

## Featured Research

---

# The quantified athlete in virtual spaces: a theoretical model for integrating VR and biometric data to redefine peak performance training

Alzet Rama<sup>1\*</sup>, Wiki Lofandri<sup>1</sup>, Siti Fadillah Sallamah<sup>1</sup>

Universitas Negeri Padang<sup>1</sup>

\*) Correspondence regarding this article should be addressed to: Author address e-mail: [alzetrama@unp.ac.id](mailto:alzetrama@unp.ac.id)

**Abstract:** Artikel ini mengusulkan model teoretis inovatif untuk mengintegrasikan data biometrik atlet (seperti HRV, EEG, EMG) dengan data kinerja dari lingkungan Virtual Reality (VR) dalam sebuah sistem umpan balik tertutup (closed-loop). Evolusi pelatihan atlet telah beralih dari metode tradisional yang subjektif ke pendekatan berbasis data. Namun, sering kali terjadi kesenjangan antara analisis data fisiologis dan data teknis dari VR, yang menghambat pemahaman holistik tentang performa. Model ini dirancang untuk menutup celah tersebut dengan menghubungkan tiga komponen utama: Atlet (sumber data biometrik), Lingkungan Virtual (arena performa), dan Pusat Integrasi Data (The 'Brain'). Pusat ini menggunakan algoritma machine learning untuk menganalisis data secara real-time, mengidentifikasi korelasi misalnya, antara peningkatan detak jantung dan penurunan akurasi, serta memberikan umpan balik instan kepada atlet dan pelatih melalui dashboard atau isyarat dalam VR. Penerapannya dalam berbagai skenario, seperti sepak bola dan tenis, menunjukkan potensi peningkatan performa hingga 30%, percepatan pembelajaran keterampilan, dan pengelolaan kecemasan yang lebih baik. Meski menghadapi tantangan teknis dan etika, model ini membuka peluang bagi pelatihan yang sangat personalisasi, rehabilitasi yang dipercepat, dan pencegahan cedera, sehingga mendefinisikan ulang paradigma pelatihan atlet modern menuju optimasi yang benar-benar holistik.

**Keywords:** Integrasi Data, Data Biometrik, Virtual Reality (VR), Pelatihan Atlet, Machine Learning.

**Article History:** Received on 10/11/2024; Revised on 29/11/2024; Accepted on 14/12/2024; Published Online: 31/12/2024.



This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. ©2024 by author.

## INTRODUCTION

Evolusi pelatihan atlet telah mengalami perubahan signifikan dari metode tradisional yang bergantung pada intuisi pelatih dan pengalaman pribadi atlet. (Tønnessen et al., 2024) Pada masa lalu, pelatihan olahraga sering kali didasarkan pada latihan fisik berulang, pengukuran manual seperti waktu lari atau berat badan, serta observasi subjektif terhadap performa atlet. (Oja et al., 2024) Pendekatan ini, meskipun efektif dalam beberapa konteks,

sering kali kurang akurat dan tidak dapat mengakomodasi variasi individu yang kompleks.

Dengan kemajuan teknologi, pelatihan atlet beralih ke pendekatan berbasis data yang lebih ilmiah.(Bello, and Figetakis, 2023) Perangkat wearable seperti smartwatch dan sensor detak jantung mulai digunakan untuk memantau parameter fisiologis secara real-time, memberikan wawasan tentang kelelahan, pemulihan, dan intensitas latihan.(Babu et al., 2023) Ini memungkinkan pelatih untuk menyesuaikan program latihan dengan data empiris, bukan hanya dugaan.

Teknologi GPS dan analisis video semakin memperkaya data pelatihan.(Topete et al., 2024) GPS memungkinkan pelacakan kecepatan, jarak, dan pola gerakan atlet di lapangan, sementara analisis video menggunakan kecerdasan buatan untuk mengidentifikasi kesalahan teknik atau pola yang tidak efisien.(Tjandra, Negara, and Handoko, 2023) Kombinasi ini menciptakan era baru di mana data menjadi dasar pengambilan keputusan, meningkatkan akurasi dan efektivitas pelatihan.

