JIKOMTI:
Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi
e- ISSN: 3089-2996
Vol. 2 No. 1, Mei 2025

Pengaruh Manipulasi Sensorik yang Dilakukan oleh VR terhadap Keseimbangan dan Pola Aktivasi Otak

Muhamad Aria Armada Djojosugito
Universitas Sains Indonesia, Kabupaten Bekasi

E-mail:
muhammad.aria@lecturer.sains.ac.id

Abstract

A virtual space refers to an environment that does not exist in reality and is not a depiction of the physical world. It is created within a computer program, allowing for the visualization of an alternate reality. By utilizing a virtual reality (VR) headset, a person can immerse themselves in this virtual environment and interact with it freely. The user of the VR headset gains the ability to observe and engage with a world that is entirely distinct from their current physical surroundings. Over the years, extensive research has been carried out to study human balance and motor systems. Some of these studies have provided valuable insights into the intricate relationship between the body, the nervous system, and the brain. By utilizing fNIRS (functional near-infrared spectroscopy), researchers can identify specific areas of the brain that become active during testing and experimentation. Additionally, studies exploring balance have incorporated virtual reality in various ways, highlighting its potential for future research applications. Based on these findings, it can be inferred that human cognition significantly influences the balance system. Building on this knowledge, it may be possible to alter an individual's sense of balance through the use of simulated or false realities.

Keywords*: balance; cognition; fnirs; human balance; virtual reality*

Abstrak

Ruang virtual merujuk pada lingkungan yang tidak ada dalam kenyataan dan bukan merupakan gambaran dari dunia fisik. Ruang ini diciptakan dalam program komputer, memungkinkan visualisasi realitas alternatif. Dengan menggunakan headset realitas virtual (VR), seseorang dapat membenamkan diri dalam lingkungan virtual ini dan berinteraksi secara bebas. Pengguna headset VR mendapatkan kemampuan untuk mengamati dan terlibat dengan dunia yang sepenuhnya berbeda dari lingkungan fisik mereka saat ini. Selama bertahun-tahun, penelitian ekstensif telah dilakukan untuk mempelajari sistem keseimbangan dan motorik manusia. Beberapa penelitian ini telah memberikan wawasan berharga mengenai hubungan kompleks antara tubuh, sistem saraf, dan otak. Dengan menggunakan fNIRS (*functional near-infrared spectroscopy*), peneliti dapat mengidentifikasi area spesifik di otak yang menjadi aktif selama pengujian dan eksperimen. Selain itu, studi yang mengeksplorasi keseimbangan telah memasukkan realitas virtual dalam berbagai cara, menekankan potensinya untuk aplikasi penelitian di masa depan. Berdasarkan temuan ini, dapat disimpulkan bahwa kognisi manusia memengaruhi sistem keseimbangan secara signifikan. Dengan memanfaatkan pengetahuan ini, mungkin saja untuk mengubah rasa keseimbangan seseorang melalui simulasi atau realitas palsu.

Kata kunci: *fnirs*; keseimbangan; keseimbangan manusia; kognisi; *virtual reality*

1. PENDAHULUAN

Kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan merupakan aspek fundamental dalam kehidupan sehari-hari yang sering kali terabaikan, hingga akhirnya disadari ketika kemampuan tersebut mulai menurun seiring bertambahnya usia atau terganggu oleh penyakit neurologis [1]. Keseimbangan dicapai melalui interaksi kompleks antara sistem kognitif dan kontrol sensorimotor, yang secara harmonis mengumpulkan, memproses, dan merespons masukan sensorik melalui Sistem Saraf Pusat (SSP) [2].

Dari sisi kognitif, proses mental seperti persepsi dan pemahaman berperan penting dalam pengambilan keputusan dan pengendalian gerakan. Salah satu komponen utama dalam pengaturan keseimbangan adalah sistem vestibular yang terletak di telinga bagian dalam . Sistem ini mendeteksi perubahan gerakan dan orientasi kepala serta berkontribusi pada stabilisasi postur dan koordinasi tubuh. Selanjutnya, SSP yang terdiri dari otak, sumsum tulang belakang, dan sistem saraf tepi mengintegrasikan seluruh masukan sensorik tersebut dan mengoordinasikan respons motorik yang sesuai. Area otak seperti lobus parietal, frontal, oksipital, serta talamus memiliki peran penting dalam persepsi spasial, pengendalian gerakan, dan kesadaran tubuh.

