

LTstep: inovatyvi nešiojamoji eisenos analizavimo sistema su tiesioginiu grįžtamuoju ryšiu

Martynas Ramanauskas*¹, Gintaras Kučinskas², Birutė Rataitė²

¹Klaipėdos valstybinės kolegijos Kineziterapijos ir grožio terapijos katedra,
Dariaus ir Girėno g. 8, Klaipėda. Tel. 8 659 65 131, el. paštas m.ramanauskas@kvk.lt

²Klaipėdos valstybinės kolegijos Inžinerijos ir informatikos katedra,
Bijūnų g. 10, Klaipėda. Tel. 8 655 38385, el. paštas: g.kucinskas@kvk.lt, b.rataite@kvk.lt

(Gauta 2021 m. balandžio mėn.; atiduota spaudai 2021 m. gegužės mėn.; prieiga internete nuo 2020 m. gegužės 11 d.)

Anotacija

Straipsnyje apžvelgiami žmogaus kūno dalių judesio analizės ir eisenos stebėjimo bei analizės būdai, kurie yra labai svarbūs reabilitacijos ir sporto mokslo srityje. Eisenos parametrai dažniausiai kinta vyresniame amžiuje arba esant tam tikroms patologijoms: galvos smegenų insultui, Parkinsono ligai, trauminiui galvos smegenų pažeidimui, išsėtinei sklerozei, būklėms po traumų ar chirurginių intervencijų, o jauname amžiuje pagrindiniai – judamojo aparato pažeidimai. Tyrimo tikslas buvo sukurti „LTstep“ judesio analizės sistemos prototipą su grįžtamuoju ryšiu, kurį būtų galima naudoti klientams / pacientams iširti, namų reabilitacijos programai įgyvendinti bei treniruojant sportininkus, siekiant aukštesnių sportinių rezultatų arba nustatyti pagrindinius traumų rizikos veiksnius.

Reikšminiai žodžiai: *LTstep sistemos prototipas, eisenos ir judesio analizė.*

Abstract

The article reviews the methods of analysis of the movement of human body parts and analysis of gait, which are essential in the field of rehabilitation and sports science. Walking parameters usually change in old age or with certain pathologies: stroke, Parkinson's disease, traumatic brain injury, multiple sclerosis, conditions after trauma or surgery, and at a young age, the main ones are musculoskeletal disorders. The aim of the study was to develop a prototype of LTstep motion analysis system (with direct feedback) that could be used for client / patient assessment, home rehabilitation programs, and athlete training to achieve higher athletic performance or identify main risk factors.

Key words: *LTstep system prototype, gait and motion analysis*

Įvadas

Žmogaus eisenos analizė šiuo metu yra daugelio mokslinių tyrimų objektas (Caldas ir kt. 2017; Muro-De-La-Herran ir kt., 2014), o pavieniai tyrimai, tiriantys kiekybinius žmogaus eisenos parametrus, pradėti XIX amžiuje (Holub, 2017). Esant mobilumo funkcijos sutrikimui, reabilitacijos specialistai, dirbdami su žmogaus atramos ir judėjimo sistema, vertina klientų / pacientų eisenos parametrus. Vienas iš pagrindinių eisenos parametrų yra žingsnio ilgis (Brognara ir kt., 2020). Vidutinis vyrų žingsnio ilgis yra apie 78 cm, o moterų – 67 cm. Taip pat vertinamas žingsnių kiekis per tam tikrą laiko tarpą, ritmas, pėdos pastatymo kampas, plotis bei greitis (Magee ir kt., 2016). Eisenos parametrai dažniausiai kinta vyresniame amžiuje arba esant tam tikroms patologijoms: galvos smegenų insultui, Parkinsono ligai, trauminiui galvos smegenų pažeidimui, išsėtinei sklerozei, būklėms po traumų ar chirurginių intervencijų (Ashhar ir kt., 2017; Bruijn & Van Dieën, 2018). Mobilumo funkcijos sutrikimas apibūrinamas, kai ėjimo greitis yra mažesnis nei 80 cm/sek (Genthe ir kt., 2018; Washabaugh ir kt., 2017).

Eisenos parametrams vertinti naudojami įvairūs klinikiniai ir instrumentiniai ištyrimo metodai: TUG, GAIT, WGS, RVGA klinikinės eisenos vertinimo skalės, instrumentinė pėdos spaudimo taškų analizė su jėgos platforma (*Zebri sistema, Kistler platforma*), 3D vaizdo analizės metodai (*Vicon judesio stebėjimo, Mocap 3D judesio analizės sistema*) (Bagheri ir kt., 2018; Ferrarello ir kt., 2013; Niknam ir kt., 2017). Tačiau, minėti klinikiniai testai turi trūkumų. Pagrindinis trūkumas yra tas, kad klinikiniai testai ne visą laiką yra objektyvūs, nes skiriasi turima reabilitacijos specialistų patirtis bei



kompetencija (Muro-De-La-Herran ir kt., 2014). Instrumentinių eisenos ištyrimo sistemų trūkumai yra didelė įsigijimo kaina, didelės šių sistemų kalibravimo išlaidos bei reikalingas specialus reabilitacijos personalo apmokymas (van der Veen ir kt. 2019). Kai kurios eisenos analizavimo sistemos neteikia klientui / pacientui tiesioginio grįžtamojo ryšio, o eisenos parametrų duomenys pateikiami ir apdorojami tik jau po atlikto ištyrimo. Nors moksliniais tyrimais yra nustatyta, jog tiesioginis grįžtamasis ryšis gerina klientų / pacientų motyvaciją ir reabilitacijos efektyvumą (Afzal ir kt. 2015; Jafari ir kt. 2016).

Pažymėtina, kad išmaniųjų nešiojamųjų sistemų panaudojimo galimybės tiriant žmogaus eisenos parametrus yra labai didelės, nes jos finansiškai prieinamesnės ir mažesnio dydžio lyginant su laboratorijose naudojamomis stacionariomis žmogaus kūno judesius analizuojančiomis sistemomis (*Zebri sistema, Kistler platforma, Vicon sistema*) (Muro-De-La-Herran ir kt., 2014; Taborri ir kt. 2016).

Išmaniosios nešiojamosios sistemos gali būti panaudojamos ne tik eisenos parametrų fiksuoti ir analizuoti, bet ir klientų / pacientų namų reabilitacijos programai įgyvendinti, kai pagal paskirtą gydytojo gydymą klientai / pacientai namie savarankiškai atlieka individualias užduotis (Patel 2012; Kumari 2017). Telereabilitacijos metu gydytojai nuotoliniu būdu gali įvertinti klientų / pacientų reabilitacijos proceso eigą bei pokyčius pagal nešiojamųjų įrenginių sukauptus duomenis, konsultuoti klientą / pacientą apie reabilitacijos eigą ir dinamiką bei paskirti naujas individualias užduotis (Rodgers ir kt. 2019).

Mūsų tyrimo **tikslas** – sukurti autonominių nešiojamųjų eisenos analizavimo sistemos prototipą su tiesioginiu grįžtamoju ryšiu.

