

OPTIMIZACIJA OCENE ERGONOMSKIH TVEGANJ Z UPORABO POSPEŠKOMEROV V 4D OKOLJU

TILEN MEDVED, ZVONE BALANTIČ,
BRANKA JARC KOVAČIČ

Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijo, Kranj, Slovenija
tilen.medved2@um.si, zvone.balantic@um.si, branka.jarc@guest.um.si

Zanesljiva ocena ergonomskih tveganj je ključna za izboljšanje varnosti in zdravja zaposlenih in za zmanjšanje pojava absentizma. Današnji inovativni pristopi oblikovanja ergonomske ocene povezujejo fizično, biološko in tehnološko okolje. Brezžični sledilniki gibanja (pospeškometri – inercialni senzorji) Movella Xsens, nameščeni na človeka, v realnem času natančno zajemajo vse premike v 3D prostoru in verodostojno beležijo tudi časovno dinamiko položajev telesnih segmentov (4D okolje). Modeliranje različnih morfoloških značilnosti zaposlenih in oblikovanje delovnega prostora izvedemo z Siemensovim računalniškim orodjem Tecnomatix Process Simulate Human. Senzorji za sledenje gibanju v 4D okolju so zagotovili bolj natančne meritve in s tem bolj objektivno oceno ergonomskih tveganj. Zajem podatkov je dosleden in omogoča pripravo še dodatnih ergonomskih ocen v kratkem času. Omogočeno je hitrejša in učinkovitejša prilagajanje delovnih mest in hitro izboljšanje delovnih pogojev. Na voljo je visoka odzivnost in hitro poseganje v produktivnost in zadovoljstvo zaposlenih. Dolgoročno bi se močno zmanjšalo število kostno-mišičnih obolenj, kar bi spodbudilo izrazito rast prispevka k bolj trajnostni in zdravi delovni praksi.

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fov.2.2025.45](https://doi.org/10.18690/um.fov.2.2025.45)

ISBN
978-961-286-963-2

Ključne besede:
ergonomija,
ergonomska tveganja,
ergonomske metode,
pospeškometri,
4D okolje

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fov.2.2025.45](https://doi.org/10.18690/um.fov.2.2025.45)

ISBN
978-961-286-963-2

Keywords:
ergonomics,
ergonomic risks,
ergonomic methods,
accelerometers,
4D environment

OPTIMISING ERGONOMIC RISK ASSESSMENT USING ACCELEROMETERS IN A 4D ENVIRONMENT

TILEN MEDVED, ZVONE BALANTIČ,
BRANKA JARC KOVAČIČ

University of Maribor, Faculty of Organisational Sciences, Kranj, Slovenia
tilen.medved2@um.si, zvone.balantic@um.si, branka.jarc@guest.um.si

Reliable ergonomic risk assessment is the key to improving employee health and safety and reducing absenteeism. Today's innovative approaches to ergonomic assessment link the physical, biological and technological environment. The Movella Xsens wireless motion trackers (accelerometers – inertial sensors), which are attached to people, capture all movements in 3D space in real time and also reliably record the temporal dynamics of the positions of the body segments (4D environment). The computer tool from Siemens, Tecnomatix Process Simulate Human, is used to model the various morphological characteristics of employees and to design the workspace. The motion tracking sensors in the 4D environment have enabled more accurate measurements and therefore a more objective assessment of ergonomic risks. Consistent data collection enables fast and efficient ergonomic assessment. It enables faster and more efficient adaptation of workstations and rapid improvement of working conditions. A high level of responsiveness and rapid intervention in employee productivity and satisfaction are possible. In the long term, musculoskeletal disorders would be significantly reduced and the contribution to a more sustainable and healthier way of working significantly increased.



1 Uvod

Vsakega človeka, ki vstopa na trg dela, čaka svojevrsten izziv, s katerim se sooča na mnogih nivojih. Srečuje se s pripravami na zaposlitev, izbornim postopkom, formalizacijo glede zaposlitve, prilagajanjem na delovno okolje in usposabljanjem za delo ter z zagotavljanjem varnosti in zdravja pri delu. Poudariti moramo, da je sklop izzivov tesno povezan z varnim in zdravim delovnim okoljem oziroma z ergonomijo, kjer se oblikuje jedro stalnega izboljševanja delovnega mesta. Organizacije so dolžne za svoje zaposlene poskrbeti tako, da preventivno skrbijo za njihovo zdravje. Če hoče organizacija doseči tak namen, potem mora dosegati celo vrsto vmesnih ciljev. V organizacijah se poveča produktivnost tudi zaradi zmanjšane števila telesnih poškodb, odsotnosti z dela (t. i. absentizem) in zmanjšanja števila napak zaradi nezbranosti ali zmanjšane telesne zmogljivosti zaradi bolnega zaposlenega na delovnem mestu (t. i. prezentizem). Če hočemo slediti temu namenu, moramo dosegati vmesne cilje in poskrbeti za to, da pravilno ocenimo in opredelimo možne nevarnosti pri oblikovanju določenega delovnega mesta in dela (Balantič et al., 2016).