Sayangnya, gangguan terhadap keseimbangan bukanlah hal yang langka, khususnya di negara maju seperti Australia yang memiliki rata-rata usia penduduk relatif tinggi. Data menunjukkan bahwa sepertiga orang dewasa berusia di atas 65 tahun mengalami jatuh setidaknya sekali dalam setahun, dan sekitar 20% di antaranya mengalami kejadian jatuh berulang. Jatuh menjadi penyebab utama cedera serius, rawat inap, bahkan kematian pada lansia, dengan penyebab utama berupa penurunan kemampuan keseimbangan [3].

Selain proses penuaan, gangguan neurologis seperti penyakit Parkinson juga berkontribusi besar terhadap penurunan keseimbangan [4, 5]. Dalam upaya pencegahan dan rehabilitasi, pendekatan berbasis teknologi seperti *Virtual Reality Therapy* (VRT) mulai mendapatkan perhatian. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan platform seperti Nintendo Wii Fit Plus® berpotensi meningkatkan rehabilitasi keseimbangan pada pasien dengan gangguan vestibular. Meskipun demikian, sebagian besar studi masih terbatas pada aspek terapi, bukan penilaian [6].

Oleh karena itu, proyek kami bertujuan untuk mengeksplorasi potensi VR dalam penilaian kemampuan keseimbangan [7, 8, 9, 10], khususnya dengan mengamati pola aktivasi otak melalui oksigenasi pada orang dewasa muda yang sehat [11]. Sayangnya, keterbatasan akibat pandemi COVID-19 memaksa kami untuk menghentikan pengujian laboratorium dan mengalihkan fokus studi ke Rencana B sebagai bentuk adaptasi metodologis.

2. METODE

Penelitian ini pada awalnya berencana untuk Menyediakan kerangka kerja untuk penelitian lebih lanjut yang berbasis keseimbangan manusia, serta mencari bukti korelasi antara penglihatan, keseimbangan, dan kognisi dalam kaitannya dengan ruang VR. Kami juga akan mempelajari kemungkinan penggunaan VR dalam penilaian sistem keseimbangan manusia. Untuk melakukannya, kami akan melakukan eksperimen pada relawan manusia menggunakan perangkat lunak dan perangkat keras yang disebutkan di bawah ini untuk melakukan eksperimen dan mengumpulkan data.

Rencana awal atau **Rencana A** bertujuan untuk mengumpulkan data dari relawan manusia menggunakan kombinasi fNIRS, pelacak gerakan, dan headset VR secara bersamaan. fNIRS akan mengumpulkan data oksigenasi darah dan bagian otak yang diaktifkan, yang akan terjadi ketika peserta melakukan tes. Pelacak gerakan akan merekam pergerakan dan orientasi tubuh peserta sebagai nilai koordinat (x, y, z) yang disinkronkan dengan detiknya. Headset VR akan merekam pergerakan dan orientasi peserta dalam ruang VR. Data yang dikumpulkan dari ketiga perangkat tersebut kemudian akan diakumulasi dan diintegrasikan, menciptakan

data yang dapat diurutkan. Data itu sendiri kemudian akan digunakan untuk membuat kesimpulan untuk proyek ini.

Namun, dikarenakan keterbatasan waktu dan pembatasan pergerakan manusia akibat COVID-19, penelitian berubah tujuan menjadi **Rencana B**, untuk meletakkan dasar pengetahuan yang dikumpulkan dari berbagai studi akademis seputar penggunaan fNIRS dan VR untuk menilai keseimbangan dan kognisi [12]. Ditemani oleh ruang VR yang mudah disesuaikan di mana berbagai tes keseimbangan dapat dilakukan [13]. Kerangka kerja ini akan memungkinkan studi lebih lanjut untuk mengembangkan kemungkinan bahwa VR akan berdampak positif pada rehabilitasi keseimbangan bagi mereka yang menderita gangguan keseimbangan.

2.1. Peralatan

1. Headset VR (*Oculus Rift*)

Oculus Rift adalah headset realitas virtual dengan teknologi tampilan canggih yang dikombinasikan dengan sistem pelacakan konstelasi presisi dan latensi rendah, yang memungkinkan sensasi kehadiran. Perangkat ini dapat disesuaikan, nyaman, dan adaptif. Setiap aspek Rift dirancang untuk mudah, menarik, dan nyaman digunakan - dan itu mencakup lingkungan VR yang dibuat oleh pembuatnya sebagai titik awal untuk setiap perjalanan realitas virtual.

