

KINEMATIČNI PARAMETRI ROKE KOT KVANTITATIVNI OZNAČEVALCI INVALIDNOSTI IN KOGNICIJE PRI MULTIPLI SKLEROZI

ŽAN ZAJC,¹ ŽIGA BIZJAK,¹ GREGOR BRECLJAKOB,²
MIRAN BUERMEN,¹ ŽIGA ŠPICLIN¹

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija
zz88301@student.uni-lj.si, ziga.bizjak@fe.uni-lj.si, miran.burmen@fe.uni-lj.si,
ziga.spiclin@fe.uni-lj.si

² Univerzitetni klinični center Ljubljana, Nevrološka klinika, Ljubljana, Slovenija
gregor.brecljakob@kclj.si

Nevrološke bolezni, kot je multipla skleroza (MS), pogosto povzročajo motnje fine motorike, zato so potrebne objektivne metode za njihovo ocenjevanje. V tej študiji smo razvili stereo-vizualni sistem za sledenje dlani, ki omogoča 3D rekonstrukcijo trajektorij 21 anatomskih točk roke med izvajanjem testa devetih zatičev (NHPT). Na podlagi rekonstruiranih gibanj smo izračunali kinematične parametre in jih klinično ovrednotili na vzorcu 162 bolnikov z MS z analizo povezav z razširjeno lestvico prizadetosti (EDSS) in kognitivno oceno CogEval. Rezultati so pokazali, da je višja stopnja nevrološke prizadetosti najmočnejše povezana s podaljšanim časom izvedbe NHPT ter s spremenjenimi gibalnimi vzorci palca, kot sta večja linearnost in manjša sunkovitost gibanja. Pri kognitivnem statusu se je kot ključni dejavnik izkazala hitrost izvedbe naloge. Predlagani pristop je neinvaziven in cenovno dostopen ter omogoča poglobljen vpogled v kakovost gibanja, kar predstavlja obetavno orodje za objektivno in skalabilno spremljanje motoričnih sprememb pri MS.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.feri.4.2026.4](https://doi.org/10.18690/um.feri.4.2026.4)

ISBN

978-961-299-111-1

Ključne besede:

stereo video-analiza,
kinematika roke,
sledenje anatomskim
točkam,
ocena fine motorične
sposobnosti,
multipla skleroza,
klinična ocena,
digitalni biomarkerji



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

Keywords:

stereo video analysis,
hand kinematics,
anatomical landmark
tracking,
fine motor skill assessment,
multiple sclerosis,
clinical assessment,
digital biomarkers

KINEMATIC PARAMETERS OF HAND AS QUANTITATIVE MARKERS OF DISABILITY AND COGNITION IN MULTIPLE SCLEROSIS

ŽAN ZAJC,¹ ŽIGA BIZJAK,¹ GREGOR BRECLJAKOB,²
MIRAN BUERMEN,¹ ŽIGA ŠPICLIN¹

¹ University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering, Ljubljana, Slovenia
zz88301@student.uni-lj.si, ziga.bizjak@fe.uni-lj.si, miran.burmen@fe.uni-lj.si,
ziga.spiclin@fe.uni-lj.si

² University Medical Center Ljubljana, Division of Neurology, Ljubljana, Slovenia
gregor.brecljakob@kclj.si

Neurological diseases such as multiple sclerosis (MS) frequently lead to impairments in fine motor function, highlighting the need for objective assessment methods. In this study, we developed a stereo-visual hand-tracking system that enables 3D reconstruction of the trajectories of 21 anatomical landmarks of the hand during the Nine-Hole Peg Test (NHPT). Based on the reconstructed movements, kinematic parameters were computed and clinically evaluated in a cohort of 162 patients with MS by analyzing their associations with the Expanded Disability Status Scale (EDSS) and the CogEval cognitive assessment. Higher neurological disability was most strongly associated with prolonged NHPT completion time and with altered thumb movement patterns, characterized by increased movement linearity and reduced jerkiness. With respect to cognitive status, task execution speed emerged as the key contributing factor. The proposed approach is non-invasive and cost-effective, providing a detailed insight into movement quality and representing a promising tool for the objective and scalable monitoring of motor changes in MS.



