

**Název výsledku (en): Software for exercise, measurement and
evaluation of the musculoskeletal system**

**Název výsledku (cz): Software pro cvičení, měření a hodnocení
muskuloskeletálního systému**

Autor:

Ing. et Ing. Jan Hejda, Ph.D., (ČVUT),

Ing. Petr Volf, Ph.D. (ČVUT),

Ing. Marek Sokol, (ČVUT)

doc. Ing. Patrik Kutílek, Ph.D., (ČVUT),

Ing. Leová Lydie (ČVUT)

Mgr. Miroslav Rozložník, PhD. (Hydronaut Project a.s.)

Jiří Schneider (Hydronaut Project a.s.)

František Veselý (Hydronaut Project a.s.)

Stanislav Smolaga (Hydronaut Project a.s.)

Číslo projektu: TM04000062

Identifikační číslo výsledku: TM04000062-V3

Typ výsledku: R

Odpovědný pracovník: Mgr. Miroslav Rozložník, PhD.

PRAHA, ČERVEN 2025

Jazyk výsledku: CZE

Hlavní obor: JB - Senzory, čidla, měření a regulace

Uplatněn: ANO

Název výsledku česky:

Software pro cvičení, měření a hodnocení muskuloskeletálního systému

Název výsledku anglicky:

Software for exercise, measurement and evaluation of the musculoskeletal system

Popis výstupu/výsledku z návrhu projektu TM04000062 TAČR 4.VS DELTA 2:

Software umožňuje měřit, prezentovat a vyhodnocovat biomechanická data jednotlivců během cvičení v prostředí ICE. Grafický výstup ze softwaru informuje o stavu a kondici jednotlivých subjektů. Limitní hodnoty měřených dat lze pro každý subjekt nastavit individuálně, v souladu s očekávanými hodnotami konkrétního cvičícího. Tyto hodnoty může odborník určit a nastavit před měřením i v jeho průběhu.

Abstrakt k výsledku česky:

Modulární softwarový systém je určen pro zpracování a vizualizaci dat z nositelných EMG a IMU senzorů. Software umožňuje přijímat surová data, provádět jejich předzpracování, výpočet svalové aktivity a orientace segmentů těla a poskytovat přehlednou vizualizaci v desktopové aplikaci nebo VR prostředí. Pro podporovaný cvik „široký dřep“ systém využívá strojového učení k odhadu fáze pohybu a detekci chyb ve vykonávání cviku. Data mohou být ukládána do databáze časových řad pro následnou analýzu a dlouhodobé sledování vývoje fyzického stavu. Software přináší nové algoritmy pro synchronizaci a analýzu biosignálů, integruje AI pro automatickou interpretaci pohybového vzorce a umožňuje interaktivní nastavení referenčních hodnot svalové aktivity. SW podporuje biofeedback a tvorbu výzkumných datasetů pro aplikace v rehabilitaci, sportovní přípravě a simulovaném ICE prostředí. Výsledek je implementován v Pythonu a je kompatibilní s Windows a Linux. Software představuje originální řešení pro hodnocení pohybové aktivity a svalového zapojení v experimentálních i praktických podmínkách.

Abstrakt k výsledku anglicky:

The modular software system is designed for processing and visualizing data from wearable EMG and IMU sensors. The software enables the acquisition of raw data, preprocessing, computation of muscle activation and body segment orientation, and provides clear visualization in a desktop application or VR environment. For the supported exercise “wide squat,” the system uses machine learning to estimate the movement phase and detect execution errors. Data can be stored in a time-series database for subsequent analysis and long-term monitoring of physical condition. The software introduces new algorithms for synchronization and analysis of biosignals, integrates AI for automatic interpretation of movement patterns, and allows interactive setting of reference values for muscle activation. The software supports biofeedback and the creation of research datasets for applications in rehabilitation, sports training, and simulated ICE environments. The system is implemented in Python and is compatible with Windows and Linux. It represents an original solution for assessing physical activity and muscle engagement in both experimental and practical settings.