2. *Artinis Brite fNIRS*

Brite adalah perangkat fNIRS (*functional near-infrared spectroscopy*, digunakan untuk pencitraan aktivitas saraf) yang dapat dipakai dan fleksibel. Alat ini juga mengukur perubahan konsentrasi hemoglobin oksi-, deoksi-, dan total dari berbagai area kortikal otak. Kontrol gain multi-daya memungkinkan pemilihan, baik secara otomatis atau manual, pengaturan optik yang optimal untuk setiap area otak dan peserta. Jarak antaroptode yang fleksibel memungkinkan pengukuran saluran pendek dan panjang, serta dilengkapi dengan sensor orientasi 9-sumbu. Peralatan ini juga dapat dikombinasikan dengan teknik lain seperti *Elektroensefalogram* (EEG) dan *Transcranial Direct Current Stimulation* (tCDS) untuk pengumpulan data.

3. MTw-Awinda

MTw Awinda adalah pelacak gerakan manusia nirkabel yang mudah diintegrasikan untuk aplikasi real-time. Protokol Awinda yang dipatenkan memastikan pengambilan data yang sangat akurat dan tersinkronisasi waktu (dalam 10 µs) di semua pelacak gerakan yang terhubung, yang sangat penting untuk sudut sendi yang akurat. Protokol radio Awinda memastikan sinkronisasi waktu sekitar 10 µs antara setiap MTw pada jaringan area tubuh nirkabel.

Integrasi dengan MTw sangat mudah dilakukan dengan Xsens MT *Software Suite*. MT *Software Suite* adalah API yang mudah digunakan dan dapat dihubungkan melalui antarmuka COM, C, dan C++ dengan dukungan untuk Windows dan Linux.

4. Program Ruang Eksperimen VR 1:1.

Program VR akan digunakan untuk menguji keseimbangan para relawan dalam menangani situasi “lingkungan palsu”. Dikembangkan oleh anggota tim proyek menggunakan Python 3.8 dan Vizard 7 sebagai IDE.

5. Program kontrol master (*Master Control Program*)

Program utama akan digunakan untuk menangani input data dan menjalankan perangkat lunak VR, menciptakan kerangka waktu yang sama untuk melakukan eksperimen dan mengumpulkan data darinya. Pengembangan dilakukan menggunakan Python 3.8.

6. Perangkat Lunak fNIRS

Perangkat lunak diperlukan untuk mengumpulkan data dari Brite fNIRS, di mana semua data yang terkumpul seharusnya diintegrasikan oleh program utama. Namun, karena perangkat lunak tersebut tidak praktis diakses dalam lingkungan rumah, integrasi ini tidak dapat dilakukan selama lockdown.

7. Perangkat lunak pelacak gerakan

Perangkat lunak diperlukan untuk mengumpulkan data dari pelacak gerak MTw Awinda, di mana data yang terkumpul seharusnya diintegrasikan oleh program utama. Masalah serupa juga dialami seperti pada integrasi fNIRS.

8. Vizard 7

Vizard 7 adalah alat pengembangan VR terkemuka yang berbasis Python, digunakan untuk mengembangkan ruang VR dan fungsi-fungsinya. Salah satu alasan utama penggunaan program ini dibandingkan alat lainnya adalah kemampuannya untuk merender ruang VR dengan lancar tanpa memerlukan banyak baris kode yang harus ditulis secara langsung.

2.2. Partisipan

Dalam rencana awal, peserta penelitian ditargetkan adalah orang dewasa muda yang sehat, termasuk mahasiswa dan relawan. Karena transisi ke Rencana B, perekrutan peserta tidak terlaksana. Namun, berdasarkan studi sebelumnya, penelitian ini diharapkan menjadi dasar bagi studi lanjutan dengan populasi lebih luas, termasuk lansia dan penderita penyakit neurologis.

