustavy gyro-akcelerometrických senzorů. Senzor měření posturální stability měří zrychlení v (ms^{-2}) a natočení v (mdps) v X-, Y-, Z-ové ose, res. odpovídající úhlové rychlosti. Gyro-akcelerometrické senzory jsou připojitelné skrze USB 2.0 rozhraní, nebo Bluetooth rozhraní k počítači. V kapitole 2.1 jsou popsány požadované charakteristiky podsystému a jeho zapojení do komplexního řešení a v kapitole 2.1 je popsáno finální technické řešení.

2.1. CHARAKTERISTIKY PODSYSTÉMU NOSITELNÝCH SENZORŮ

Nositelný senzor pro měření posturální stability a hodnocení pohybových aktivit v podobě zařízení nositelného senzor IMU 9DoF, viz kap. 2.2 splňuje následující požadavky identifikovaného během mezinárodní spolupráce napříč organizacemi uvedené v Tab. 2. Implementace požadavků je popsána v popisu HW v kap 2.2.

Tab. 2: Parametry nositelného senzor IMU 9DoF v provedení na zápěstí nebo na opasku
podrobná technická specifikace

ID TP	Kategorie technického požadavku	Název technického požadavku	Hodnoty nebo detail technického požadavku
A1	IMU	Akcelerometr	datové řady: X, Y, Z měřicí rozsahy: $\pm 2 \text{ g}$, $\pm 4 \text{ g}$, $\pm 8 \text{ g}$ a $\pm 16 \text{ g}$ rozlišení: 16 bits, 100 Hz
A2		Gyroskop	datové řady: X, Y, Z měřicí rozsahy: ± 245 , ± 500 and $\pm 2000^\circ/\text{s}$ rozlišení: 16 bits, 100 Hz
A3		Magnetometr (kompas)	datové řady: X, Y, Z měřicí rozsahy: ± 4 , ± 8 , ± 12 , ± 16 gauss rozlišení: 13 bits, 100 Hz
A4	Teplota	Snímač teploty (teplota čipu)	datové řady: teplota měřicí rozsahy: -10 až 50 rozlišení: 16 bits, 100 Hz
A5	Procesor	Paměť pro ukládání dat	micro SDHC karta kapacita záznamu: 64 GB
A6		Konektivita	2.4 GHz (BLE nebo Wi-Fi)
A7		Synchronizace	datové řady: datum a čas

			rozlišení: 1 ms, 100 Hz RTC na čipu
A8	Napájení	Batterie	datové řady: napětí akumulátoru měřicí rozsah: 0 až 5000 mV rozlišení: 16 bits (LSB 1 mV), 100 Hz kapacita akumulátoru: odpovídající provoznímu času online provozní čas: 70 to 150 minut offline provozní čas: 360 to 750 minut
A9		USB	USB-C, 5 V DC
A10	Obal	Konstrukce	Vhodné materiály pro výrobu konstrukce jsou takové, které jsou kombinací pevnosti, hmotnosti a odolnosti proti korozi aby nedošlo během měření k poškození zařízení či ohrožení na zdraví osob.
A11		Signalizace	Signalizace pomocí stavových LED.

2.2. REALIZOVANÉ ŘEŠENÍ

Nositelný podsystém pro měření posturální stability a hodnocení pohybových aktivit se skládá z jednoho nebo více chytrých senzorů absolutní orientace v prostoru založených na IO BNO055. Realizovaný senzor je označen MoCap4AFR-MoCap, na PCB zkráceně MoCap, viz Obr. 16. MoCap4AFR-MoCap je zapouzdřen v krabičce, která chrání všechny elektronické obvody a umožňuje upevnění na tělo, jak je názorně vyobrazeno v Obr. 3 a v Obr. 27 na obou zápěstích.



Obr. 3: Zkonstruovaný prototyp MoCap4AFR-MoCap senzoru absolutní orientace v prostoru v 3D tištěné krabičce z flexibilního filamentu.

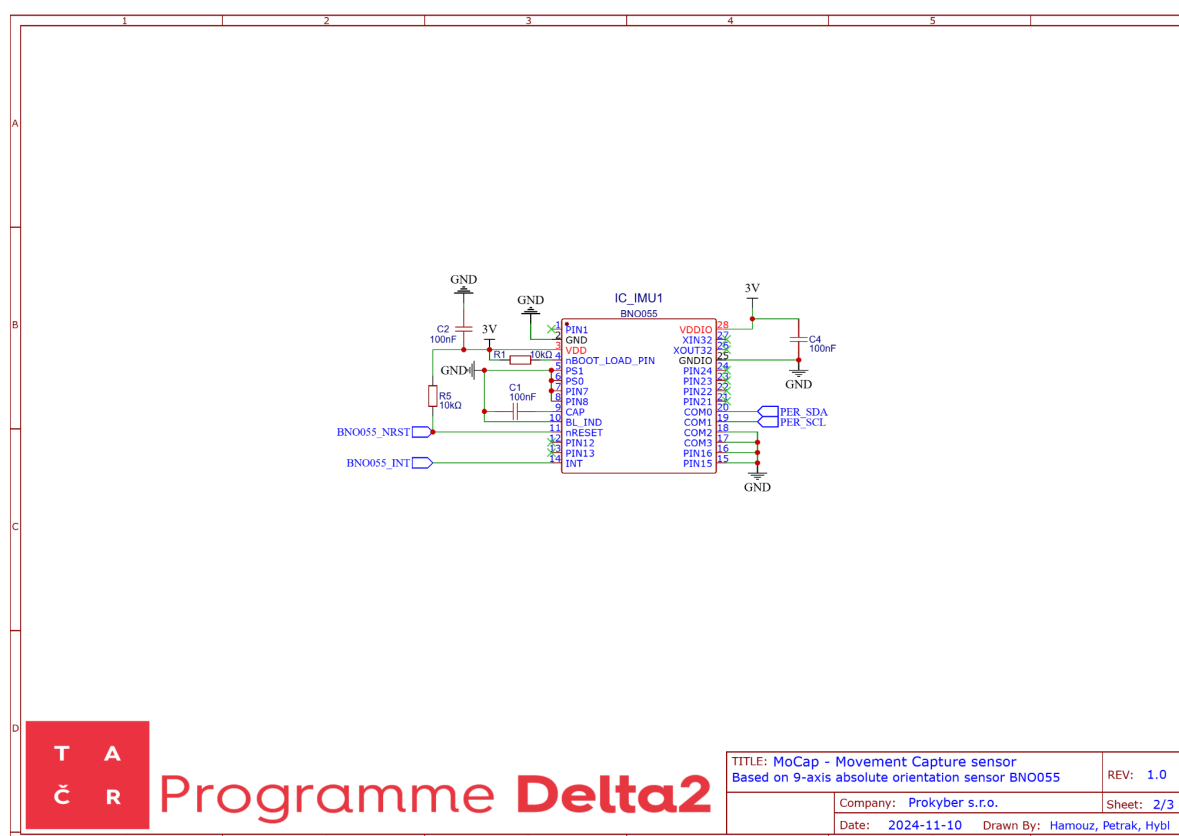
Senzor BNO055 je pokročilý senzor od společnosti Bosch Sensortec, který integruje 9-osý IMU (Inertial Measurement Unit) s integrovaným fúzním algoritmem. Senzor kombinuje akcelerometr, gyroskop a magnetometr do jednoho čipu a poskytuje přímo zpracovaná data orientace nebo pohybu. BNO055 integruje senzory:

1. Akcelerometr (Bosch BMA280):
 - Rozsah měření: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
 - Rozlišení: 14 bit
 - Frekvence vzorkování: 8 Hz až 1000 Hz
2. Gyroskop (Bosch BMG160):
 - Rozsah měření: ± 125 °/s, ± 250 °/s, ± 500 °/s, ± 1000 °/s, ± 2000 °/s
 - Rozlišení: 16 bit
 - Frekvence vzorkování: 12 Hz až 523 Hz
3. Magnetometr (Bosch BMM150):
 - Rozsah měření: ± 1300 μ T (osově)
 - Rozlišení: 13 bit

Integrovaný fúzní algoritmus poskytuje eulerovy úhly (roll, pitch, yaw), kvaterniony lineární akceleraci (bez vlivu gravitace) a gravitační vektor. BNO055 umožňuje přepínání mezi režimy surových dat a dat z fúzního algoritmu.

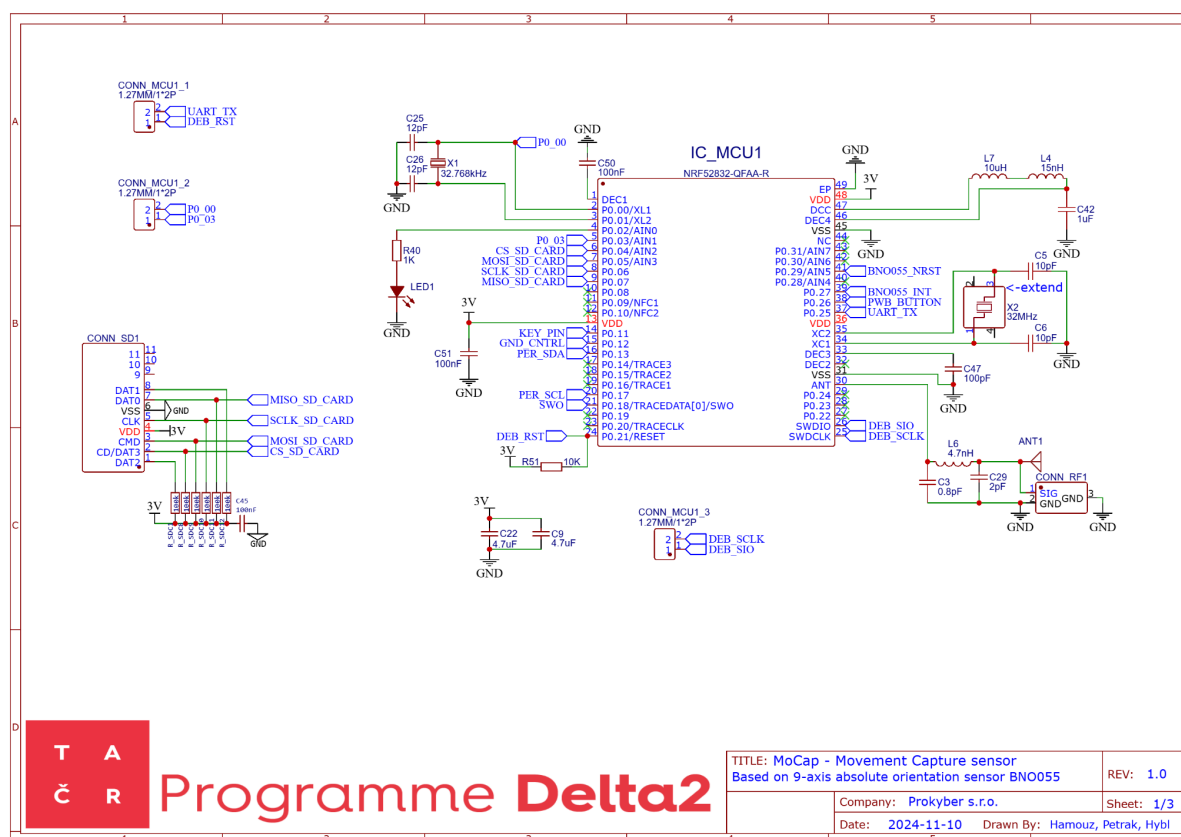
Zapojení IO BNO055 (IC_IMU1) je v Obr. 4. Napájecí napětí je 3 V (BNO055 funguje od 1,8 V do 3,6 V). Napětí je filtrováno 100nF kondenzátory C2 a C4. Spotřeba energie při fúzi senzorů je ~ 12 mA, při měření pouze s akcelerometrem $\sim 0,5$ mA a v režimu spánku ~ 5 μ A. Provozní teplota BNO055 -40 °C až $+85$ °C, která je dosažena pouze při chodu z napájení skrze USB bez integrovaného akumulátoru, který omezuje využití senzoru na oblast -20 °C ~ 60 °C při 45~85% RH. IC_IMU1 je k IC_MCU1 připojen vodiči:

- BNO055_NRST, reset IC_IMU1 volaný z IC_MCU1,
- BNO055_INT, přerušení volané z IC_IMU1 do IC_MCU1,
- PER_SDA, sériová data přenášena mezi IC_IMU1 a IC_MCU1,
- PER_SCL, hodinový signál pro přenos sériových dat mezi IC_IMU1 a IC_MCU1.



Obr. 4: Schéma zapojení elektrických obvodů senzoru pro záznam pohybu MoCap4AFR-MoCap, detail zapojení chytrého senzoru absolutní orientace v prostoru BNO055.