Tyrimo metodai ir priemonės

1. Atlikta mokslinės literatūros šaltinių analizė apie žmogaus kūno judėjimo ištyrimo metodus bei išmaniųjų nešiojamųjų sistemų panaudojimo galimybes.
2. Suprojektuota ir sukurta LTstep sistema – techniniai įrenginiai žingsnio ilgiui ir ritmui matuoti bei programinė įranga duomenims analizuoti ir atvaizduoti.
3. Sukurta LTstep sistemos programinė įranga (išmanioji programėlė) – programiniai sprendimai skirti analizuoti ir atvaizduoti žmogaus eisenos parametrus.

Tyrimui naudota techninė (1 lentelė) ir programinė įranga (2 lentelė).

1 lentelė. Tyrimui naudota techninė įranga
Table 1. Hardware used for research

Nr.	Pavadinimas	Kiekis vnt.
1	Mikrovaldiklis Arduino Nano su ATmega328P procesoriumi	2
2	Ultragarsinis atstumo matavimo jutiklis HC-SR04	6
3	Bluetooth ryšio modulis HC-05	1
4	433 MHz radijo ryšio siųstuvo modulis FS1000A	1
5	433 MHz radijo ryšio imtuvo modulis XD-RF	1
6	9 V baterija	2
7	3,5V mikrovariklis su ekscentriku.	1
8	Ulefone armor X7 (išmanusis telefonas su Android operacinė sistema)	1

2 lentelė. Tyrimui naudota programinė įranga
Table 2. Software used for research

Nr.	Pavadinimas
1	Arduino valdiklių programavimo platforma, v. 1.8.13
2	Fritzing v. 0.9.3
3	Visual Studio Community 2019 integruota programavimo aplinka (Java programavimo kalba (JDK8 versija))
4	MySQL duomenų bazė



Tyrimė naudojama metodika. Įrenginio matavimo tikslumo įvertinimui naudota metrinė liniuotė, keičiant daviklių atstumą tarpusavyje. Tyrimo metu paaiškėjo, kad LTstep sistemos matavimo tikslumas siekia ± 1 cm. Tas pats tikslumas išlieka, keičiant matuojamą atstumą iki 50-70 cm.

Ateityje planuojama kalibruoti ir validuoti LTstep sistemos tikslumą bei patikimumą remiantis optinėmis judesio analizės sistemomis (*Vicon arba Mocap 3D*), kurios Pasaulyje prilyginamos kaip „auksinis technologinis standartas“ analizuojant žmogaus eiseną bei jos parametrus (Caldas ir kt. 2017).

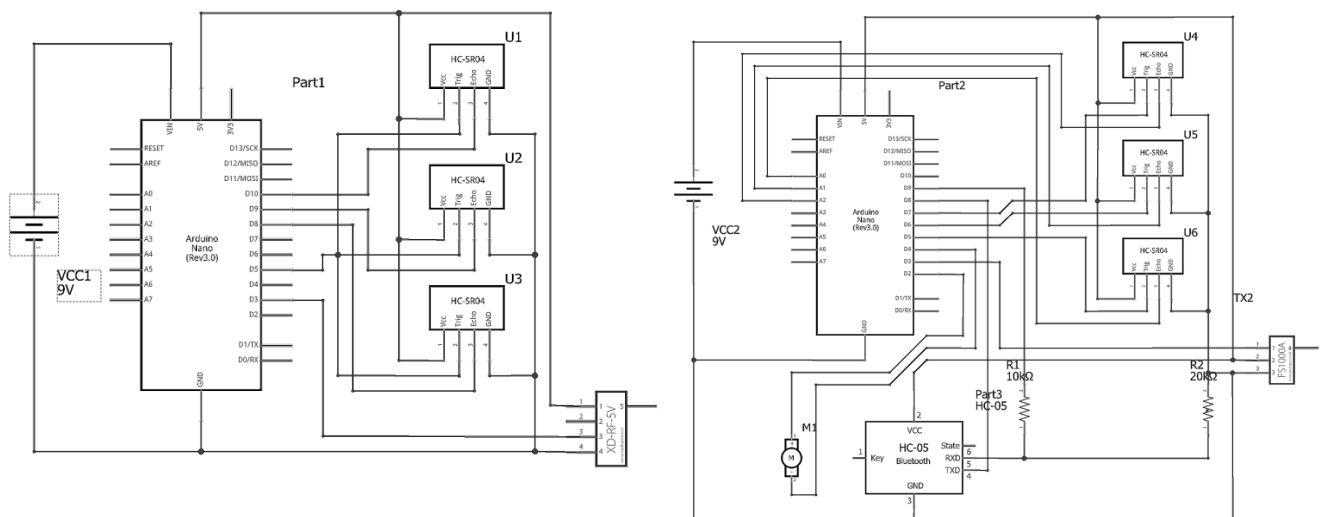
Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

Nešiojamųjų įrenginių pritaikymas žmogaus eisenos analizavimui. Vertinant žmogaus eiseną vieni iš pagrindinių fiksuojamų bei analizuojamų eisenos parametrų yra žingsnio ilgis, greitis, ritmas, kurie dažniausiai vertinami instrumentiniais ištyrimo metodais, nes jie yra objektyviausi. Vienas iš labiausiai populiarėjančių eisenos analizavimo metodų yra nešiojamųjų įrenginių panaudojimas (*angl. wearable devices*) (Muro-De-La-Herran ir kt., 2014).

Nešiojamuosiuose įrenginiuose yra naudojami specialūs davikliai: inerciniai davikliai (*IMU*), spaudimo plokštelės, elektroninis goniometras, elektromiografinis tyrimas (*EMG*), ultra-plačios sensorinės juostos (*UWB*), ultragarso davikliai (Caldas ir kt. 2017; Wahab, Bakar, 2011).

Ultragarso davikliai gali matuoti dideliu tikslumu, o jų kaina santykinai maža, tačiau jų išdėstymo galimybės yra ribotos. Lyginant su kitais davikliais naudojamais nešiojamuosiuose įrenginiuose, kurie vertina žmogaus eisenos parametrus, ultragarso daviklių teikiamų signalų skaičiavimo algoritmai yra žymiai paprastesni (Ashhar ir kt., 2017; Caldas ir kt. 2017; Muro-De-La-Herran ir kt., 2014).

LTstep prototipo techninis sprendimas (1 pav.). *Struktūra.* Įrenginį sudaro du moduliai – pagrindinis ir pagalbinis – tvirtinami prie tiriamojo kojų vidinių pusių.



1 pav. Principinė modulių schema

Fig. 1. Basic scheme of modules

Svarbiausias pagalbinio modulario elementas – mikrovaldiklis *Arduino Nano (Part1)* su ATmega328P procesoriumi. Prie mikrovaldiklio prijungti trys ultragarsiniai atstumo jutikliai HC-SR04 (U1-U3). Atstumo jutikliai modernizuoti, iš jų fiziškai pašalinus priimančiąją RX ultragarsinę galvutę. Siekiant, kad ultragarsinis impulsas būtų išspinduliuojamas vienu metu, visų jutiklių Trig kontaktai sujungti ir prijungti prie valdiklio skaitmeninio D5 kontakto, nustatyto dirbti išėjimo



(*OUTPUT*) režimu. Atsakymą generuojantys jutiklių kontaktai Echo prijungti prie valdiklio D8-D10 skaitmeninių kontaktų, nustatytų dirbti įėjimo (*INPUT*) režimu. Sinchronizaciją su pagrindiniu modulių užtikrina naudojamas XD-RF 433 MHz radijo imtuvo blokas, prijungtas prie valdiklio D3 skaitmeninio kontakto, nustatytą dirbti įėjimo (*INPUT*) režimu.