Najboljše prakse za proučevanje ergonomije na delovnem mestu, vključujejo celovit pristop, ki upošteva različne vidike delovnega okolja in potrebe zaposlenih (Balantič et al., 2024). Prvi ukrep je običajno namenjen prilagoditvi delovnih mest, z vključevanjem telesnih značilnosti zaposlenih, kjer najpogosteje prilagodimo delovni nivo in naklon delovne površine. V tem sklopu uporabimo in optimiramo razne ergonomske pripomočke (opore, podloge, naslonjala ...). Pozorni moramo biti na ustrezne namestitve in na pravilno uporabo ergonomskih pripomočkov, z zavedanjem, da poskrbimo za nevtralizacijo telesnih obremenitev. Naslednji korak vključuje umestitev pravočasnih in zadostnih odmorov ter razgibanje telesa, kar zmanjšuje utrujenost zaposlenega. Stalno moramo skrbeti za izobraževanje in usposabljanje o pravi uporabi ergonomske opreme. Zelo pomembno je periodično preverjanje stanja učinkovitosti ergonomskih ukrepov, kjer pa nam lahko izjemno pomaga uporaba senzorjev gibanja oziroma pospeškometerov oziroma inercialnih senzorjev. Prav ta merilna tehnologija nam omogoča natančno spremljanje in prilagajanje delovnih pogojev, saj z njihovo pomočjo lahko prepoznamo in odpravimo potencialna tveganja v realnem času. Vse te aktivnosti morajo vključevati zaposlene v nadaljnji proces oblikovanja in izboljševanja delovnih mest. Njihove povratne informacije in izkušnje so dragocene za prepoznavanje težav in za iskanje

učinkovitih rešitev. Prav zaradi zgoraj naštetih dejavnikov je dobra in zanesljiva ocena ergonomskih tveganj na delovnih mestih ključna za izboljšanje varnosti ter zdravja zaposlenih in za posledično zmanjšanje pojava absentizma. V sodobnem času vse bolj inovativni pristopi oblikovanja ergonomske ocene delovnega mesta tesno povezujejo fizično, biološko in tehnološko okolje (Castillo et al., 2022; Carnazzo et al., 2024)

Fizično okolje vključuje dejavnike, kot so delovna oprema, orodja, delovni prostori in telesna drža pri delu. Biološko okolje vključuje preučevanje vpliva delovnih pogojev na fiziološke in psihološke vidike delavcev, kot so stres, utrujenost in splošno počutje. Tehnološko okolje pa se osredotoča na uporabo naprednih tehnologij, kot so avtomatizacija, robotika, internet stvari in računalništvo v oblaku, ki lahko izboljšajo delovne procese in zmanjšajo obremenitve zaposlenih (Sangeethalakshmi et al., 2023).

Če hočemo objektivno oceniti delovne pogoje in prepoznati njihov vpliv na človeka, potem je potrebno uporabiti objektivno metodologijo za zajem in obdelavo pridobljenih podatkov. Integracija omenjenih treh ključnih dejavnikov omogoča celovito in natančno oceno ergonomskih tveganj, kar vodi k bolj učinkovitim rešitvam za izboljšanje delovnih pogojev. Na podlagi ocene tveganj je nato potrebno določiti prednostne naloge za obvladovanje tveganj. Pri tem imajo prednost tveganja, ki predstavljajo največjo grožnjo za zdravje in varnost zaposlenih (Rezvanizadeh et al., 2023).

Sodobna pametna okolja omogočajo uporabo najrazličnejših senzorjev za zbiranje podatkov, programsko opremo za analizo in obdelavo teh podatkov in seveda algoritme za pravilno presojo in interdisciplinarno povezavo zajetih in strojno obdelanih podatkov (Lind et al., 2020). Na ta način dobimo jasen objektivni in vsestranski vpogled v raznolikost ergonomskih rešitev, na podlagi katerih lahko sprejemamo bolj zanesljive poslovne odločitve in lažje modeliramo izboljšane delovne procese (Lind, 2024).

Uporaba inercialnih senzorjev oziroma pospeškomerov v 3D prostoru lahko pomaga spremljati telesno držo in gibanje zaposlenih tudi v četrti, časovni dimenziji – s tem ustvarimo t. i. 4D okolje. Na ta način lahko sistem zazna morebitne nevarnosti v realnem času. Napredna analitična orodja lahko strokovnjaku iz

področja ergonomije omogočajo takojšnjo podporo pri analizi zbranih podatkov za zmanjšanje tveganj na obravnavanih delovnih mestih (Greco et al., 2020; Kotowski & Gibson, 2023). S tem celostnim pristopom k ergonomiji se ne izboljšuje le varnost in zdravje zaposlenih, temveč se povečuje tudi njihova produktivnost in zadovoljstvo pri delu. Zaposleni so tako manj izpostavljeni poškodbam in boleznim, ki so posledica dela ter se počutijo bolj cenjene in motivirane.