Zapojení mikrokontroléru, antény a konektoru SD karty je ve schématu na Obr. 5. Jádrem komunikačního rozhraní senzoru MoCap4AFR-MoCap je výkonný systém na čipu (SoC) nRF52832 od společnosti Nordic Semiconductor určený pro BLE bezdrátovou komunikaci na frekvenci 2,4 GHz. Procesor SoC je ARM Cortex-M4F na frekvenci 64 MHz, 32bitová architektura. Paměť flash je 512 kB a RAM je o velikosti 64 kB. Provozní teplota $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spotřeba energie při BLE komunikaci: $\sim 5,3\text{ mA}$ (TX na 0 dBm) a standby režimu $\sim 0,7\text{ }\mu\text{A}$. Nastavitelný výkon vysílače -20 dBm až $+4\text{ dBm}$. Citlivost přijímače -96 dBm (1 Mbps), -92 dBm (2 Mbps). Anténa BLE byla zvolena v podobě vlnovce na vrchní vrstvě PCB (Obr. 16) a doplněna IPEX (6GHz 50 Ω) konektorem pro připojení koaxiálního kabelu externí antény. Konektor micro SD karty byl vybrán v minimalistické variantě a umístěn tak aby karta zabírala prostor nad součástkami spodní vrstvy PCB, detail v Obr. 7 a Obr. 8.



Obr. 5: Schéma zapojení elektrických obvodů senzoru pro záznam pohybu MoCap4AFR-MoCap, detail zapojení mikrokontroléru, antény a konektoru SD karty.

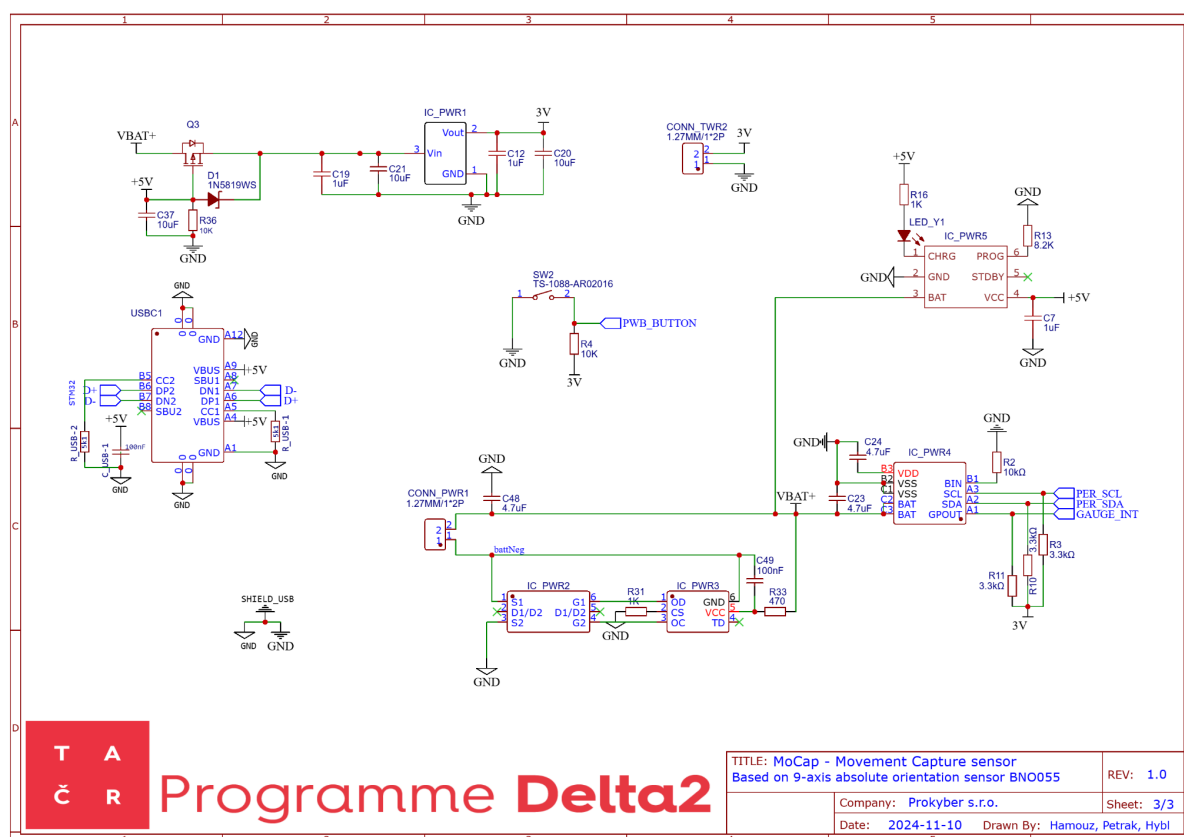
Zapojení primárních napájecích obvodů, USB a bateriového napájení je ve schématu na Obr. 6. Bateriového napájení spojuje několik obvodů které chrání akumulátor proti vybití, nabíjí akumulátor a sledují jeho stav.

Obvody ochrany akumulátoru využívají IO DW01, ve schématu označen jako IC_PWR3, který poskytuje základní ochranu proti přebití, podvybití, přetížení proudem a zkratu, čímž chrání baterii i připojeného zařízení před poškozením. Spotřeba energie na vlastní funkci v pracovní režimu je $\sim 3 \mu\text{A}$ a ve standby režimu $\sim 0,1 \mu\text{A}$. Ochrana proti přebití se aktivuje při napětí nad 4,3 V (uvolnění na 4,1 V). Ochrana proti podvybití se aktivuje se při napětí pod 2,4 V (uvolnění na 3,0 V). Ochrana proti přetížení proudem se aktivuje při detekci rychlého úbytku napětí na 0,16 V a detekce zkratu se aktivuje při úbytku 1,3 V. Provozní teplota -40°C až $+85^\circ\text{C}$. DW01 je ve spojení s N-Channel MOSFETy ($18\text{m}\Omega@4.5\text{V}, 6\text{A}$), ve schématu v pouzdru IC_PWR2, kterými odpojuje GND akumulátoru.

Pro sledování stavu akumulátoru byl vybrán IO BQ27621 od Texas Instruments, ve schématu označen jako IC_PWR4. IC_PWR4 slouží jako měřič kapacity akumulátoru pro jednočlávkové Li-ion a Li-polymerové akumulátory. IC_PWR4 je použit k přesnému měření stavu nabití a poskytuje klíčové údaje, jako jsou zbývající kapacita, napětí baterie a odhadovaný zbývající čas provozu. Přesnost měření stavu nabití je $\pm 16 \text{ mV}$ ($\pm 1 \%$). Spotřeba

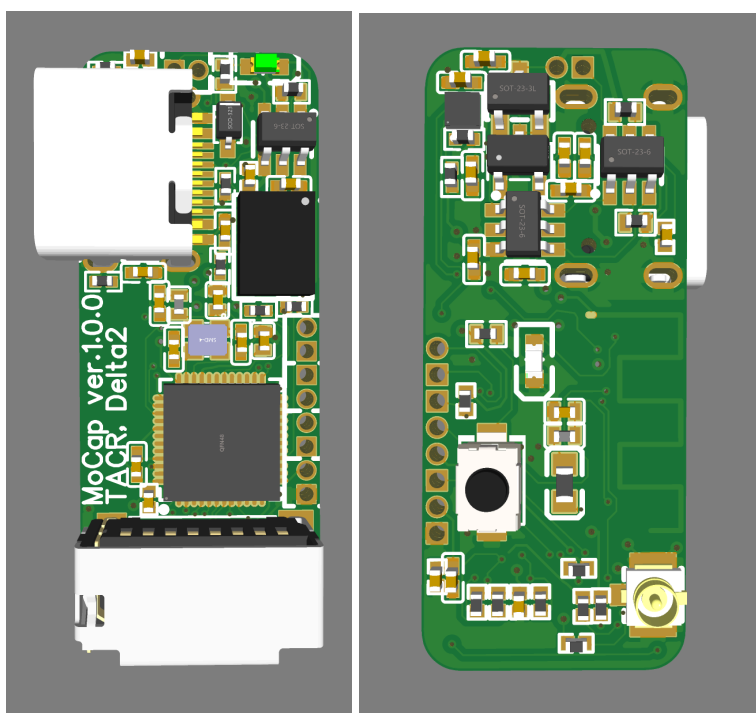
energie v aktivním režimu je $\sim 100 \mu\text{A}$ a v režimu spánku $\sim 23 \mu\text{A}$. Provozní teplota -40°C až $+85^\circ\text{C}$. IO je připojen skrze rozhraní I²C vodiči PER_SCL, PER_SDA, GAUGE_INT. Funkce měření kapacity sleduje stav nabití v reálném čase a poskytuje zbývající kapacitu v mAh nebo %. Používá algoritmus Impedance TrackTM pro velmi přesné odhady kapacity baterie. Přesné měření napětí na akumulátoru poskytuje odhad zbývajícího času provozu na základě aktuální spotřeby a kapacity baterie odhaduje, jak dlouho baterie vydrží v aktuálním zatížení.

Pro nabíjení akumulátoru byl vybrán IO TP4057 navržený pro nabíjení jednočlánkových Li-ion nebo Li-polymerových akumulátorů, ve schématu označen jako IC_PWR5. IC_PWR5 poskytuje funkce regulace nabíjecího proudu, ochrana baterie a indikace stavu nabíjení. Napájecí napětí IO je mezi 4,0 V až 8,0 V. Nabíjecí napětí baterie je $4,2 \text{ V} \pm 1 \%$. Nabíjecí proud je nastaven na 40 mA pomocí rezistoru R13. Spotřeba energie obvodu pro vlastní funkci v aktivním režimu je $\sim 50 \mu\text{A}$ a ve standby režimu pouze $\sim 25 \mu\text{A}$. Provozní teplota -40°C až $+85^\circ\text{C}$. Při nízkém napětí baterie obvod dodává konstantní nabíjecí proud (režim konstantního proudu). Jakmile napětí baterie dosáhne 4,2 V, obvod přejde do režimu konstantního napětí. Po dokončení nabíjení (když nabíjecí proud klesne pod stanovenou mez) se nabíjení vypne. Součástky Q3 a D1 jsou nezbytné pro oddělení výstupu akumulátoru VBAT+ při nabíjení, tedy při připojeném napětí +5V.

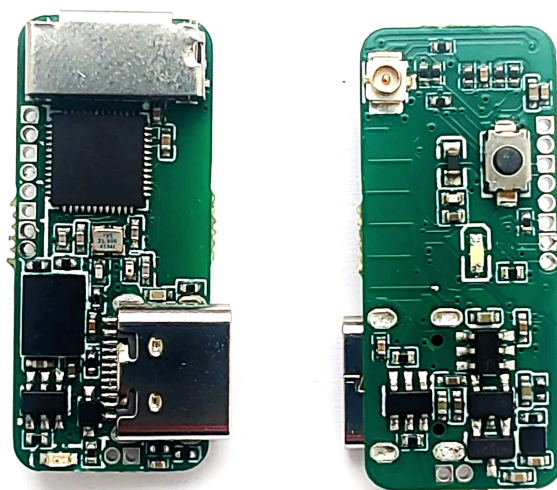


Obr. 6: Schéma zapojení elektrických obvodů senzoru pro záznam pohybu MoCap4AFR-MoCap, detail zapojení primárních napájecích obvodů, USB a bateriového napájení.

Akumulátor pro napájení MoCap4AFR-MoCap je umístěn v krabičce (Obr. 10) a napevno spojen vodiči s PCB senzoru. Byly vybrány a odzkoušeny 2 velikosti lithium polymerových akumulátorů jmenovitého napětí 3,7 V. Konkrétně L301020 (cena 84 CZK) a L401230 (cena 81 CZK). Oba typy akumulátorů mají stejné vlastnosti, významně se liší pouze velikostí a kapacitou. L301020 má rozměry 3x10x20 mm a kapacitu 40mAh. L401230 má rozměry 4x12x30 mm a kapacitu 110 mAh. Oba akumulátory mají vybíjecí/nabíjecí proud 1C a počet nabíjecích cyklů 500. Bezpečné vybíjení akumulátorů je možné provádět v rozsahu teplot -20 °C až +60 °C a nabíjení v rozsahu teplot 0 °C až +45 °C.



Obr. 7: Model PCB navrženého senzoru MoCap4AFR-MoCap.

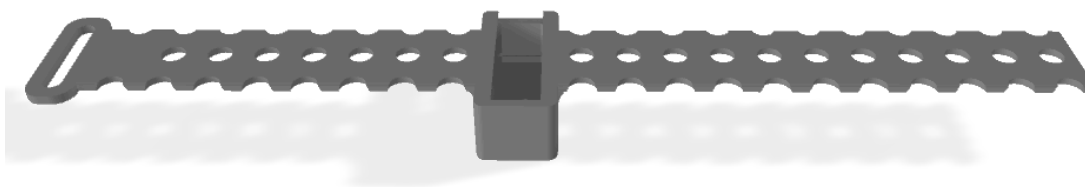


Obr. 8: Vyrobený a osazený PCB senzoru MoCap4AFR-MoCap.