Pagrindinį modulį taip pat valdo mikrovaldiklis Arduino Nano (Part2) su ATmega328P procesoriumi. Pagrindiniame modulyje naudojami trys ultragarsiniai atstumo jutikliai HC-SR04 (U4-U6) su pašalintomis siunčiančiomis TX ultragarsinėmis galvutėmis. Trys jutikliai, išdėstyti puslankiu apie modulį, leidžia ne tik nustatyti atstumą iki kito modulio, bet ir jutiklių tarpusavio padėtį (priklausomai, nuo to, kuris jutiklis priėmė signalą). Jutiklių impulsą generuojantys kontaktai Trig prijungti prie valdiklio D5-D7 skaitmeninių kontaktų, nustatytų veikti išėjimo (*OUTPUT*) režimu. Jutiklių atsakymo kontaktai Echo prijungti prie valdiklio analoginių kontaktų A0-A2, nustatytų veikti įėjimo (*INPUT*) režimu. Sinchronizaciją su pagalbiniu modulių užtikrina FS1000A 433MHz radijo siųstuvo modulis, prijungtas prie valdiklio skaitmeninio D3 kontakto, nustatytą dirbti išėjimo (*OUTPUT*) režimu. Jutiklinį grįžtamąjį ryšį leidžia atlikti mikrovariklis su ekscentriku (M1), prijungtas prie valdiklio skaitmeninių D2 ir D4 kontaktų, nustatytų dirbti išėjimo (*OUTPUT*) režimu. Variklio maitinimas pagrįstas skirtumu tarp skaitmeninio nulio (0,5V) ir skaitmeninio vieneto (4,5V) būsenų įtampų. Jei valdiklio skaitmeniniuose išėjimuose yra skirtingos reikšmės (pavyzdžiui, D2 – HIGH, o D4 – LOW), tuomet susidariusio potencialų skirtumo pakanka varikliui maitinti.

Ryšiu su mobiliuoju įrenginiu naudojamas HC-05 Bluetooth modulis. Modulio TXD kontaktas prijungtas prie valdiklio skaitmeninio D8 kontakto, nustatytą dirbti įėjimo (*INPUT*) režimu. Bluetooth modulio RXD kontaktas, siekiant užtikrinti 3,3V modulio logikos veikimą, per įtampos daliklį (rezistoriai R1 ir R2) prijungtas prie valdiklio skaitmeninio D9 kontakto, nustatytą dirbti išėjimo (*OUTPUT*) režimu.

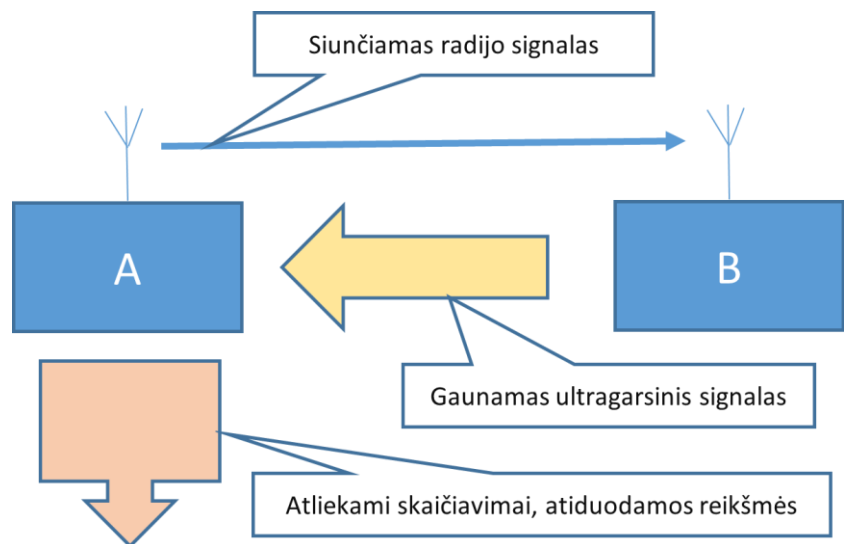
Atstumo matavimas. LTstep sistemos įrenginys sudarytas iš dviejų modulių. Atstumui tarp modulių nustatyti naudojami ultragarso signalai. Paprastai ultragarsiniai atstumo jutikliai veikia echolokacijos principu ir matuoja atstumą nuo jutiklio iki objekto. Šiuo atveju, sprendimas pagrįstas ultragarsinių impulsų sklidimo nuo vieno iki kito modulio laiko skaičiavimu. Sinchronizaciją užtikrina radijo signalas.

Modulių veikimą galima aprašyti tokia seka (2 pav.):

- Modulis („A“) siunčia radijo signalą pagalbiam moduliui („B“) – „generuoti ultragarsinių signalų seką“.

- „B“ generuoja ir siunčia ultragarsinį signalą.

- „A“ priima ultragarsinį signalą, nustato sklidimo trukmę, apskaičiuoja atstumą iki „B“ ir, pagal tai, kuris iš jutiklių priėmė signalą, nustato kojų padėtį.

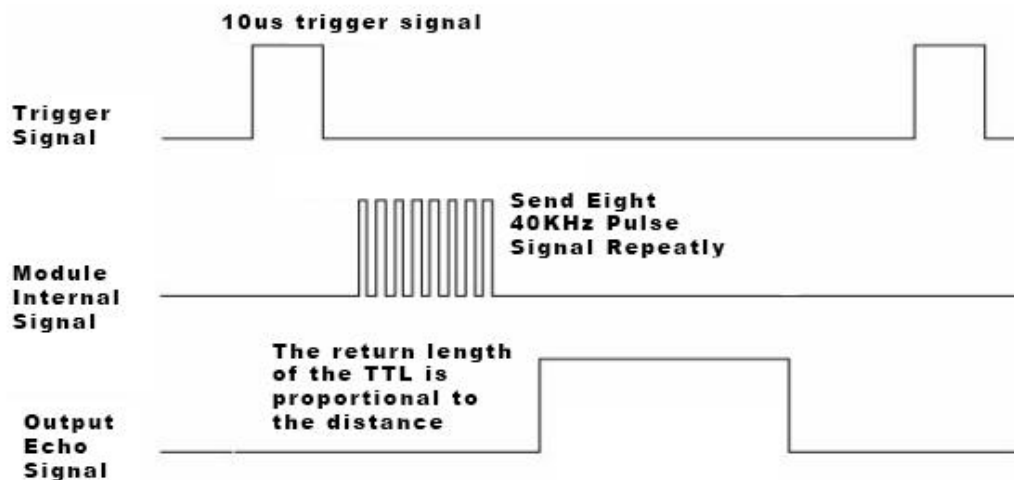


2 pav. Modulių veikimo principas

Fig. 2. Principle of operation of modules (Sending Radio signal; Receiving ultrasound signal; Calculating, returning the values)

Veikimas. Pagrindiniame modulyje formuojamas sinchronizacijos signalas ir radijo ryšiu siunčiamas į pagalbinį modulį. Pagalbinio modulio radijo dalis veikia imtuvo režimu. Gavus sinchronizacijos signalą jis vienu metu siunčia komandą trims ultragarsiniams jutikliams išsiųsti matavimo signalus (seriją ultragarsinių signalų suformuotų laike (3 pav.). Viena laikiškumas reikalingas tam, kad neatsirastų laiko matavimo intervalo netikslumų dėl programos kodo vykdymo ar vėlesnio ultragarsinio signalo išspinduliavimo. Signalai formuojami, pasinaudojant vidine HC-SR04 logika.

