

Turingov test zaznave gibalne sposobnosti pri fizičnem sodelovanju med človekom in intelligentnim robotskim agentom

Rebeka Kropivšek Leskovar^{1,2}, Tadej Petrič^{1,2}

¹Odsek za avtomatiko, biokibernetiko in robotiko, Inštitut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

²Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

E-pošta: {rebeka.leskovar, tadej.petric}@ijs.si

Turing test of motor ability perception in physical collaboration between a human and an intelligent robot agent

In this paper we propose a novel robot control method for human-robot collaboration tasks that takes into account the leader-follower relationship found in human interactions. Taking into account the leader-follower dynamics, learnt during a study on human-human collaboration, the control method replicates human behaviour when performing collaborative tasks. The performance of the proposed control method was evaluated using a 2D reaching task where we compared task performance between individual tasks, tasks in collaboration with a human and tasks in collaboration with a robot. The subjects in the evaluation were asked to grade their perceived task load for each experiment as well as specify if they thought they performed the task alone, with a robot or with a human partner as a Turing test to determine whether the subjects were able to distinct between a robot and a human partner. The results of the evaluation showed, that the robot control method is capable of replicating human behavior to benefit overall task performance of the subject in collaboration, however it is not capable of replicating this behaviour to the degree that the subject in collaboration would not be able to distinguish whether they were collaborating with a robot or a human partner.

1 Uvod

V zadnjem desetletju pridobiva raziskovalno področje interakcij med človekom in robotom veliko zanimanja z raziskavami, kot so [1][2][3]. Da bi bolje razumeli interakcije med človekom in robotom, je potrebno prvo razumeti interakcije med ljudmi. Študija Ganesha in drugih [4] je pokazala, da se ljudje v izvajanju naloge izboljšajo, če sodelujejo s partnerjem. Poleg tega so ugotovili, da se človek izboljša bolj, če sodeluje s človekom kot, če sodeluje z umetnim agentom (npr. robotom). Iz tega lahko izhajamo, da je za boljše sodelovanje med človekom in robotom potrebno razviti sistem vodenja robota, ki implementira človeku podobna obnašanja.

V dosedanjih študijah [5][6] smo se človeškemu obnašanju poskušali približati z implemetacijo že obstoječih nevromehanskih modelov človeka v sisteme vodenja. V omenjenih študijah je bila naloga robota, da sledi gibanju človeka in prilagodi svoje obnašanje tako,

da izboljša njegovo uspešnost. Tako je človek med izvajanjem naloge vedno prevzel vlogo vodje. V primerjavi s tem se v interakcijah med ljudmi vodjo določi med izvajanjem naloge. Da bi lahko posnemali razmerje vodja-spremljevalec, ki se pojavi v sodelovanju med ljudmi, potrebujemo v interakcijah med človekom in robotom sistem vodenja robota, ki poleg stereotipno človeškega obnašanja vzame v zakup tudi razmerje vodja-spremljevalec.

V sklopu tega prispevka bomo predstavili nov sistem vodenja za kolaborativne robote, ki poleg človeku podobnega gibanja med interakcijo s človekom upošteva tudi strategijo vodja-spremljevalec, ki se naravno pojavi v sodelovanju med ljudmi. Predlagan sistem bomo prav tako ovrednotili na podlagi uspešnosti človeka v sodelovanju s predlaganim sistemom vodenja robota v primerjavi z uspešnostjo človeka, ko nalogo opravlja sam ter z uspešnostjo človeka, ko sodeluje s človeškim partnerjem. Pri tem predpostavljamo, da bo predlagan sistem vodenja izboljšal uspešnost človeka s katerim sodeluje glede na njegovo individualno uspešnost. Prav tako predpostavljamo, da bo uspešnost kolaborativne naloge približno enaka v primeru sodelovanja z robotom in sodelovanja s človeškim partnerjem. Za konec bomo s pomočjo preprostega Turnigovega testa ovrednotili ali človek prepozna razliko med sodelovanjem s človeškim ali robotskeim partnerjem.