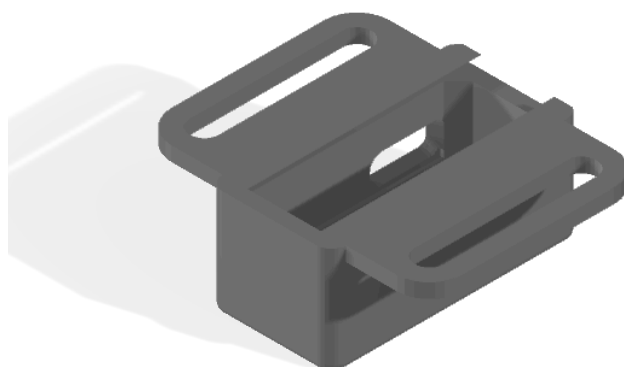
Tab. 3: Cenová kalkulace komponent PCB senzoru MoCap4AFR-MoCap.

Komponenta	Pouzdro komponenty	Množství	Cena jednotková v	Cena celkem v CZK
Cx	C0402	25	0,051	1,270
CONN_RF1	IPEX-SMD_BWIPX-1-001E	1	1,428	1,428
CONN_SD1	TF-SMD_HYCW104-TF08-375B	1	6,427	6,427
D1	SOD-323_L1.8-W1.3-LS2.5-RD	1	0,265	0,265
IC_IMU1	LGA-28_L5.2-W3.8-P0.50-BL	1	221,043	221,043
IC_MCU1	QFN-48_L6.0-W6.0-P0.40-BL-EP3.8	1	72,764	72,764
IC_PWR1	SOT-23-3_L2.9-W1.6-P1.90-LS2.8-BR	1	2,513	2,513
IC_PWR2	SOT-23-6_L2.9-W1.6-P0.95-LS2.8-BR	1	1,428	1,428
IC_PWR3	SOT-23-6_L2.9-W1.6-P0.95-LS2.8-BR	1	0,846	0,846
IC_PWR4	DSBGA-9_L1.7-W1.6-R3-C3-P0.50-BL	1	51,234	51,234
IC_PWR5	SOT-23-6_L2.9-W1.6-P0.95-LS2.8-BR	1	3,386	3,386
LED_W1	LED0603-R-RD_WHITE	1	0,265	0,265
LED_Y1	LED0603-R-RD	1	0,582	0,582
Q3	SOT-23-3_L3.0-W1.7-P0.95-LS2.9-BR	1	1,613	1,613
Rx	R0402	22	0,026	0,582
SW2	SW-SMD_L3.9-W3.0-P4.45	1	1,084	1,084
USBC1	USB-C-SMD_TYPE-C-USB-17	1	10,210	10,210
X2	OSC-SMD_4P-L2.0-W1.6-BL	1	2,566	2,566
Celková cena		63 komponent je	379,50 Kč	

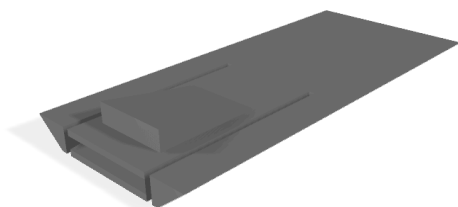
Obal MoCap4AFR-MoCap je optimalizován pro výrobu pomocí 3D tisku flexibilním filamentem TPE (termoplastický elastomer). 3D modely dvou návrhů krabičky jsou v Obr. 18, krabička s páskem na ruku a Obr. 9, krabička s otvory na popruh. Obě krabičky mají stejný prostor pro umístění PCB (Obr. 10), vnějších rozměrů 34 mm x 17 mm x 14 mm a využívají víka s patentním uzávěrem (Obr. 11), který po zasunutí víka na své místo zaklapne a zajistí víko ve své pozici. Krabička s páskem na ruku je z jednoho kusu, bez dalších pohyblivých částí, pásek se provlékne kolem zápěstí a zasune do oka s čepem, který projde skrze otvor v pásku. Krabička umístěná kolem zápěstí je v Obr. 12.



Obr. 9: Model krabičky senzoru MoCap4AFR-MoCap s páskem na ruku.



Obr. 10: Model krabičky senzoru MoCap4AFR-MoCap s otvory na popruh.



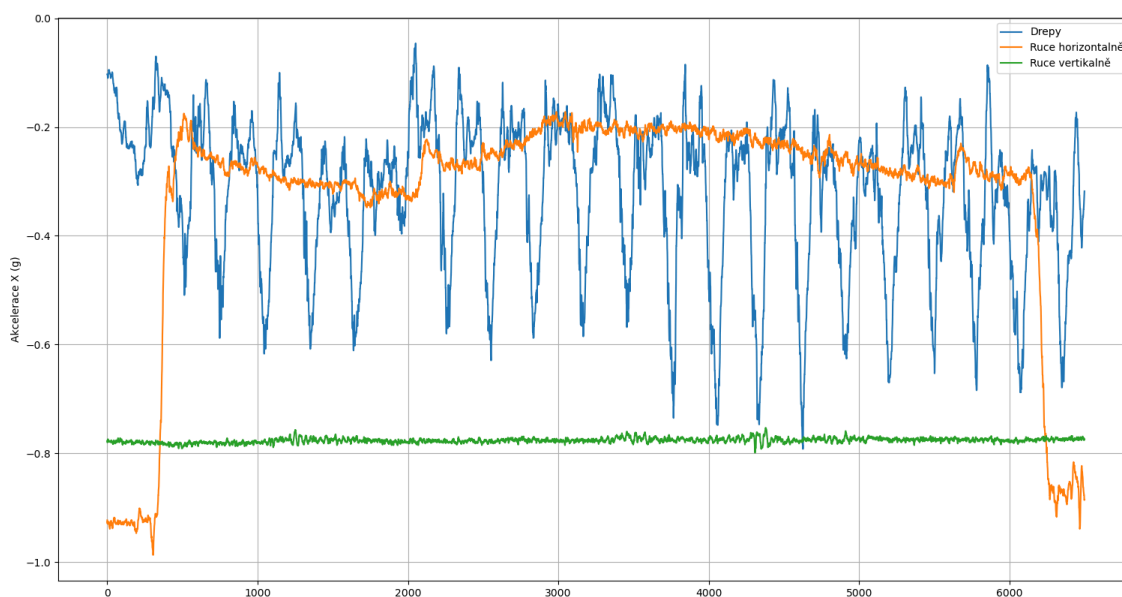
Obr. 11: Model víčka obou typů krabiček senzoru MoCap4AFR-MoCap.

Krabička s otvory na popruh je vhodná pro umístění kolem pasu (pro měření posturální stability), nebo na různé taktické vybavení. Oka pro upevnění krabičky mají vnitřní rozměr 23 mm pro provlečení ustrojovacích popruhů 15 a 20 mm. Krabička s popruhem 20 mm se suchým zipem je na Obr. 12.

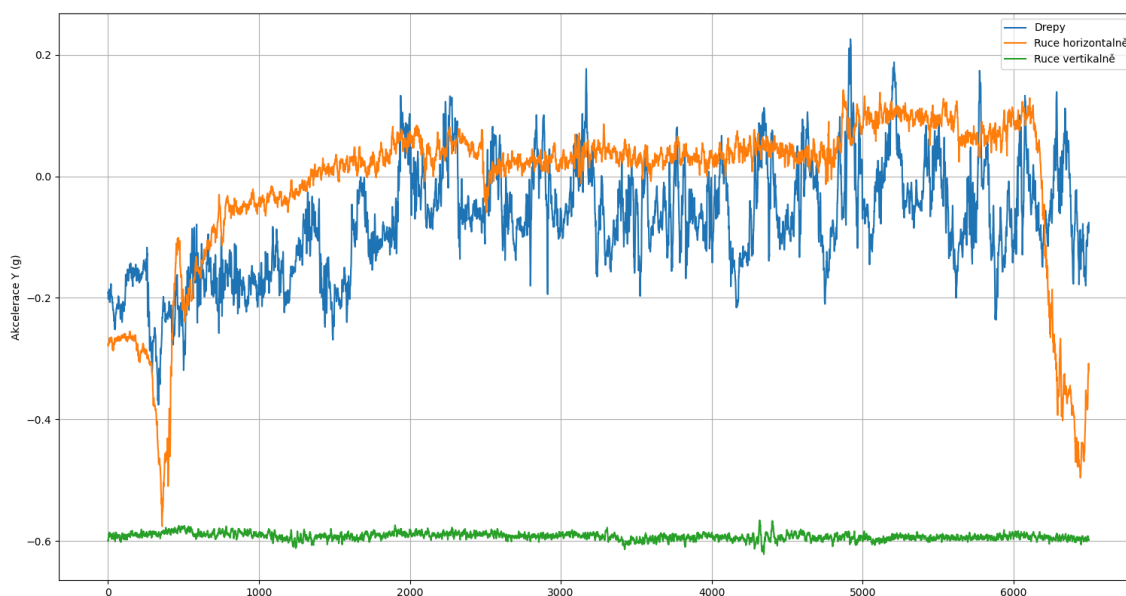


Obr. 12: Senzor MoCap4AFR-MoCap v krabičce s popruhem kolem pasu.

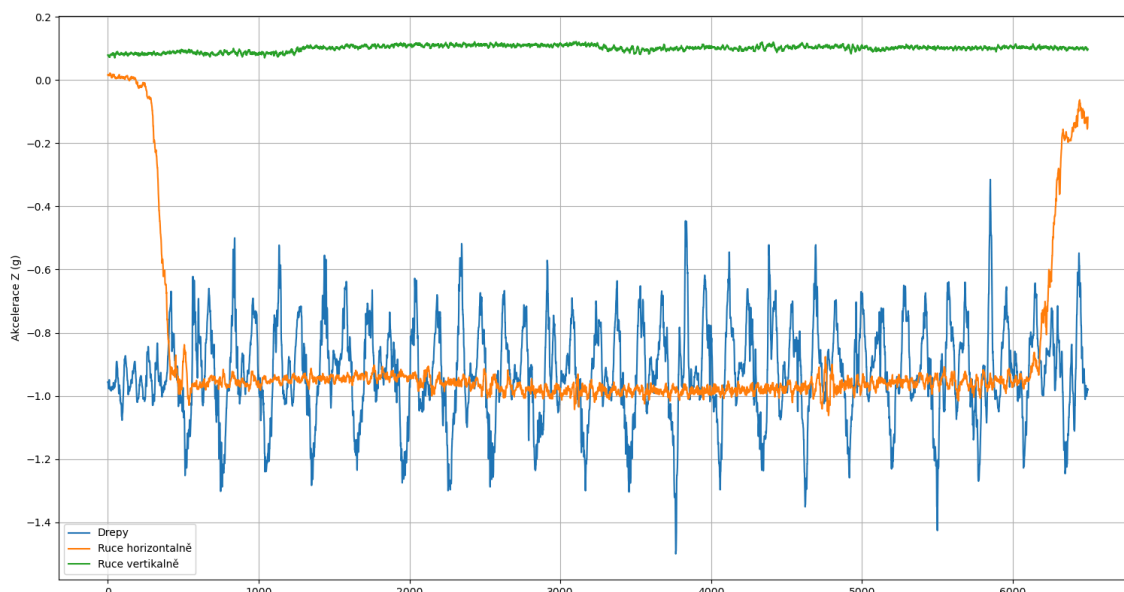
MoCap4AFR-MoCap poskytuje data skrze BlueTooth LE (BlueTooth Low Energy) který je optimalizovaný pro přenos krátkých bloků dat na menší vzdálenosti s minimální energetickou náročností. Mikrokód MCU1 poskytuje data na BLE primární službě s UUID 0xA00A. Informace o senzoru jako jsou výrobce, sériové číslo, číslo modelu, číslo revize HW, revize FW a revize SW jsou na službě UUID 0x180A. Ukázky časových průběhů naměřených dat akcelerací při pohybových aktivitách s náramkem umístěným na zápěstí jsou na Obr. 13 pro osu X, Obr. 14 pro osu Y, Obr. 15 pro osu Z.



Obr. 13: Naměřená data akcelerace osy X senzoru MoCap4AFR-MoCap pohybových aktivit dřepy, a stoj s rukama v horizontální poloze a vertikální poloze



Obr. 14: Naměřená data akcelerace osy Y senzoru MoCap4AFR-MoCap pohybových aktivit dřepy, a stoj s rukama v horizontální poloze a vertikální poloze



Obr. 15: Naměřená data akcelerace osy Z senzoru MoCap4AFR-MoCap pohybových aktivit dřepy, a stoj s rukama v horizontální poloze a vertikální poloze

Data jsou ze senzoru stahována pomocí API v python. Kód je spuštěn ze souboru main.py, který inicializuje aplikaci a řídí její běh. Soubor Facade.py implementuje návrhový vzor Facade, který zjednodušuje komunikaci mezi částmi aplikace. Soubor scanner.py odpovídá za skenování dostupných BLE zařízení a soubor script_stopper.py zajišťuje bezpečné ukončení běhu aplikace pomocí stisku klávesy “f”. Moduly pro práci s BLE a API:

- Base.py základní třídy a rozhraní pro práci s BLE zařízeními.
- Device_Info_Reader.py čte informace o připojených zařízeních.
- Drawer.py obsahuje vizualizační nebo grafické funkce.
- Factories.py vytváří objektů BLE zařízení podle jejich ID.
- Logger.py spravuje logování do souboru během běhu aplikace.
- Org_Bio_Sender.py odesílání dat do Influx databáze.
- SmartAhrsV2.py a SmartAhrsV3.py implementují specifické metody pro práci s konkrétními verzemi MoCap4AFR-MoCap senzorů.
- AccelReaderLogger.py zajišťuje čtení, parsování a ukládání posílaných dat.