2.3. Tes

Berikut adalah daftar tes yang akan dilakukan dalam eksperimen:

- **Aturan:** Tes akan dilakukan dalam urutan acak, dengan maksimal 2 tes latihan yang diperbolehkan.
- **3 Set Tes Berikut:**
  - **Kontrol:** Menggunakan peralatan pemantauan tanpa gangguan pada penglihatan peserta.
  - **Blinded:** Menggunakan peralatan pemantauan dengan penglihatan peserta sepenuhnya terhalang.
  - **VR Penglihatan Palsu:** Menggunakan peralatan VR untuk mensimulasikan umpan balik visual palsu yang mungkin menyebabkan disorientasi [14].
- **Tes Duduk ke Berdiri:** Menggunakan kursi standar, peserta harus duduk dan berdiri sebanyak 5 kali sambil menjaga punggung tetap lurus. Tes dilakukan secepat mungkin dengan tetap mempertahankan kenyamanan.
- **Tes Sikap Berdiri Ganda:** Dari posisi berdiri dengan tangan di sisi tubuh, tetap diam selama 2 menit.
- **Tes Sikap Tandem:** Berdiri tegak dengan kaki mengarah lurus ke depan, letakkan satu kaki di depan kaki lainnya dengan tumit menyentuh ujung jari kaki belakang. Tetap dalam posisi ini selama dua menit, satu menit dengan kacamata VR (sebaiknya selama dua menit). Tes ini dilakukan untuk menguji efek dari orang dewasa yang melaksanakan dua kegiatan secara bersamaan [15].
- **Tes Sikap Berdiri Satu Kaki:** Berdiri dengan satu kaki (kaki dominan), sementara kaki lainnya diangkat sedikit dalam posisi yang nyaman dari lantai. Tetap dalam posisi ini selama dua menit, lengan dapat digunakan untuk membantu keseimbangan. Usahakan untuk mempertahankan keseimbangan selama 30 detik.
- **Tes Putaran 360°:** berputar 360 derajat searah jarum jam, lalu berlawanan arah jarum jam secepat mungkin.

Dalam rencana awal, peserta penelitian ditargetkan adalah orang dewasa muda yang sehat, termasuk mahasiswa dan relawan . Karena transisi ke Rencana B, perekrutan peserta tidak terlaksana. Namun, berdasarkan studi sebelumnya, penelitian ini diharapkan menjadi dasar bagi studi lanjutan dengan populasi lebih luas, termasuk lansia dan penderita penyakit neurologis.

2.4. Dokumentasi

Dalam Rencana A, kami awalnya bermaksud mencatat data penguji atau peserta baik secara tertulis maupun elektronik. Data dari pengujian MTw Awinda direncanakan untuk direkam menggunakan perangkat lunak ‘MT Manager Software’ yang disediakan oleh Xsens.

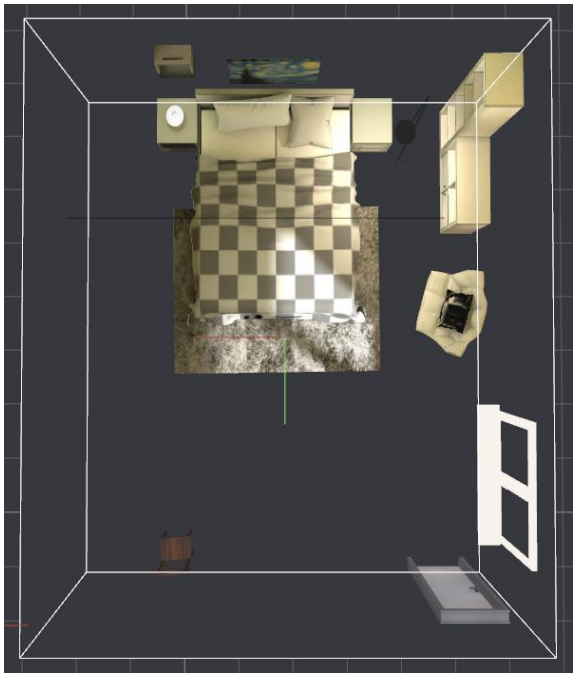
Sementara itu, data pengujian dari fNIRS dicatat menggunakan perangkat lunak *Brite Complementary Software* yang disediakan oleh pembuat fNIRS. Selanjutnya, data dari MTw Awinda dan fNIRS akan dimasukkan ke dalam program utama, lalu ditransfer ke MATLAB untuk analisis lebih lanjut.

Karena penelitian kami adalah salah satu dari banyak studi yang meneliti dampak VR terhadap keseimbangan, kami berharap dapat menyediakan dasar bagi penelitian lebih lanjut dengan cakupan populasi yang lebih luas, seperti lansia dan individu yang terdampak oleh penyakit neurologis.