2 Metode

Brezžični sledilniki gibanja (pospeškometri) Movella Xsens omogočajo večkanalno zbiranje podatkov o dinamiki zaposlenega in to v realnem času in prostoru. Zbrani podatki tvorijo osnovo za podrobno analizo gibanja. Senzorji zajemajo podatke o hitrosti, pospešku in kotih sklepov, kar omogoča natančno spremljanje in analizo telesnih gibov med delom (Xsens Technologies, 2021). Meritve s senzorji za sledenje gibanju v 4D okolju se izvajajo v več korakih:

- namestitev senzorjev na telo zaposlenega in to na ključne točke, kot so zapestja, komolci, ramena, hrbet, boki, kolena in gležnji,
- kalibracija sistema, z določitvijo začetnih referenčnih točk, s čemer se zagotovi natančnost zajetih podatkov,
- zajem podatkov o gibih in položajih telesa v realnem času,
- analiza podatkov, ko se zbrani podatki analizirajo s pomočjo programske opreme, ki prepozna vzorce gibanja in drže ter identificira potencialna ergonomska tveganja,
- poročilo, ki vsebuje ugotovitve in priporočila za izboljšanje ergonomije na delovnem mestu,
- implementacija izboljšav s prilagoditvami delovnih postaj, z uvedbo ergonomskih pripomočkov in z usposabljanjem zaposlenih.

Uporabimo sistem s sedemnajstimi senzorji (Slika 1), in dvema posebnima rokavicama, kjer je na vsako od teh rokavic nameščeno po pet senzorjev na konceh prstov (Slika 2) (Manus, n.d.). Standardna postavitev torej vključuje 17 senzorjev ki so nameščeni na naslednjih mestih:

- glava,
- prsni koš,
- medenica,
- zgornji del hrbtenice (levo in desno),
- zgornji del rok (levo in desno),
- spodnji del rok (levo in desno),
- zapestje (levo in desno),
- stegna (levo in desno),
- spodnji del nog (levo in desno) in
- stopala (levo in desno).

Ta postavitev omogoča natančno spremljanje gibanja celotnega telesa.



Slika 1: Zaposleni na delovnem mestu, z nameščenimi inercialnimi senzorji

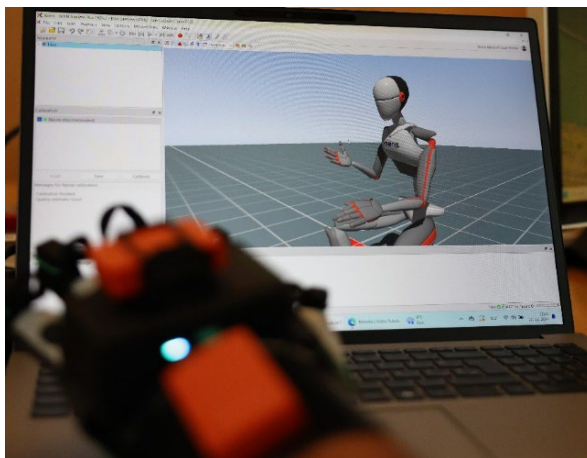
Vir: Lasten



Slika 2: Rokavica z inercialnimi senzori

Vir: Lasten

Premike v prostoru zajemamo z orodjem Xsens – MVN Analyze Plus v realnem času in pri tem verodostojno beležimo dinamiko položajev telesnih segmentov (Slika 3) (Xsens Technologies, 2021).



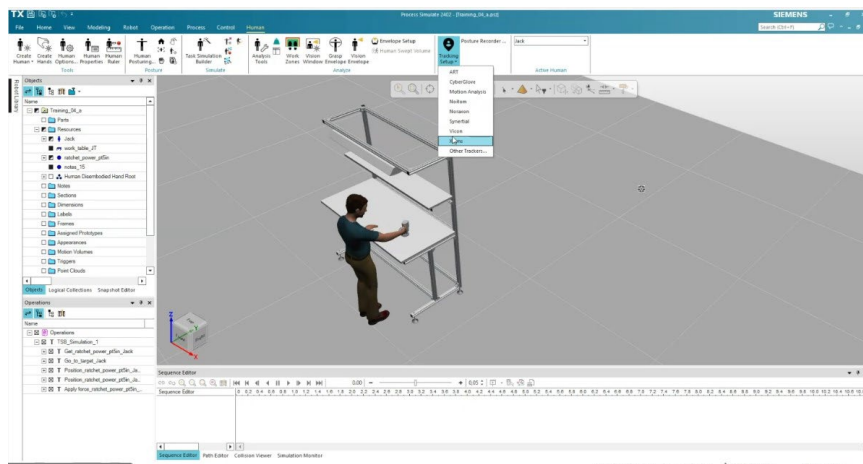
Slika 3: Računalniško orodje Xsens – MVN Analyze Plus za zajem podatkov iz inercialnih senzorjev, ki so nameščeni na telo zaposlenega

