



EXTERNAL EXAMINER REPORT

Candidate: Ing. Sergo Martirosov

Thesis title: The effect of training in Virtual Reality on hand movement precision

1. Contribution of the doctoral thesis

The work presented in the dissertation can be divided threefold. First, the candidate demonstrates how new technologies such as Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) can be utilized in various industries and sectors, including teaching, training, medicine, aerospace, and others. The amount of reviewed work on VR/AR application is extensive, and it is well-presented, identifying the *pros* and *cons* of specific use case scenarios.

Second, the candidate showed how specific hardware devices and software tools could be used to create different VR environments, followed by their application in different training scenarios. That is especially relevant since tools and software (commonly used by the gaming industry) were utilized for the thesis by the candidate, meaning additional time and effort had to be invested for learning how to work with the tools.

Third, the level of ingenuity in measuring test subjects' performances in VR and the real world is impressive. In my view, the fusion of the collected data from different sources to derive conclusions required a lot of planning. Hence, I can complement the author and the supervisor (doc. Ing. Pavel Kopeček, CSc.) for creating the methodology for performance comparison that I believe could be used in other disciplines.

I can see the contribution of the thesis in the following:

- The literature on VR/AR technology applications in different industries was extensively and critically reviewed.
- The methodology for conducting this type of experiment, gathering data, and analyzing the results was developed.
- The interplay between VR training and the subjects' performances in the real world (while completing specific tasks) was discovered, leading to interesting thesis conclusions.
- Multiple research paths were opened for others to follow in future research, particularly those who would use haptic devices or more experienced test subjects in their experiments.

Noting the points mentioned above, I **evaluate the thesis contribution positively**.

2. Evaluation of the applied procedures, methods, and achieved objectives

As one of the strong points of the thesis, the candidate devotes an entire chapter explaining the procedures and methods used for planning and executing the experiment and data analysis. Specific stages of the experiment are discussed with a sufficient level of detail. I particularly value the section where the implemented statistical analysis is explained, showing how the candidate recognized that appropriate methods and tests must be employed if proper and valid conclusions are to be reached.

One remark that can be addressed during the presentation of the thesis results, i.e., its defense, is why the candidate did not use debriefing sessions with the test subjects during the experiment phase (or he did, but they were not reported in the document). As mentioned in the literature review (e.g., [103] and [104]), if pre-, during-, and post-training instructions are given to the test subjects, their performances can improve. In the industrial environment, I expect workers to receive feedback from their educators during the training phase. The candidate did not use that approach in his experiments. Another suggestion would be to use a separate control group of test subjects. The task of the second group of test subjects would be to undergo only real-world training. That would allow comparing performances of those who trained in VR and those who trained only in the real world.

In the experiments involving human subjects, there is always a risk of losing the subjects' interest and motivation for participating in the research. That is especially true if the experiment takes a long time and requires a higher concentration level from the participants. When analyzing the obtained results, we can see that the VR performances improved in both dimensions (time and accuracy), which was not the case in the real world. In my view, the subjects were more inclined to train in a VR environment since VR technology is usually perceived as new, exciting, providing an immersive experience, etc. Hence, their performances improved in VR (they liked that experience), but this was not reflected in the real-world performances. Maybe the participants wanted to finish the real-world experiment as soon as possible (i.e., reducing the time), which yielded less accuracy. That is why I believe that the control group of test subjects would have been beneficial in this research.

The candidate proposed several hypotheses, confirming the H1, H2, H3 for the VR experiment and H2 and H3 for the real-world experiment. In contrast, hypotheses H4 for the VR experiment and H1 and H4 for the real-world experiment were proven false. The outcomes of the hypothesis tests are all very well explained and discussed in detail.

Overall, I can positively evaluate the methods and procedures used in the thesis and the achieved objectives. As I mentioned earlier, the dissertation delivered multiple contributions; that would not be possible unless an appropriate methodology were applied.

3. The results and originality

There are several aspects of the experiments presented in the dissertation. Namely, the candidate conducted his research using human participants. The participants were asked to draw specific objects (line, circle, and wave shapes) in a VR environment and real life, using modified glue and a caulking gun with one and two hands. The objective was to see if the subjects' performance (in terms of accuracy and time needed to conduct the task) would improve in real life after a month of training in VR. That was the basic idea of this work.

To conduct such work, apart from voluntary participants, the candidate needed a suitable VR environment, not just for presenting the scene to the participants but also for the data collection on the movement precision and time. It is admirable that the candidate created that environment from the ground up.