Naudojamus standartinius HC-SR04 įrenginius reikėjo modernizuoti (pašalinant siunčiamąją ar priimančiąją ultragarsinę galvutę), nes paprastai tokio tipo įrenginių paskirtis – matuoti atstumą iki kliūtis, nuo kurios atsispindi siunčiamas garso signalas. Mūsų atveju reikia nustatyti atstumą tarp dviejų ultragarsinių įrenginių – vienas įrenginys turi aptikti kito įrenginio siųstą signalą. Tam, kad būtų išvengta garsinių signalų maišymosi, buvo priimtas sprendimas fiziškai pašalinti elementą (kapsulę), generuojantį virpesius.



3 pav. HC-SR04 Ultragarsinio sensoriaus veikimo laikinė diagrama (Electrodragon, 2016)
Fig. 3. HC-SR04 Ultrasonic sensor operation time diagram (Electrodragon, 2016)

Išsiuntęs sinchronizacijos signalus radijo ryšiu, pagrindinis modulis laukia 100 µs, (užlaikymas nustatytas eksperimento būdu, laikas reikalingas radijo signalo priėmimui ir ultragarsinio signalo išsiuntimui). Po to tikrinamos jutiklių būsenos su 10 ms pauzėmis (reikalingomis radijo modulių ir naudojamos bibliotekos „NewPing“ darbui). Kiekvieno ciklo metu duomenys siunčiami Bluetooth ryšiu programai mobiliajame įrenginyje. Duomenys perduodami 115200 kB/s greičiu.

Perduodamų Bluetooth ryšiu duomenų struktūra:

X1 tarpas X2 tarpas X3 enter, nauja eilutė

Pastaba: X1 – pirmojo jutiklio atstumo duomenys, X2 – antrojo, ir X3 – trečiojo.

Modulis atlieka matuojamo parametro – žingsnio ilgio – palyginimą su matavimo pradžioje gautu parametru pagal nustatytus algoritmus aktyvuoja mikrovariklį, tokiu būdu sukeldamas virpesius ir realizuodamas grįžtamąjį ryšį tiriamajam.



Konstrukcija. Abu moduliai suprojektuoti kaip nepriklausomi įrenginiai (4 pav.), gumine juosta tvirtinami prie blauzdų distalinės dalies vidinės pusės. Ateityje planuojama konstrukciją daryti lanksčią, kad būtų patogiau tvirtinti prie įvairių įvairios apimties blauzdų.



4 pav. Modulių konstrukcija
Fig. 4. Design of modules

LTstep sistemos modulių konstrukciniai korpusai atspausdinti iš PLA plastiko, naudojant 3D spausdintuvą. Kiekvienas modulis maitinamas iš 9V baterijos, kurios vieta suprojektuota modulio išorėje – tai leidžia patogiai ją pakeisti, tam nereikia ardyti modulio. Baterijos talpos užtenka daugiau nei 5 val. veikimo trukmei.

Tobulinimo galimybės. Atliekant matavimus pastebėta, kad duomenų matavimas (techninėje dalyje) ne visuomet veikia stabiliai. Pastebimos praleistos reikšmės, nuliniai rezultatai. Atlikus daug bandymų, buvo padaryta išvada, kad matavimo tikslumui didelę įtaką daro atsispindėjęs garsas (aidas) nuo patalpos sienų ar aplinkinių daiktų. Dalis atsispindėjusių ultragarsinių signalų imtuvą pasiekia vėliau. Skirtingu laiku atėję impulsai klaidina valdiklį. Šioje srityje planuojama iširti modulių korpusų akustinių savybių gerinimą, garso linzių taikymą, kitokių sinchronizacijos metodų parinkimą, patikrinti kitą naudojamų elementų rinkinį bei iš esmės peržvelgti konstrukcijos koncepciją.

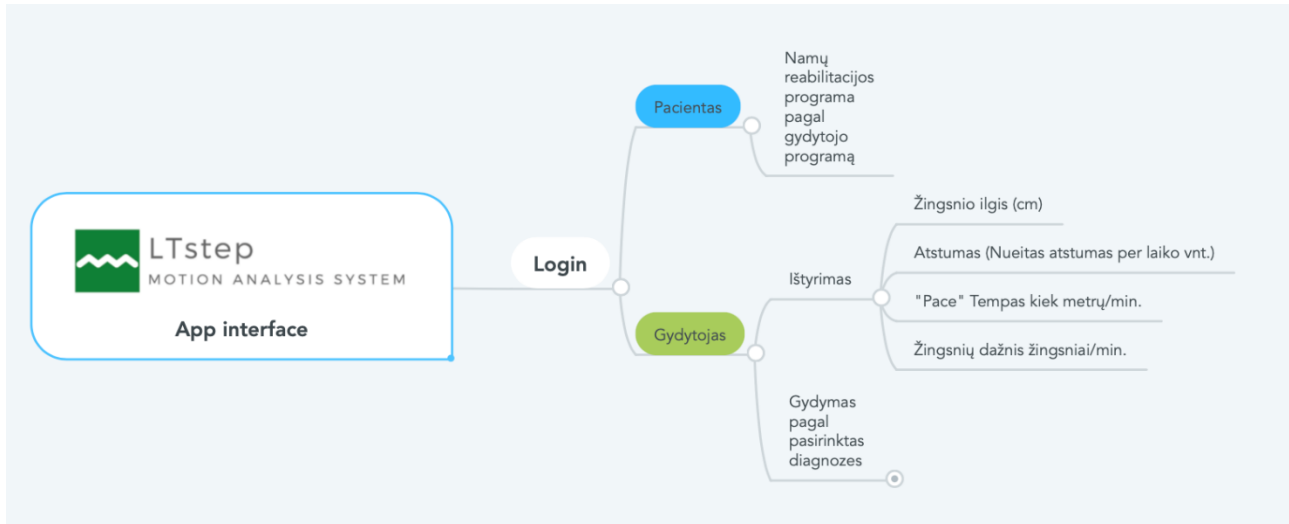
LTstep prototipo programinis sprendimas. Struktūra. Išmaniojoje programėlėje fiksuojami jau anksčiau minėti eisenos parametrai: žingsnio ilgis, ritmas, greitis, žingsnių dažnis (5 pav.).



5 pav. LTstep sistemoje fiksuojami žmogaus eisenos parametrai
Fig. 5. Human gait parameters recorded in LTstep system



Projektavimo metu buvo numatyta, kad mobiliojoje programėlėje bus du naudojimo režimai: gydytojo ir paciento (6 pav.). Terminas *pacientas* buvo galiausiai praplėstas ir pereita prie *klientas*, nes LTstep sistema gali būti naudojama ne tik gydymo tikslais, bet ir profilaktinės diagnostikos tikslais nesant ligos diagnozei.