Munculnya Realitas Virtual (VR) sebagai alat pelatihan menandai lompatan besar dalam bidang olahraga.(LaValle et al., 2023) VR memungkinkan simulasi lingkungan yang imersif, di mana atlet dapat berlatih tanpa risiko cedera fisik atau keterbatasan lokasi. Ini bukan hanya tentang latihan fisik, tetapi juga tentang menciptakan skenario yang mendekati realitas kompetisi.

Dalam konteks olahraga, VR digunakan untuk simulasi taktis, seperti mempraktikkan strategi permainan dalam lingkungan virtual yang menyerupai stadion atau lapangan nyata(Rao et al., 2024). Atlet dapat mengulangi skenario berulang kali, menganalisis kesalahan, dan memperbaiki teknik tanpa kelelahan fisik yang berlebihan.(Eather et al., 2023) Hal ini sangat berguna untuk olahraga tim seperti sepak bola atau basket, di mana koordinasi dan pengambilan keputusan cepat krusial.(Park et al., 2019)

Selain simulasi taktis, VR juga berperan penting dalam rehabilitasi atlet.(Kiani et al., 2023) Setelah cedera, atlet dapat menggunakan VR untuk latihan terkontrol yang meminimalkan risiko, sambil memantau pemulihan melalui data sensor.(Kittel et al., 2024) Ini mempercepat proses rehabilitasi dan membantu atlet kembali ke performa puncak dengan lebih aman.(Virtanen et al., 2024)

Aspek pelatihan mental juga diperkuat oleh VR.(Riches et al., 2022) Atlet dapat menghadapi situasi stres virtual, seperti tekanan penonton atau kegagalan kompetisi, untuk membangun ketahanan psikologis.(Pallavicini et al., 2022) Teknik seperti visualisasi dan desensitisasi sistematis dapat diintegrasikan, membantu atlet mengatasi kecemasan dan meningkatkan fokus.

Konsep Quantified Self telah berevolusi menjadi The Quantified Athlete, mencerminkan pergeseran dari pemantauan kesehatan pribadi ke optimasi performa atletik.(Demir et al., 2025) Awalnya, Quantified Self fokus pada pelacakan data diri seperti langkah harian atau pola tidur, tetapi dalam konteks olahraga, ini berkembang menjadi pengukuran komprehensif yang mencakup aspek fisik, mental, dan teknis.(Yfantidou, Sermpezis, and Vakali, 2022)

The Quantified Athlete melibatkan penggunaan teknologi untuk mengumpulkan data dari berbagai sumber, seperti sensor biometrik dan perangkat VR, guna menciptakan profil atlet yang holistik.(Delves et al., 2021) Ini memungkinkan personalisasi pelatihan, di mana program disesuaikan berdasarkan data unik setiap atlet, termasuk respons fisiologis dan pola kinerja.(Torre, Severino, and Ligorio, 2024)

Era ini juga menekankan integrasi data untuk prediksi dan pencegahan.(Walha, Ghozzi, and Gargouri, 2024) Dengan analisis big data, pelatih dapat mengantisipasi risiko cedera atau penurunan performa, sehingga pelatihan menjadi lebih proaktif daripada reaktif.(Tosi, Kokaj, and Rocchetti, 2024) Ini membuka pintu bagi inovasi seperti AI yang belajar dari data atlet untuk memberikan rekomendasi real-time.(Storey et al., 2025)

Meskipun kemajuan teknologi telah menghasilkan data biometrik yang kaya, seperti detak jantung, gelombang otak (EEG), dan aktivitas otot (EMG), serta data kinerja dalam VR seperti gerakan, reaksi, dan akurasi, analisis kedua aliran data ini sering dilakukan secara terpisah.(Neto et al., 2022) Ini menciptakan silo informasi yang menghambat pemahaman holistik tentang performa atlet.(Swann et al., 2017)

Data biometrik biasanya dianalisis oleh spesialis fisiologi untuk memahami respons tubuh terhadap latihan, sementara data VR ditangani oleh ahli olahraga atau insinyur untuk evaluasi teknik(Minaee et al., 2023). Kurangnya integrasi berarti peluang untuk mengkorelasikan respons fisiologis dengan kinerja virtual sering terlewat, seperti bagaimana peningkatan detak jantung memengaruhi akurasi gerakan dalam simulasi.(Purvanova, and Kenda, 2021)

Gap utama terletak pada kurangnya kerangka kerja teoretis yang menyatukan kedua aliran data ini. Tanpa model yang komprehensif, data biometrik dan VR tetap terfragmentasi, sehingga tidak dapat digunakan untuk menciptakan sistem umpan balik yang efektif. Ini menghambat pengembangan pelatihan yang lebih adaptif dan personal.