2 Sistem vodenja robota

Predlagani sistem vodenja temelji na dinamičnem modelu, ki smo ga razvili v sklopu članka [7]. Le-ta je sestavljen iz dveh točk, ki predstavljata končna člena robotskih rok in sta med seboj povezani z virtualno vzmetjo. Pri tem je koeficient virtualne vzmeti nastavljen tako, da vzmet posnema palico, zato lahko silo vzmeti v sistemu zanemarimo. Dinamični model generira silo F v središču vzmeti glede na sili, ki sta aplicirani na končna člena robotskih rok. Tako dobimo enačbo:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1)$$

kjer je \mathbf{F}_1 sila na prvem končnem členu in \mathbf{F}_2 sila na drugem končnem členu.

Zgoraj opisani dinamični model omogoča povezavo dveh robotskeih rok v primerih, ko med seboj sodeluja dve osebi, uporablja pa se lahko tudi za individu-

alno izvajanje nalog, pri čemer se robotski roki med seboj razčlenita tako, da upoštevamo silo na drugem končnem členu kot 0.

Da lahko uporabimo zgoraj opisani dinamični model v primerih, ko človek sodeluje z robotskim agentom, je potreben enačbo 1 zapisati kot:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_h + \mathbf{F}_r \quad (2)$$

kjer je \mathbf{F}_h sila, ki jo človek aplicira na končno točko robota, \mathbf{F}_r pa sila, ki jo proizvede robotski agent.

Sila \mathbf{F}_r je v predlaganem sistemu vodenja sestavljena iz dveh delov in sicer:

$$\mathbf{F}_r = K_l \cdot (\mathbf{F}_{r,fb} + \mathbf{F}_{r,ff}) \quad (3)$$

kjer je $\mathbf{F}_{r,ff}$ sila, naučena iz povprečne trajektorije sil posameznega subjekta s katerim sodeluje, $\mathbf{F}_{r,fb}$ pa je sila, ki temelji na povratni zanki in je odvisna od napake med željeno in dejansko pozicijo robota v danem času. Slediča je definirana kot:

$$\mathbf{F}_{r,fb} = K_p \cdot (\mathbf{p}_{dej} - \mathbf{p}_t) + K_d \cdot (\mathbf{v}_{dej} - \mathbf{v}_t) \quad (4)$$

kjer sta K_p in K_d koeficiente ojačanja, \mathbf{p}_{dej} dejanska pozicija in \mathbf{p}_t željena končna pozicija ter \mathbf{v}_{dej} dejanska hitrost in \mathbf{v}_t željena končna hitrost, ki je enaka 0.

Silo $\mathbf{F}_{r,ff}$ se robot nauči tako, da se najprej nauči karakteristično trajektorijo pomika skozi fazo naloge $p(\phi)$, ko subjekt izvaja nalogo individualno. Iz naučene trajektorije pomika, nato izračuna silo kot:

$$\mathbf{F}_{r,ff}(\phi) = m\ddot{\mathbf{p}}(\phi) + D\ddot{\mathbf{p}}(\phi) \quad (5)$$

pri čimer je m masa dinamičnega sistema in D faktor dušenja dinamičnega sistema.

K_l predstavlja vodilno konstanto, ki določi kolikšen vpliv ima virtualna sila robota na celotno gibanje dinamičnega modela. Vodilna konstanta je odvisna od zadane naloge in je definirana na podlagi rezultatov raziskave o sodelovanju med ljudmi, katere eksperiment je predstavljen v [7]. V tej raziskavi, je bila zadana nalogu subjektov doseči devet različnih tarč, medtem ko so bili med seboj povezani v pare. V sklopu raziskave smo ugotovili, da subjekta v sodelovanju ne vložita enako sile v zadano nalogu, temveč eden izmed subjektov vedno vloži večjo silo in posledično vodi opravljanje naloge. Kakšna je proporcionalna razlika med vloženima silama posameznega subjekta smo definirali kot:

$$L = \int_0^T \mathbf{F}_f(t) - \mathbf{F}_s(t) dt \quad (6)$$

kjer je \mathbf{F}_f sila hitrejšega subjekta, \mathbf{F}_s pa sila počasnejšega subjekta, pri čimer sta bila hitrejši in počasnejši subjekt določena glede na njuno hitrost izvajanja naloge, ko sta naloge opravljala sama.