6 pav. LTstep išmanios programėlės vartotojo sąsajos schema

Fig. 6. LTstep system mobile application graphic user interface circuit (LTstep system GUI)

Gydytojo režimas skirstomas į *Ištyrimą* ir *Gydymą*. Ištyrimas galimas pagal žingsnio ilgį, atstumą, žingsnio tempą ir žingsnio dažnį. Šis režimas reikalingas, kad gydytojas gautų kliento / paciento žingsniavimo parametrus ir galėtų atlikti suasmenintus kliento / paciento nustatymus. Gydymo režime gydytojas galės klientui / pacientui nustatyti diagnozę ir savarankiško darbo tikslus. Pagal suasmenintus nustatymus ir užduotis klientas / pacientas prisijungęs prie savo paskyros savarankiškai galės atlikti korekcines užduotis sau patogiu laiku ir vietoje, o užduočių atlikimo sesijų duomenis gaus jį gydantis (paskyrą sukūręs) gydytojas. Gydymo režime numatoma ne tik sekti gaunamus iš techninių modulių žingsnių parametrus, bet ir siųsti į modulius signalus, kad jie būtų perteikiami klientui / pacientui vibracijų forma per techninius modulius, pritvirtintus ant kojų (pvz., nepasiekus užbrėžto žingsniavimo greičio ar atstumo).

Veikimas. Mobiliojoje programoje numatytos dvi prisijungimo rolės:

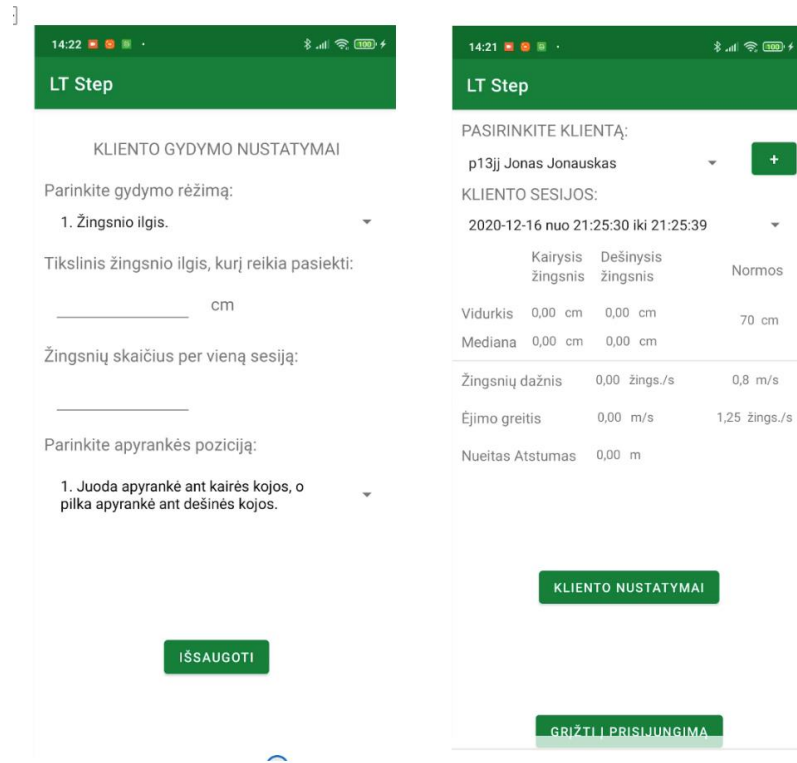
- Gydytojas – specialistas, kuris valdo savo klientų duomenis.
- Klientas – konkretaus gydytojo sukurtas programos naudotojas, galintis inicijuoti matavimų sesijas ir rinkti bei siųsti gydytojui duomenis.

Visi prisijungimo vardai koduoti siekiant apsaugoti konfidencialius duomenis. Klientų / pacientų sesijų duomenys saugomi koduotoje MySQL duomenų bazėje.

Gydytojas programoje gali:

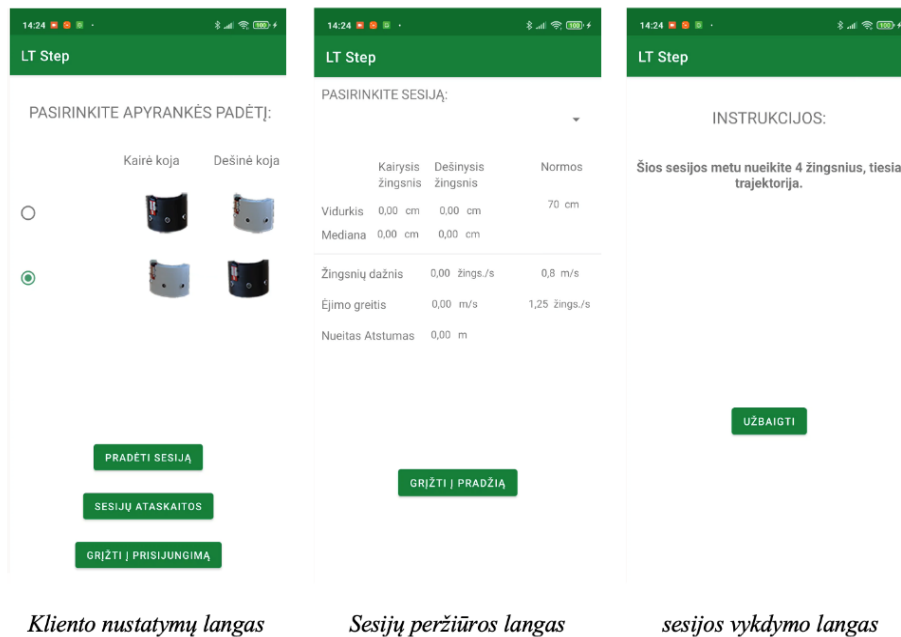
- sukurti naujus klientus / pacientus;
- keisti kliento / paciento sesijų nustatymus (žr. 7 pav. kairėje) ir tikslinius parametrus: iširti bei gydyti klientą / pacientą pagal patologiškus žingsnio ilgį, atstumą, žingsnio tempą ir žingsnio dažnį;
- peržiūrėti klientų / pacientų sesijų ataskaitas (žr. 7 pav. dešinėje).





7 pav. Gydytojo rolės langai programos grafinėje sąsajoje
Fig. 7. Therapist mode GUI

Paciento režime numatytas savarankiško darbo režimas (namų gydymo režimas), kurio metu klientas / pacientas turi pasiekti tam tikrus jam gydytojo priskirtus rodiklius (žr. 8 pav. dešinėje). Prieš pradėdamas sesiją, klientui / pacientui nurodoma ant kurios kojos užsidėti kokią daviklį (žr. 8 pav. kairėje). Pacientas savo aplinkoje gali peržiūrėti tik savo sesijų duomenis (žr. 8 pav. centre).