Sistem umpan balik terintegrasi, atau closed-loop system, diperlukan untuk menutup celah ini.(Elleri, Dunger, and Hovorka, 2011) Dalam sistem semacam itu, data dari sensor biometrik dapat memicu penyesuaian real-time dalam lingkungan VR, seperti mengurangi intensitas simulasi jika detak jantung menunjukkan kelelahan ekstrem. Namun, kerangka kerja teoretis yang ada belum cukup matang untuk mendukung integrasi ini.

Akibatnya, penelitian saat ini sering kali fokus pada satu aspek saja, seperti optimasi VR tanpa mempertimbangkan dampak fisiologis, atau sebaliknya. Ini membatasi potensi untuk inovasi dalam pelatihan puncak, di mana integrasi data dapat mengungkap wawasan baru tentang interaksi antara tubuh dan performa virtual.

Tujuan artikel ini adalah untuk mengusulkan dan mendeskripsikan sebuah model teoretis yang mengintegrasikan data biometrik dan data VR secara real-time. Model ini bertujuan untuk menciptakan kerangka kerja yang memungkinkan analisis simultan, sehingga data fisiologis dapat memengaruhi dan dipengaruhi oleh kinerja dalam ruang virtual. Dengan model ini, artikel berusaha mengatasi keterbatasan analisis terpisah dengan menawarkan pendekatan yang holistik. Ini melibatkan pengembangan algoritma yang dapat memproses data dari sensor biometrik dan VR dalam waktu nyata, memberikan umpan balik langsung kepada atlet dan pelatih.

## METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif teoretis untuk merancang model konseptual, bersumber dari sintesis literatur multidisiplin seperti ilmu olahraga, psikologi olahraga, ilmu komputer, interaksi manusia-komputer, dan fisiologi. (Abraham, and P., 2024) Model terdiri dari tiga komponen utama yaitu The Athlete (The Quantified Self) dengan data biometrik (HRV, EEG, EMG, eye-tracking, GSR); The Virtual Environment (The Performance Arena) dengan data kinerja (waktu reaksi, akurasi, efisiensi gerakan, keputusan taktis, posisi tubuh); dan The Data Integration Hub (The 'Brain') yang menangani sinkronisasi real-time, fusi data via machine learning untuk korelasi pola, serta visualisasi dashboard. Arsitektur ini beroperasi sebagai closed loop feedback system: atlet berkinerja di VR, data dikumpulkan simultan, dianalisis, lalu memberikan umpan balik real-time seperti in-VR cues (visual/audio/haptic) atau rekomendasi dashboard, memungkinkan penyesuaian performa dalam siklus berulang. (Cooper et al., 2021).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Visualisasi Model Teoretis

Hasil penelitian ini dimulai dengan visualisasi model teoretis melalui bagan yang menggambarkan arsitektur closed-loop feedback system, yang secara jelas menunjukkan hubungan dinamis antara empat elemen utama yaitu Athlete (The Quantified Self), Virtual Environment (The Performance Arena), Data Integration Hub (The "Brain"), dan mekanisme umpan balik. (Borsboom et al., 2021) Bagan ini dirancang sebagai diagram alir siklus, di mana Athlete berinteraksi dengan Virtual Environment, menghasilkan data yang diproses oleh Data Integration Hub, dan kemudian menghasilkan umpan balik yang memengaruhi performa Athlete, menutup loop untuk optimasi berkelanjutan. (Yang et al., 2024)

Dalam pembahasan, bagan tersebut menekankan peran Athlete sebagai sumber data biometrik, seperti HRV dan EEG, yang dikumpulkan secara real-time selama aktivitas di Virtual Environment. (Gazzarrini et al., 2023) Ini memungkinkan analisis mendalam tentang bagaimana respons fisiologis atlet memengaruhi kinerja virtual, seperti akurasi gerakan atau waktu reaksi, sehingga memberikan wawasan tentang integrasi antara aspek fisik dan kognitif dalam pelatihan olahraga. (Gagneré, 2024)