1 Uvod

Nevrološke motnje, kot so multipla skleroza, Parkinsonova bolezen in cerebralna paraliza, močno vplivajo na kakovost življenja bolnikov, saj pogosto vodijo do poslabšanja motoričnih sposobnosti (Yozbatiran et al., 2006). Natančno in objektivno ocenjevanje fine motorike zgornjih okončin je ključnega pomena za spremljanje napredovanja bolezni in načrtovanje ustrezne rehabilitacije.

V klinični praksi se kot standardizirano orodje za ocenjevanje ročnih spretnosti pogosto uporablja test devetih zatičev (angl. *Nine Hole Peg Test*, NHPT) (Oxford Grice et al., 2003). Test je zaradi svoje enostavnosti in ponovljivosti široko sprejet, vendar pa je njegova glavna pomanjkljivost v tem, da pri tradicionalni izvedbi merimo zgolj skupni čas, ki ga preiskovanec potrebuje za vstavljanje in odstranjevanje vseh zatičev. Takšen pristop spregleda številne pomembne informacije o dinamiki gibanja, kot so trajektorije dlani, tresenje rok in strategije, ki jih bolnik uporabi pri izvajanju naloge.

Poleg motorične funkcije so za multiplo sklerozo značilne tudi kognitivne motnje, ki se pogosto kažejo v upočasnjem procesiranju informacij in zmanjšani pozornosti. Ker se kognitivni upad pri bolniki z MS pogosto kaže v spremenjenih vzorcih gibanja, bi lahko podrobnejša kinematična analiza NHPT služila kot boljši kazalnik bolnikovega nevrološkega stanja (Yozbatiran et al., 2006).

V dosedanjih poskusih izboljšave diagnostične vrednosti NHPT so raziskovalci preizkusili različne senzorske pristope. Digitalizirane različice NHPT z vgrajenimi senzorji so izboljšale časovno natančnost in standardizacijo testa ter pokazale visoko zanesljivost, a ostajajo omejene na izhodne meritve, kot sta trajanje testa in število napak (Mythili, 2025). Za oceno kinematičnih parametrov roke, kot sta hitrost in zveznost gibanja, so bili med izvajanjem NHPT uporabljeni tudi nosljivi sistemi na osnovi inercialnih merilnih enot (Bai et al., 2022), a ta pristop dodatno obremenjuje pacienta. Virtualni testi vstavljanja zatičev nadomestijo fizično platformo testa z vmesniki, ki zajemajo kinematične podatke, vendar na račun omejene primerljivosti z uveljavljenimi kliničnimi normami (Kanzler et al., 2020). V tem delu predlagamo video-analizo kinematike roke, ki ohranja uveljavljen potek NHPT in je povsem neinvazivna metoda.

Cilj te študije je razvoj in ovrednotenje stereo-vizualnega sistema za sledenje dlani, ki omogoča sledenje in 3D rekonstrukcijo trajektorij 21 anatomskih točk na dlani in prstih med izvajanjem NHPT. Na podlagi rekonstruiranih trajektorij je bila izvedena kvantitativna analiza gibalnih vzorcev roke z uporabo izbranih kinematičnih parametrov, kot sta skupna prepotovana pot in hitrost gibanja. Znanstveni prispevek študije je dodatno nadgrajen s klinično validacijo predlaganega pristopa na bolnikih z multiplo sklerozo (MS). Ta vključuje analizo povezav med izpeljanimi kinematičnimi meritvami ter uveljavljenimi kliničnimi ocenami motoričnih in kognitivnih funkcij, kot sta razširjena lestvica stopnje prizadetosti (angl. *Expanded Disability Status Scale*; EDSS) in kognitivna ocena CogEval, s čimer se preverjata klinična relevantnost in potencialna uporabnost metode v praksi.