8 pav. Kliento / paciento rolės programos aplinkoje
Fig. 8. Client/patient GUI modes



Programos jungimasis su techniniais LTstep sistemos moduliais. Pradedant prisijungimą pirmiausia įsitikinama, kad „Bluetooth“ adapteris telefone yra įjungtas. Juo galima rasti visus „Bluetooth“ įrenginius, suporuotus su telefonu. Iš gauto sąrašo galima sužinoti, ar norimas HC-05 modulis yra suporuotas, jei ne, vartotojui parodomas pranešimas tai padaryti. Jei modulis yra suporuotas, jis yra pasirenkamas naudojamu „Bluetooth“ įrenginiu. Jį naudojant yra sukuriamas „Bluetooth“ lizdas (angl. *socket*), kuriuo atidaromas ryšys su pasirinktu įrenginiu. Atidarius ryšį galimi du veiksmi: imti duomenų srautą iš įrenginio arba jį siųsti įrenginiui. Šioms funkcijoms atlikti naudojantis sukurtu lizdu sukuriamas įvesties srauto objektas arba išvesties srauto objektas. Įvesties ir išvesties objektai naudojami nuskaityti iš įrenginio ateinančius duomenis arba išsiųsti duomenis į įrenginį. Baigus visus procesus, ryšys su „Bluetooth“ moduliu uždaromas.

Programos kūrimo įrankiai. Mobilioji programa pritaikyta tikslingai *Android* operacinei sistemai. Pasak GlobalStats, pasaulinėje rinkoje įrenginiai su įdiegta *Android* operacine sistema sudaro 71,8 % mobiliųjų įrenginių rinkos, o Lietuvoje – 72,41 %.

Buvo renkama iš keturių populiariausių integruotų kūrimo aplinkų: *AndroidStudio*, *Xcode*, *Visual Studio* ir *IntelliJ*. Kadangi programėlės prototipas kuriamas tikslingai *Android* operacinei sistemai, buvo atmesta *Xcode* ir *Visual Studio*. Iš dviejų likusių buvo pasirinkta *Android Studio*, nes ši yra pritaikyta būtent *Android* operacinei sistemai skirtų programų kūrimui ir turi daugiau pagalbinių funkcijų (Ashraf, 2020).

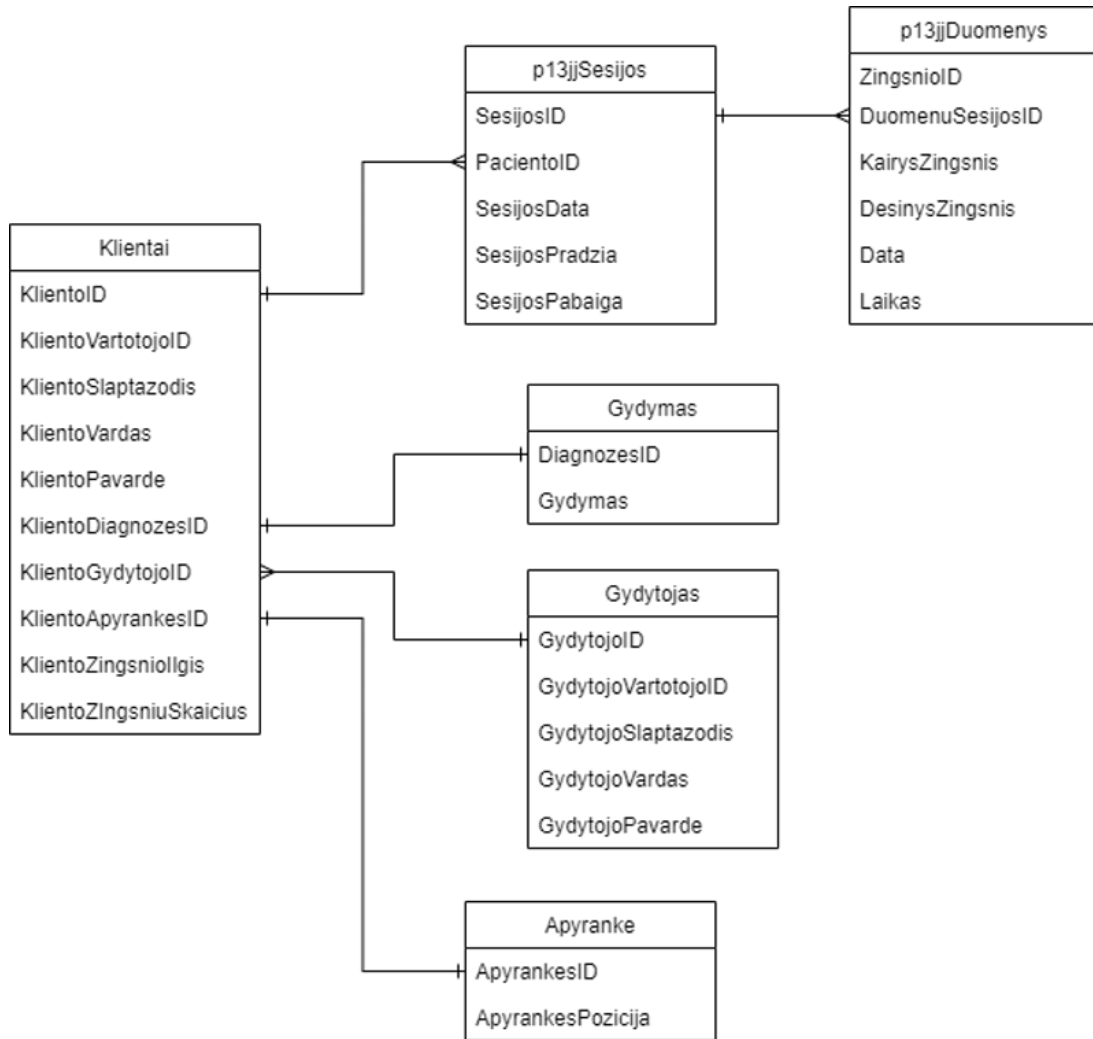
AndroidStudio – tai oficiali tikslingai *Android* operacinės sistemos programoms kurti skirta integruota kūrimo aplinka, padedanti paspartinti kūrimo procesą kuriant programas visiems *Android* operacinę sistemą palaikantiems įrenginiams. Programavimui šioje aplinkoje gali būti naudojamos *Java* arba *Kotlin* kalbos, o *LTstep* kūrimui buvo pasirinkta *Java* programavimo kalbos 8 versija. Šioje integruotoje programavimo aplinkoje esantis „*Android Emulator*“ įdiegia ir paleidžia programas telefono emuliacijoje ir tai leidžia prototipuoti bei išbandyti programas įvairių specifikacijų *Android* operacinę sistemą palaikančiuose įrenginiuose net ir neturint fizinio įrenginio. Integruotas versijų kontrolės įrankis padeda komandiniam programos kūrimo darbui. *LTstep* programinis kodas yra publikuotas *Gitlab* išorinėje saugykloje *LTstep* uždaros prieigos projekte.

Duomenys. Programa yra skirta surinkti ir dalintis duomenimis, todėl neapsieita be duomenų saugyklos. Šiam sprendimui didelę įtaką turi naudojama integruota kūrimo aplinka *AndroidStudio*. Ši integruota kūrimo aplinka turi pagalbines klases, skirtas valdyti *SQLite* duomenų bazių kūrimą ir versijų kontrolę, todėl tai būtų akivaizdžiausias pasirinkimas. Tačiau *SQLite* duomenų bazė yra lokali, t. y. pasiekama tik tame įrenginyje, kur naudojama programėlė. Kadangi programėlės naudotojai: gydytojas ir klientas / pacientas, naudojami skirtingais įrenginiais – tai jie turi turėti galimybę pasikeisti duomenimis. Tokiam sprendimui lokali duomenų bazė nebeužtenka, reikalinga išorinė duomenų bazė.

