

SODOBNE METODE MERJENJA GIBANJA

CONTEMPORARY METHODS OF MOVEMENT MEASUREMENT

doc. dr. Andrej Olenšek, univ. dipl. inž. el.

Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije – Soča, Ljubljana

Povzetek

Zmožnost dobro koordinirati gibanje je verjetno ena najpomembnejših sposobnosti, ki se jih človek nauči. Omogoča natančno premikanje in izvajanje aktivnosti v tri-dimenzionalnem prostoru kot tudi natančno manipulacijo predmetov. Ker je kot tako neposredno povezano s kakovostjo življenja, je zanimanje za proučevanje in analizo človekovega gibanja že dolgo prisotno, vedno pa je bilo podvrženo trenutnim tehnološkim rešitvam in teoretičnemu znanju. V kliničnem okolju se moderne metode merjenja gibanja danes ne omejujejo zgolj na merjenje kinematike, ampak združujejo še merjenje kinetike, pogosto pa se vključuje še dinamično elektromiografijo. So široko uporabne na vseh raziskovalnih področjih, kjer je gibanje osrednji predmet proučevanja, na področju rehabilitacije in v klinični kineziologiji, na športnem področju in zabavni industriji. Za merjenje kinematike se mnogokrat uporabljajo elektronski goniometri in inercialni senzorji, v zadnjem čas pa jih pogosto nadomeščajo optični sistemi za merjenje gibanja, saj je bilo zanje razvitih mnogo standardnih protokolov merjenja. Za merjenje kinetike so precej enostavno uporabljajo pritiskovni senzorji, integrirani v vložke za čevlje ali v pohodne podloge. Ker merijo zgolj vertikalno obremenitev, za natančnejše merjenje reakcijskih sil pogosto porabljamo pritiskovne plošče, še boljše alternativa pa so instrumentacijski tekoči trakovi s pohodno površino deljeno v pohodno površino za levo in desno nogo. Danes so sistemi za merjenje in analizo gibanja temeljni integralni del sodobnih avtomatiziranih rehabilitacijskih rešitev.

Ključne besede:

analiza hoje; kinematika in kinetika hoje; sklepni koti; sklepni momenti in moči; reakcijska sila podlage

Abstract

Being able to appropriately coordinate movement is probably one of the most important capabilities that humans learn. It enables accurate movement and performing activities in three-dimensional space as well as accurate manipulation of objects. As this is so directly related to the quality of living, the interest for studying and analysis of human movement has been long present, yet limited to available technological solutions and theoretical knowledge. Contemporary methods of movement measurement in clinical environment are not limited to kinematics measurements, but also combined with measurement of kinetics and often also include dynamic electromyography. They are widely used in all research areas where the movement is of primary interest, in rehabilitation and in clinical kinesiology, in sport and in the entertainment industry. Electronic goniometers and inertial sensors are often used for measuring kinematics. However, they are increasingly replaced by optical systems for which standardised measurement protocols have been developed. For kinetic measurements, pressure sensors integrated into shoe insoles or walkways are often used. As they only measure vertical pressure, force plates provide a more accurate alternative for measuring ground reaction forces. Even more advanced are instrumented treadmills with walking surface split into separate walking surfaces for the left and right leg. Systems for movement measurement and analysis are today a basic integral element of modern automated rehabilitation solutions.

Keywords:

gait analysis; gait kinematics and kinetics; joint angles; joint moments and powers; ground reaction force

UVOD

Zmožnost dobro koordinirati gibanje je verjetno ena najpomembnejših sposobnosti, ki se jih človek nauči. Omogoča natančno premikanje in izvajanje aktivnosti v tri-dimenzionalnem prostoru kot tudi natančno manipulacijo predmetov. Ker je kot tako neposredno povezano s kakovostjo življenja, je zanimanje za proučevanje in analizo človekovega gibanja že dolgo prisotno, vedno pa je bilo podvrženo trenutnim tehnološkim rešitvam in teoretičnemu znanju (1).