2.5. Ruangan *Virtual Reality*

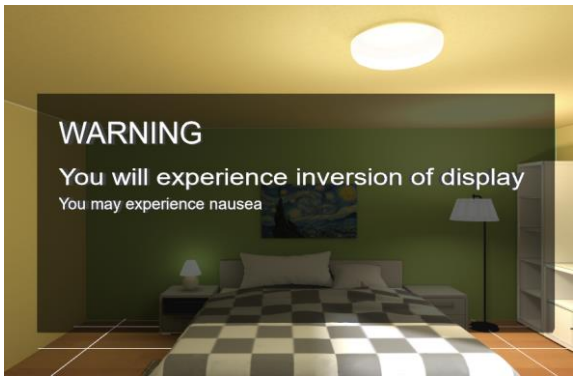
Ruang *virtual reality* (VR) pada awalnya dimaksudkan sebagai salah satu bagian dari uji coba/eksperimen yang akan dilakukan pada rencana awal / Plan A proyek kami. Ruang *virtual reality* dimaksudkan sebagai sebuah ruangan yang memiliki skala 1:1 dengan ruangan di dunia nyata, menciptakan ilusi "tindakan yang dilakukan di dunia nyata sama dengan tindakan yang dilakukan di dunia virtual." Ruang virtual pada awalnya dibayangkan sebagai kamar tidur sederhana, dengan empat dinding, tempat tidur, jendela, dan pintu. Namun demikian, dalam proses perkembangannya, beberapa fiturnya telah diubah.

Ruang realitas virtual (VR) dikembangkan dengan memanfaatkan perangkat lunak Vizard sebagai platform utama, didukung oleh subprogram *Inspector* dan *Vizconnect*. *Inspector* digunakan untuk mengatur dimensi dan tata letak ruang VR, sedangkan *Vizconnect* menghubungkan ruang tersebut dengan headset VR. Proses pengembangan dimulai dengan mengimpor model 3D kamar tidur dari *Sketchfab*, yang kemudian disesuaikan skalanya agar sesuai dengan ukuran laboratorium. Elemen tambahan seperti pintu, papan tulis, dan kursi ditambahkan sebagai penanda posisi awal, dengan skala dan posisi yang telah dimodifikasi agar sesuai dengan lingkungan virtual seperti yang terlihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Ruangan Pengujian Realitas Virtual

Langkah berikutnya mencakup penambahan latar belakang hitam transparan dan teks instruksi seperti yang terlihat di **Gambar 2**. Teks ini tidak dimasukkan sebagai objek, tetapi dikodekan secara langsung di Vizard menggunakan Python. Tantangan utama adalah menentukan posisi teks yang tepat, sehingga diperlukan iterasi pengujian berulang. Kode tambahan juga digunakan untuk memungkinkan perubahan teks secara dinamis melalui input *keyboard* serta menampilkan kisi-kisi lantai 1 meter dan penanda jarak.



Gambar 2. Pesan peringatan inversi

Ruang VR kemudian diuji menggunakan *Oculus Rift* dalam ruang fisik yang sempit, menciptakan tantangan baru terkait persepsi spasial. Pengujian ini menunjukkan bahwa ketidaksesuaian antara dunia nyata dan virtual

dapat memengaruhi sistem keseimbangan manusia — temuan yang relevan dalam konteks penelitian rehabilitasi keseimbangan.

Ruang VR dirancang sebagai sarana uji coba untuk eksperimen yang akan dilakukan di masa mendatang. Kemampuan ruang VR untuk dibalik secara visual (inversi) dapat dimanfaatkan untuk memanipulasi sistem keseimbangan manusia [16], yang berpotensi memberikan kontribusi signifikan dalam studi tentang keseimbangan di masa depan. Selain itu, ruang VR ini juga dapat langsung digunakan dalam eksperimen yang dirancang untuk Rencana A, karena instruksi serta desainnya telah disusun agar mendukung pelaksanaan baik Rencana A maupun Rencana B.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Di dalam makalah penelitian, terdapat pola-pola kelompok yang sedang dipelajari dan dibandingkan, dan penelitian ini sering membandingkan kelompok-kelompok tersebut atau memiliki kelompok kontrol untuk mendapatkan hasil yang paling akurat. Tiga kelompok utama yang kami temukan adalah:

- Dewasa muda
- Dewasa tua
- Pasien yang terkena penyakit neurologis seperti penyakit Parkinson atau stroke

Studi pada orang dewasa muda yang sehat biasanya menemukan bahwa aktivasi otak meningkat selama tes atau saat tingkat kesulitan tes meningkat. Juga bahwa bagian-bagian tertentu dari otak secara jelas diaktifkan untuk tujuan tertentu. Misalnya, korteks prefrontal ditemukan terlibat secara bilateral dalam tugas-tugas yang menuntut perhatian, ketika orang dewasa muda dan lanjut usia dibandingkan, keduanya mengalami peningkatan aktivasi otak saat berpartisipasi dalam tes keseimbangan, namun, diharapkan para lansia mengalami penurunan keseimbangan.