2 Materiali in eksperimentalni protokol

2.1 Podatki

V študijo je bilo prvotno vključenih 186 preiskovancev. Motorična funkcija rok je bila testirana po standardiziranem protokolu NHPT, ki je obsegal dve zaporedni ponovitvi z vsako roko (dominantno in nedominantno). Pri izvedbi in vrednotenju smo sledili metodološkim usmeritvam, ki jih navajajo (Čelofiga et al., 2021) (Measurement properties of the Nine Hole Peg Test, 2026), kar zagotavlja visoko stopnjo zanesljivosti zajetih časovnih parametrov in primerljivost z uveljavljenimi kliničnimi normativi. Zaradi tehničnih omejitev smo iz nadaljnje analize izključili 19 oseb, pri katerih je delež neveljavnih 3D rekonstrukcij izvedbe testa NHPT presegal 20 %. Končni vzorec za analizo stopnje nevrološke prizadetosti je zajemal 162 udeležencev (110 žensk in 52 moških) s povprečno starostjo 47,85 let (mediana 47,0 let; razpon 23–82 let). Glede na ročnost je bilo v tej skupini 155 desničarjev in 7 levičarjev. Stopnja prizadetosti, ocenjena z lestvico EDSS, je za vključene preiskovance v povprečju znašala 1,90 (mediana 1,0; razpon 0,0–6,5), kar odraža vključenost pacientov z blago do zmerno stopnjo invalidnosti.

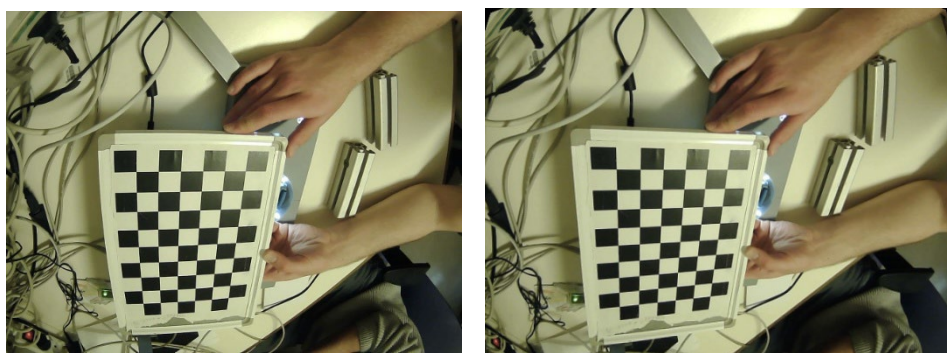
Podskupina 107 udeležencev (70 žensk in 37 moških) s povprečno starostjo 46,35 let (mediana 45,0 let; razpon 23–74 let) je bila dodatno ocenjena s kognitivnim testom CogEval. V tej skupini so bili 103 desničarji in 4 levičarji, povprečni Z-rezultat kognitivnega preizkusa pa je znašal $-0,51$ (mediana $-0,40$; razpon od $-3,36$ do $1,76$). Takšna sestava vzorca omogoča celovito analizo povezanosti med

motorično izvedbo testa NHPT, stopnjo nevrološke prizadetosti ter kognitivnim statusom preiskovancev.

2.2 Metode

2.2.1 Opis sistema NHPT in zajema videoposnetkov

Nadgrajeni sistem NHPT temelji na stereo postavitvi dveh sinhroniziranih kamer (kamere USB znamke ELP, tip USBFHD01ML28.), ki sta nameščeni nad testno ploščo na levi in desni pod kotom približno 30° glede na središče testne plošče. Video zajemata z ločljivostjo 640 x 480 pikslov in 25 slik na sekundo. Posamezno kamero smo kalibrirali z vzorcem šahovnice 9 x 6 s polji dimenzije 20×20 mm, z zajemom 15-25 slik v različnih pozah šahovnice, in določili intrinzične parametre in geometrijska popačenja leč z OpenCV (OpenCV, 2026) (slika 1).



Slika 1: Primer slike pred (levo) in po (desno) korekciji popačenja leče.