Prvi začetki proučevanja gibanja so tako bili omejeni na opazovanje, ki je bilo tudi osnova za razvoj prvih intuitivnih teorij o kontroli gibanja (2). Z razvojem anatomije so nastala spoznanja, da so motorji gibanja mišice in njihova zmožnost krčenja (3), gibanje pa se je s celotnega telesa pričelo členiti v gibanje trupa in posameznih segmentov (4). S pojavom modernih principov gibanja je bilo možno empirična opazovanja gibanja teoretično podpreti. Z gibanjem so pričeli povezovati razdalje in čas, torej tudi hitrost gibanja, upoštevati so začeli sile kot vzrok gibanja in podporne točke oziroma ploskve telesa (3). Novi fizikalni koncepti kot so dinamika gibanja, masa, vztrajnost in sila, ki jih je vpeljal Newton, so teoretičnemu razlaganju gibanja dali nov zagon. Razvili so se prvi formalni matematični modeli gibanja in eksperimentalni pristopi, ki so modele validirali. Pomemben napredek pri analizi gibanja je predstavljal nastanek moderne kinematografije proti koncu 19. st., ki je omogočala zajemanje kinematičnih parametrov iz zaporednih fotografij oseb med gibanjem (Muybridge in Marey) (5, 6). Kmalu je bilo znano, da je s sočasno uporabo več kamer, in oblekami z reflektivnimi oznakami ali markerji moč precej natančneje izmeriti gibanje točk v tri-dimenzionalnem prostoru, pojavili pa so se tudi zametki miokinezičnih metod, ko so s palpatornimi tehnikami ocenili periode mišičnih aktivnosti med hojo. Sčasoma je pojem merjenja gibanja združil posamezne vidike gibanja in se razširil na merjenje kinematike v vseh treh ravninah gibanja, razvoj dinamometrije je omogočal merjenje reakcijskih sil in momentov podlage ter centra pritiska, razvoj elektromiografije pa je omogočalo natančno določanje period mišičnih aktivnosti posameznih mišičnih skupin (7, 8). Poleg gibanja zdravih ljudi se je vedno več pozornosti namenilo proučevanju gibanja oseb z nevrološkimi in živčno-mišičnimi boleznimi (9–11). Nov korak na področju merjenja gibanja je predstavljal uporaba video kamer

in analizatorja gibanja namesto fotografije. Kmalu se je tudi ta postopek avtomatiziral in nastal je avtomatski sistem za analizo gibanja. Hiter razvoj video kamer v kombinaciji z računalniki je izboljševal natančnost in točnost merjenja ter proučevanja človekovega gibanja, kar je spodbudilo širšo klinično uporabnost (9–11). Danes v okviru merjenja in analize gibanja razumemo kinematiko (tri-dimenzionalno merjenje sklepnih kotov, hitrosti in pospeškov), kinetiko (reakcijske sile podlage, sklepne sile, momenti in moči) in dinamično elektromiografijo (EMG). Prav tako se je uporaba merjenja in analize gibanja močno razširila na mnoga raziskovalna področja povezana z gibanjem, v klinično okolje in področje rehabilitacije, na področje športa in ergonomije, kot tudi v zabavno industrijo.

MODERNE TEHNOLOGIJE MERJENJA GIBANJA

Kinematika

Elektronski goniometri (Slika 1) predstavljajo preprosto in cenovno ugodno rešitev za brezžično merjenje sklepnih kotov v eni ali dveh ravninah (12). Sestavljeni so iz dveh mehanskih segmentov, ki sta med sabo povezana z uporovnim elementom. Segmenta goniometra se namestita na sosednja segmenta telesa, med katerima želimo meriti sklepni kot, električne lastnosti uporovnega elementa, ki se spremenijo ob spreminjanju sklepnega kota, pa se pretvorijo v ustrezno velikost kota. Enostavni so za uporabo vendar sta točnost in natančnost merjenja precej odvisni od namestitve in sta podvržena premikanju kože in konstituciji segmentov, kamor jih namestimo. Zato se največkrat uporabljajo za oceno obsega gibanja ali manjšega števila sklepnih kotov, za natančnejše merjenje več sklepnih kotov človekovega telesa pa se redko uporabljajo in jih nadomeščajo optični sistemi z markerji.