Klíčová slova česky:

pohybová aktivita, trénink, IMU, EMG, ICE prostředí

Klíčová slova anglicky:

physical activity, training, IMU, EMG, ICE environment

Vlastník výsledku:

České vysoké učení technické v Praze (IČO 68407700) - 40%,
Hydronaut Project a.s. (IČO 09756761) - 60%,

Lokalizace: Hydronaut Project a.s.

Licence: Ne

Licenční poplatek: Ne

Ekonomické parametry:

Ekonomické SW odpovídají vývojové fázi zařízení a zahrnují zejména náklady spojené s návrhem, vývojem, testováním a integrací. Náklady zahrnují také vývoj řešení pro sběr, předzpracování a bezdrátový přenos EMG a IMU dat, stejně jako vývoj uživatelského rozhraní pro vizualizaci dat na PC. V rámci projektu byla celková výše nákladů zařazena do kategorie do 25 mil. Kč.

Technické parametry:

Typ systému: modulární softwarová platforma pro zpracování a vizualizaci biosignálů (EMG/IMU)

Programovací jazyk: Python 3.11

Podporované operační systémy: Windows 10/11, vybrané distribuce Linuxu

Datové vstupy: surová EMG/IMU data z nositelných senzorů (multikanálové)

Výstupy: vizualizace svalové aktivity a orientace segmentů, detekce fází cviku a chyb, ukládání do databáze časových řad (InfluxDB)

Komunikační protokoly: MQTT pro realtime data, TCP/IP pro připojení senzorů

Integrace AI: 1D CNN pro odhad fáze pohybu a detekci chybných opakování

Vizualizační rozhraní: desktopová aplikace, VR

Datové formáty: JSON pro komunikaci mezi moduly

Kategorie nákladů: výše nákladů ≤ 25 mil. Kč.

Popis software

Softwarový systém (komerční název VirtualTrainer) pro on-line zpracování a vizualizaci dat z nositelných EMG/IMU senzorů. Skládá se ze dvou hlavních modulů: serverového modulu **main**, který zajišťuje příjem a zpracování signálů, a vizualizační části **vt_gui**, která prezentuje vypočtené parametry uživateli v reálném čase. Modul main přijímá surová data z podporovaných senzorů, provádí jejich předzpracování a analýzu. Na základě konfigurace modul odesílá výsledné časové řady do databáze InfluxDB a/nebo publikuje zvolené parametry prostřednictvím protokolu MQTT.

V případě cviku „široký dřep“ systém navíc využívá metody umělé inteligence k automatickému určení aktuální fáze pohybu a k detekci typických chyb v provedení cviku. Vyhodnocené výstupy mohou být vizualizovány buď v dodané vizualizační aplikaci, nebo v dalších klientech, například ve VR digitálním dvojčeti (VR twin). V těchto prostředích je možné zobrazit MVCP (relativní zapojení sledovaných svalových skupin), nastavit referenční individuální MVC (maximum voluntary contraction), zvolit podporovaný cvik „široký dřep“, sledovat jeho fázi a přehledně zobrazovat identifikované chyby provedení.