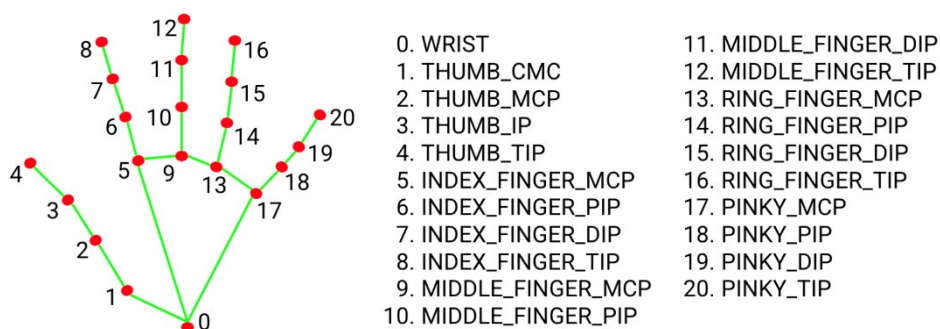
Vir: lasten.

Za kalibracijo stereo para smo na podlagi lokalizacije 18 luknjic na testni plošči in dveh dodatnih točk izven ravnine na podlagi kalibra reševali sistem enačb Longuet-Higgins. S tem smo definirali stabilen referenčni koordinatni sistem, vezan na testno platformo.

2.2.2 Analiza videoposnetkov

Kinematične parametre smo pridobili z lokalizacijo in sledenjem anatomskih točk roke, časovnim filtriranjem in 3D rekonstrukcijo. S knjižnico Python MediaPipe (google-ai-edge, 2025) smo lokalizirali 21 anatomskih točk, ki vključujejo zapestje,

členke in konice vseh petih prstov (slika 2). S triangulacijo pripadajočih parov anatomskih točk smo izvedli 3D rekonstrukcijo (`cv2.triangulatePoints` v OpenCV (OpenCV, 2026)) in tako dobili trajektorijo gibanja posamezne točke. Za glajenje trajektorij, zaradi šuma pri detekciji točk, smo uporabili filter Savitzky-Golay. Filter smo uporabili izključno na neprekinjenih veljavnih segmentih trajektorije vsakega prsta posebej, kar preprečuje popačenja na robovih manjkajočih zaznav. Glajene vrednosti smo uporabili le za izračun metrik, ki temeljijo na odvodih (hitrost, pospešek, sunkovitost, premori in stabilnost), saj so ti parametri posebej občutljivi na visokofrekvenčni šum.



Slika 2: Prikaz 21 značilnih točk dlani, kot jih zazna model MediaPipe Hands.

Vir: Hand Landmark Detection Guide (Google AI for Developers, 2026), Google AI for Developers.

Licenca: Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0).

Za izračun prostorskih metrik in metrik »ravnosti poti« smo uporabili surove interpolirane položaje, da bi ohranili dejansko geometrijo giba. V primerih krajših intervalov brez veljavnih detekcij smo uporabili linearno interpolacijo za imputacijo, daljše prekinitev smo izločili iz nadaljnje analize.

Kinematične parametre smo strukturirali v naslednje skupine:

- **Prostorske in geometrijske značilnice:** te metrike so izračunane na surovih koordinatah in vključujejo skupno dolžino poti, volumen delovnega prostora, dolžino diagonale delovnega prostora, največji polmer dosega ter indeks planarnosti giba, ki ocenjuje, v kolikšni meri se gibanje odvija v eni ravnini. V to skupino smo dodali tudi celotno trajanje testa.

- **Ravnost in vijugavost poti:** skupina parametrov ocenjuje geometrijsko učinkovitost poti. Vključuje povprečno lokalno ravnost, deseti percentil lokalne ravnosti za zaznavo najbolj odstopajočih segmentov ter globalno vijugavost, ki je definirana kot razmerje med celotno dolžino poti in diagonalo delovnega prostora.
- **Hitrost, pospešek in sunkovitost:** dinamični parametri so izračunani na glajenih trajektorijah. Poleg povprečnih in maksimalnih vrednosti hitrosti, pospeška in sunkovitosti smo izračunali tudi koeficiente variacije, ki služijo kot indikatorji stabilnosti hitrostnega profila. Sunkovitost (angl. jerk) pri tem neposredno meri gladkost gibanja.
- **Prekinitve gibanja:** premor smo empirično definirali na ravni posameznega prsta kot segment, kjer hitrost pade pod pet odstotkov preiskovančeve maksimalne hitrosti in traja vsaj 320 milisekund. Spremljali smo število premorov, celoten čas trajanja vseh premorov, delež časa premorov glede na celotno trajanje testa ter povprečno trajanje posamezne prekinitve.
- **Stabilnost in variabilnost:** te značilnice vključujejo variabilnost hitrosti ter smerno variabilnost, ki meri disperzijo kotov vektorjev hitrosti v prostoru.
- **Koordinacija med prsti:** za oceno fine motorike smo analizirali interakcijo med palcem in kazalcem. Metrike vključujejo povprečno razdaljo med prstoma, variabilnost te razdalje in korelacijo njunih hitrosti.