The results showed that the subjects' performances in the VR environment improved throughout the training period (in both dimensions: reducing time and increasing accuracy). However, this was not entirely reflected in the real-world performances. It can even be argued that VR training negatively impacted the participants' accuracy in the real world. Without any doubt, the candidate proved that VR training sessions affected the subjects' performances in the real world (positively in some aspects, negatively in others). The results showed how VR technology has excellent potential in training different industry professionals, especially if the training sessions are somewhat modified to suit specific needs and training goals. That is elaborated in the dissertation and highlighted in the concluding chapters.

Experimenting with VR applications in various sectors (industry, medicine, aerospace, responsive services, etc.) is not a novel approach. The candidate's literature review unambiguously confirms that. There are many papers, studies, and reports (dating from 1990ties onwards) on how VR technology can be used; thus, the originality of this thesis lies elsewhere. From my standpoint, **the novelty of this work advents from the developed methodology for conducting these type of experiments** that includes: selection of human participants, creation of VR environment, developing data collection methods (for both subjective and objective data sets), developing software solutions for data fusion, and interpretation of presented results. Hence, **I can positively evaluate the thesis originality and the presented results.**

4. Evaluation of formal aspects of the thesis

Before I comment on the thesis's formal aspects, I must mention that the University of Zagreb has somewhat different guidelines for preparing the dissertations (e.g., document structure, text styling, and formatting, figure and table styles, etc.). Keeping that in mind, I trust the candidate and his supervisor (doc. Ing. Pavel Kopeček, CSc.) that the dissertation is prepared according to the guidelines of the Západočeská univerzita v Plzni.

The text presented in the dissertation is clear and easy to follow, even for someone not familiarized with the topic. The structure of the chapters systematically describes the used research methodology, obtained results, and derived conclusions. Another benefit is chapter 14, where the candidate lists possible applications of the research. The candidate always tries to explain the specific stages of his research in detail, enabling the repetitiveness of the work.

I found a few typing errors, but nothing to be concerned about in the document of this size. However, in one case, one entire paragraph was repeated by mistake (on top of page 43), which can be corrected in the electronic version of the document. Additionally, I find that subchapter 7.2 would be more suitable as a part of chapter 2.

Document layout is of good quality; the use of figures (66 in total) and tables (8 in total) is appropriate and complements the surrounding text, helping readers understand the authors' ideas better. That is especially true for figures depicting the created VR environment showing different tasks the subjects had to complete. The English language is very good.

The above leads to my conclusion: **I approve of the formal aspects of the thesis.**



5. The candidate's publications

The reference list in the dissertation does not contain any publications authored or co-authored by the candidate, which is somewhat odd. A simple Google Scholar search reveals several works of the candidate from the fields of VR and related cybersickness issues, potentials of using VR for training individuals, evaluation of user experiences for VR applications, positional tracking, and other topics important for the dissertation itself. Hence, **I can positively evaluate the candidate's publications; their amount and diversity (conference and journal papers) are suitable for someone at his career stage**, yet the lack of self-citation within the dissertation (where appropriate) is puzzling.

6. Final recommendation

In my view, the dissertation delivered interesting conclusions, to some extent even unexpected. Novelty and innovativeness in the methodological sense are key attributes of the work. Moreover, possibilities for future research are detected and wide open. Therefore, I approve the thesis titled *The effect of training in Virtual Reality on hand movement precision* as being scientifically sound and original. **I recommend that the doctoral dissertation moves to the next phase, its defense by the author Ing. Sergo Martirosov.**

External examiner

Asst. Prof. Marko Matulin, Ph.D.

Oponentní posudek disertační práce

Jméno autora: Ing. Sergo Martirosov

Jméno oponenta: Ing. Marek Bureš, Ph.D.

Práce předkládaná k hodnocení nese název „The effect of training in Virtual Reality on hand movement precision“ a je zpracována v anglickém jazyce. Práce obsahuje celkem 122 stran textové části, včetně extenzivního seznamu použité literatury.

Význam pro obor

Práce je orientována na oblast virtuální reality (VR) a jejího využití v průmyslové praxi. S rozmachem digitálních technologií a principů průmyslu 4.0 se VR neustále rozšiřuje do všech humanitních a technických oborů, včetně průmyslové praxe. Stále více dochází k prolínání klasických a moderních přístupů. Je tedy velmi důležité akceptovat tato fakta a mapovat potenciál nových technologií. Jelikož objasnění přínosů VR pro specifickou oblast v průmyslové praxi je hlavním cílem této práce, shledávám ji jako zcela relevantní a troufám si říci nezbytnou pro budoucí rozvoj průmyslové digitalizace.