Vir: Lasten

Modeliranje različnih morfoloških značilnosti zaposlenih in oblikovanje delovnega prostora izvedemo z Siemensovim računalniškim orodjem Tecnomatix Process Simulate Human (Slika 4). To napredno orodje omogoča simulacijo in analizo

interakcij med delavci in njihovim delovnim okoljem. S pomočjo orodja lahko ustvarimo digitalne modele delovnih mest, ki upoštevajo različne telesne značilnosti zaposlenih, kot so višina, teža, razpon rok in druge antropometrične mere (Siemens, 2024). Pri tem lahko uporabimo širok nabor priporočenih ergonomskih analiz, ki vključujejo naslednje analize in simulacije:

- analiza drža: ocenjevanje telesne drža med različnimi delovnimi nalogami za prepoznavanje potencialnih tveganj za mišično-skeletne motnje,
- analiza obremenitev: merjenje in ocenjevanje fizičnih obremenitev, ki jih delavci doživljajo med dvigovanjem, potiskanjem, vlečenjem in med drugimi fizičnimi aktivnostmi,
- analiza gibanja: spremljanje in analiza gibanja telesnih segmentov za prepoznavanje neustreznih ali ponavljajočih se gibov, ki lahko vodijo do poškodb,
- analiza delovnega prostora: optimizacija postavitve delovnega prostora za zmanjšanje nepotrebnih gibov in izboljšanje dostopnosti orodij in materialov,
- simulacija delovnih nalog: uporaba simulacij za preizkušanje različnih scenarijev in prilagoditev delovnih nalog, da se zmanjšajo tveganja za poškodbe.



Slika 4: Modeliranje delovnega prostora z orodjem Tecnomatix Human

Vir: Lasten

3 Rezultati

Tradicionalne metode, ki temeljijo na vizualnem opazovanju in subjektivnih ocenah, pogosto ne morejo zajeti vseh subtilnih gibov in položajev telesa, ki lahko prispevajo k ergonomskim tveganjem. Uporaba senzorjev za sledenje gibanju v 4D okolju predstavlja pomemben napredek na področju ergonomskih analiz. Senzorji omogočajo natančno sledenje vsakemu gibu zaposlenega, kar omogoča bolj podrobno analizo in identifikacijo potencialnih tveganj (Vox et al., 2021).

Poleg tega senzorji omogočajo zbiranje podatkov v realnem času, kar pomeni, da lahko analitiki takoj prepoznajo in obravnavajo morebitne težave. To je še posebej pomembno v dinamičnih delovnih okoljih, kjer se lahko pogoji dela hitro spreminjajo. S tradicionalnimi metodami bi bilo potrebno več časa za zbiranje in analizo podatkov, kar bi lahko pomenilo zamudo pri implementaciji potrebnih izboljšav.

Natančnost meritev, ki jo omogočajo senzorji, prav tako prispeva k boljši zanesljivosti ocen ergonomskih tveganj. To pomeni, da so priporočila za izboljšave delovnih pogojev bolj utemeljena in ciljno usmerjena. Če senzorji zaznajo, da se zaposleni pogosto nahaja v ergonomsko neugodnem položaju, se lahko delodajalec osredotoči na prilagoditev delovnega mesta ali uvedbo ergonomskih pripomočkov, ki bodo zmanjšali tveganje za poškodbe (Santos et al., 2024).

Dodatna prednost uporabe senzorjev je možnost dolgoročnega spremljanja in analize podatkov tudi pri ergonomskih metodah, kot je metoda OWAS, RULA ali REBA (Balantič et al., 2016). Ergonomska analiza delovnih mest po omenjenih metodah je pokazala, da so senzorji za sledenje gibanju v 4D okolju, v primerjavi s tradicionalnimi metodami, zagotovili bolj natančne meritve in s tem bolj zanesljivo in objektivno oceno ergonomskih tveganj. Zajem podatkov je dosleden in omogoča pripravo še dodatnih ergonomskih ocen v kratkem času.