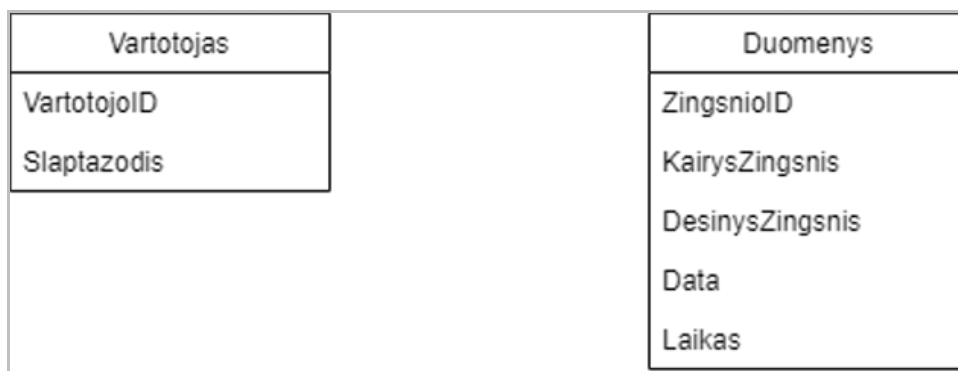
Pagrindiniai programos duomenys saugojami išorinėje *MySQL* duomenų bazėje. DB versija: 5.7.32-cll-lve - *MySQL Community Server* - (GPL). Programos duomenims saugoti suprojektuotos ir sukurtos duomenų bazės schema pavaizduota 9 paveiksle.

Kliento / paciento duomenys yra saugomi vienoje lentelėje. KlientoDiagnozėsID, KlientoApyrankesID ir KlientoGydytojoID yra išoriniai raktai, siejantys įrašus su duomenimis kitose DB lentelėse. Lentelės p13jjSesijos ir p13jjDuomenys saugo kliento / paciento, kurio ID yra p13jj, sesijų aprašus ir duomenis. Kiekvienam klientui / pacientui su unikaliu KlientoID yra sukuriama jo sesijų ir duomenų lentelės. Šioje duomenų bazėje yra saugomi duomenys surinkti kiekvienos sesijos metu. Kadangi duomenų perkėlimas į išorinę *MySQL* duomenų bazę realiu laiku labai sulėtina programos veikimo spartą, tai duomenų rinkimo metu duomenys saugojami lokaliaje *SQLite* duomenų bazėje telefone. Lokali *SQLite* duomenų bazės schema pavaizduota 10 paveiksle.





9 pav. MySQL DB schema
Fig. 9. MySQL DB schema



10 pav. Lokalios SQLite DB schema
Fig. 10. Local SQLite DB schema



Kaip ir minėta anksčiau, duomenys šioje DB saugojami jų rinkimo metu pačiame telefone. Duomenis, susietus su aktyvaus kliento / paciento ID, perkėlus į išorinę duomenų bazę, visa lentelė yra ištrinama, o nauja sukuriama, kai vėl pradedama duomenų rinkimo sesija. Lentelė Vartotojas saugo paskutinio aktyvaus naudotojo prisijungimo duomenis, kad jam jų nereikėtų suvesti kiekvieną sykį atidarius programėlę.

Kodas. Kiekvienas duomenų objektas turi savo klasę, Bluetooth ir duomenų bazių valdymas taip pat išskirtas į atskiras klases. Kiekvienas langas (*activity*) turi savo klasę. Iš viso programos projekte yra 19 klasių. Duomenų objektams yra paskirtos 3 klasės, apibūdinančios gydytojo informaciją, kliento / paciento informaciją bei sesijos duomenis. *Bluetooth* valdymui yra paskirtos dvi klasės, viena įgyvendinanti prisijungimą per Bluetooth sąsają, kita aprašanti algoritmų metodus. Dvi klasės yra skirtos dirbti su duomenų bazėmis: *SQLite* ir *MySQL*. Likusios 12 klasių aprašo kiekvieno programos grafinės naudotojo sąsajos lango veikimą.

Publikavimas. LTstep mobilioji programa yra publikuota *Google Play* aplinkoje su ribota prieiga, nes dar yra testavimo stadijoje. Ši programa negali būti išbandyta atskirai neturint techninio modulio, dedamo ant kojų, iš kurio imami sesijų duomenys. Programos grafinėje sąsajoje yra tik lietuvių kalba ir kitų kalbų pasirinkimo galimybių nėra, tad programa skirta tik labai ribotam naudotojų ratui, galinčių valdyti programą lietuvių kalba. Palaikomi *API*: minimali SDK versija, su kuria mobilioji programa dar gali veikti yra 16, nors tikslinė SDK versija yra 30. Google vertinimu, programa yra saugi publikuoti ir naudoti pagal *PEGI 3* standartą.

Išvados

1. Išmaniosios nešiojamosios sistemos gali būti panaudotos tiek eisenos parametrų fiksavimui ir analizei, tiek įgyvendinant klientų / pacientų telereabilitacijos (namų reabilitacijos) programas, kai pagal paskirtą gydytojo gydymą klientai / pacientai namuose savarankiškai atlieka individualias užduotis. Gydytojais nuotoliniu būdu gali įvertinti klientų / pacientų reabilitacijos proceso eigą, dinamiką, paskirti naujas individualias užduotis.
2. Įvertinus galimas technologijas, žingsnio ilgiui matuoti pasirinktas ultragarsinis metodas. Moduliams valdyti pasirinkti *Arduino Nano* mikrovaldikliai. Prototipo korpusas atspausdintas 3D spausdintuvu. Toliau vystant prototipą būtina padidinti matavimų stabilumą.
3. Ateityje būtų galima peržiūrėti programinės įrangos kūrimui naudojamas technologijas, leidžiančias greitesnę duomenų apdorojimą realiu laiku. Taip pat didinti pritaikomumą mobiliesiems įrenginiams ne tik su *Android* operacine sistema, bet ir pritaikant įrenginiams su *iOS* operacine sistema. Pritaikomumas mobiliesiems įrenginiams padidintų galimų naudotojų kiekį iki 99,19 % Lietuvoje registruotų mobiliųjų įrenginių naudotojų.