3. PODSYSTÉM STACIONÁRNÍCH SENZORŮ

Stacionární podsystém pro měření posturální stability a hodnocení pohybových aktivit pomocí jedné nebo sestavy stabilometrických platforem a pomocí jedné nebo sestavy kamer.

3.1. KAMEROVÝ SYSTÉM

Systém využívá 2 běžně dostupných RGB kamer, které je možné umístit v různém prostorovém rozložení. Důležitým parametrem kamer je možnost vzájemné synchronizace.

3.1.1. HARDWARE KAMEROVÉHO SYSTÉMU

Pro potřeby systému byly zvoleny kamery Flir Blackfly® S BFS-U3-23S3C-C viz Obr. 16. Kamery Flir Blackfly® S BFS-U3-23S3C-C mají parametry:

- Celokovové tělo s rozměry 29 x 29 x 30 mm a hmotností 36 g
- Typ senzoru: Sony IMX392:
 - Technologie: CMOS s progresivním skenováním
 - Uzávěrka: Globální
 - Formát senzoru: 1/2.3"
 - Rozlišení: 2,3 MP (1920 x 1200 pixelů)
 - Velikost pixelu: 3,45 μm x 3,45 μm
 - Obrazová plocha: 6,62 mm x 4,14 mm
 - Snímková frekvence: Až 163 fps
 - Hloubka pixelu: 10/12 bitů
 - Expoziční čas: 5 μs – 30 s
 - Standard: USB3 Vision v1.0
- Vyrovnávací paměť obrazu: 240 MB
- Konektor: USB 3.1 Gen 1, Micro-B se zámkou na šrouby
- Synchronizace: Hardwarový nebo softwarový spouštěč
- Typ GPIO konektoru: 6pinový Hirose (HR10)
- Uchycení: C-Mount závit 1/4-20 s adaptérem pro stativ
- Provozní teplota: 0 °C až +50 °C
- Skladovací teplota: -30 °C až +60 °C



Obr. 16: Kamera Flir Blackfly® S BFS-U3-23S3C-C

Propojení kamer s PC zajišťuje 4 portový USB hub Flir U3H419E1 viz Obr. 17. USB hub Flir U3H419E1 má parametry:

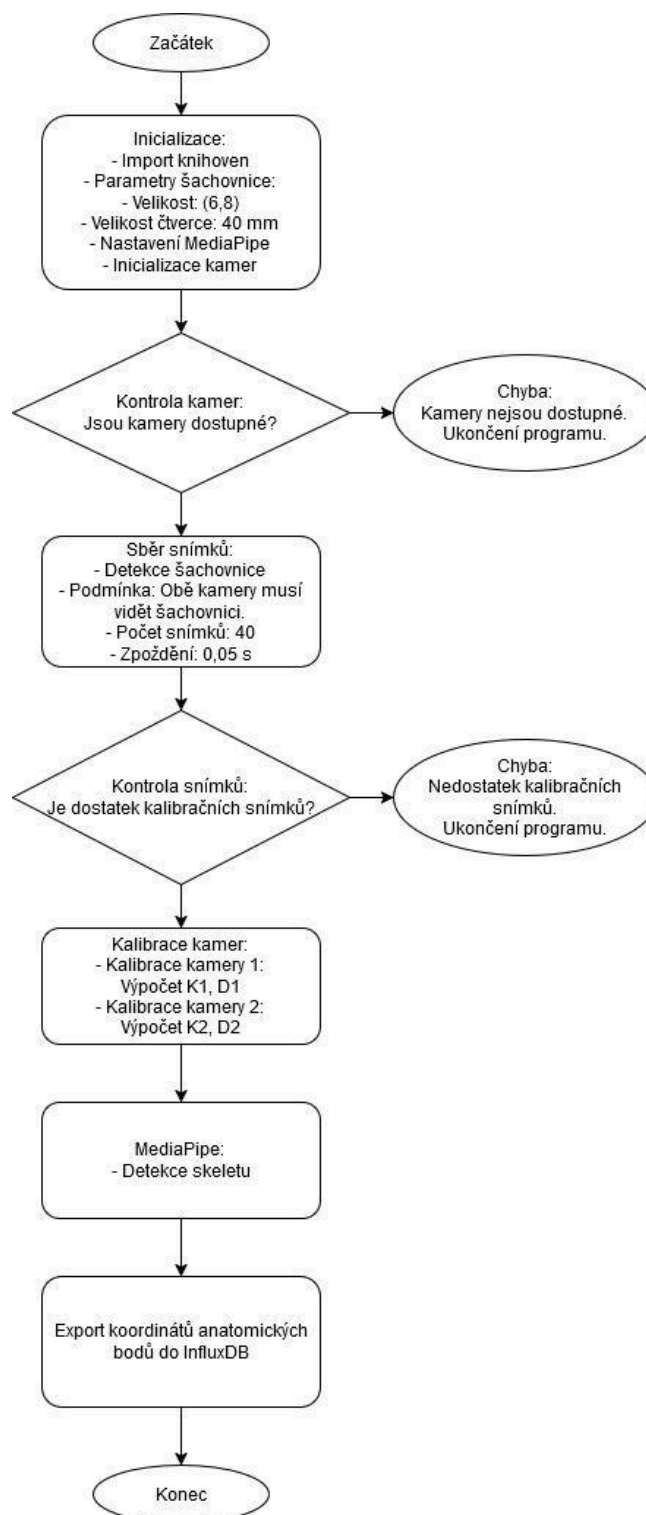
- Standardy: USB 2.1 a USB 3.1 Gen 1
- Podporované přenosové rychlosti: SuperSpeed (5 Gbps), Hi-Speed (480 Mbps), Full-Speed (12 Mbps), Low-Speed (1,5 Mbps)
- Napájení: Individuální přepínání napájení pro každý port, ochrana proti přetížení s notifikací.
- Upstream port: 1x USB 3.1 kabelový port (Standard B-type konektor), TID# 360000002
- Downstream porty: 4x USB 3.1 kabelové porty (Standard A-type konektor), TID# 360000006
- Certifikace UL: E322375 (AP2311) nebo E328191 (APL3553)



Obr. 17: USB hub Flir U3H419E1

3.1.2. SOFTWARE KAMEROVÉHO SYSTÉMU

Navržený SW pro kalibrace kamer umožňuje provádět komplexní proces kalibrace kamer, a detekování anatomických bodů v rámci skeletu za využití knihovny MediaPipe, viz Obr. 18. Uložení koordinátů anatomických bodů je pak možné do časové databáze InfluxDB.

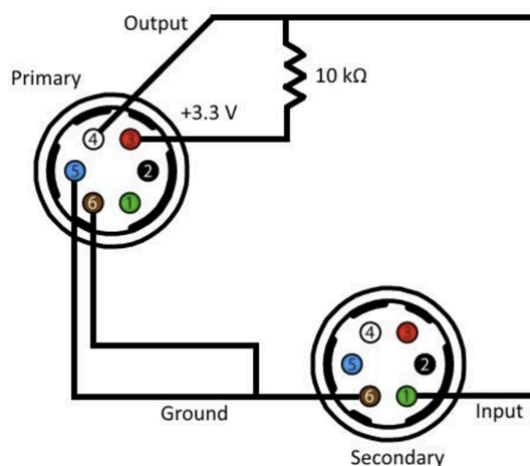


Obr. 18: Vývojový diagram algoritmu kamerového systému

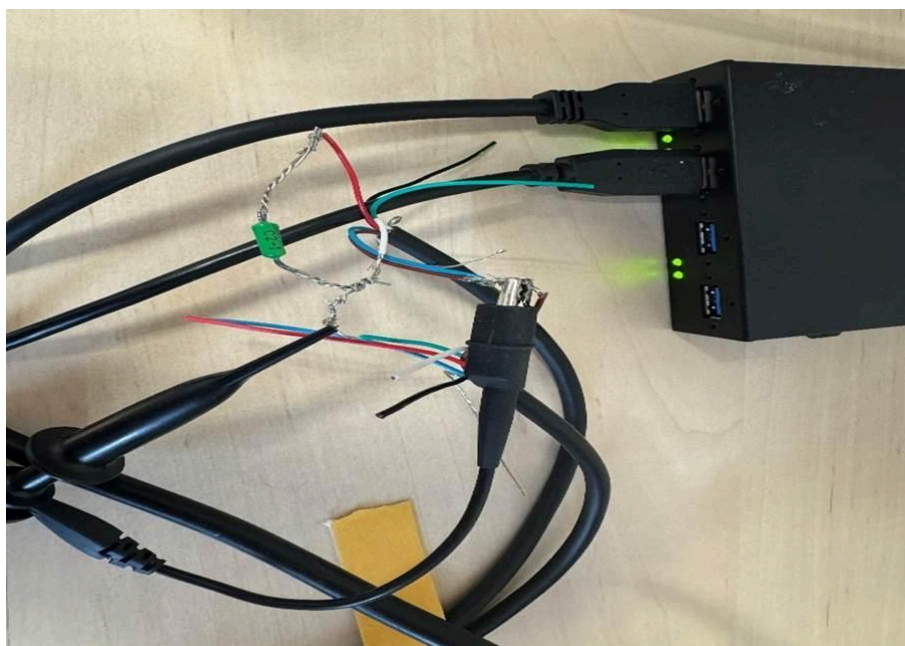
Pro potřeby komunikace s průmyslovými kamerami typu Flir Blackfly S (BFS) v jazyce Python je nutná instalace Teledyne Spinnaker SDK v kombinaci s jeho Python wrapperem Spinnaker-Python (pozor, nezaměnit za pypspin instalovaný za využití pip pypspin nebo pip PySpin). Dále byla pro potřeby komunikace a zejména synchronizace zvolena knihovna EasyPySpin, která zjednodušuje konfiguraci. Synchronizace byla provedena za využití 6pinového GPIO viz Obr. 19 zapojeného dle konfigurace viz Obr. 20 s 10 k Ω pull-up rezistorem (2x 20 k Ω paralelně) viz Obr. 21. Synchronizační signál měřený osciloskopem je zobrazen na Obr. 22. Snímková frekvence kamer je závislá na nastaveném rozlišení. Ukázkové snímky jsou při rozlišení 1920x1080 px se snímkovou frekvencí 15 FPS (max. při daném rozlišení cca 18,5 FPS).

Diagram	Color	Pin	Line	Function	Description
	Green	1	3	V _{AUX}	Auxiliary Input Voltage (DC)
				GPI	Non-isolated Input
	Black	2	0	OPTOIN	Opto-isolated Input
	Red	3	2	VOUT	Camera Power Output
				GPIO	Non-isolated Input/Output
	White	4	1	OPTOOUT	Opto-isolated Output
	Blue	5	N/A	Opto GND	Opto-isolated Ground
	Brown	6	N/A	GND	Camera Power Ground

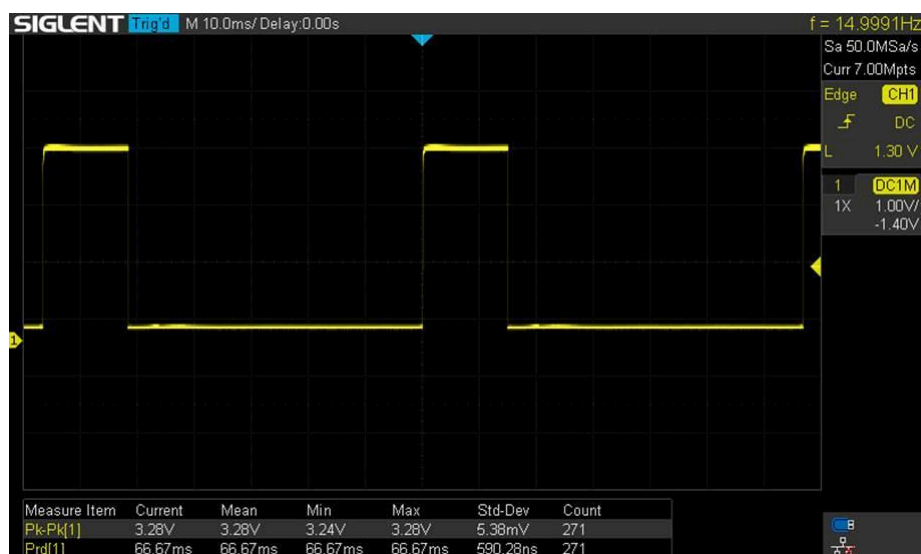
Obr. 19: 6pinové GPIO pro potřeby synchronizace mezi kamerami [1]



Obr. 20: Propojení primární (master) a sekundární (slave) kamery [1]



Obr. 21: Fyzické propojení synchronizačního signálu se sondou osciloskopu



Obr. 22: Synchronizační signál kamer

V rámci zpracování obrazových dat byla zvolena knihovna OpenCV, která je využita k základnímu převodu z Bayerovy masky a následně i pro potřeby detekce kalibrační šachovnice využitě ke kalibraci jednotlivých kamer a stereo-kalibraci pro určení bodů v prostoru. Šachovnice má rozměry 6x8 vnitřních rohů (7x9 čtverců o rozměru 40 mm). Počet kalibračních snímků je možné nastavit spolu s časem zpoždění mezi snímáním kalibračních snímků. Kalibrační snímky, viz Obr. 23, jsou uloženy a jelikož kamery mají objektivy typu rybí oko, bylo přistoupeno k využití metody `cv2.fisheye.calibrate` (běžná kalibrace neposkytuje dostatečnou přesnost korekce optického zkreslení obrazu). Tato funkce vrací matici vnitřních parametrů a koeficienty zkreslení a pro každou kameru jsou ukládány rotační a translační vektory. Reprojekční chyba obou kamer je v praxi nižší než 1px.