Inercijski senzorji gibanja (IMU – Inertial Measurement Unit) so kompaktno merilne enote (Slika 1), ki najpogosteje združujejo tehnologije žiroskopov, ki merijo hitrost zasuka segmenta, in pospeškometrov, ki merijo linearne pospeške segmenta, ter včasih magnetometrov, ki merijo orientacijo segmenta glede na določeno smer v globalnem koordinatnem sistemu (13). So dokaj enostavni za uporabo, uporaba ni omejena na določen prostor ampak jih je



Slika 1: Sistemi za merjenje kinematike: elektronski goniometri – Biometrics Ltd. (levo) (11), inercijski senzorji gibanja – Xsens (12) (sredina), optični sistem merjenje gibanja – Vicon (14) (desno).

Figure 1: Systems for measuring kinematics: electronic goniometers Biometrics Ltd. (left) (11), inertial measurement units – Xsens (12) (middle), optical motion capture system – Vicon (14) (right).

možno uporabljati na prostem in so cenovno dostopni. Njihova največja slabost je akumulacija napake merjenja skozi meritev, ki nastane zaradi integriranja signalov pospeška, in vpliv feromagnetskih materialov v bližini. Od natančnosti senzorjev in dodatne obdelave signalov je odvisno kako hitro in v kolikšni meri tovrstna napaka vpliva na kakovost meritve. Moderne rešitve, kot jih na primer ponuja Xsens (14), združujejo več inercialnih senzorjev integriranih na več mestih v posebnih obleke, tako da lahko sledimo gibanju več segmentov hkrati, med njimi izračunamo relativne sklepne kote, hitrosti in pospeške gibanja in podatke grafično ali v animaciji predstavimo. Tovrstni pristopi sledenja in analize gibanja so zelo zanimivi tako za zabavno industrijo kot tudi za raziskovalne namene na področju biomehanike, športa in ergonomije.

Optični sistemi merjenja gibanja (Vicon, Qualisys, Optitrack, Codamotion) trenutno predstavljajo standard na področju merjenja kinematike (Slika 1). Sistem obsega večje število kamer – vsaj dve običajno pa več, v zabavni industriji tudi več deset – ki se jih razporedi v prostoru tako, da vse zajemajo posnetek človeka med gibanjem (15). Na človeka se namestijo bodisi aktivni markerji, ki predstavljajo izvor infra-rdeče svetlobe, bodisi pasivni markerji, ki so prevlečeni s slojem, ki infra-svetlobo od površine odbija. Temu ustrezno kamere vsaj zajemajo infra-rdeči spekter svetlobe, lahko pa so tudi izvor infra-rdeče svetlobe, ki najprej potuje do markerja in se od njega odbije nazaj do kamere. Po kalibraciji kamer se tri-dimenzionalna pozicija markerja v globalnem koordinatnem sistemu izračuna iz kombinacije posnetkov vseh kamer, točnost manj kot milimeter pa je običajna. Čeprav se optični sistemi merjenja gibanja lahko uporabijo v poljubni aplikaciji, so v prvi vrsti bili razviti za merjenje in analizo človekovega gibanja. V tem smislu se je veliko pozornosti namenilo optimalni namestitvi markerjev, kar je sčasoma vodilo k standardnim modelom namestitve markerjev (npr. različice modela Helen-Heyes, Plug in Gait). Modeli namestitve markerjev predpisujejo namestitve markerjev nad določene izpostavljene točke skeletnega sistema, ki niso močno prekrivane z mišicami. Na ta način se zagotovi, da se markerji med gibanjem zaradi kontrakcije mišic ne premikajo, kar bi sicer zmotno lahko pripisali gibanju telesa. Modeli prav tako določajo postopke, kako naj se iz izmerjenih pozicij markerjev izračunajo sklepni koti in hitrosti, ter časovni in dolžinski parametri hoje. Točnost in natančnost merjenja gibanja takšnega pristopa je precej