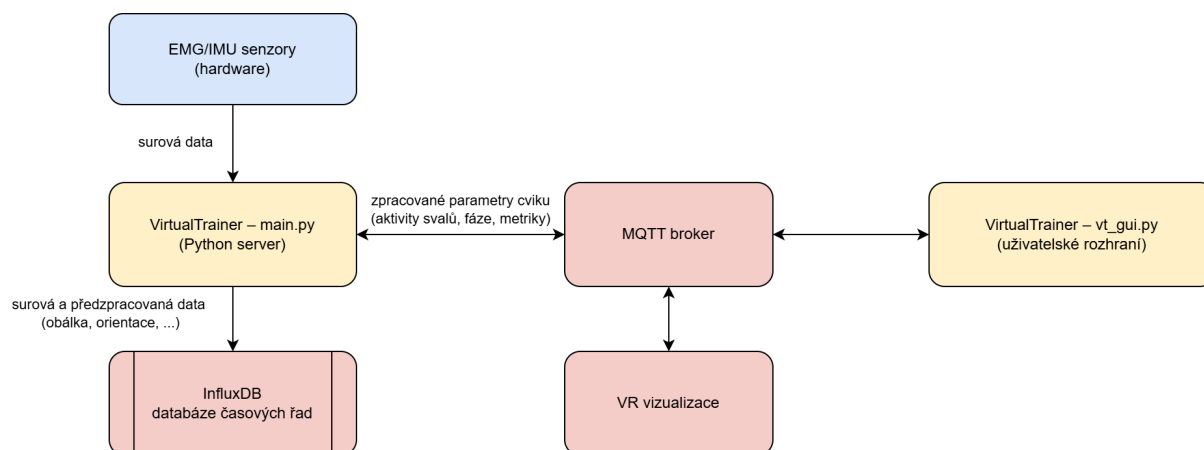
Software je vyvíjen v jazyce Python (verze 3.11) a je určen primárně pro běh v prostředí Windows 10/11 a vybraných distribucí Linuxu.

Software je v současnosti používán jako interní nástroj výzkumné skupiny a je dostupný na vyžádání pro akademické a výzkumné partnery. Licenční režim je v době podání výsledku interní (autorské dílo ve vlastnictví ČVUT v Praze, FBMI).

Uživatelské rozhraní i interní dokumentace jsou v angličtině.

Struktura

Software VirtualTrainer je navržen modulárně (viz Obr. 1) a skládá se ze serverového modulu **main** a jednoho nebo více vizualizačních modulů (např. desktopová aplikace **vt_gui**, VR twin). Serverová část zajišťuje příjem a zpracování signálů z EMG/IMU senzorů a jejich distribuci dalším aplikacím prostřednictvím databáze časových řad InfluxDB a/nebo komunikačního protokolu MQTT. Vizualizační část pak z těchto dat vytváří přehlednou zpětnou vazbu o zapojení svalů a kvalitě provedení cviku.



Obr. 1 Diagram aplikace - moduly softwaru vyznačeny žlutě, červeně jsou vyznačeny externí softwarové moduly a modře podporovaný hardware.

Serverový modul main

Modul main představuje serverovou část systému. Funguje jako TCP/IP server naslouchající na portu 8888, ke kterému se připojují EMG/IMU senzory jako klienti a průběžně odesílají surová data. Každý senzor je v konfiguraci jednoznačně přiřazen ke konkrétní pozici na těle; v základním nastavení se počítá se svalovými skupinami m. biceps brachii, m. triceps brachii, m. quadriceps femoris a m. gastrocnemius.

Po přijetí dat modul provádí předzpracování signálů, typicky:

- filtraci EMG (band-pass),
- výpočet lineární obálky EMG,
- výpočet orientace senzoru na základě 9DoF IMU (akcelerometr, gyroskop, magnetometr), reprezentované tzv. kvaternionem.

Další činnosti modulu jsou konfigurovatelné pomocí argumentů příkazové řádky. Podle nastavení lze:

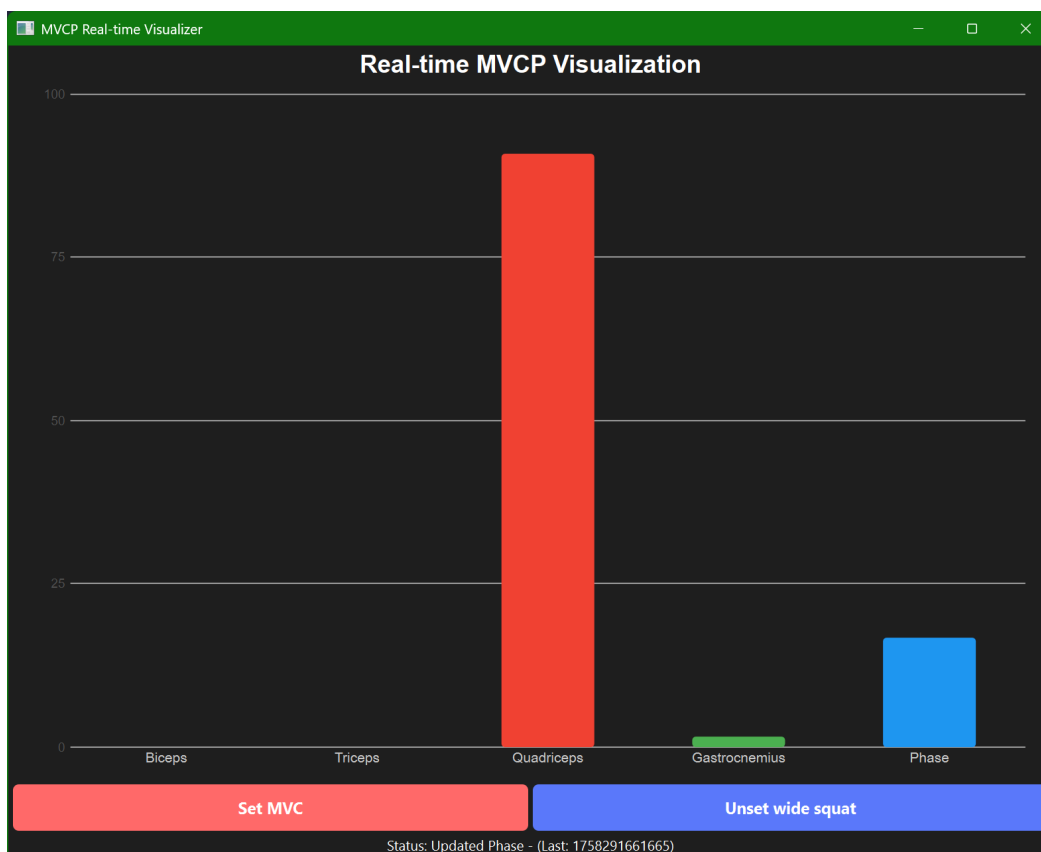
- 1) Odesílat data do databáze časových řad InfluxDB:
 - ukládat surové a předzpracované EMG/IMU signály,
 - podporované vzorkovací frekvence:
 - EMG: 1000 Hz (nativní frekvence senzorů) nebo 200 Hz (downsampling typicky pro případ omezené výpočetní nebo paměťové kapacity),
 - IMU: 100 Hz.
- 2) Publikovat parametry přes MQTT:
 - EMG parametry (hodnota obálky pro jednotlivé svaly),
 - MVCP (relativní zapojení sledovaných svalových skupin),
 - IMU parametry – zejména kvaternion vyjadřující orientaci senzoru,
 - aktuálně zvolený cvik a jeho specifické parametry.

Pro podporovaný cvik „široký dřep“ modul využívá AI model k určení:

- fázi cviku (hodnota 0 až 100 určující např. excentrickou, spodní, koncentrickou fázi cviku),
 - chyb provedení, jako je nevhodné tempo, nesprávná technika zdvihu či nízká konzistence opakování.
- 3) Reagovat na povely z vizualizační aplikace (MQTT) - prostřednictvím MQTT může vizualizační aplikace:
 - spustit měření MVC (nastavení referenčních maximálních hodnot svalové aktivity),
 - nastavit aktuální cvik (např. přepnutí na „široký dřep“).

Vizualizační modul vt_gui

Modul vt_gui je desktopová aplikace v Pythonu (Obr. 2), která slouží jako hlavní uživatelské rozhraní systému VirtualTrainer. Připojuje se k MQTT brokeru, odebírá zprávy publikované modulem main.py, převádí je do interní podoby a v reálném čase zobrazuje stav cvičení a zapojení jednotlivých svalů.