Řešený problém, použité metody a splnění cíle

Práce se primárně zaměřuje na objasnění faktu, zda má trénink ve VR pozitivní vliv na provádění úkonů v reálném světě s ohledem na jejich přesnost. Prokázání tohoto faktu je velmi důležité pro potvrzení, zda průmyslové operace jako např. svařování, lepení montáž či jiné operace náročné na přesnost, mohou být ve VR nacvičeny. Cíle disertační práce jsou tedy jasně stanoveny a obdobným způsobem jsou formulovány i dílčí hypotézy. V části věnující se vlastní experimentální činnosti je jasně definován metodický postup, následné experimenty, vyhodnocení výsledků a jejich diskuze. Práce tedy plně odpovídá principům vědeckého zkoumání.

Doktorand provedl několik experimentů, jejichž podstatou bylo simulovat nanášení lepidla pomocí jednoručního nebo obouručního nástroje. Sledovány byly dva parametry, a to přesnost a doba trvání daného úkolu, respektive jak se tyto dva parametry mění s počtem provedených testů ve virtuální realitě. Pro ověření, zda trendy vývoje zmíněných parametrů budou obdobně probíhat i ve skutečném světě, provedl doktorand i experimenty na přesnost a čas i ve skutečném světě. Charakter práce je tedy čistě experimentální a přináší tak jasné, měřitelné a objektivní výsledky. Experimentální výsledky jsou následně statisticky vyhodnoceny, konfrontovány se stanovenými hypotézami a potvrzují či vyvracejí tak stanovené předpoklady.

Výsledky disertační práce

V závěrečných kapitolách předkládané práce je pomocí statistického vyhodnocení výsledků jasně prokázáno, že nácvik úkonů ve VR má pozitivní vliv na přesnost a rychlost prováděných úkonů. Pozitivní trend byl prokázán jak pro provádění úkonů jednou i oběma rukama, tak u všech sledovaných trajektorií (přímka, kružnice, sinusoida). Ve většině případů bylo také potvrzeno, že v průběhu prvních čtyř nácviků dochází k rychlejšímu progresu, co se týče



presnosti. Rychlost klesala téměř lineárně až do sedmého opakování. Výsledky jsou tedy relevantní a znamenají jasný přínos pro rozvoj zkoumané problematiky.

Systematičnost, přehlednost, formální a jazyková úprava

Jak již bylo zmíněno, práce je po metodické stránce zcela v pořádku. Doktorand při zkoumání problematiky postupoval systematicky a výsledky jsou tedy přehledné a jasně potvrzené. Nutno podotknout, že zejména v rešeršní části, ale i ve zbytku práce doktorand pracoval s velkým množstvím zdrojů zahraniční literatury. V práci je citováno přes 300 literárních zdrojů, což nebývá běžným standardem. Tímto opět dokládá relevantnost práce a její vysokou odbornou úroveň.

Doktorand pracoval s řadou softwarů (GIMP, Blender, Unity 3D, GeoGebra, Excel makra) což ukazuje jeho erudovanost a široký záběr. Velmi náročný byl také způsob odměření přesnosti ve VR (speciálně u sinusoidy) se kterým se však doktorand velmi dobře vypořádal, jak dokazují provedené výpočty.

Po formální stránce je práce také v pořádku, neboť obsahuje všechny zvyklosti a předepsanou strukturu. Kvalita jazykového projevu je z mého pohledu také dostačující, avšak nemohu zcela posoudit gramatickou stránku.

Publikační aktivita

Za zmínku stojí také vyjádření se k publikační aktivitě doktoranda, který byl v průběhu pěti let autorem celkem 8 publikací, z čehož je 5 konferencí a 3 články v impaktovaných časopisech. Jeden z impaktovaný článků vznikl ve spolupráci s univerzitou v Záhřebu, kde byl doktorand na Erasmus pobytu. Nejhodnotnější je poslední článek, který byl otisknut v časopisu Virtual Reality (impact factor 3,6, kvartil Q1). Jeden z publikovaných článků má již 10 zahraničních citací v databázi Scopus, což ve výsledku znamená H-index 2.