Ročni zajem podatkov sicer lahko poteka z visoko frekvenco beleženja gibov zaposlenega, toda v tem primeru je analiza zamudna. Če to delo prepustimo senzorjem in avtomatskemu beleženju, lahko delo opravimo zanesljivo, učinkovito in zelo hitro. Prednost je v neprekinjenem spremljanju dela na delovnem mestu. Analiza na ta način postaja bolj poglobljena in bolj natančna. Lažje identificiramo

morebitna specifična tveganja. Ves čas omenjamo 4D okolje, kar je še dodatna prednost, saj na ta način dokaj enostavno lahko sledimo časovnim spremembam zaradi spreminjajočih se delovnih pogojev ali zaradi uvedbe ergonomskih ukrepov.

Študijo primera smo izvedli v kontroliranem laboratorijskem okolju, kjer je oseba moškega spola z baterijskim vijačnikom izvajala ponavljajočo se nalogo sestavljanja komponent. Delovni proces je vključeval pobiranje in pozicioniranje komponent, njihovo združevanje s privijanjem ter prestavljanje sestavljenega izdelka na odlagalno površino. Za spremljanje gibanja in drže udeleženca študije smo uporabili 17 inercialnih senzorjev, (15 nameščenih na ključne točke telesa ter 2 nameščena na rokavicah, ki zbirata podatke iz koncev prstov obeh zapestij).

Sistem inercialnih senzorjev smo pred začetkom meritev natančno kalibrirali z določanjem referenčnih točk, kar zagotavlja visoko natančnost zajetih podatkov. Med izvajanjem naloge smo v realnem času zbirali podatke o gibih in položajih telesa, ki smo jih nato analizirali s programsko opremo za prepoznavanje vzorcev gibanja in identifikacijo ergonomskih tveganj. Končna analiza je vključila kvantitativne podatke o obremenitvah mišičnih skupin, časovne vzorce delovnih položajev in ocene tveganj po priznanih metodah, kot sta na primer OWAS in RULA.

Uporaba senzorjev je omogočila bolj podrobno in natančno analizo ergonomskih tveganj v primerjavi s tradicionalnimi metodami. Vizualni prikazi, pridobljeni s pomočjo inercialnih senzorjev, so razkrili specifične drže in obremenitve telesa med delovnim procesom. Rezultate smo analizirali s pomočjo orodij, implementiranih v Tecnomatix Process Simulate. Analiza s pomočjo orodja »Posture Monitor« (Slika 5), ki vključuje analizo drže na podlagi OWAS in RULA sistemov, razkriva specifične točke tveganja in poudarja potrebo po ergonomskih prilagoditvah za zmanjšanje mišično-skeletnih obremenitev. OWAS ocena "4121-1" nakazuje, da trenutna drža ni urgentno problematična, vendar obstaja možnost za izboljšave v prihodnosti, zlasti v kontekstu dolgoročnega vpliva na delavčevo zdravje. Ocena RULA z rezultatom 5 na levi in desni strani telesa opozarja na srednje do visoko tveganje za poškodbe in poudarja potrebo po ukrepanju. Podrobnejša analiza sklepov kaže, da je trup v fleksiji (pripogib naprej) pod kotom 46°, kar presega priporočene vrednosti in kaže na znatno obremenitev hrbtnih mišic. Desna rama je abducirana za 48° (odmik roke od telesa), kar pomeni, da so mišice ramenskega sklepa in okoliških

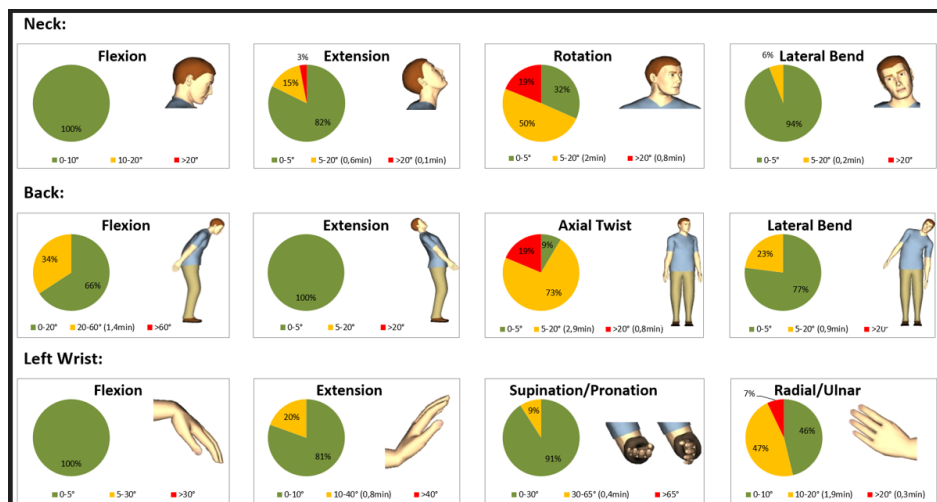
struktur izpostavljenosti zmerni obremenitvi. Desni komolec dosega kot fleksije/ekstenzije 76° , kar kaže na obremenitev, ki bi lahko povzročila utrujenost ali celo poškodbe pri daljši izpostavljenosti. Desno zapestje ima radialno (proti palcu)/ulnarno (proti mezinu) deviacijo 31° , kar je nad varnimi mejami in signalizira tveganje za prekomerno obremenitve zapestja.