Obr. 23: Ukázka synchronizovaného snímání kalibračních snímků

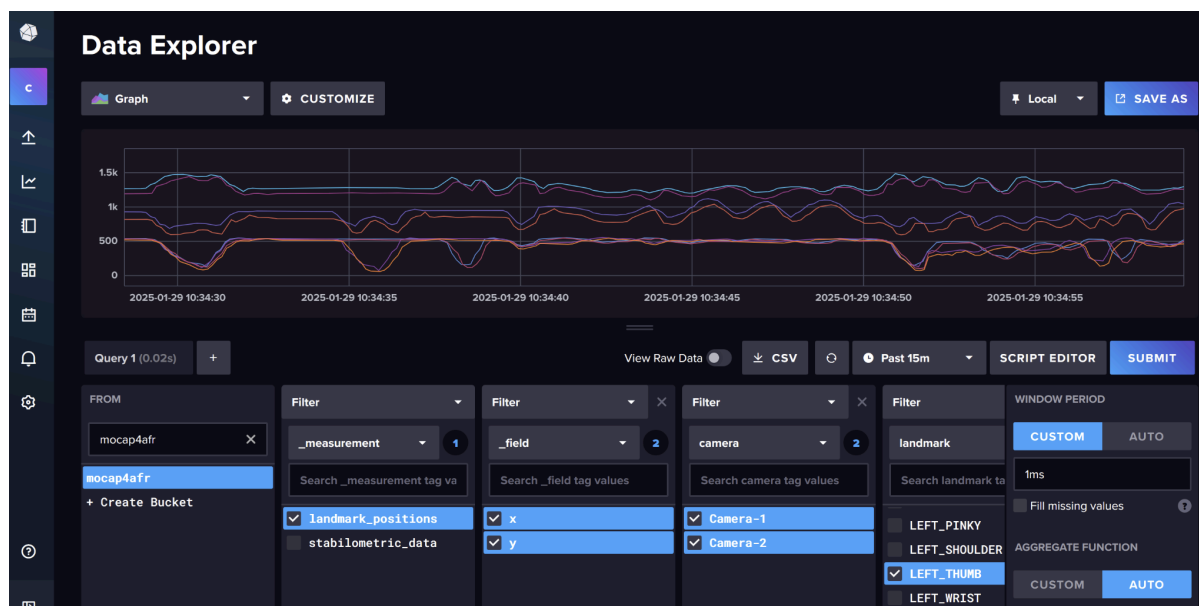
Detekce skeletu pomocí kamerového systému viz Obr. 24 a Obr. 25, byla realizována za využití MediaPipe od Google, který umožňuje detekci anatomických bodů lidského těla pro potřeby vytvoření skeletálního modelu. Zobrazení koordinátů anatomických bodů v InfluxDB viz Obr. 26.



Obr. 24: Detekce anatomických bodů pravé a levé kamery



Obr. 25: Detekce anatomických bodů pravé a levé kamery



Obr. 26: Zobrazení koordinátů levého a pravého palce ruky

3.2. STABILOMETRICKÉ PLATFORMY

Stabilometrická platforma je specializované zařízení používané k měření a analýze rovnováhy a posturální stability člověka. Toto zařízení je schopné detekovat jemné pohyby těžiště těla a poskytuje cenné informace o schopnosti člověka udržet rovnováhu v různých podmínkách. Stabilometrická platforma umožňuje měřit:

- Těžiště těla, tedy jeho přesnou pozici a pohyb v čase.
- Rovnovážné schopnosti, tedy udržení stabilního postoje.
- Výkyvy a oscilace v podobě amplitudy a frekvence pohybů těžiště.

Platformy byly navrhovány aby umožnily statická a dynamická stabilometrická měření:

- Statická stabilometrie hodnotí rovnováhu v klidném stavu, například když člověk stojí na platformě.
- Dynamická stabilometrie hodnotí reakce na změny podmínek, například při pohybu nebo simulaci nestabilního povrchu.

V rámci plánované komercializace hledali pracovníci prokyber využití stabilometrické platformy pro další oblasti. Byly nalezeny tyto vhodné oblasti použití:

- Zdravotnictví, především rehabilitace a prevence: diagnostika a trénink pacientů po úrazech nebo neurologických poruchách, jako je mrtvice nebo Parkinsonova choroba. Identifikace rizika pádů u starších osob. Vhodné kontaktovat soukromá pracoviště a pracoviště fyzioterapeutů.
- Sportovní trénink, analýza stability, zlepšení výkonu dlouhodobé trendy. Možnost přímo oslovovat fit centra a tělocvičny.
- Ergonomie a pracovní prostředí: hodnocení pracovníků, kteří potřebují dobrou rovnováhu. Možnost oslovovat profesionální organizace zajišťující BOZP.
- Vědecký výzkum: studování mechaniky lidského těla a rovnováhy stoje.
- Videoherní průmysl: ovládání sportovních a bojových her, simulátorů a střelců jak v prostředí 2D tak virtuální reality.
- Průmyslová výroba: zjišťováním polohy těžiště obrobků a strojních částí.

Na základě uvedených požadavků a možností uplatnění byla stabilometrická platforma vymezena v podobě zařízení:

1. Sestávajícího z jednoho nebo více kusů siloměrných plošin.
2. Kde každá siloměrná plošina je vybavena 4 silovými senzory, které snímají velikost síly vyvíjené na povrch platformy.
3. Kde každá siloměrná plošina má provedenu kalibraci celkové měřené síly a rozložení síly na jednotlivé silové senzory.
4. Jehož silové senzory jsou v podobě kalibrovaných vážných tenzometrických čidel měřících silové působení v jednom směru.
5. Které poskytuje data v podobě časových řady z každého silového senzoru

Výsledné společné parametry vyrobených prototypů siloměrných plošin jsou uvedeny v Tab. 4 a vyrobená siloměrná plošina se stojícím probandem je na Obr. 27. V textu je využíván jak pojem siloměrná plošina, která poskytuje informaci o silových účincích na jednotlivé senzory, tak pojem stabilometrická platforma, který spojuje siloměrná plošina s aplikačním SW pro výpočet pozice těžiště (COM). V rámci dalšího vývoje dojde k implementaci algoritmu pro výpočet COM přímo ve FW plošiny, spolu s implementací kalibračního algoritmu, který umožní nutné nastavení parametrů aby mohl být výpočet COM realizován.



Obr. 27: Realizovaný prototyp siloměrné plošiny

Tab 4. Společné parametry vyrobených prototypů siloměrných plošin

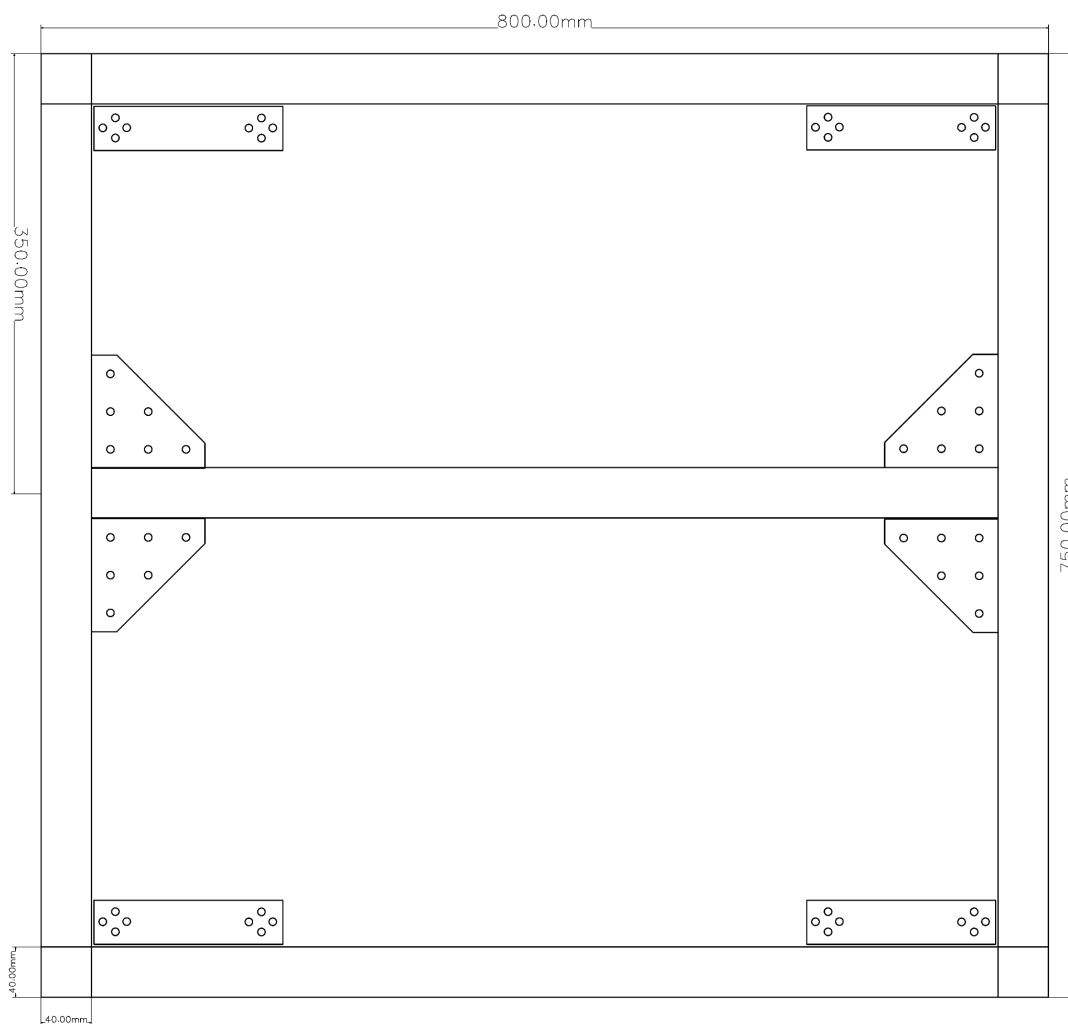
Parametr	Hodnota
Maximální rozsah plošného statického zatížení	800 kg
Maximální rozsah plošného dynamického zatížení	960 kg
Maximální rozsah bodového statického zatížení	200 kg
Maximální rozsah bodového dynamického zatížení	240 kg
Vzorkovací frekvence	400 Hz
Maximální kombinovaná chyba z rozsahu	$\pm 0,16 \%$
Rozlišení AD převodníku	16 bit
Výstupní rozhraní a formát výstupu	USB RTU MODBUS
Napájecí rozhraní a napětí	USB 5 V
Provozní teploty	-10 °C až 40 °C
Stupeň krytí	IP53

3.2.1. KONSTRUKCE SILOMĚRNÉ PLOŠINY

Konstrukce plošiny je zatížena následujícími požadavky:

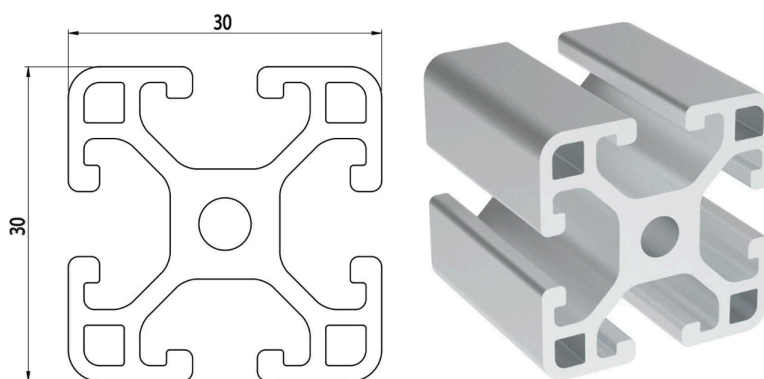
- vysoká mechanická odolnost
- minimum mechanických částí
- dobrá údržba v externím prostředí
- možnost použití i v podmínkách kapající, nebo tekoucí vody z objektu měření
- snadná a rychlá výroba různých velikostí

Konstrukce siloměrné plošiny (Obr. 28) je v podobě robustního samonosného rámu čtvercového, nebo obdélníkového tvaru. Rám je dle potřeby doplněn rovnoběžnými příčkami, které zvyšují tuhost konstrukce omezují průhyb plechu, který je přišroubován na rám a přenáší sílu působícího objektu na 4 senzory situované ve vrcholech čtyřúhelníku.