Celkové zhodnocení práce

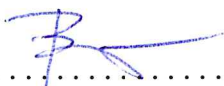
Po odborné stránce je práce velmi kvalitní a má experimentální charakter. Autor pracuje výhradně se zahraniční literaturou a zdroji, což poukazuje na novost řešené problematiky. Výsledky práce jsou originální a přináší nové poznatky pro oblast využití VR v průmyslové praxi. I přes získání jasných finálních výsledků je možné ve výzkumu dále pokračovat, například rozšířením věkové skupiny účastníků. Pokračování v tomto výzkumu bude bezesporu přínosem nejen po teoretické stránce, ale i pro využití v průmyslové praxi.

Závěrem tedy doporučuji předkládanou disertační práci k obhajobě a v případě úspěšné obhajoby udělení titulu Ph.D.

Otázky na doktoranda

Domníváte se, že v případě využití jiného hardwaru pro VR (náhlavního displeje a ovladačů) by mohly být získány odlišné výsledky?

Místo, dne: V Plzni, 17. 6. 2021


.....
podpis

**POSUDOK OPONENTA
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

Názov práce (Eng): **THE EFFECT OF TRAINING IN VIRTUAL REALITY ON HAND MOVEMENT
PRECISION**

Názov práce (Sk): **VPLYV TRÉNINGU VO VIRTUÁLNEJ REALITE NA PRESNOŠŤ POHYBU RUKY**

Doktorand: Ing. Sergo MARTIROSOV

Školiace pracovisko: Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni

Oponent: prof. Ing. Ing. Peter TREBUŇA, PhD. , Ing. PAED IGIP

1. AKTUÁLNOSŤ ZVOLENEJ TÉMY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačnú prácu s názvom „VPLYV TRÉNINGU VO VIRTUÁLNEJ REALITE NA PRESNOŠŤ POHYBU RUKY“ je možné považovať za mimoriadne aktuálnu a zároveň je možné konštatovať, že vyplýva zo všeobecných trendov zameraných do skúmanej oblasti.

Z obsahového hľadiska sú v práci prezentované výsledky vlastnej štúdie doktoranda, z ktorej sa ponúkajú špecifické úlohy pre ďalšie riešenie v súvislosti s vývojom nových metód a návrhov v skúmanej oblasti.

Z vyššie uvedeného vyplýva jednoznačný význam celej dizertačnej práce.

2. METÓDY SPRACOVANIA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Posudzovaná dizertačná práca pozostáva zo 14 na seba nadväzujúcich kapitol, úvodu a záveru, obsahuje 122 strán, 327 literárnych odkazov, 66 obrázkov a 8 tabuliek a je z formálneho hľadiska vypracovaná v súlade s podmienkami kladenými na tento druh prác. Postup riešenia považujem za správny. V nadväznosti na základné ciele dizertačnej práce boli metódy správne vybrané a v riešení aplikované. Na to aby dizertant mohol správne aplikovať vybrané metodické postupy bolo potrebné dôkladne analyzovať východiská práce a následne analyzovať existujúce podmienky a všetky vstupné parametre.

Metódy sú charakterizované a kategorizované naprieč celým riešením práce, v závislosti od analyzovaného konkrétneho atribútu skúmania.

Dizertant dôsledne rešpektoval a dodržiaval odporúčaný postup a štruktúru spracovania dizertačnej práce. Jazyková stránka predkladanej práce je na vynikajúcej úrovni.

V úvode autor definuje účel nasadzovania simulácie vo virtuálnej realite do výroby za účelom tréningu. Tréning vo virtuálnej realite autor považuje za nástroj, ktorý urýchli bezpečné adaptovanie sa zamestnancov na pracovné procesy pri nasadzovaní nových pracovných scenárov.

Poukazuje zároveň na pripravenosť zavádzania technológií virtuálnej a zmiešanej reality za účelom ich plnej integrácie do PLM systémov.

3. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE A NOVÉ POZNATKY

Z hľadiska koncepcie, štruktúry a obsahu dizertačnej práce jednoznačne vyplýva niekoľko dôležitých prínosov. Na prvom mieste vysoko oceňujem komplexnosť celej dizertačnej práce do predmetnej problematiky.

Aplikovaný prístup analýz je správny, keďže v ďalšom postupe je užšie špecializovaný do konkrétnych oblastí zvoleného problému.