Pasien yang menderita penyakit neurologis memiliki kelompok kontrol untuk menguji apakah program rehabilitasi memberikan hasil yang bermanfaat. Banyak tes yang terbukti dapat memulihkan keseimbangan dan mengaktifkan kembali otak mereka.

Selama tes keseimbangan statis, kami menemukan bahwa *Supplementary Motor Area* (SMA), *Dorsolateral Prefrontal Cortex* (DLPFC), dan *Prefrontal Cortex* (PFC) meningkatkan aktivitas otak seiring dengan meningkatnya tingkat kesulitan tugas. Di berbagai makalah, kami juga melihat bahwa PFC diaktifkan ketika para peserta melakukan tugas-tugas yang menantang secara kognitif seperti tugas ganda dan berjalan sambil menghitung.

6 dari 21 makalah penelitian yang kami teliti telah menggunakan VR. Sebagian besar dari 6 makalah tersebut menggunakan semi VR. Salah satu makalah penelitian menggunakan kotak VRRT untuk melakukan penelitian mereka. Cara VRRT digunakan adalah untuk melihat apakah itu meningkatkan keseimbangan postural pengguna. Salah satu makalah penelitian menggunakan teknologi VR yang sebenarnya dan penggunaan Nintendo Wiimote. Mereka menggunakan benda-benda ini untuk menyelidiki keseimbangan dan kemampuan berjalan pasien yang baru saja mengalami stroke. Penelitian lainnya menggunakan perangkat Nintendo Wii-Fit. Mereka menggunakan perangkat Nintendo Wii-Fit untuk memainkan Video Game ski dengan menggunakan fNIRS untuk menemukan bagian aktivasi otak.

4. KESIMPULAN

Risiko paling signifikan yang dihadapi selama semester ini adalah kemungkinan diberlakukannya *lockdown* yang berkepanjangan. Sayangnya, risiko ini berada di luar kendali kami, sehingga satu-satunya strategi mitigasi yang memungkinkan adalah menyesuaikan hasil proyek sesuai dengan situasi. Sebuah garis besar dari rencana alternatif—disebut sebagai Rencana B—telah disertakan dalam proposal proyek awal. Namun, seiring berjalannya waktu, semakin jelas bahwa rencana tersebut tidak memiliki tingkat detail yang memadai dan belum cukup matang untuk menopang pelaksanaan proyek selama satu semester penuh.

Dari seluruh komponen proyek yang direncanakan, hanya pengembangan ruang VR yang tetap berjalan relatif tanpa hambatan akibat *lockdown*. Sebaliknya, program kontrol utama mengalami pelaksanaan yang paling lemah di antara seluruh hasil adaptasi. Meskipun memerlukan investasi waktu yang cukup besar, program ini hanya berhasil mencapai versi alfa dasar, jauh dari harapan yang ditetapkan oleh sponsor.

Tahapan pengujian dan analisis mengalami perubahan paling drastis, dengan ruang lingkup proyek yang bergeser dari eksperimen internal menuju pemanfaatan studi eksternal yang dilakukan oleh kelompok lain di bidang yang relevan. Perubahan ini menghasilkan sebuah makalah penelitian yang mengulas dan mensintesis tren data dari beberapa eksperimen sejenis.

Walaupun hasil-hasil yang telah disesuaikan ini tidak sepenuhnya menggantikan rencana proyek awal, hasil tersebut tetap memberikan fondasi yang bernilai untuk pengujian lebih lanjut di masa mendatang, ketika kondisi global memungkinkan. Ruang VR dan versi alfa dari program kontrol masih dapat dimanfaatkan dalam eksperimen berikutnya. Selain itu, tinjauan literatur yang disusun memberikan dasar informasi yang kuat, sekaligus menunjukkan bahwa arah eksperimen yang direncanakan memiliki potensi nilai yang signifikan.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Fuchs, “Dancing with Gravity—Why the Sense of Balance Is (the) Fundamental,” *behavioral sciences*, vol. 8, no. 7, 2018.