Literatūra

1. Afzal, R., Byun, Y., Oh, K., & Yoon, J. (2015). Effects of Kinesthetic haptic feedback on standing stability of young healthy subjects and stroke patients. *Journal of Neuroengineering and rehabilitation*, 12(1), 1-11.
2. Ashhar, K., Soh, C., Kong, K. (2017). A wearable ultrasonic sensor network for analysis of bilateral gait symmetry. In *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* P. 4455-4458. IEEE.
3. Ashraf M. (2020). Best IDEs for Mobile App Development | Our Top 5 Picks. Prieiga per internetą: <https://www.appverticals.com/blog/best-integrated-development-environments/>
4. Bagheri, R., Takamjani, E., Dadgou, M., Ahmadi, A., Sarrafzadeh, J., Pourahmadi, M., Jafarpisheh, S. (2018). Gender-related differences in reliability of thorax, lumbar, and pelvis kinematics during gait in patients with non-specific chronic low back pain. *Annals of rehabilitation medicine*, 42(2), 239.
5. Bluetooth (2018). An Introduction to Bluetooth Low Energy Development. Prieiga per internetą:



- <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-le-developer-starter-kit/>
6. Brognara, L., Navarro-Flores, E., Iachemet, L.; Serra-Catalá, N.; Cauli, O. (2020). Beneficial Effect of Foot Plantar Stimulation in Gait Parameters in Individuals with Parkinson's Disease. *Brain Sci.*, 10, 69.
 7. Bruijn, S. M., Van Dieën, H. (2018). Control of human gait stability through foot placement. *Journal of The Royal Society Interface*, 15(143), 20170816.
 8. Caldas, R., Mundt, M., Potthast, W., de Lima Neto, F. B., & Markert, B. (2017). A systematic review of gait analysis methods based on inertial sensors and adaptive algorithms. *Gait & posture*, 57, 204-210.
 9. Developers. Bluetooth overview. Prieiga per internetą: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth>
 10. Developers. Documentation for app developers. Prieiga per internetą: <https://developer.android.com/docs>
 11. Electrodragon (2016). *HC-SR04 Ultrasonic sensor*: https://www.electrodragon.com/w/HC-SR04_Ultrasonic_sensor
 12. Ferrarello, F., Bianchi, V. A. M., Baccini, M., Rubbieri, G., Mossello, E., Cavallini, M. C., Di Bari, M. (2013). Tools for observational gait analysis in patients with stroke: a systematic review. *Physical therapy*, 93(12), 1673-1685.
 13. Genthe, K., Schenck, C., Eicholtz, S., Zajac-Cox, L., Wolf, S., & Kesar, T. M. (2018). Effects of real-time gait biofeedback on paretic propulsion and gait biomechanics in individuals post-stroke. *Topics in stroke rehabilitation*, 25(3), 186-193.
 14. GlobalStats šaltinis: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>
 15. Holub, P. (2017). *Gait Analysis in the 19th Century: Motion Brought to Light*. Kindle Direct Publishing. ISO 690
 16. Jafari, N., Adams, K. D., & Tavakoli, M. (2016). Haptics to improve task performance in people with disabilities: A review of previous studies and a guide to future research with children with disabilities. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, 3, 2055668316668147.
 17. Kumari, P., López-Benítez, M., Lee, G. M., Kim, T. S., & Minhas, A. S. (2017). Wearable Internet of Things- from human activity tracking to clinical integration. *39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 2361-2364). IEEE.
 18. Magee J., Zachazewski E., Quillen S., Manske R. C. (2016). *Pathology and intervention in musculoskeletal rehabilitation*. Missouri: Elsevier.
 19. Muro-De-La-Herran, A., Garcia-Zapirain, B., & Mendez-Zorrilla, A. (2014). Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications. *Sensors*, 14(2), 3362-3394.
 20. Muro-De-La-Herran, A., Garcia-Zapirain, B., & Mendez-Zorrilla, A. (2014). Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications. *Sensors*, 14(2), 3362
 21. MySQL. MySQL Documentation. Prieiga per internetą: <https://dev.mysql.com/doc/>
 22. Niknam, H., Esteki, A., Salavati, M., & Kahrizi, S. (2017). Reliability of Zebris motion analysis system in healthy athletes and athletes with anterior cruciate ligament reconstruction. *Asian Journal of Sports Medicine*, 8(1).
 23. Rcscomponents. HC Serial Bluetooth Products. Prieiga per internetą: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/hc_hc-05-user-instructions-bluetooth.pdf
 24. Rodgers, M. M., Alon, G., Pai, V. M., & Conroy, R. S. (2019). Wearable technologies for active living and rehabilitation: current research challenges and future opportunities. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, 6, 2055668319839607.
 25. Simform (2017). How to Choose the Right Mobile App Database for Your Application. Prieiga per internetą: https://www.simform.com/mobile-app-developers-database-selection/?fbclid=IwAR25M9_3zq9fQPE8lg2wW7HKtRiIFgbGUNT6I5toQoV9YieWA3O6hbWEqA
 26. Slant. What are the best IDEs for Android development? Prieiga per internetą: <https://www.slant.co/topics/1321/~best-ides-for-android-development>
 27. SQLite. Features Of SQLite. Prieiga per internetą: <https://www.sqlite.org/features.html>
 28. Taborri, J., Palermo, E., Rossi, S., & Cappa, P. (2016). Gait partitioning methods: A systematic review. *Sensors*, 16(1), 66.
 29. van der Veen, S. M., Bordeleau, M., Pidcoe, P. E., France, C. R., & Thomas, J. S. (2019). Agreement analysis between vive and vicon systems to monitor lumbar postural changes. *Sensors*, 19(17), 3632.
 30. Wahab Y., Bakar N., "Gait analysis measurement for sport application based on ultrasonic system," 2011 IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), Singapore, 2011, pp. 20-24, doi: 10.1109/ISCE.2011.5973775.
 31. Washabaugh, E. P., Kalyanaraman, T., Adamczyk, P. G., Claflin, E. S., & Krishnan, C. (2017). Validity and repeatability of inertial measurement units for measuring gait parameters. *Gait & posture*, 55, 87-93.
 32. Your Team In India (2019). 5 Best IDE's for Android App Development. Prieiga per internetą: <https://www.yourteaminindia.com/blog/best-free-ide-android-app-development/>



LTstep: an Innovative Wearable Gait Analysis System with Direct Feedback

(Received in April, 2021; Accepted in May, 2021; Available Online from 11th of May, 2021)

Summary

Objective - The aim of our study is to develop an autonomous wearable gait analysis system prototype with direct feedback.

A literature review was performed. Designed and developed LTstep gait analysis system with direct feedback. The LTstep system consists of two modules which are placed on the patient/client legs. Ultrasonic signals are used to determine the distance between the modules with ultrasonic sensors. Typically, ultrasonic distance sensors operate on the principle of echolocation and measure the distance from the sensor to the object. In this case, the solution is based on the calculation of the time of propagation of ultrasonic pulses from one module to another.

The study showed that the measurement accuracy of the LTstep system reaches ± 1 cm. The same accuracy remains when changing the measured distance to 50-70 cm.

The mobile application on the Android operating system was developed using the Visual Studio Community integrated programming environment and the Java programming language (JDK8 version). The code is published in the Gitlab external platform as a closed access project.

In the future, it is planned to calibrate and validate the accuracy and reliability of the LTstep system based on optical motion analysis systems (Vicon or Mocap 3D), which are “golden technological standard” for analysing human gait

Conclusions. 1. Smart wearable systems can be used both for recording and analysis of gait parameters and in the implementation of client / patient telerehabilitation (home-based rehabilitation) programs, when clients/ patients perform individual tasks independently at home according to the treatment prescribed by a therapist. Therapists can remotely assess the progress and dynamics of the client / patient rehabilitation process, assigning new individual tasks.

2. After evaluating the available technologies, the ultrasonic sensors were chosen to measure the step length. Arduino Nano microcontrollers were selected for module control. The body of the prototype was printed with a 3D printer. Further development of the prototype is necessary to increase the stability of the measurements.

3. In the future, it should be reviewed the technologies used for software development, which allow faster real-time data processing and expand the application to mobile devices not only with Android operating system, but also to iOS operating system devices, which would increase the number of potential users to 99.19% in Lithuania registered mobile device users.