Slika 5: Analiza drže in ergonomskih tveganj (OWAS, RULA)

Vir: Lasten

Podrobnejši vpogled v biomehantične parametre je zagotovilo programsko orodje »**Ergonomic Metrics**«, ki je analizirala premike vratu, hrbta in zapestja (Slika 6). Analiza kaže, da največje tveganje za obremenitev v vratu predstavlja iztegovanje, kjer je kot 20° presežen v 15 % časovnem deležu, rotacija pa presega 20° v 19 % časovnem deležu. Gibanje vratu v preostalih ravninah večinoma ostaja znotraj varnih območij. Pri hrbtu se večja obremenitev pojavlja pri upogibu naprej, kjer je pri 34 % časovnem deležu zabeležen kot med 20° in 60° ter pri zasukih, kjer 8 % časa presega vrednost 20° . Pri levem zapestju beležimo največje tveganje povezano z iztegovanjem, saj je kot 40° presežen 20 % časa. Pri zasukih zapestja 9 % časa presega vrednost 65° .

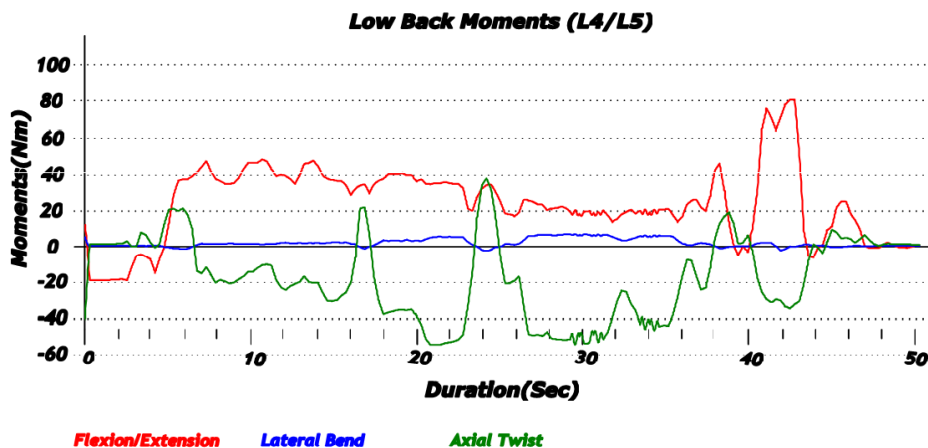


Slika 6: Analiza obremenitve vratu, hrbta in zapestja

Vir: Lasten

Pridobljeni podatki so prav tako ključni za prepoznavanje obremenitev spodnjega dela hrbta, ki so jih dodatno podprle meritve z orodjem »Low Back«. Graf na sliki 7 prikazuje časovno porazdelitev momentov sile na ledvenem delu hrbtenice (L4/L5) za tri različne gibalne komponente: fleksijo/ekstenzijo, stranski upogib (lateral bend) in aksialni zasuk (axial twist). Moment sile je izražen v Nm, čas trajanja pa v sekundah. Podrobna analiza kaže, da so najvišje vrednosti momenta pojavijo pri fleksiji/ekstenziji (rdeča linija) in jih dosegamo med približno 20. in 40. sekundo. Na tem časovnem odseku moment presega 60 Nm. Ta komponenta predstavlja ključni vir obremenitve na ledvenem delu, kar kaže na visoko intenzivnost gibanja naprej in nazaj. Moment v lateralni smeri povzroča stranski upogib (modra linija), ki v celotnem časovnem intervalu ostaja skoraj konstanten in blizu 0 Nm, kar predstavlja minimalne stranske obremenitve. Nasprotno pa aksialni zasuk (zelena linija) doseže pomembne vrhove pri približno 15., 25. in 40. sekundi, kjer vrednosti presegajo 40 Nm v pozitivni ali negativni smeri. To nakazuje ponavljajoče se obremenitve zaradi rotacijskega gibanja, ki lahko povečajo tveganje za poškodbe vretenc in diskov. Fleksija in ekstenzija v ledvenem delu hrbtenice sta zelo neugodni obremenitvi in sta tudi glavna dejavnika, ki prispevata k mehanskim pritiskom na segment L4/L5. Čeprav je stranski upogib zanemarljiv, je aksialni zasuk še vedno pomemben dejavnik tveganja zaradi pogostih in izrazitih vrhov aktivnih torzijskih momentov. Za zaščito ledvenega dela je vsekakor ključno zmanjšanje ekstremnih fleksijskih in

ekstenzijskih momentov, pri čemer je priporočljiva uporaba ergonomskih orodij, ki omejujejo pretirano gibanje v tej smeri. Prav tako je pomembno izogibanje ponavljajočim se zasukom ali zmanjšanje intenzivnosti rotacijskih gibov, saj lahko takšni ukrepi bistveno pripomorejo k preprečevanju poškodb.