[2] V. de Rond, D. Orcioli-Silva, B. W. Dijkstra, J.-J. O. de Xivry, A. Pantall and A. Nieuwboer, “Compromised Brain Activity With Age During a Game-Like Dynamic Balance Task: Single- vs. Dual-Task Performance,” *frontiers in Aging Neuroscience*, vol. 13, 2021.

[3] R. L. Taylor, K. J. Wise, D. Taylor, S. Chaudhary and P. R. Thorne, “Patterns of vestibular dysfunction in chronic traumatic brain injury,” *Frontiers in Neurology*, vol. 13, 2022.

[4] V. S. Hvingelby, A. N. Glud, J. C. H. Sørensen, Y. Tai, A. S. M. Andersen, E. Johnsen, E. Moro and N. Pavese, “Interventions to improve gait in Parkinson’s disease: a systematic review of randomized controlled trials and network meta-analysis,” *Jeournal of Neurology*, vol. 269, pp. 4068-4079, 2022.

[5] E. Sarasso, A. Gardoni, A. Tettamanti, F. Agosta, M. Filippi and D. Corbetta, “Virtual reality balance training to improve balance and mobility in Parkinson’s disease: a systematic review and meta-analysis,” *Journal of Neurology*, vol. 169, pp. 1873-1388, 2022.

[6] K. H. Sienko, R. D. Seidler, W. J. Carender, A. D. Goodworth, S. L. Whitney and R. J. Peterka, “Potential Mechanisms of Sensory Augmentation Systems on Human Balance Control,” *frontiers in Neurology*, vol. 9, 2018.

[7] H.-J. Moon and S. Han, “Perspective: Present and Future of Virtual Reality for Neurological Disorders,” *brain sciences*, vol. 12, 2022.

[8] A. R. Alashram, E. Padua and G. Annino, “Virtual reality for balance and mobility rehabilitation following traumatic brain injury: A systematic review of randomized controlled trials,” *Journal of Clinical Neuroscience*, vol. 105, pp. 115-121, 2022.

[9] I. Patsaki, N. Dimitriadi, A. Despoti, D. Tzoumi, N. Leventakis, G. Roussou, A. Papathanasiou, S. Nanas and E. Karatzanos, “The effectiveness of immersive virtual reality in physical recovery of stroke patients: A systematic review,” *Frontiers in Systems Neuroscience*, vol. 16, 2022.

[10] M. Liu, K. Zhou, Y. Chen, L. Zhou, D. Bao and J. Zhou, “Is Virtual Reality Training More Effective Than Traditional Physical Training on Balance and Functional Mobility in Healthy Older Adults? A

Systematic Review and Meta-Analysis," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 16, 2022.

[11] R. Das, S. Paul, G. K. Mourya, N. Kumar and M. Hussain, "Recent Trends and Practices Toward Assessment and Rehabilitation of Neurodegenerative Disorders: Insights From Human Gait," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 16, 2022.

[12] L. van Dammen, T. T. Finseth, B. H. McCurdy, N. P. Barnett, R. A. Conrady, A. G. Leach, A. F. Deick, A. L. Van Steenis, R. Gardner, B. L. Smith, A. Kay and E. A. Shirtcliff, "Evoking stress reactivity in virtual reality: A systematic review and meta-analysis," *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 136, 2022.

[13] M. Dogan, E. Ayvat and M. Kılınç, "Telerehabilitation versus virtual reality supported task-oriented circuit therapy on upper limbs and trunk functions in patients with multiple sclerosis: A randomized controlled study," *Multiple Scelerosis and Related Disorders*, no. 71, 2023.

[14] K. Brock, S. J. Vine, J. M. Ross, M. Trevarthen and D. J. Harris, "Movement kinematic and postural control differences when performing a visuomotor skill in real and virtual environments," *Experimental Brain Research*, no. 241, pp. 1791-1810, 2023.

[15] R. Stojan, M. Mack, O. Bock and C. Voelcker-Rehage, "Inefficient frontal and parietal brain activation during dual-task walking in a virtual environment in older adults," *NeuroImage*, no. 273, 2023.

[16] G. Wang, Y. Yang, J. Wang, Z. Hao, X. Luo and J. Liu, "Dynamic changes of brain networks during standing balance control under visual conflict," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 16, 2022.