Aplikáciu metodiky a realizáciu opatrení považujem za detailne spracované. Autor sa orientuje do viacerých oblastí, ktoré sú logicky odôvodnené konkrétnymi krokmi vyplývajúcimi z ponúkanej hĺbkovej analýzy. Z návrhov a nasadenia virtuálnej reality je možné očakávať zefektívnenie vnútropodnikových činností a samozrejme skrátenie doby reakcie na výskyt problémov vo výrobe.

Dizertačná práca splnila všetky stanovené ciele v teoretickej a praktickej časti práce, čo autor sám deklaruje v prínosoch a v závere na strane 100.

Predložená práca svojimi parametrami vo viacerých častiach dokladuje vedeckú erudíciu doktoranda. Potrebné je zdôrazniť aj publikačnú činnosť doktoranda orientovanú do oblasti riešenia skúmanej problematiky a záznamy v databázach Scopus a CC. Zároveň pri vedecko-výskumnej aktivite doktoranda považujem za potrebné spomenúť 2 záznamy v databáze WOS a 6 záznamov v databáze SCOPUS.

Konštatujem, že ciele definované v dizertačnej práci je možné považovať za dosiahnuté a splnené.

4. PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A TECHNIKY (UMENIA)

Dizertačná práca má teoretický prínos, predovšetkým v oblasti systematizácie poznatkov súvisiacich s oblasťou virtuálnej reality, zariadení a softvérov pre virtuálnu realitu a taktiež podáva základ pre laboratórne experimentovanie v uvedenej oblasti. Praktický prínos práce možno vidieť v konkrétnych návrhoch a využití metodiky identifikácie novej hrozby zániku obchodnej značky a samozrejme realizácie vlastného výskumu.

Osobitne vyzdvihujem aplikačnú kapitolu 10 a taktiež realizačnú kapitolu 11 a ich vyhodnotenie štatistickými nástrojmi, ktoré jednoznačne potvrdili hypotézy.

Praktickým prínosom dizertačnej práce sú sumarizované doktorandom na strane 96 a po dôkladnom preštudovaní práce je možné stotožniť sa s nimi.

5. PRIPOMIENKY A POZNÁMKY K DIZERTAČNEJ PRÁCI

Nemám.

6. OTÁZKY A ÚLOHY K RIEŠENEJ PROBLEMATIKE

Bolo by možné zaoberať sa aj ekonomickým efektom navrhovaných riešení? Ak áno ako metódou by ste dokázali skalkulovať prípadnú úsporu?

Aké nastupujúce trendy v skúmanej oblasti vidíte postupným prechodom z I 4.0 na I 5.0 (definovanou Európskou komisiou) v blízkej budúcnosti?

7. SPLNENIE SLEDOVANÝCH CIEĽOV DIZERTAČNEJ PRÁCE

Všetky ciele dizertačnej práce (ako celkový, tak čiastkové) považujem na základe preskúmania tiež za splnené. Z hľadiska celkového hodnotenia dizertačnej práce Ing. Serga MARTIROSOVA teda konštatujem, že doktorand v plnom rozsahu splnil definované ciele.

Logickým vyústením celej práce je kapitola 13, kde autor rozvádza a potvrdzuje svoje hypotézy a tvrdenia. V závere práce dizertant podopiera svoje tvrdenia aj o nasadenie štatistického hodnotenia výsledkov vlastného výskumu, resp. výskumu školiaceho pracoviska, čo je pre daný typ prác žiadúce.

Kapitola 14 zhodnocuje využitie vnorených technológií v priemyselnej praxi. Následne poukazuje na nové možnosti a orientáciu výskumu a možnosti ďalšieho smerovania v predmetnej oblasti dizertačnej práce.

8. CELKOVÉ ZHODNOTENIE DIZERTAČNEJ PRÁCE A ZÁVER

Pretože doktorand splnil všetko, čo sa od spracovania dizertačnej práce požaduje, odporúčam predloženú dizertačnú prácu k obhajobe a po úspešnom obhájení odporúčam Ing. Sergovi MARTIROSOVOVI udeliť titul PhD.

Predloženú dizertačnú prácu na základe predchádzajúceho hodnotenia

ODPORÚČAM prijať k obhajobe

a po jej obhájení navrhujem udeliť doktorandovi akademický titul "philosophiae doctor (PhD.)"

Podpisom na tomto posudku zároveň súhlasím s licenčnými podmienkami obsiahnutými v licenčnej zmluve na použitie posudku záverečnej práce, ktorá je súčasťou tohto posudku.

V Košiciach 30.5. 2021



.....
prof. Ing. Ing. Peter TREBUŇA, PhD., Ing. PAED IGIP