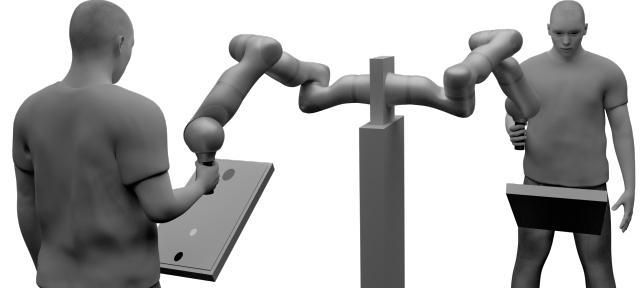
Da bi lahko robot opravljal vlogo tako partnerja, ki vodi kot partnerja, ki sledi, smo K_l glede na željeno vlogo definirali kot:

$$\Delta K_l = \begin{cases} 1 - \frac{L}{max(L)} & ; \text{robot sledi človeku} \\ 1 & ; \text{človek in robot sta ekvivalentna} \\ 1 + \frac{L}{max(L)} & ; \text{robot vodi človeka} \end{cases} \quad (7)$$

Tako koeficient vodenja K_l kot sili $\mathbf{F}_{r,ff}$ in $\mathbf{F}_{r,fb}$ so odvisni od končnega cilja naloge. Zaradi tega predlagan sistem vodenja pred začetkom izvajanja naloge najprej oceni, kaj je cilj naloge, ter cilju primerno prilagodi svojo strategijo izvajanja naloge.

3 Vrednotenje sistema vodenja

Za vrednotenje sistema vodenja smo izvedli štiri vrste eksperimentov in sicer individualen eksperiment, kolaborativni eksperiment z robotom, kjer robot sledi subjektu, kolaborativni eksperiment z robotom, kjer robot vodi subjekta ter kolaborativni eksperiment med dvema subjektoma. V vrednotenju je sodelovalo 12 subjektov, oziroma 6 parov, pri čemer je bilo 8 moških in 4 ženski subjekti. Vsi subjekti so bili desničarji.



Slika 1: 3D prikaz eksperimentalne postavitve uporabljene za vrednotenje krmilnika. Na ekranu je prikazan grafični vmesnik, ki se je uporabljal v eksperimentu. Le-ta prikazuje začetno pozicijo (črna točka), tarčo (siva točka) in točko, ki jo subjekta premikata s pomočjo haptičnega vmesnika (bela točka).

3.1 Postavitev eksperimenta

Eksperiment se je izvajal na dveh robotskeh rokah Kuka LWR, ki sta služili kot haptični vmesnik med človekom in virtualnim okoljem. Za prikaz virtualnega okolja sta bila uporabljena dva računalniška ekranov, na katerih je bil prikazan preprost grafični vmesnik, predstavljen na sliki 1.

3.2 Postopek eksperimenta

Subjekta sta se postavila pred računalniški zaslon in prijela ročaj haptičnega vmesnika, kot je prikazano na sliki 1. Eksperiment se je začel, ko sta se subjekta s haptičnim vmesnikom pomaknila v začetno točko. Ko sta bila oba subjekta v začetni točki, se je na grafičnem vmesniku prikazala tarča. Subjekta sta imela nalogo, da zadeneta tarčo v najkrajšem možnem času ter ostaneta v tarči dokler leta ne izgine iz zaslona. Ko je tarča izginila, sta se morala vrniti nazaj v začetno točko ter tam počakati, dokler se ni pojavila nova tarča.

Vsak eksperiment je trajal približno 10 minut in je bil sestavljen iz pet ciklov. V sklopu vsakega cikla so morali subjekti doseči 9 različnih tarč, ki so se na ekranu pojavljale v naključnem zaporedju. Vsak eksperiment je imel v celoti 45 ponovitev. Da bi se izognili vplivu učenja naloge na končni rezultat med posameznimi eksperimenti, smo za vsak par spremenili vrstni red izvajanja eksperimentov, pri čemer je bil prvi eksperiment vedno individualen zaradi učenja trajektorij robotskega agenta.

Med posameznim eksperimentom so imeli subjekti 5 min pavze, v katerih so za vsak eksperiment posebej izpolnili *Nasa Task Load index* oziroma Nasa-TLX vprašalnik, ki je namenjen ocenjevanju zaznane obremenitve pri izvajanju nalog [8]. Kot Turingov test so morali subjekti, po izvedbi vseh štirih eksperimentov, odgovoriti še na dva vprašanja in sicer:

1. če bi izbrali enega izmed eksperimentov, kateri se vam je zdel najlažji za izvesti?
2. Za posamezni eksperiment izberite ali ste eksperiment opravljali sami, s človekom ali z robotom.