Slika 7: Beleženje momentov v anteroposteriorni, lateralni in aksialni smeri med 4. in 5. ledvenim vretencem

Vir: Lasten

Študija je pokazala, da so meritve s senzorji omogočile hitrejšo analizo in bolj zanesljive rezultate, kot pri ročni izvedbi. Medtem ko tradicionalne metode pogosto zahtevajo daljši čas za zbiranje in obdelavo podatkov, je uporaba inercialnih senzorjev omogočila takojšnjo prepoznavo tveganj in pripravo ciljno usmerjenih izboljšav, kar povečuje učinkovitost ukrepov.

4 Diskusija

Širok nabor ergonomskih ocen, daje strokovnjakom priložnost za optimalno pripravo zelo vsestranske ocene ergonomskih tveganj. Ugotovili smo, da je z uporabo inercialnih senzorjev oziroma pospeškomerov v 4D okolju možna hitrejša in učinkovitejša ergonomska ocena delovnega mesta. Analiza drže, gibov, uporabe sile in ponavljajočih se gibov, je vozlišče praktično vseh metod in ergonomskih ocen. Različne metode ocenjevanja omogočajo natančno prepoznavanje specifičnih

ergonomskih tveganj, ki so prisotna na različnih delovnih mestih v različnih panogah, kot so na primer:

- **V proizvodnih obratih** se senzorji uporabljajo predvsem za spremljanje gibanja zaposlenih, ki opravljajo ponavljajoče se naloge. S tem se lahko identificirajo neergonomski gibi in položaji, ki bi lahko vodili do poškodb zaradi ponavljajočih se obremenitev. Na podlagi teh podatkov se lahko prilagodijo delovni procesi in uvedejo ergonomski pripomočki, kot so prilagodljive delovne postaje in ergonomska orodja.
- **V zdravstvenih ustanovah** se inercialni senzorji uporabljajo za spremljanje gibanja medicinskega osebja, ki pogosto dviguje in premika paciente. Senzorji lahko pomagajo prepoznati tvegane gibe in položaje ter vodijo do izboljšav, kot so uporaba dvigal za paciente in ergonomske tehnike dvigovanja, s čimer se zmanjšajo tveganja za poškodbe hrbtenice in mišično-skeletnega sistema.
- **V pisarniških okoljih** se inercialni senzorji uporabljajo za spremljanje drže zaposlenih, ki večino časa preživijo v sedečem položaju za računalnikom. Senzorji lahko zaznajo slabo držo in tako lahko utemeljeno predlagamo prilagoditve, kot so ergonomski stoli, nastavljive mize in pogosti odmori za raztezanje, kar pripomore k zmanjšanju tveganja za bolečine v hrbtu in vratu.
- **Na gradbiščih** se inercialni senzorji uporabljajo za spremljanje gibanja delavcev, ki opravljajo fizično zahtevna dela. Senzorji lahko pomagajo prepoznati tvegane gibe in položaje na podlagi katerih predlagamo izboljšave, kot so uporaba ergonomskih orodij in tehnik dvigovanja, s čimer se zmanjšajo tveganja za poškodbe zaradi dvigovanja težkih bremen in drugih fizičnih obremenitev.

Na podlagi ugotovitev ergonomskih ocen je možno hitro in učinkovito prilagoditi delovna mesta, uvedbo ergonomskih pripomočkov in spremembe delovnih procesov, kar prispeva k izboljšanju delovnih pogojev. Z izboljšanjem ergonomije na delovnem mestu se povečuje produktivnost zaposlenih. Udobno in varno delovno okolje omogoča zaposlenim, da delajo bolj učinkovito in z manj napora, kar vodi do večje produktivnosti in boljših rezultatov. Ergonomsko urejena delovna mesta prispevajo k večjemu zadovoljstvu zaposlenih. Ko se zaposleni počutijo

udobno in varno, so bolj motivirani in zvesti podjetju, kar pozitivno vpliva na delovno klimo in zmanjšuje fluktuacijo zaposlenih.