Obr. 2 Ukázka modulu vt_gui při vizualizaci širokého dřepu. Je znázorněno téměř maximální zapojení m. quadriceps a fáze blížící se spodní poloze. Tlačítko Set MVC umožňuje nastavení referenční hodnoty svalové aktivity a Set/Unset wide squat spuštění/ukončení hodnocení širokého dřepu.

Příjem dat a komunikace

Obsah typické zprávy je ve formátu JSON a zahrnuje:

- časové razítko (timestamp),
- slovník senzorů (sensors), kde jsou pro jednotlivé svaly (např. Biceps, Triceps, Quadriceps, Gastrocnemius) k dispozici:
 - stav (status – např. Active),
 - hodnota EMG obálky (emg_envelope),
 - relativní aktivace ve % MVC (mvcp),
 - orientace segmentu v podobě kvaternionu (quat_wxyz),
 - aktuálně sledované cvičení (exercise, např. "wide_squat"),
 - popis fáze cviku (exercise_description, např. phase jako číselný indikátor průběhu pohybu nebo případně detekované chyby cviku).

Formát a struktura zpráv jsou navrženy tak, aby bylo možné vt_gui relativně snadno rozšířit o další svalové skupiny nebo nové typy cviků.

Vizualizace MVCP a stavu cvičení

- Pro každý sval zobrazí vt_gui grafickou reprezentaci jeho aktivace v relativních hodnotách vůči dříve naměřenému MVC.

Na základě příznaků status, emg_envelope a mvcp aplikace:

- zvýrazňuje aktivní svalové skupiny,
- umožňuje uživateli rychle identifikovat přetěžované nebo málo zapojené svaly.

V případě cviku široký dřep (exercise = "wide_squat") využívá vt_gui informace z exercise_description (např. phase) k:

- zobrazení aktuální fáze cviku (excentrickou, spodní, koncentrickou fázi cviku, apod.),
- zobrazení případných upozornění na chyby provedení, pokud jsou takové informace předány z main.py (např. nesymetrie, nedostatečný rozsah pohybu, nesprávné časování).

Řídící funkce (MVC a hodnocení dřepu)

Kromě pasivního zobrazení dat nabízí vt_gui i interaktivní ovládání celého procesu měření:

Nastavení MVC

- Uživatel může v aplikaci spustit proceduru nastavení MVC pro všechny svalové skupiny (kalibrační měření maximální vůlí vyvolané kontrakce).
- Po dokončení MVC měření vt_gui pracuje s uloženými MVC hodnotami jako s referencí pro výpočet a vizualizaci MVCP.

Spuštění a ukončení hodnocení širokého dřepu

- Aplikace umožňuje zahájit a ukončit hodnoticí blok pro cvik široký dřep.
- Během aktivního hodnocení vt_gui v reálném čase zobrazuje:
 - fázi cviku,
 - průběh aktivace relevantních svalů v % MVC,
 - případná upozornění na chyby provedení.

Díky tomu modul vt_gui propojuje výpočetní backend (main) s uživatelem/terapeutem a poskytuje přehlednou, interaktivní vizualizaci stavu svalové aktivace a kvality provedení cviku v reálném čase.

Integrované metody strojového učení

Pro automatické hodnocení fáze cviku „široký dřep“ byl vyvinut regresní model, který odhaduje průběh pohybu v rozsahu 0–100 %, kde hodnota 0 odpovídá horní výchozí pozici, 50 % spodní poloze a 100 % návratu do horní pozice. Model byl natrénován na vlastním datasetu obsahujícím záznamy 20 osob, které v rámci širšího měřicího protokolu opakovaně prováděly mimo jiné i cvik „široký dřep“. Kvalita provedení jednotlivých opakování byla následně hodnocena expertem – fyzioterapeutem, jehož hodnocení slouží jako referenční rámec pro interpretaci výstupů modelu a identifikaci nesprávné techniky.