3.3 Analiza podatkov

Poleg subjektivnega vrednotenja na podlagi Nasa-TLX, smo uspešnost izvajanja naloge v posameznih eksperimentih vrednotili še na podlagi Fittsovega zakona (ang. *Fitts' law*) [9]. Fittsov zakon opisuje razmerje med hitrostjo in natančnostjo človeka pri izvajanju nalog, kjer je potrebno doseči določeno tarčo. V sklopu tega zakona je uspešnost izvajanja naloge za različne tarče opisana z vrednostjo IP oziroma *index of performance*. Le-ta je definiran kot:

$$IP = \frac{ID}{T} \quad (8)$$

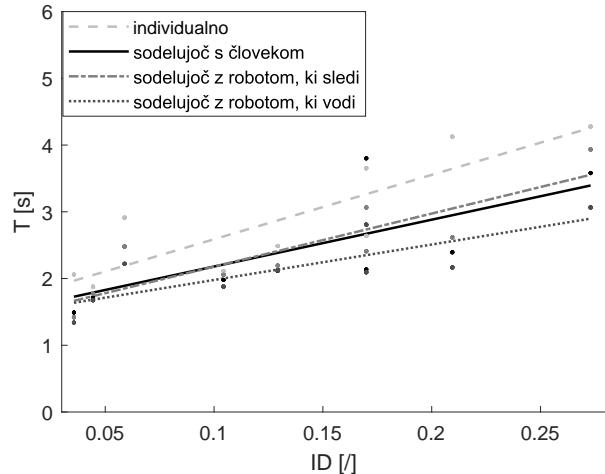
kjer je T merjen čas za doseg določene tarče in ID *index of difficulty*, ki definira zahtevnost tarče.

V literaturi je ID definiran na različne načine, v našem primeru pa smo uporabili Shannonovo formulacijo, ki je definirana kot:

$$ID = \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right) \quad (9)$$

V tej enačbi predstavlja D razdaljo tarče, W pa velikost tarče.

4 Rezultati



Slika 2: Primerjava modelov Fittsovega zakona za posamezne eksperimente.

Na sliki 2 so prikazani modeli po Fittsovem zakonu za posamezne tipe eksperimentov. Nižji čas izvedene naloge predstavlja boljšo učinkovitost izvajanja naloge. Iz

like lahko vidimo, da se je uspešnost pri vseh eksperimentih, kjer je subjekt sodeloval z robotom ali človekom, izboljšala v primerjavi z individualnim eksperimentom.

Poleg tega lahko vidimo, da je učinkovitost izvajanja naloge bila najboljša v eksperimentih, kjer je subjekt sodeloval z robotom, ki je vodil, medtem ko je bila učinkovitost v eksperimentih, kjer je subjekt sodeloval z drugim človekom in z robotom, ki je sledil subjektu, v povprečju približno enaka.

Če si ogledamo ocene pridobljene z Nasa-TLX vprašalnikom, ki so prikazane na sliki 3, lahko vidimo, da je skupno najboljšo oceno dobil eksperiment, v katerem je subjekt izvajal naloge v sodelovanju z robotom, ki je vodil. To potrjujejo tudi odgovori subjektov na vprašanje 1, kjer je 7 od 12 subjektov odgovorilo, da jim je bil najlažji eksperiment, kjer so sodelovali z robotom, ki vodi. Pri tem sta 2 od 12 subjektov odgovorila z individualnim eksperimentom ter eksperimentom, kjer so sodelovali s človekom, 1 od 12 subjektov pa je odgovoril z eksperimentom, kjer so sodelovali z robotom, ki je sledil.