Obr. 28: Výrobní výkres konstrukce siloměrné plošiny

Pro konstrukci samonosného rámu siloměrných plošin byly zvoleny hliníkové profily se čtvercovým řezem z hliníkových slitin EN AW-6063 a EN AW 6060. Oba typy konstrukčních profilů jsou dobře dostupné na evropském trhu i se spojovacím materiálem. Tvar drážek není klíčový. Jádru profilu je vhodné volit s válcovým otvorem (Obr. 29), aby bylo možné spojovat profily pomocí rohových spojek nebo kostek. Profily s plnými stěnami nejsou vhodné, jelikož z každé strany je umístěna konstrukční část a z vnější strany je umístěna gumová záslepka (Obr. 30), která brání mechanickému oděru eloxovaných částí, pokud jsou umístěny 2 a více plošiny u sebe. Délka stěny řezu profilů je 30 mm, nebo 40 mm, v závislosti na zvoleném vážném tenzometrickém čidle.



Obr. 29: Ukázka vhodného konstrukčního profilu samonosného rámu [2]

Byly realizovány 2 velikosti siloměrných plošin a to menší siloměrná plošina o rozměrech 300 x 500 (parametry v Tab. 5, fotka v Obr. 30) a větší siloměrná plošina o rozměrech 700 x 800 (parametry v Tab. 6, fotka v Obr. 31). Menší siloměrná plošina je velikostně kompatibilní s Wii/WiiU Fit - Balance Board. Větší vychází z požadavku rozkročeného stoje.



Obr. 30: Siloměrná plošina o rozměrech 300 x 500

Tab. 5: Parametry siloměrné plošiny o rozměrech 300 x 500

Parametr	Hodnota
Rozměr s pogumovanými okraji	310 x 510 x 56 mm
Rozměr pochozí desky	290 mm x 490 mm
Povrch pochozí desky	SRB 2 mm
Počet nožiček	4
Výška nožiček	18 mm
Nastavitelná výška nožiček	+ 10 mm
Průměr plochy nožiček	25 mm
Kontaktní plocha nožiček	PP černý



Obr. 31: Siloměrná plošina o rozměrech 700 x 800

Tab. 6: Parametry siloměrné plošiny o rozměrech 700 x 800

Parametr	Hodnota
Rozměr s nožičkami	700 x 800 x 58 mm
Rozměr absolutní (pogumované okraje)	310 mm x 510 mm
Rozměr pochozí desky	290 mm x 490 mm
Povrch pochozí desky	Slitina hliníku
Počet nožiček	4
Výška nožiček	17 mm
Nastavitelná délka nožiček	+ 10 mm
Průměr plochy nožiček	25 mm
Materiál nožičky a kontaktní plocha	Guma
Tuhost materiálu nožičky	770 N

3.2.2. SENZORY SILOMĚRNÉ PLOŠINY

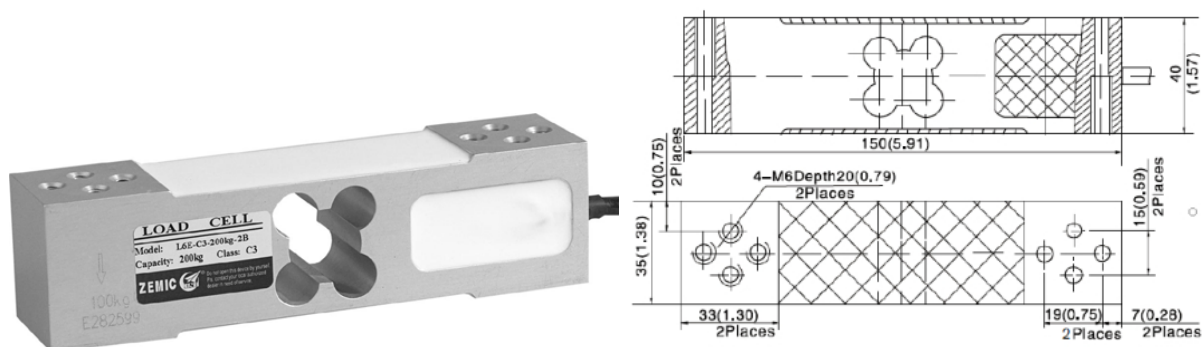
Pro měření působení sil v rámci stacionárního pod systému siloměrných plošin pro záznam silových účinků byly vybrány kalibrované vážní snímače hmotnosti fungující na principu tenzometrických snímačů síly, které převádí mechanickou veličinu vektoru síly na elektrickou veličinu napětí. Převod se děje prostřednictvím tenzometrických známek (strain gauges), které jsou nalepeny na těle snímače. V rámci vývoje byly stanoveny 2 zásadní požadavky na tyto senzory a to:

1. Cena senzoru. Cena se výrazně liší pro oblast použití pro cílovou aplikaci prototypu, tedy armádní využití a IZS, která se shoduje s oblastmi vědeckého výzkumu a průmyslové výroby od oblasti videoherního průmyslu, tělocvičny a malá pracoviště fyzioterapeutů, kde je kladen důraz na cenu pořízeního zařízení. Zdravotnictví v podobě klasifikovaného ZP se opět řadí do první kategorie kde je cena senzorů zanedbatelná vzhledem k nákladům na celé zařízení. Z požadavku na cenu se vhodnou volbou jeví snímače v hodnotě kolem 3 tisíc a níže, v Tab. 1 zvýrazněny žlutě u ceny.
2. Přesnost měření. Parametr přesnosti měření snímačů vychází z požadované přesnosti měření posturální stability pomocí stabilometrických platforem na milimetry posunu CoP. Pro jednotlivé snímače je maximální chyba měření dána kombinovanou nepřesností a rozsahem snímače. V Tab. 1 jsou zvýrazněny žlutě snímače s nejvyšší přesností v celém rozsahu. Snímač Tedeo 380/250kg C3 má oproti ostatním snímačům poloviční amplitudu poskytovaných dat, což má přímý dopad na návrh měřících částí elektronických obvodů a proto je v tabulce označen ve sloupci Plný rozsah červeně a obdobně je tomu i u snímače HT TAS606/500kg.

Výše popsané parametry na výběr vhodného senzoru pro stabilometrickou platformu splňují na trhu dostupné senzory v Tab. 11. Byly zakoupeny a použity senzory GUANG CE YZC-1B (dále v textu jako YZC-1B) v siloměrné plošině o rozměrech 300 x 500 a Zemic L6E/200kg C3 (dále v textu jako L6E/200kg) v siloměrné plošině o rozměrech 700 x 800.

Tab. 7: Vybrané snímače sil pro stabilometrické platformy

Tenzometrický snímač	Třída přesnosti OIML R60	Jmeno- vitá kapacita (RC)	Přetížení	Kombinovaná chyba		Plný rozsah (FS)	Nejdelší rozměr	Cena (s DPH)
		kg		% R.C.	±%FS	±mV/V	mm	CZK
GUANG CE YZC-1B	-	200	120	0,030	0,060	$2,0 \pm 0,2$	130	600
Zemic L6E/200kg C3	C3	200	150	0,046	0,046	$2,0 \pm 0,2$	150	1 500
Zemic L6E3/200kg C3	C3	200	150	0,040	0,040	$2,0 \pm 0,2$	150	1 800
Zemic L6D8/200kg C3	C3	200	150	0,046	0,020	$2,0 \pm 0,2$	130	1 300

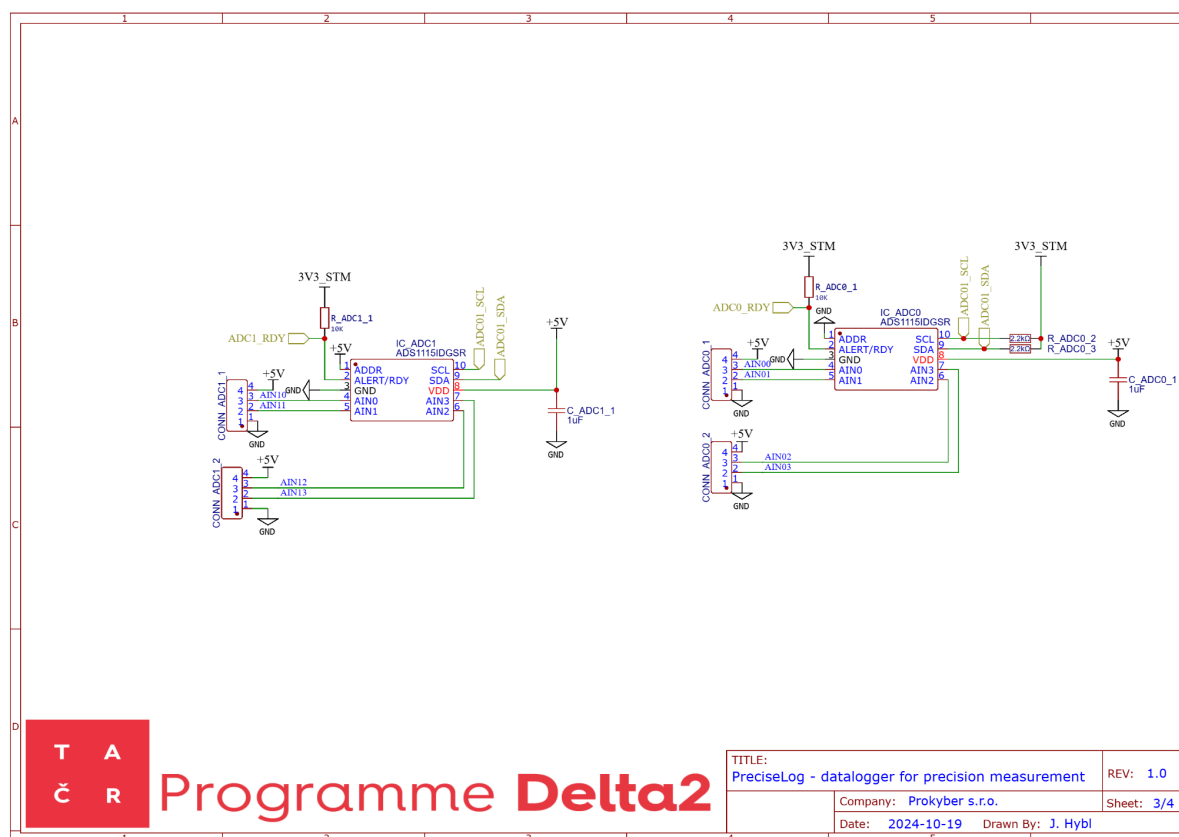


Obr. 32: Použitý tenzometrický snímač Zemic L6E/200kg C3 v hodnotě 1500 Kč s DPH [3]

3.2.3. ELEKTRICKÉ OBVODY SILOMĚRNÉ PLOŠINY

Tenzometrické snímače jsou připojeny k desce plošných spojů datového záznamníku MoCap4AFR-PreciseLog čtyřmi vodiči, dva napájecí a dva signálové na konektory CONN_ADC0_1, CONN_ADC0_2 a CONN_ADC1_1, CONN_ADC1_2 AFE části PreciseLog, viz schéma na Obr. 33. Signál ze snímačů je vyjádřen v milivoltech na Volt (mV/V), viz Tab. 11, kde jsou popsány parametry použitých tenzometrů. Diferenční signály jsou přes uvedené svorkovnice vedeny na 4 kanály dvou 16 bitových ADC ADS1115 (ve schématu IC_ADC0 a IC_ADC1), vyráběných společností Texas Instruments. Základní vlastnosti ADS1115:

- Rozlišení 16 bitů.
- 4 jednovstupové kanály nebo 2 diferenciální vstupy
- I2C (s volitelnými adresami, až 4 zařízení na sběrnici).
- Programovatelný zesilovač umožňuje nastavení rozsahu vstupního napětí od ± 256 mV až $\pm 6,144$ V.
- Vzorkovací rychlost až 860 vzorků za sekundu.



Obr. 33: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení ADC převodníků.