Pro trénink byly využity časové úseky multi-kanálových EMG/IMU signálů, reprezentující jednotlivé fáze dřepu. Vstupní data jsou předzpracována normalizací po kanálech (odečtení střední hodnoty a dělení směrodatnou odchylkou) a cílová hodnota fáze je škálována z intervalu 0–100 % do intervalu $(0, 1)$. Vzhledem k cyklickému charakteru fáze pohybu (0 % a 100 % představují stejnou polohu) je cílová veličina dále interně kódována jako bod na jednotkové kružnici prostřednictvím dvojice $[\sin(2\pi\varphi), \cos(2\pi\varphi)]$. Tím je odstraněn problém s diskontinuitou na přechodu mezi koncem a začátkem pohybového cyklu.

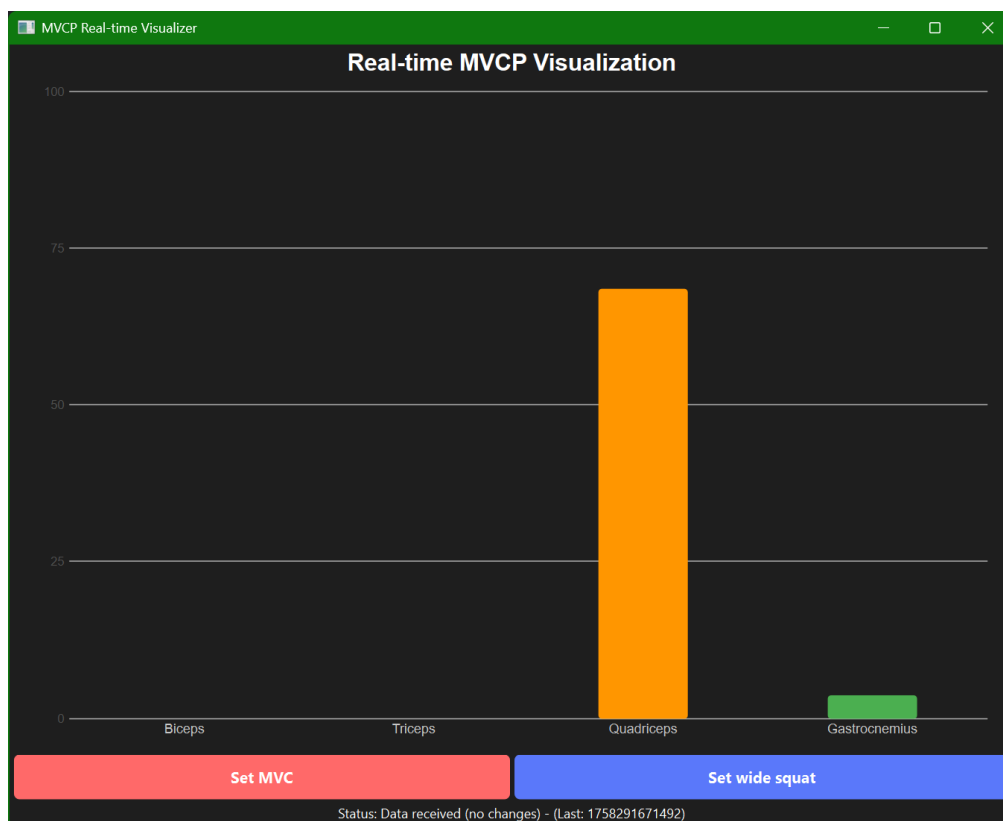
Vlastní model je implementován jako jednorozměrná konvoluční neuronová síť (1D CNN), která zpracovává vícekanálový časový průběh EMG/IMU. Trénink probíhá v prostředí PyTorch s využitím optimalizátoru Adam (počáteční learning rate 1×10^{-3}) a ztrátové funkce typu MSE mezi predikovaným a cílovým vektorem $[\sin, \cos]$. Pro zvýšení robustnosti modelu a omezení přeučení se využívá časová augmentace signálu (přidání šumu, náhodný časový posun, změna měřítka amplitudy, náhodné vynechání jednoho kanálu). Výcvik probíhá v 5-násobné křížové validaci. Kvalita modelu je vyhodnocována pomocí klasické střední kvadratické chyby (MSE), součinitele determinace (R^2) a kruhové střední absolutní chyby (circular MAE), které respektují cyklickou povahu fáze pohybu.