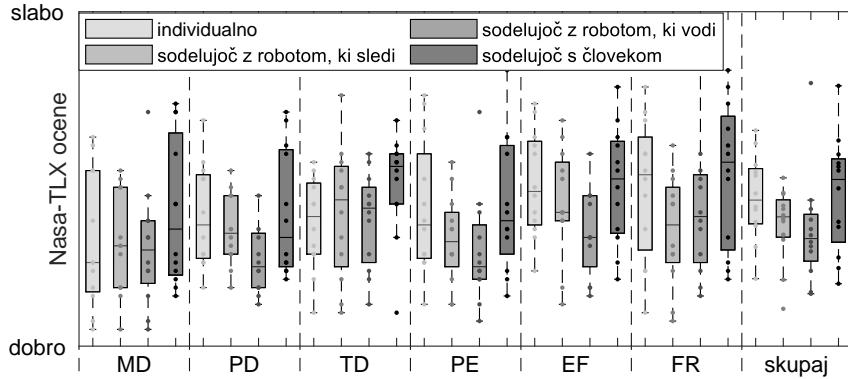
Poleg tega lahko opazimo, da ima eksperiment, kjer so subjekti sodelovali s človekom največjo razpršenost ocen skozi vse faktorje razen časovne zahtevnosti (ang. *temporal demand*), medtem ko imata eksperimenta, kjer je subjekt sodeloval z robotom najnižjo razpršenost skozi vse faktorje razen časovne zahtevnosti.

Pri vprašanju 2 je tipe eksperimentov pravilno določilo 9 od 10 subjektov za individualni eksperiment, 4 od 10 za eksperiment, kjer so sodelovali z robotom, ki jim je sledil, 7 od 10 za eksperiment, kjer so sodelovali z robotom, ki je vodil in 9 od 10 za eksperiment, kjer so sodelovali s človekom. Dva od desetih subjektov je eksperiment, kjer so sodelovali z robotom, ki vodi zamenjalo za eksperiment, kjer so sodelovali s človekom in en za individualen eksperiment. Eksperiment, kjer so sodelovali z robotom, ki je subjektom sledil, pa je 5 od 10 subjektov zamenjalo za individualen eksperiment in 1 od 10 za sodelovanje s človekom. Pri tem smo 2 od 12 subjektov zanemarili zaradi nepopolnega odgovora na vprašanje.

5 Diskusija

Namen raziskave je bilo razviti nov sistem vodenja kolaborativnega robota, ki vzame poleg človeku podobnega gibanja v zakup tudi strategijo vodja-spremljevalec in omogoča zamenjavo človeškega partnerja v kolaborativnih nalogah s človeku podobnim obnašanjem robota. Predlagan sistem je bil preizkušen na preprosti nalogi, kjer je moral subjekt doseči tarčo in sicer na štiri različne načine – sam, s pomočjo robota, ki je sledil subjektu, s pomočjo robota, ki je vodil subjekta in s pomočjo človeškega partnerja.

Analiza učinkovitosti izvajanja naloge, ki smo jo določili na podlagi Fittsovega zakona, je pokazala, da se je subjektom med izvajanjem naloge v sodelovanju s tako robotskim kot človeškim partnerjem učinkovitost izboljšala, kar se ujema z rezultati, prikazanimi v [4] in [7]. Iz tega lahko sklepamo, da predlagan sistem vodenja ne ovira subjekta pri izvajanju naloge, temveč celo dodatno



Slika 3: Nasa-TLX ocene vseh subjektov. Ocene so predstavljene za vse faktorje posebej (MD: mentalna zahtevnost (ang. *mental demand*), PD: fizična zahtevnost (ang. *physical demand*), TD: časovna zahtevnost (ang. *temporal demand*), PE: učinkovitost (ang. *performance*), EF: napor (ang. *effort*), FR: frustracija (ang. *frustration*)) ter kot skupna ocena (tj. povprečna ocena vseh faktorjev z obteženimi ocenami glede na vsakega posameznika).

pripomore k učinkovitosti.