Oba IO ADS1115 jsou pomocí I2C linek s vodiči ADC01_SCL a ADC01_SDA připojeny na MCU1, viz schéma na Obr. 34. MCU1 je STM32F446, výkonný 32bitový mikrokontrolér založený na jádře ARM Cortex-M4 vyráběný společností STMicroelectronics. Základní vlastnosti STM32F446:

- ARM Cortex-M4 s DSP instrukční sadou a jednotkou FPU (Floating Point Unit) a frekvenci až 180 MHz.
- Flash paměť 512 kB.
- SRAM 128 kB rozdělená do několika bloků.
- GPIO piny s možností přerušení.
- Tři 12bitové ADC, celkem 16 kanálů multiplexovaných na každý ADC.
- Dva 12bitové DAC kanály.
- Celkem 15 časovačů včetně PWM časovačů a RTC (Real-Time Clock) s podporou bateriového zálohování.
- Komunikace 6x USART/UART, 4x SPI, 3x I2C, 2x CAN, USB 2.0 (OTG Full-Speed a High-Speed).

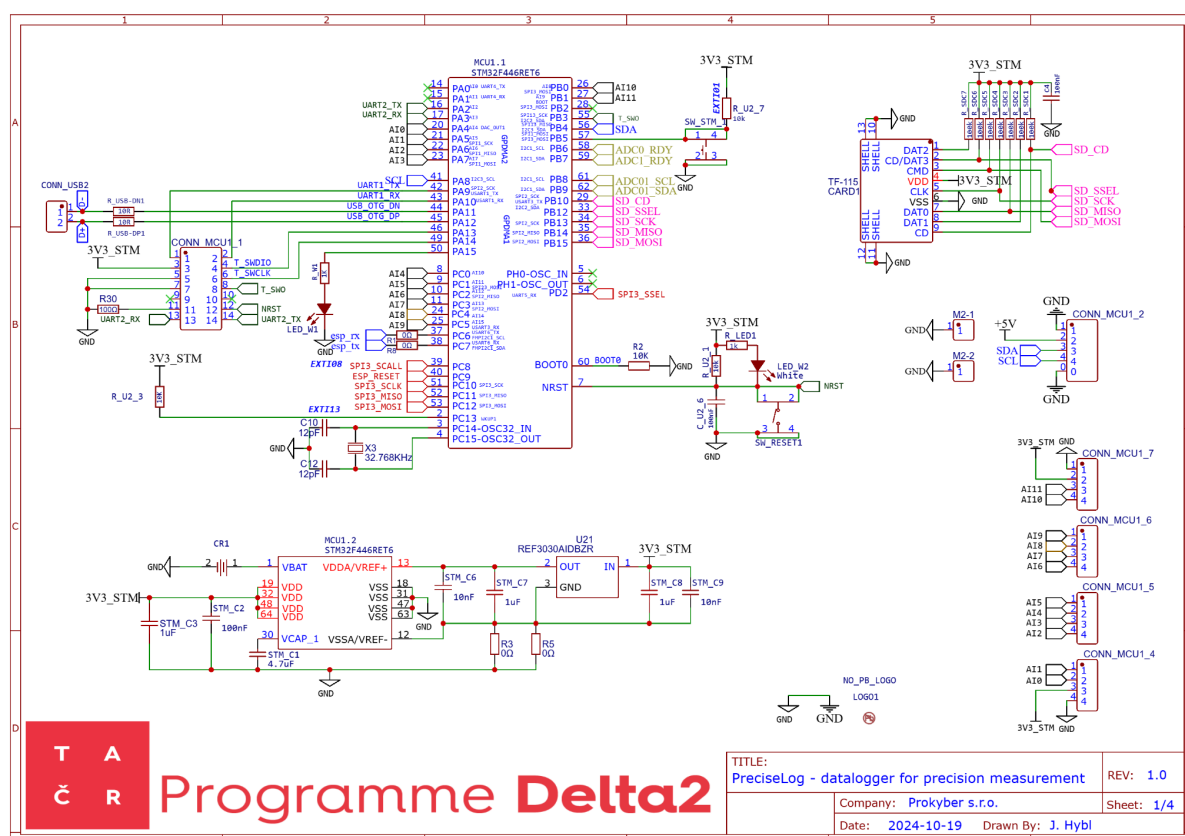
Propojení MCU1 a periférií je ve schématu (Obr. 34) zvýrazněno barvami a to:

- růžově jsou zvýrazněny vodiče micro SD karty CARD1
- červeně jsou zvýrazněny vodiče MCU2
- tmavě zeleně UART2 na svorkovnici CONN_MCU1_1
- zelenožlutě jsou zvýrazněny vodiče ADC01_SCL a ADC01_SDA I2C linky 2
- modře USB a I2C linka 3 s vodiči SDA a SCL vedoucími na Stemma QT konektor

Stemma QT konektor (od firmy Adafruit) je systém konektorů a rozhraní navržený pro snadné propojení senzorů, modulů a jiných periférií bez nutnosti pájení. Využívá standard I2C komunikace a je plně kompatibilní se systémem Qwiic od SparkFun.

Pro přesné měření na 12bitových ADC byl obvod doplněn precizní referencí REF3030, ve schématu IO U21.

Pro rychlou komunikaci s uživatelem je MCU doplněn 2 LED a to programovatelnou LED_W1 a LED_W2. LED_W2 slouží pouze k informování o stavu RESET, který je možné vyvolat stiskem tlačítka SW_RESET1. LED_W1 je ovládána FW MCU a poskytuje informaci o chodu FW.

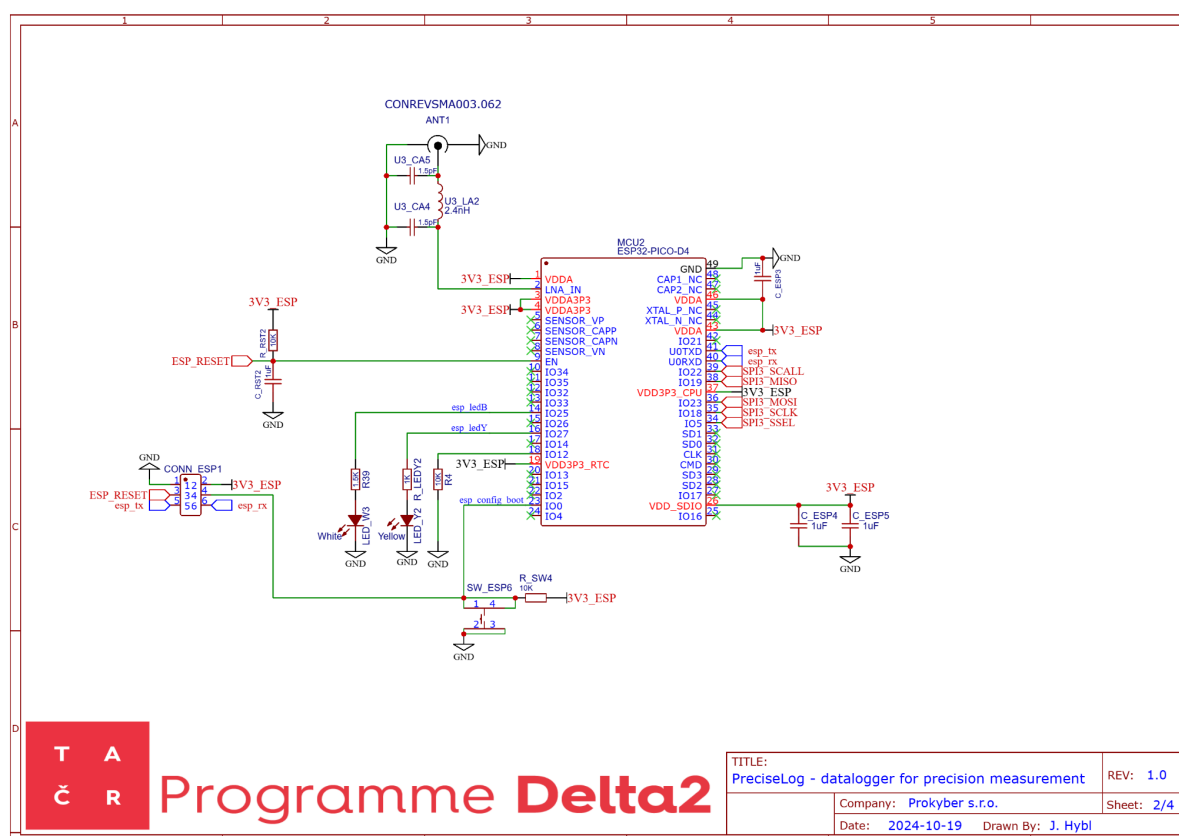


Obr. 34: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení mikrokontroléru STM32.

MCU2 je ESP32-PICO-D4, kompaktní systém na čipu (SoC) vyráběný společností Espressif Systems. Tento SoC integruje vše, co je potřeba pro bezdrátovou komunikaci, v jednom malém pouzdře. Periferie MCU2 jsou pouze napájecí kondenzátory C_ESP4, anténa ANT1 s filtračními kondenzátory, programovatelní LED_W3 a LED_Y2 a programovací konektor CONN_ESP1, viz schéma elektrických obvodů v Obr. 35. V rámci funkce PreciseLog jsou klíčové tyto vlastnosti ESP32-PICO-D4:

- Procesor Dual-core Xtensa LX6, dvě jádra, každé běží až na 240 MHz (dual-core, single-core), 32bitová architektura.
- Paměť flash 4 MB SPI, SRAM 520 kB interní SRAM + 8 kB RTC SRAM.
- Konektivita Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n (2,4 GHz), podpora Wi-Fi Direct a softwarového AP, podpora šifrování (AES, SHA, RSA), BLE (Bluetooth Low Energy) v4.2 a klasické Bluetooth (BR/EDR).
- Programovatelných 27 GPIO pinů.
- SPI a UART linky.
- Integrované napěťové regulátory pro snížení potřeby externích komponent.

Resetovací vodič ESP_RESET je připojen na MCU1 a umožňuje řízený reset do režimu hlubokého spánku.



Obr. 35: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení komunikačního modulu ESP32, který komunikuje s počítačem skrze Wi-Fi 2,4 GHz.

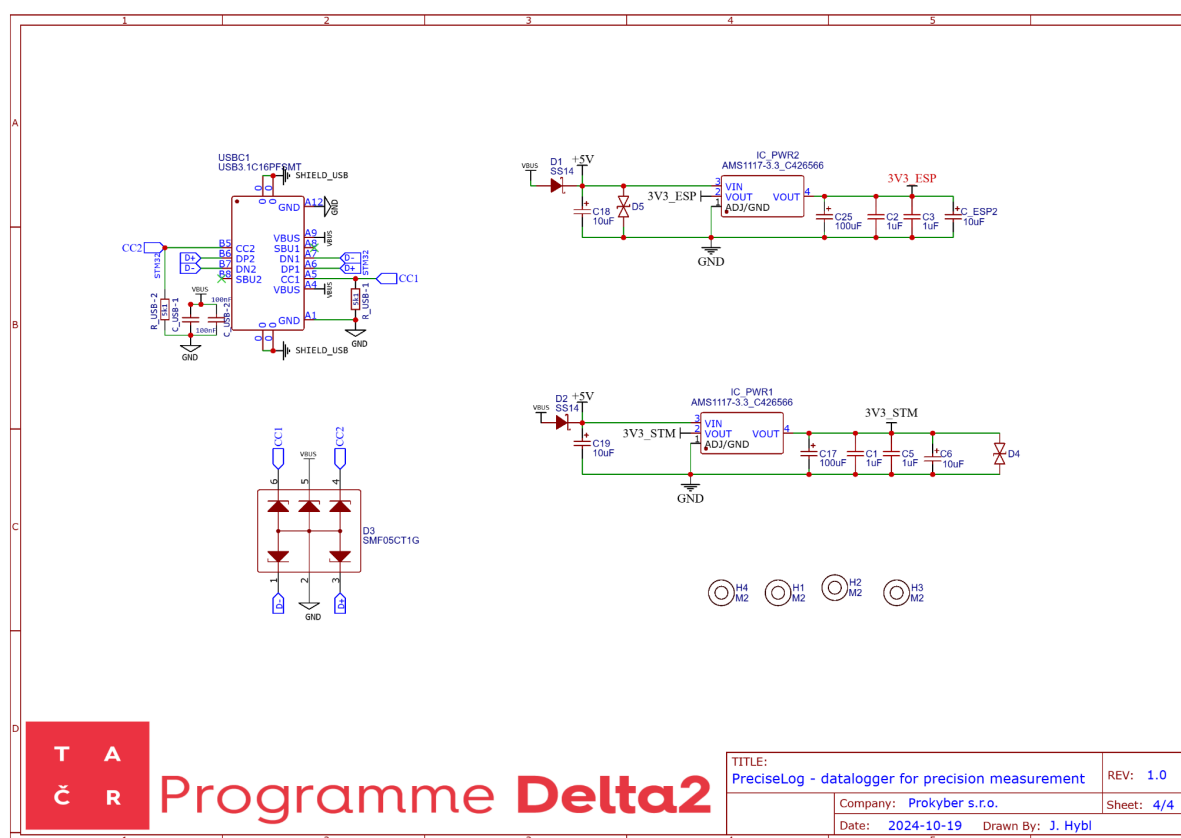
MoCap4AFR-PreciseLog má relativně jednoduché obvody pro napájení, v detailu vyobrazené ve schématu v Obr. 36. MoCap4AFR-PreciseLog využívá 2 IO AMS1117-3.3 ve schématu označeny IC_PWR1 a IC_PWR2, což jsou stabilizátory napětí (LDO - Low Dropout Voltage Regulator) navrženy pro snížení vyššího vstupního napětí na stabilní výstupní napětí 3,3 V. Základní vlastnosti AMS1117-3.3:

- Pevné výstupní napětí 3,3 V.
- Rozsah vstupního napětí 4,5 V až 15 V.
- Poklesové napětí (Dropout Voltage) typicky 1,1 V při 1 A.
- Výstupní proud max. 1 A.
- Přesnost výstupního napětí typicky $\pm 1\%$ při nominálních podmínkách.
- Ochrana proti zkratu automaticky sníží výstupní proud, aby ochránil obvod.
- Ochrana proti přehřátí automaticky vypne regulátor, při překročení provozního limitu.