Výsledný regresní model je integrován do serverového modulu main, kde v reálném čase odhaduje fázi širokého dřepu z aktuálně snímaných EMG/IMU dat a poskytuje tak podklad pro vizualizaci průběhu pohybu a detekci chyb v modulu vt_gui a případně ve VR twin prostředí.

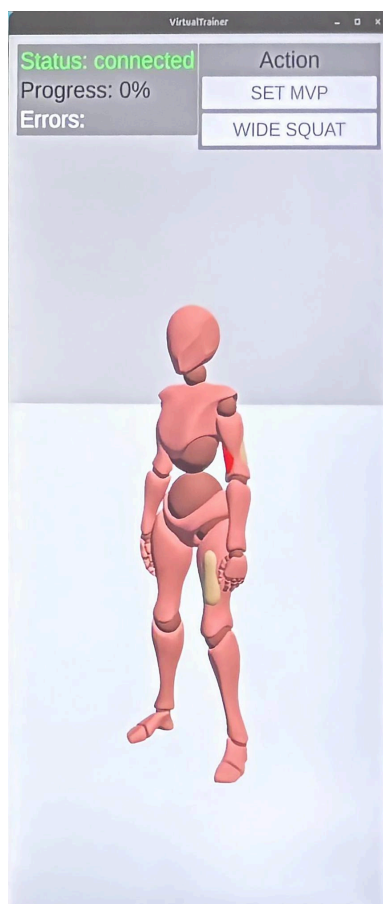
Možnost integrace externích aplikací

Biofeedback

Na základě použití protokolu MQTT je možné zajistit biofeedback cvičící osobě pomocí modulu vt_gui (Obr. 3), případně pomocí externích aplikací, jako je virtuální dvojče (Obr. 4).



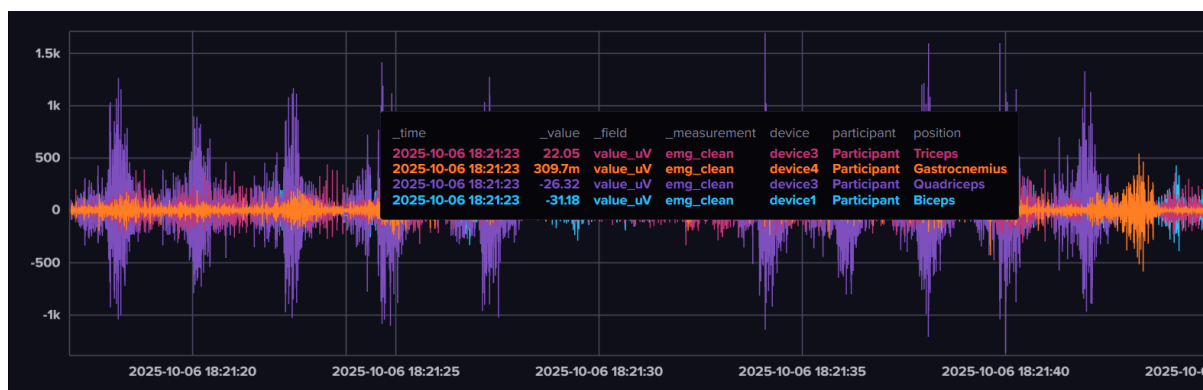
Obr. 3 Modul vt_gui při hodnocení svalové činnosti zobrazením MVCP.