boljša, kot pri drugih metodah, skupaj s standardizacijo namestitve markerjev in izračuna kinematike pa je omogočila standardiziranje in avtomatizacijo postopka merjenja človekovega gibanja. To je omogočilo široko uporabo enakega pristopa merjenja gibanja človeka po svetu, kar je odprlo vrata tudi v klinično uporabo.

Optični sistem za zajemanje in analizo gibanja Vicon (Slika 1) velja danes za metodo izbora na področju klinične kineziologije (15). Običajno se ga združuje s talnimi pritiskovnimi ploščami za merjenje reakcijskih sil in momentov podlage, ki v kombinaciji s kinematiko omogoča še izračun kinetike hoje (sklepnih momentov in moči), vključuje pa lahko še elektromiografski sistem za merjenje mišičnih aktivnosti. Merjenje je med vsemi sistemi sinhronizirano. Slabost konfiguracije s pritiskovnimi ploščami je v mnogem številu potrebnih ponovitev meritev, saj lahko kinetiko hoje izmerijo le med dostopom na pritiskovno ploščo. Do neke mere se to lahko izboljša z več zaporednimi pritiskovnimi ploščami, v celoti pa se težavi izognemo, če analiza gibanja poteka na instrumentacijskem tekočem traku z ločenima pohodnima površinama za levo in desno nogo. Na ta način se v vsakem koraku izmerita tako kinematika kot tudi kinetika gibanja. Optičnim sistemom za merjenje in analizo gibanja se najpogosteje očita zamudno nameščanje markerjev pri obsežnih modelih markerjev. V ta namen se v zadnjem času veliko sredstev vlaga v razvoj **sistemov za merjenje in analizo gibanja brez markerjev** (Contemphas Templo) (16). Delujejo podobno kot optični sistemi, z visoko resolucijskimi hitrimi kamerami torej zajemajo človekovo telo med gibanjem, podatke o gibanju – sklepnih kotih – pa dobijo zgolj iz posnetkov gibanja in ne več markerjev. Raziskave kažejo dobro točnost, tehnologija pa kaže velik aplikativni potencial tako na področju športa in raziskovalnega dela, kot tudi v klinični uporabi.

Kinetika

Pri analizi gibanja nas običajno zanimajo tudi vzroki gibanja, to so sile in momenti. Sklepnih sil in momentov ne moremo neposredno meriti, lahko pa jih z ustreznim modelom telesa izračunamo, če poznamo zunanje sile na telo. Vedno je prisotna sila teže, ki vleče telesa proti Zemljinem površju in jo ne merimo, ampak jo izračunamo kot produkt mase in gravitacijskega pospeška. Pri proučevanju gibanja privzamemo, da na telo deluje tudi reakcijska



Slika 2: Sistemi za merjenje kinetike: vložki za čevlje – Fsrtek (levo) (15), pohodna podlaga – GAITRite (16) (sredina), pritiskovna plošča AMTI (17) (desno).

Figure 2: Systems for measuring kinetics: shoe insoles – Fsrtek (left) (15), walkway – GAITRite (16) (middle), force plate – AMTI (17) (right).

sila podlage, ki nasprotuje sili teže. Najpreprosteje jo lahko merimo z **vložki za čevlje** (Slika 2), ki imajo vgrajene uporovne senzorcje, ki obremenitev pretvorijo v ustreznost meritev sile. Napredne rešitve vsebujejo več senzorjev, s katerimi poleg merjenja vertikalne komponente reakcijske sile podlage lahko ocenimo v kateri točki sila deluje na telo – center pritiska (17). Na ta način lahko ocenimo tudi časovno sosledje posameznih faz med hojo. Slabost teh rešitev sta slabša točnost in natančnost, in da lahko merijo zgolj vertikalno komponento reakcijske sile podlage, ne pa tudi medio-lateralno ali antero-posteriorno.