Pri kolaborativnih nalogah pa je poleg učinkovitosti pomembna tudi obremenitev subjekta pri izvajajuju naloge. Le-to smo vrednotili s pomočjo Nasa-TLX vprašalnika, v katerem je najboljšo oceno dobil eksperiment, kjer so subjekti sodelovali z robotom, ki jih je vodil, najslabšo oceno pa eksperiment, kjer so sodelovali s človeškim partnerjem. Razlog za to izhaja predvsem iz uteži posameznih faktorjev, ki se jih upošteva med računanjem skupne ocene TLX. Uteži posameznih faktorjev določi vsak subjekt posebej glede na to, kateri faktor se mu zdi najbolj pomemben pri izvajajuju naloge [8]. Pri izbiri uteži so v povprečju subjekti za najbolj pomemben faktor izbrali učinkovitost (PE) in frustracijo (FR). Iz slike 3 lahko vidimo, da ima eksperiment, kjer so subjekti sodelovali s človeškim partnerjem, najslabšo oceno tako v PE kategoriji kot v FR kategoriji, medtem ko ima eksperiment z robotom, ki vodi, najboljšo oceno v PE kategoriji in drugo najboljšo oceno v FR kategoriji. Razlog za prikazane ocene izhaja predvsem iz tega, da je človek manj predvidljiv, kot robot s predlaganim sistemom vodenja, kar povzroči večjo frustracijo ter mentalno breme subjekta in posledično zmanjša občutek učinkovitosti izvajanja naloge.

Iz odgovorov na vprašanja Turingovega testa lahko ugotovimo, da je večina subjektov pravilno ugotovila ali so nalogu izvajali sami, z robotom ali s človeškim partnerjem, pri čimer je bil izjema eksperiment, kjer je subjekt sodeloval z robotom, ki sledi. Iz tega lahko sklepamo, da sistem vodenja, predlagan v tem članku, ne generira človeku dovolj podobnega obnašanja, da bi prestal Turingov test. V primeru sistema vodenja, kjer robot vodi je namreč bilo obnašanje dovolj drugačno od človeškega partnerja, da sta ga za človeka zamenjala le 2 od 10 subjektov, v primeru sistema vodenja, kjer je robot sledil subjektu, pa ga je za človeka zamenjal 1 od 10 subjektov, pri čemer je 5 od 10 subjektov mislilo, da so nalogu izvajali sami.

Študija predstavljena v tem članku nakazuje, da je predlagan sistem vodenja robota sposoben nadomestiti človeškega partnerja, saj se učinkovitost izvajanja naloge v primeru sodelovanja z robotom, tako kot pri sodelovanju s človeškim partnerjem, izboljša. Kljub temu pa predlagan sistem vodenja robota ni sposoben oponašati človeškega obnašanja v kolaborativnih nalogah do te-

mere, da ne bi bil prepoznaven v primerjavi s človekom, saj je njegovo obnašanje tipično drugačno kot obnašanje človeškega partnerja, subjekt pa ga je zmožen razločiti.

Acknowledgement: This work was supported by Slovenian Research Agency grant N2-0130.

Literatura

- [1] S. Ikemoto, H. B. Amor, T. Minato, B. Jung, and H. Ishiguro, "Physical human-robot interaction: Mutual learning and adaptation," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 19, no. 4, pp. 24–35, 2012.
- [2] C. Thomas, L. Stankiewicz, A. Grötsch, S. Wischniewski, J. Deuse, and B. Kuhlenkötter, "Intuitive work assistance by reciprocal human-robot interaction in the subject area of direct human-robot collaboration," *Procedia CIRP*, vol. 44, pp. 275 – 280, 2016, 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS).
- [3] X. Yu, Y. Li, S. Zhang, C. Xue, and Y. Wang, "Estimation of human impedance and motion intention for constrained human–robot interaction," *Neurocomputing*, 2019.
- [4] G. Ganesh, A. Takagi, R. Osu, T. Yoshioka, M. Kawato, and E. Burdet, "Two is better than one: Physical interactions improve motor performance in humans," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, p. 3824, 2014.
- [5] T. Petrič, R. Goljat, and J. Babič, "Cooperative human-robot control based on fitts' law," in *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2016, pp. 345–350.
- [6] T. Petrič, M. Cevzar, and J. Babič, "Utilizing speed-accuracy trade-off models for human-robot coadaptation during cooperative groove fitting task," in *2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)*, 2017, pp. 107–112.
- [7] R. Kropivšek Leskovar, J. Čamernik, and T. Petrič, "Dyadic human-human interactions in reaching tasks: Fitts' law for two," in *Advances in Service and Industrial Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 199–207.
- [8] S. G. HART, "Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research," *Human Mental Workload*, 1988. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10015399884/en/>
- [9] P. M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 47, no. 6, pp. 381–391, 1954.