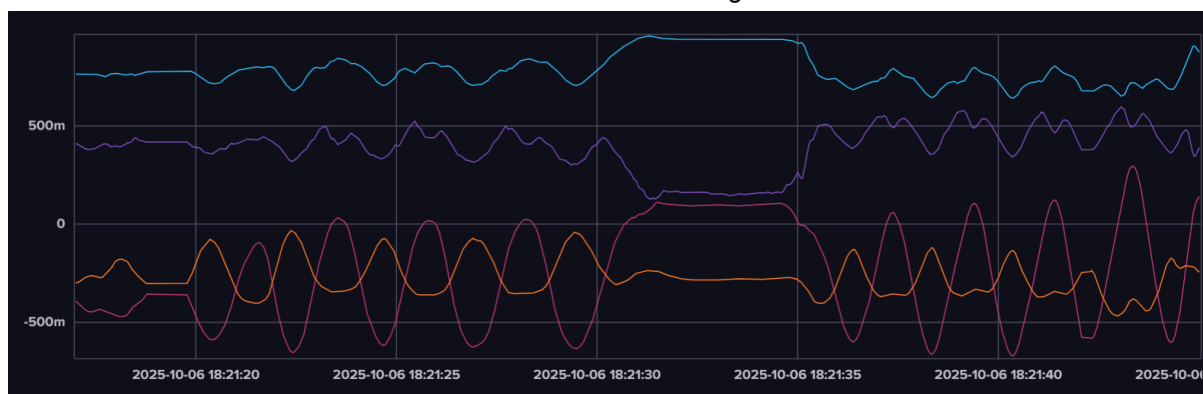
Obr. 4 Ukázka externí aplikace zpracovávající MQTT data z modulu main a zobrazující 3D postavu s barevným znázorněním aktivace svalových skupin a fáze cviku. Aplikace je využitelná na PC, tabletech i brýlích pro virtuální realitu.

Kvantitativní a kvalitativní hodnocení

Surová i zpracovaná EMG a IMU data mohou být v nastavené vzorkovací frekvenci průběžně odesílána do databáze časových řad InfluxDB (Obr. 5 a 6), kde jsou k dispozici pro kvantitativní i kvalitativní hodnocení. Tato architektura umožňuje jak on-line sledování průběhu měření v reálném čase (např. během cvičební jednotky), tak detailní post-processing s možností zpětné analýzy jednotlivých cvičení i celých tréninkových bloků. Vyšetřující osoby tak mohou dlouhodobě sledovat vývoj fyzického stavu měřených osob při cvičení, porovnávat jednotlivé seance, identifikovat trendy zlepšení či zhoršení a hodnotit efekt různých tréninkových nebo rehabilitačních intervencí.



Obr. 5 Ukázka frekvenčně filtrovaného EMG signálu v databázi InfluxDB



Obr. 6 Ukázka polohových vektorů (kvaternionů) v databázi InfluxDB.

Software umožňuje standardizovat záznam a vyhodnocení cvičení se zapojením hlavních svalových skupin horních i dolních končetin. V kombinaci s databází časových řad a vizualizačními klienty (vt_gui, VR twin) poskytuje nástroj pro dlouhodobé sledování efektu tréninku či rehabilitace, objektivní hodnocení kvality provedení cviků a tvorbu výzkumných datasetů. Výsledky mohou být využity jak ve výzkumu (např. intervenční studie, analogové mise v izolovaném, uzavřeném a extrémním (ICE) prostředí), tak v klinické praxi a sportovní přípravě.

Softwarový systém VirtualTrainer odráží současné požadavky na přesné, spolehlivé a uživatelsky komfortní monitorování svalové a pohybové aktivity v náročném prostředí ICE. Software je navržen tak, aby zpracovával a vizualizoval data z nositelných EMG a IMU senzorů bez ztráty kvality signálu a v reálném čase poskytoval přehledné informace o zapojení svalových skupin a kvalitě provedení cviků. Na základě výsledků získaných testováním a experimentálním měřením byla provedena analýza všech zaznamenaných biosignálů. Tyto poznatky byly využity k optimalizaci algoritmů pro předzpracování dat, výpočet svalové aktivity, detekci charakteristik pohybu a identifikaci chyb, čímž bylo dosaženo efektivnější vizualizace a zlepšení interakce se softwarem při jeho používání v prostředí ICE.