Njim sorodne so **pohodne podlage**. Med bolj prisotnimi v kliničnem okolju je pohodna podlaga GAITRite (Slika 2) (18). V pohodni površini ima integrirano gosto mrežo senzorjev pritiska, ki ob obremenitvi omogočajo razpoznavanje geometrije pritiska, moč je določiti relativne pozicije med posameznimi pritiski in določiti vertikalno obremenitev. Algoritmi programske opreme samodejno ločujejo med posameznimi obremenitvami in jih identificirajo kot stopinje, jih ločujejo med obremenitev leve in desne strani, iz geometrije obremenitve stopinje pa ocenijo položaj pete, sredine in prednjega dela stopala. To omogoča merjenje nabora dolžinskih (smer hoje, dolžina in širina koraka in dvokoraka, prehojena razdalja) in časovnih (čas dotika, dviga pete, dviga prstov, čas trajanja koraka in dvokoraka, hitrost hoje, časovno in relativno trajanje faz hoje) parametrov hoje. Prednost pohodnih podlog je enostavna namestitvev in zajemanje podatkov več zaporednih korakov, pri čemer oseb predhodno ni potrebno opremiti z morebitnimi merilnimi pripomočki. To omogoča hitro izvedbo meritve hoje, kar je posebej dobrodošlo pri oseb, kjer hoja in vzdrževanje ravnotežja predstavlja večji napor. Poleg običajne pohodne površine v obliki ravnega traku obstajajo tudi kompleksnejše konfiguracije pohodnih površin, ki omogočajo merjenje parametrov hoje med spreminjanjem smeri, obračanjem ali stopanjem na stopnico ali z nje (18).

Precej bolj točne in natančne so **pritiskovne plošče** (npr. AMTI), ki ob obremenitvi izmerijo reakcijsko silo in moment podlage v vseh treh ravninah gibanja (Slika 2) (19). Pri analizi človekovega gibanja meritve reakcijskih sil in momentov podlage najpogosteje uporabljamo v kombinaciji z merjenjem gibanja (kinematika). Podatki obeh sistemov so vhodni podatki v dinamični model gibanja, ki izračuna predvidene sklepne momente in moči med gibanjem. V ta namen so pritiskovne plošče skupaj z optičnim sistemom za zajemanje gibanja mnogokrat del celovitih sistemov za merjenje in analizo hoje na športnem področju in v kliničnem okolju (15).

MERJENJE IN ANALIZA GIBANJA PRI MODERNIH REHABILITACIJSKIH SISTEMOV

Danes so sistemi za zajemanje in analizo gibanja mnogokrat integralni del modernih rehabilitacijskih sistemov. Mejenje in analiza gibanja poteka v realnem času, glede na izmerjene podatke o gibanju uporabnika pa so zmožni samodejno spreminjati parametre rehabilitacije in delovanje sistema, tako da se težavnost izvajanje nalog prilagaja zmožnostim posameznika. Mnogokrat

je urjenje hoje in ravnotežja podprto z navidezno resničnostjo, ki služi kot medij za posredovanje vizualne povratne informacije uporabniku o njegovem gibanju (npr. kot gibanje avatarja) in za grafično demonstracijo ciljev naloge v navideznem okolju.