IC_PWR1 a IC_PWR1 jsou doplněny sadou filtračních kondenzátorů pro zajištění vysoké stability výstupního napětí. Pro ochranu před přepětím a špičkami napětí (ESD ochrana) byly zvoleny TVS diody (Transient Voltage Suppressor) D4 a D5. Jedná se o dvoupólový (bipolární) prvek chránící před přepětím v obou směrech (symetrická charakteristika), tím že rychle snižuje vysoké napěťové špičky na bezpečnou úroveň, čímž chrání citlivé součástky.

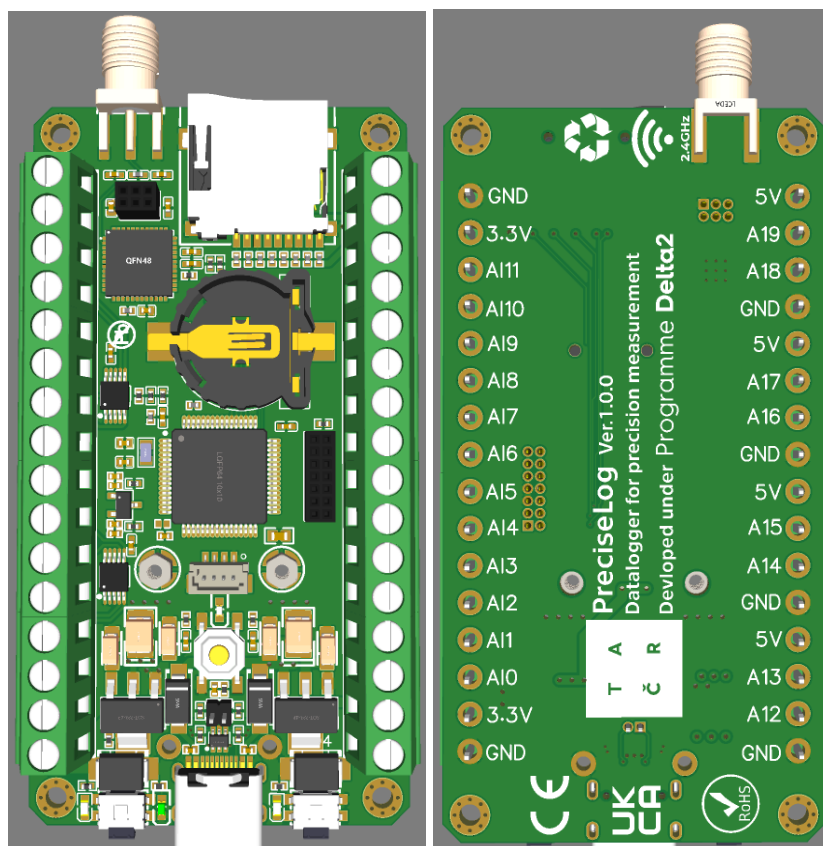
D4 je připojena na napětí 3V3_STM a D5 na napětí +5V. Ochrana proti přepólování je řešena pomocí usměrňovacích diod D1 a D2.

USB konektor USBC1 je doplněn ochranou SMF05CT1G, tedy TVS diodovou maticí určenou pro ochranu datových linek před přepětím, elektrostatickými výboji (ESD), a dalšími přechodnými napěťovými špičkami. Obvod ve schématu pod označením D3 je navržen tak, aby chránil až 5 linek, v případě MoCap4AFR-PreciseLog CC1, CC2, D-, D+ a VBUS. Ochrana odpovídá normám IEC 61000-4-2: ± 30 kV vzduchový a kontaktní výboj. Dle IEC 61000-4-5 odolnost 200 W při 8/20 μ s přechodným impulzu.

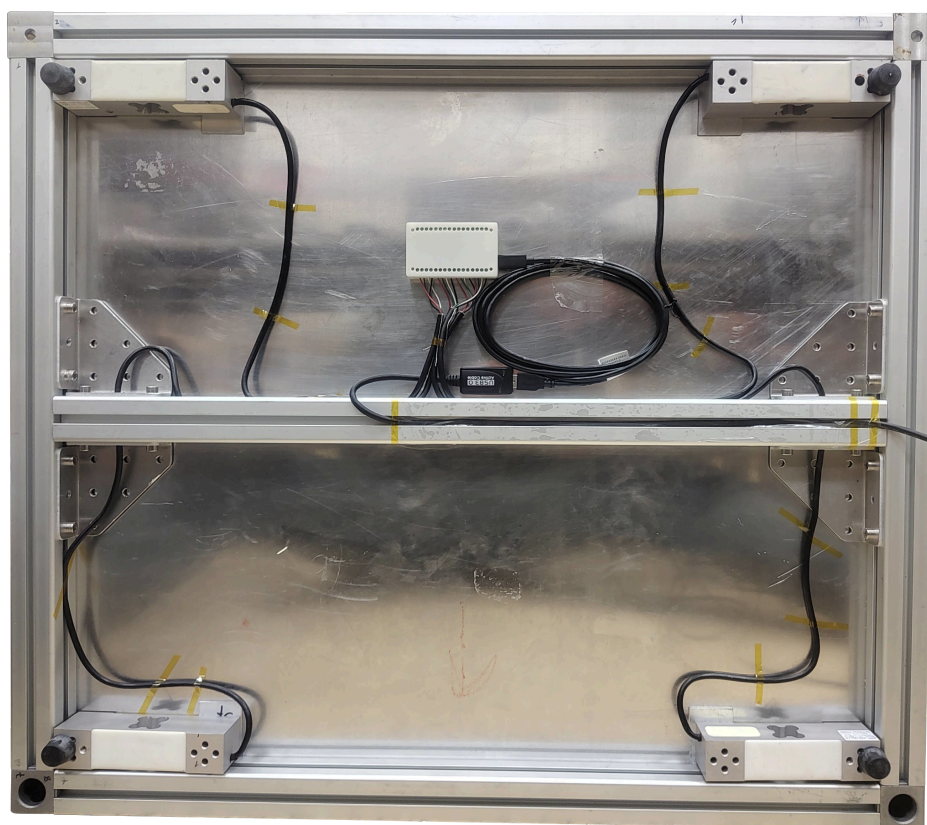


Obr. 36: Schéma zapojení elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog, detail zapojení napájecích obvodů a USB-C konektoru.

Osazená deska plošných elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog je na Obr. 37. Zapojení dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog v siloměrné plošině je na Obr. 38.



Obr. 37: Osazená deska plošných elektrických obvodů dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog.



Obr. 38: Zapojení dataloggeru MoCap4AFR-PreciseLog v siloměrné plošině

3.2.4. SOFTWARE SILOMĚRNÉ PLOŠINY

Software siloměrných plošin je součástí vyvíjeného SDK. API plošin využívá protokol ModBus RTU pro připojení stabilometrické plošiny přes sériový port. Připojení je zajištěno na základě unikátního sériového čísla. Po připojení jsou data z tenzometrů pravidelně čtena a aplikace zpracovává hodnoty napětí (SG1, SG2, SG3, SG4) z jednotlivých senzorů. V Obr. 39 je příklad zobrazení měřených dat v InfluxDB pomocí GUI webového rozhraní. Konkrétní nastavení je:

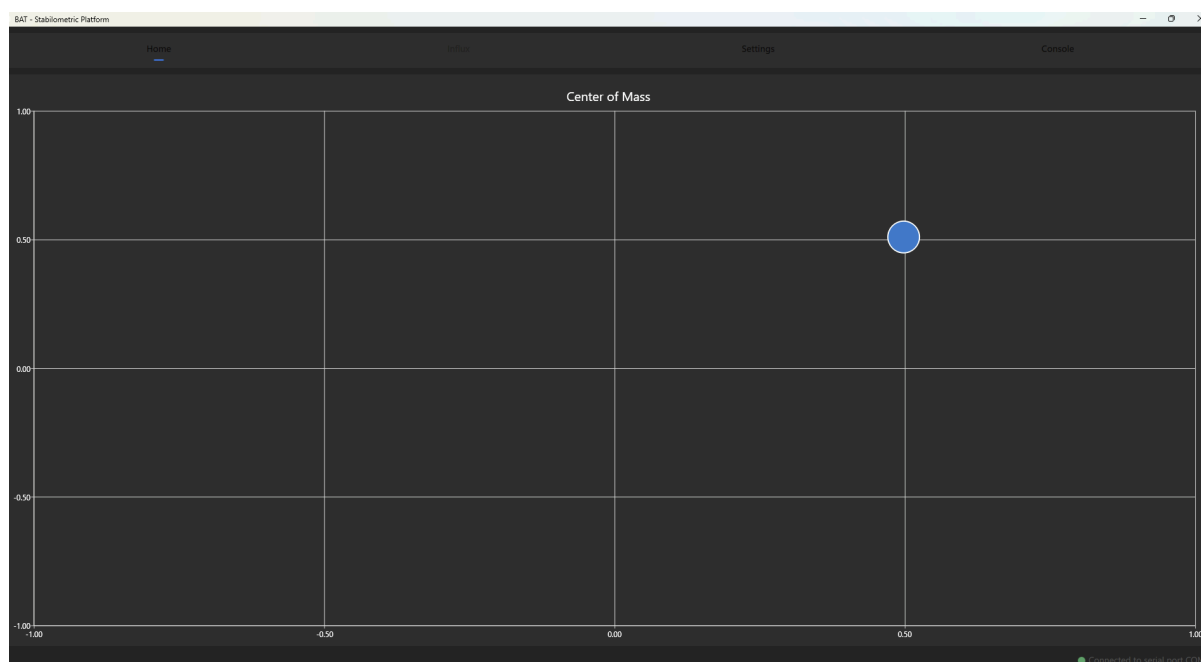
- Bucket: mocap (1. sloupec zleva FROM)
- Measurement: stabilometric_data (2. sloupec zleva Filter)
- Tags: sensors = SG1, SG2, SG3, SG4 (4. sloupec zleva Filter)
- Fields, je v podobě konkrétních hodnot vykresleno do grafu (modrá linie)



Obr. 39: Záznam tenzometrického senzoru do InfluxDB v SW pro záznam a zpracování pohybových dat ze stabilometrických plošin

Pro vizualizaci a interakci s uživatelem využívá SDK aplikaci s GUI založené na frameworku Qt. Rozhraní zobrazuje aktuální hodnoty měření, polohu COM, viz Obr. 40 a stav připojení k plošině. V aplikaci jsou implementována dvě pracovní vlákna, která zajišťují plynulý sběr dat i při náročném zpracování. Jedno vlákno se stará o monitorování připojení zařízení a inicializaci komunikace, zatímco druhé provádí sběr dat z tenzometrů, výpočty těžiště a jeho aktualizaci v reálném čase. Aplikace je konfigurovatelná a umožňuje uživateli například

nastavit sériový port pro připojení, synchronizovat čas zařízení ve formátu Unix epoch, nebo nastavit cesty pro ukládání lokálních souborů nebo InfluxDB .



Obr. 40: GUI SDK pro zobrazení polohy COM v SW pro záznam a zpracování pohybových dat ze stabilometrických platforem

ZDROJE

- [1] Technická dokumentace výrobce Teledyne Vision Solutions. Dostupné na:
<https://www.teledynevisionsolutions.com/support/support-center/application-note/iis/configuring-synchronized-capture-with-multiple-cameras/>
- [2] Technická dokumentace distributora vsk-profily. Dostupné na:
<https://www.vsk-profily.cz/hlinikovy-profil-im-30-6-30x30/>
- [3] Technická dokumentace snímače L6E od výrobce Zemic. Dostupné na:
<https://www.zemiceurope.com/en/l6e>