Dolgoročno se z izboljšanjem ergonomije na delovnem mestu močno zmanjšuje število kostno-mišičnih obolenj. To vključuje zmanjšanje bolečin v hrbtu, vratu, ramenih in drugih delih telesa, kar prispeva k boljšemu zdravju zaposlenih. Izboljšanje ergonomskih pogojev spodbuja trajnostno in zdravo delovno prakso. Zmanjšanje poškodb in bolezni, povezanih z delom, prispeva k dolgoročni vzdržnosti delovne sile in zmanjšuje stroške, povezane z bolniškimi odsotnostmi in zdravstveno oskrbo. V tem trenutku je uporaba inercialnih senzorjev še dokaj draga in zahteva kar nekaj kompleksnega znanja iz področja ergonomije. V prihodnosti bi lahko uporaba teh senzorjev za sledenje gibanju v 4D okolju postala standardna praksa pri ergonomskih analizah. Z napredkom tehnologije se bodo senzori verjetno še izboljšali, kar bo omogočilo še bolj natančne in zanesljive meritve. Poleg tega bi lahko integracija teh senzorjev z drugimi tehnologijami, kot so umetna inteligenca in strojno učenje, omogočila še bolj celovite in prilagojene rešitve za izboljšanje ergonomije na delovnem mestu. Uporaba teh metod bo sčasoma verjetno postala bolj enostavna in cenena.

Literatura

- Balantič, Z., Polajnar, A., & Jevšnik, S. (2016). Ergonomija v teoriji in praksi. *Ljubljana: Nacionalni Inštitut Za Javno Zdravje*, 126–140.
- Balantič, Z., Jarc Kovačič B., & Medved, T. (2024). Model obladovanja tveganj za utrjevanje vrednot ergonomskih načel v proaktivni ergonomiji. V Urh, B., Maletič, M., Kohont, A., & Bajić, M. (Ur.), *Raziskovalni trendi in trajnostne rešitve v inženiringu poslovnih sistemov* (str. 85-109). Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba.
- Carnazzo, C., Spada, S., Lamacchia, S., Manuri, F., Sanna, A., & Cavatorta, M. P. (2024). Virtual reality in ergonomics by wearable devices: experiences from the automotive sector. *Journal of Workplace Learning*, 36(7), 621–635.
- Castillo, J. D., Marquez, B. Y., Realyvazquez, A., & Alanis, A. (2022). RULA (Rapid Upper Limb Assessment) Methodology for Ergonomics Using Inertial Sensors. *International Conference on Advanced Research in Technologies, Information, Innovation and Sustainability*, 177–190.
- Greco, A., Caterino, M., Fera, M., & Gerbino, S. (2020). Digital twin for monitoring ergonomics during manufacturing production. *Applied Sciences*, 10(21), 7758.
- Kotowski, S. E., & Gibson, S. L. (2023). *Ergonomic Assessment Toolkit*. AIHA.
- Lind, C. M. (2024). A Rapid Review on the Effectiveness and Use of Wearable Biofeedback Motion Capture Systems in Ergonomics to Mitigate Adverse Postures and Movements of the Upper Body. *Sensors*, 24(11), 3345.
- Lind, C. M., Diaz-Olivares, J. A., Lindecrantz, K., & Eklund, J. (2020). A wearable sensor system for physical ergonomics interventions using haptic feedback. *Sensors*, 20(21), 6010.
- Manus. (n.d.). *Quantum Mocap Metagloves*. Manus Knowledge Center. <https://docs.manus-meta.com/2.4.0/Products/Quantum%20Mocap%20Metagloves/>

- Rezvanizadeh, M., Mohammad-Ghasemi, M., Soltanzadeh, A., & Sadeghi-Yarandi, M. (2023). Development of a novel ergonomic index assessment in the workplace based on physical, cognitive, and environmental components. *Work*, 75(3), 1071–1086.
- Sangeethalakshmi, K., Lakshmi, V. V., Malathi, N., & Velmurugan, S. (2023). Smart Ergonomic Practices With IoT and Cloud Computing for Injury Prevention and Human Motion Analysis. *2023 International Conference on Artificial Intelligence for Innovations in Healthcare Industries (ICAIIHI)*, 1, 1–6.
- Santos, C., Gabriel, A. T. V., Quaresma, C., & Nunes, I. L. (2024). The use of wearable sensors for ergonomic risk assessment of surgical procedures: a literature review. *Human Factors and Systems Interaction*, 154(154).
- Siemens. (2024). *Tecnomatix eMS documentation*. Siemens Documentation Center. https://docs.sw.siemens.com/en-US/doc/288782031/PL20231017544579710.tecnomatix_eMS.xid1015765/xid1657141
- Vox, J. P., Weber, A., Wolf, K. I., Izdebski, K., Schüler, T., König, P., Wallhoff, F., & Friemert, D. (2021). An evaluation of motion trackers with virtual reality sensor technology in comparison to a marker-based motion capture system based on joint angles for ergonomic risk assessment. *Sensors*, 21(9), 3145.
- Xsens Technologies. (2021). *MVN user manual*. Xsens. https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/usermanual/MVN_User_Manual.pdf