RehaWalk

Sistem RehaWalk (Slika 3) je zasnovan tako za analizo kot tudi za urjenje hoje v okviru nevrološke, ortopedske in geriatrične rehabilitacije in se ga umešča med robotsko podprto in manualno rehabilitacijo hoje (20). Omogoča analizo hoje s časovno sinhroniziranim video snemanjem in merjenjem vertikalnih obremenitev na pohodni površini tekočega traku v realnem času. Vsak trenutek so torej na voljo časovni (čas koraka in dvokoraka, čas trajanja opore in zamaha, trajanja opore in zamaha relativno glede na trajanje cikla hoje, kadenca hoje...) in dolžinski (lokacije dostopov, dolžina in širina korakov) parametri hoje za levo in desno stran. Ker analiza hoje poteka na tekočem traku, je na voljo podatkov o velikem številu podatkov. Trening hoje je kombinacija koordinacijskih in kognitivnih nalog, ko se s pomočjo vidne povratne informacije v navideznem okolju ali s projekcijami zelenih dostopov na pohodno površino uporabniku pokaže zelen vzorec, kateremu naj med hojo čim natančneje sledi. RehaWalk se lahko varno uporablja tudi pri oseb s težjimi omejitvami hoje in že v zgodnjih fazah rehabilitacije saj ima integrirano razbremenitev mase telesa (20).

Grail

Trenutno najnaprednejši avtomatiziran sistem, ki združuje klinično analizo hoje ter trening hoje in ravnotežja je Grail (Slika 4) (21). Pri sistemu Grail zajemanje podatkov poteka na več med sabo sinhroniziranih sistemih. Z optičnim sistemom in s pripadajočo programsko opremo v realnem času zajema in analizira hojo



Slika 3: RehaWalk – Zebris (18).

Figure 3: RehaWalk – Zebris (18).



Slika 4: GRAIL – Motek (19).

Figure 4: GRAIL – Motek (19).

človeka, računa in analizira sklepne kote in časovne ter dolžinske parametre hoje, izračuna povprečne vrednosti in loči za posamezne cikle hoje. Instrumentacijski tekoči trak, ki ima pohodno površino deljeno v pohodno površino za levo in desno nogo, meri reakcijske sile podlage ločeno za levo in desno nogo. V kombinaciji s kinematiko hoje tako v vsakem koraku poleg kinematike omogoča tudi merjenje kinetike gibanja (sklepnih momentov in moči). Obenem Grail omogoča tudi merjenje mišičnih aktivnosti (EMG) v realnem času in prav tako segmentiranje EMG podatkov glede na cikle hoje. Tekoči trak ima dve prostostni stopnji gibanja – v smeri hoje se lahko nagiba naprej in nazaj, prečno na smer hoje pa se lahko translacijsko pomakne. Na ta način se lahko naslovi mnogo raziskovalnih vprašanj povezanih z ravnotežnimi odzivi med hojo v zahtevnih pogojih ali pa lahko spreminjanje naklona in premikanje pohodne površine postane del rehabilitacije hoje in ravnotežja. Dostop do podatkov o hoji v realnem času in mobilnost tekočega traku je v sistemu Grail združena z navideznim okoljem. Na eni strani uporablja navidezno okolje kot medij za posredovanje vizualne povratne informacije uporabnikom gibanju kot gibanje avatarja in kot grafični prikaz časovnih potekov izmerjenih podatkov. Na drugi strani se lahko rehabilitacija hoje in ravnotežja oblikuje kot skupek nalog v navideznem okolju, pri čemer se zeleni cilji v smislu gibanja lahko med hojo v navideznem okolju uporabniku grafično demonstrirajo. Ob tem Grail dodatno izkoristi možnost nagibanja in premikanja tekočega traku, da realistično emulira zahtevnost terena v navideznem okolju. Vzpenjanje na hrib ali spuščanje z njega v navideznem okolju lahko Grail ustrezno dopolni z nagibanjem tekočega traku naprej in nazaj ter na tak način vzpostavi pogoje s katerimi bi se uporabnik sicer soočil v naravi pri vzpenjanju na hrib ali spustu z njega. Podobno se lahko v navideznem okolju sprehaja po spolzki podlagi, lateralni pomik tekočega traku pa vzpostavi pogoje kot pri zdrsu na poledenem pločniku (21).