Vse navedene značilnice so bile izračunane za vsako izvedbo testa posebej, kar omogoča statistično analizo povezanosti med kinematičnim profilom gibanja, stopnjo nevrološke prizadetosti in kognitivnim statusom preiskovancev.

2.2.3 Statistična analiza

Za vsakega udeleženca smo določili povprečne vrednosti kinematičnih značilnic iz vseh njegovih veljavnih testiranj. Zaradi visoke stopnje kolinearnosti med kinematičnimi parametri smo izvedli postopek krčenja nabora podatkov, pri čemer smo odstranili značilnice z močno medsebojno korelacijo, kjer je Spearmanov koeficient presegal vrednost 0,9.

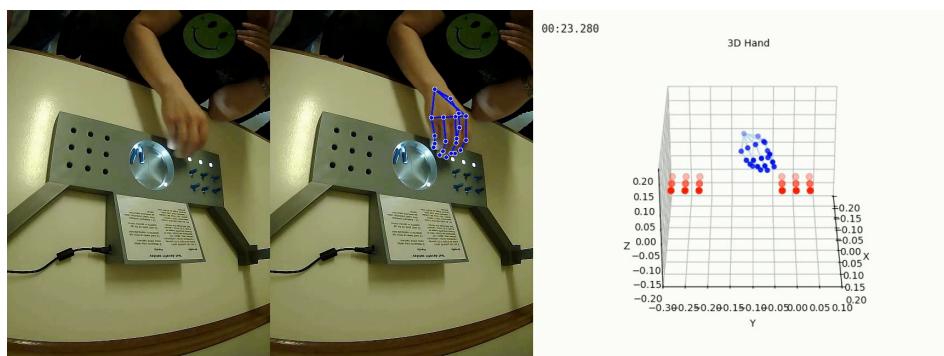
Korelacijo med izbranimi kinematičnimi značilnicami in kliničnimi ocenami smo preverjali z dvema pristopoma. Za oceno vpliva na stopnjo nevrološke prizadetosti smo uporabili ordinalno logistično regresijo, medtem ko smo kognitivni status

preverjali z linearno regresijo. V oba modela smo kot dodatni spremenljivki vključili tudi starost in spol preiskovancev. Vzporedno smo za neparametrično potrditev ugotovitev izračunali Spearmanove koeficiente korelacije med kliničnimi ocenami in kinematičnimi parametri na ravni pacienta.

3 Rezultati

3.1 Videoanaliza

Slika 3 prikazuje primer dobljene 3D rekonstrukcije. Uspešnost sledenja smo ocenili z izračunom napake reprojekcije, ki predstavlja razdaljo med dejansko zaznano točko na sliki in projekcijo rekonstruirane 3D točke nazaj na 2D ravnino. Povprečna napaka reprojekcije je znašala 7,2 mm. Za izboljšanje natančnosti smo izvedli podobnostno poravnavo (angl. similarity transformation), s katero smo 3D model optimalno skalirali, rotirali in premaknili glede na znane dimenzije testne plošče. S tem postopkom smo povprečno napako rekonstrukcije znižali na 3,1 mm.



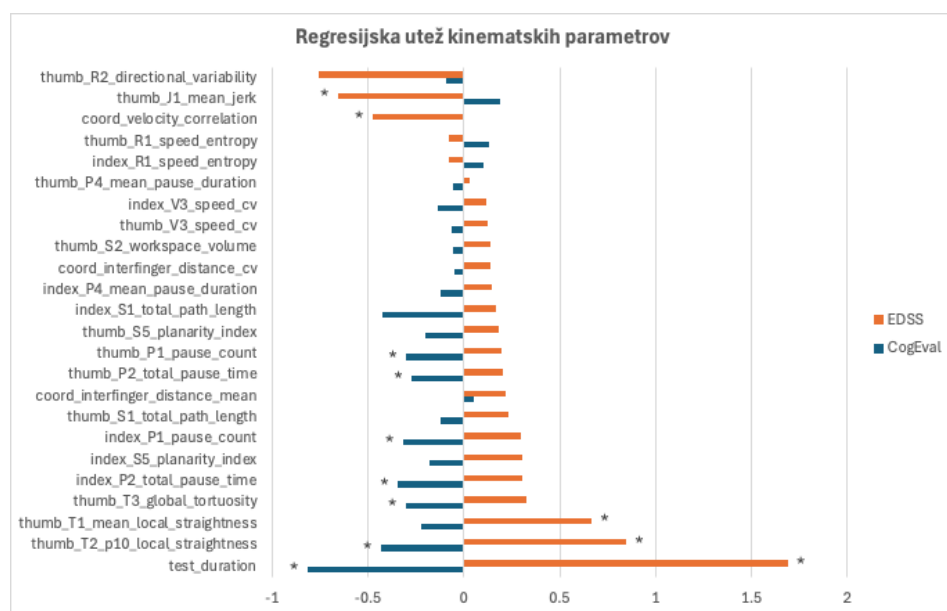
Slika 3: Izsek 3D rekonstrukcije med izvajanjem NHPT. Lokacije luknjic so označene *rdede*, anatomske točke roke pa *modro*.

Vir: lasten.

S postopkom zmanjševanja dimenzionalnosti smo začetni nabor kinematičnih parametrov omejili na 24 ključnih za nadaljnjo obdelavo.

3.2 Povezava s kliničnimi ocenami

Regresijska analiza na ravni preiskovanca, ki je vključevala prilagoditev za starost in spol, je razkrila več statistično značilnih povezav med kinematičnimi parametri in stopnjo nevrološke prizadetosti po EDSS (slika 4). Višja stopnja prizadetosti po lestvici EDSS je najmočnejše povezana s podaljšanim časom izvedbe testa. Poleg samega časa so se kot pomembni izkazali predvsem parametri gibanja palca. Ugotovili smo, da višjo stopnjo nevrološke prizadetosti spremljata visoka linearnost gibanja (*thumb_T1_mean_local_straightness*) in nižja povprečna sunkovitost gibanja palca (*thumb_J1_mean_jerk*), kar nakazuje na bolj upočasnjeno oziroma togo izvajanje gibov pri osebah z večjimi motoričnimi omejitvami.



Slika 4: Regresijske uteži kinematskih parametrov. Stolpci z oznako * so pri statistično značilnih parametrih (popravljen p-vrednost < 0.05).

Vir: lasten.

Pri kognitivnem statusu, ocenjenem s preizkusom CogEval, so statistično značilnost ohranili trajanje izvedbe testa, linearnost in vijugavost gibanja palca, pavze kazalca in palca. Rezultati potrjujejo, da so boljše kognitivne dosežke dosegali preiskovanci, ki so nalogo opravili hitreje in z neprekinjenimi direktnimi gibi. Rezultati nakazujejo, da je hitrost izvedbe v tem kontekstu primarni dejavnik uspešnosti.

Vzporedna neparametrična analiza s Spearmanovimi korelacijami (*rezultati niso prikazani*) je potrdila te povezave, ki smiselno podpirajo ugotovitve na podlagi regresijskih modelov.

4 Razprava

V tej študiji smo na podlagi videoanalize stereo para kamer opravili sledenje in 3D rekonstrukcijo anatomskih točk roke. Na kohorti 162 bolnikov MS smo pokazali, da so kinematični parametri izvedbe testa NHPT, zlasti čas izvedbe in značilnosti gibanja palca, tesno povezani s stopnjo nevrološke prizadetosti, medtem ko je kognitivni status preiskovancev predvsem odvisen od hitrosti izvedbe naloge. Ugotovitve potrjujejo, da podrobna analiza gibanja ponuja dodatne, klinično relevantne informacije o motoričnih omejitvah, ki presegajo zgolj končne časovne meritve.