ZAKLJUČEK

Sodobne metode merjenja gibanja predstavljajo temelj analize gibanja na mnogih raziskovalnih področjih, v kliničnem okolju, v rehabilitaciji, na področju športa in v zabavni industriji. Predvsem v klinični kineziologiji merjenje gibanje pogosto ni omejeno le na kinematiko gibanja ampak združuje še kinetiko gibanja torej sile

kot vzrok gibanja. Pri razvoju sodobnih sistemov za merjenje gibanja se upoštevajo potrebe po čim krajših meritvah, brezkontaktnem merjenju gibanja v realnem času in brez dodatnega opremljanja oseb z merilnimi pripomočki. Danes je merjenje gibanja že temelj sodobnih rehabilitacijskih naprav in rehabilitacijskih metod, kjer merjenje gibanja v realnem času neposredno vpliva na prilagajanje ciljev nalog med rehabilitacijo gibanja zmožnostim posameznika.

Literatura:

1. Abu-Faraj ZO, Harris GF, Smith PA, Hassani S. Human gait and clinical movement analysis. In: Webster JG, ed. Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering. 2nd ed. Chichester: Wiley; 2015: 1–34.
2. Johanson ME. Gait laboratory: structure and data gathering. In: Rose J, Gamble JG, eds. Human walking. 2nd ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1994: 201–24.
3. Schwartz RP, Heath AL. The pneumographic method of recording gait. J Bone Joint Surg. 1932;14(4):783–94.
4. Basmajian JV. Therapeutic exercise. 3rd ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1978:1, 3, 5.
5. Marey ÉJ. La méthode graphique dans les sciences expérimentales. Paris: G. Masson; 1885.
6. Muybridge E. The human figure in motion. New York: Dover; 1955.
7. Dec JB, Saunders M, Inman VT, Eberhart HD. The major determinants in normal and pathological gait. J Bone Joint Surg. 1953;35A(3):543–58.
8. Blanc Y, Dimanico U. History of the study of skeletal muscle function with emphasis on kinesiological electromyography. Open Rehabil J. 2010;3(1):84–93.
9. Perry J. Gait analysis: normal and pathological function. Thorofare: SLACK Incorporated; 1992.
10. Winter DA. Biomechanics and motor control of human movement. 3rd ed. New Jersey: Wiley; 2005.
11. Gage JR. Gait analysis in cerebral palsy. London: Mac Keith Press; 1991.
12. Goniometers. Dostopno na: <https://www.biometricsltd.com/goniometer.htm> (citirano 8. 2. 2022).
13. MTi-100 IMU. XSENS. Dostopno na: <https://www.xsens.com/mti-100> (citirano 8. 2. 2022).
14. Motion Capture. Xsens. Dostopno na: <https://www.xsens.com/motion-capture> (citirano 8. 2. 2022).
15. Gait analysis, neuroscience and motor control. Vicon. Dostopno na: <https://www.vicon.com/applications/life-sciences/gait-analysis-neuroscience-and-motor-control/> (citirano 8. 2. 2022).
16. Templo 3D markerless motion analysis with THEIA3D. Contemplas. <https://contemplas.com/en/motion-analysis/3d-analysis/> (citirano 8. 2. 2022).
17. Wearable FSR sensor: flexible gait analysis piezoresistive insole force sensitive resistor. FSRTEK. Dostopno na: <https://www.fsrtek.com/flexible-gait-analysis-piezoresistive-insole-force-sensitive-resistor> (citirano 8. 2. 2022).
18. GAITRite walkways: a system for every need. Dostopno na: <https://www.gaitrite.com/gait-analysis-walkways> (citirano 8. 2. 2022).

19. Force and motion: biomechanics overview. Dostopno na: <https://www.amti.biz/Kinesiology-Biomechanics-forceplatform-overview.aspx> (citirano 8. 2. 2022).
20. RehaWalk gait analysis and training in rehabilitation. Zebris. Dostopno na: <https://www.zebris.de/en/medical/rehawalkr-gait-analysis-and-training-in-rehabilitation> (citirano 8. 2. 2022).
21. GRAIL: the ultimate gait-lab solution. Motek. Dostopno na: <https://www.motekmedical.com/solution/grail/> (citirano 8. 2. 2022).