Ugotovljeni gibalni vzorci, zlasti podaljšan čas izvedbe ter povečana linearnost in zmanjšana sunkovitost gibanja palca, so skladni z znanimi motnjami fine motorike pri bolnikih z multiplo sklerozo, kjer demielinizacija in motena senzomotorična integracija vodita v počasnejše, bolj nadzorovane in manj avtomatizirane gibe. Takšna strategija gibanja lahko odraža kompenzacijski mehanizem za ohranjanje natančnosti pri zmanjšani motorični zanesljivosti, hkrati pa povečuje kognitivno obremenitev med izvedbo naloge. Povezava med daljšim trajanjem testa in slabšim kognitivnim izidom dodatno podpira koncept tesne interakcije med kognicijo in motoriko pri MS, kjer upad kognitivnih funkcij omejuje učinkovitost motoričnega načrtovanja in prilagajanja, kar se izrazi v manj tekočih in bolj rigidnih gibalnih vzorcih.

V primerjavi s sorodnimi študijami, ki motorično prizadetost pri MS večinoma ocenjujejo zgolj s celotnim časom izvedbe NHPT, z nosljivimi senzorji ali novimi okolji, ta študija prinaša nov doprinos z na vizualni informaciji osnovano 3D analizo fine motorike, ki omogoča podrobno prostorsko razčlenitev gibanja prstov brez dodatnega bremena za preiskovanca. V primerjavi z nosljivimi napravami (Bai et al., 2022) je pristop neinvaziven, cenovno dostopen in ohranja protokol in s tem klinično veljavnost testa (Čelofiga, Puh, 2021), hkrati pa zagotavlja klinično relevantne informacije o kakovosti gibanja, kar predstavlja pomembno dodano vrednost za objektivno in skalabilno spremljanje motoričnih sprememb.

Zahvala

Ta študija je bila podprta s strani Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (temeljni raziskovalni program št. P2-0232 in raziskovalni projekt št. J2-70102).

Literatura

- Assessment of upper extremity function and its relation with fatigue, cognitive function and quality of life in multiple sclerosis patients. *Journal of the Neurological Sciences*, 246(1–2), 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2006.02.018>
- Bai, L., et al. (2022). Upper limb position tracking with a single inertial sensor using dead reckoning method with drift correction techniques. *Sensors*, 23(1), 360. <https://doi.org/10.3390/s23010360>
- Čelofiga, N., Puh, U. (2021). Measurement properties of the nine hole peg test in patients with multiple sclerosis and patients after stroke. (2026). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/355958657_Merske_lastnosti_testa_devetih_zatic_ev_pri_pacientih_z_multiplo_sklerozo_in_pacientih_po_mozganski_kapi_Measurement_properties_of_the_nine_hole_peg_test_in_patients_with_multiple_sclerosis_and_patient
- Google AI for Developers. (2026, February 1). Hand landmarks detection guide. https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker
- google-ai-edge. (2025, February 11). *Mediapipe (C++)*. GitHub. <https://github.com/google-ai-edge/mediapipe>
- Kanzler, C. M., Schwarz, A., Held, J. P. O., Luft, A. R., Gassert, R., & Lambercy, O. (2020). Technology-aided assessment of functionally relevant sensorimotor impairments in arm and hand of post-stroke individuals. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17, 128. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00748-5>
- Mythili, D. (2025). Reliability and validity of the digital version of the modified standardized Nine Hole Peg Test with an autotimer. *Archives of Technical Science*, 2(33), 657–667. <https://doi.org/10.70102/afts.2025.1833.657>
- OpenCV. (2026, February 1). Open Computer Vision Library. <https://opencv.org/>
- Oxford Grice, K., Vogel, K. A., Le, V., Mitchell, A., Muniz, S., & Vollmer, M. A. (2003). Adult norms for a commercially available Nine Hole Peg Test for finger dexterity. *American Journal of Occupational Therapy*, 57(5), 570–573. <https://doi.org/10.5014/ajot.57.5.570>