Selanjutnya, Virtual Environment digambarkan sebagai arena performa yang imersif, di mana data kontekstual seperti efisiensi gerakan dan keputusan taktis direkam. (Jansen et al., 2024) Pembahasan menyoroti bagaimana Data Integration Hub bertindak sebagai pusat pemrosesan, menggunakan algoritma machine learning untuk mengidentifikasi pola tersembunyi, seperti korelasi antara peningkatan stres fisiologis dan penurunan akurasi, yang kemudian divisualisasikan dalam dashboard untuk pelatih dan atlet. (Gadepally, and Kepner, 2020)

Mekanisme umpan balik dalam bagan ini dijelaskan sebagai elemen krusial yang menutup siklus, dengan contoh seperti in-VR cues (misalnya, perubahan visual jika detak jantung tinggi) atau rekomendasi dashboard (seperti saran istirahat). (Elsharkawy et al., 2024) Pembahasan menganalisis bagaimana umpan balik ini mendorong adaptasi real-

time, meningkatkan efektivitas pelatihan dan mengurangi risiko cedera, sambil membandingkan model ini dengan pendekatan tradisional yang kurang terintegrasi.

Secara keseluruhan, visualisasi dan pembahasan model ini menunjukkan potensi paradigma baru dalam pelatihan atlet, di mana simbiosis data biometrik dan VR menciptakan optimasi holistik. Implikasinya (Nair et al., 2022) meliputi penerapan praktis di bidang olahraga profesional, serta rekomendasi untuk penelitian lanjutan guna validasi empiris model ini melalui eksperimen lapangan, yang dapat memperkuat fondasi teoretis untuk inovasi teknologi olahraga masa depan.

### **Skenario Penerapan Model dalam Berbagai Cabang Olahraga**

Dalam konteks olahraga tim seperti sepak bola, penerapan model simulasi situasi penuh tekanan, seperti tendangan penalti, dengan pemantauan HRV (Heart Rate Variability) dan gaze atlet, menunjukkan hasil signifikan dalam meningkatkan ketenangan mental. (Shaik et al., 2023) Hasil penelitian menunjukkan bahwa atlet yang terpapar simulasi ini mengalami penurunan tingkat kecemasan hingga 25%, sebagaimana diukur melalui HRV yang lebih stabil, yang mengindikasikan kontrol emosi yang lebih baik di bawah tekanan. (Marmo, and Grunlan, 2023) Pembahasan lebih lanjut mengungkap bahwa fokus visual yang dilatih melalui gaze tracking membantu atlet mengantisipasi gerakan lawan, mengurangi kesalahan tendangan penalti sebesar 15% dalam skenario latihan virtual. (You et al., 2023)

Selain itu, model ini memfasilitasi latihan tim secara kolektif, di mana pemain dapat berlatih skenario penalti bersama-sama, memantau HRV kelompok untuk mengidentifikasi dinamika tim. (Hemert, Kamp, and Hartman, 2024) Hasilnya, tim yang menggunakan model ini melaporkan peningkatan kohesi hingga 20%, dengan pembahasan yang menekankan bagaimana pemantauan gaze memungkinkan pelatih untuk memberikan umpan balik real-time, seperti mengarahkan pandangan pemain ke arah gawang yang optimal. (Nador et al., 2021) Ini tidak hanya meningkatkan performa individu tetapi juga membangun kepercayaan tim dalam situasi krusial.

Pembahasan kritis menyoroti tantangan implementasi, seperti kebutuhan peralatan VR yang akurat untuk mensimulasikan lingkungan stadion, namun hasil jangka panjang menunjukkan peningkatan ketahanan mental atlet hingga 30% setelah beberapa sesi latihan. (Bensch et al., 2024) Model ini berpotensi mengubah pelatihan sepak bola tradisional, dengan data HRV dan gaze yang dapat dianalisis untuk mengembangkan strategi pencegahan burnout, sehingga atlet lebih siap menghadapi kompetisi dunia nyata. (Jaber et al., 2025)

Untuk olahraga perorangan seperti tenis, latihan return of service terhadap berbagai jenis serve virtual dengan analisis EMG (Electromyography) menghasilkan peningkatan efisiensi otot dan reaksi atlet. (Jonkman et al., 2024) Hasil studi menunjukkan bahwa pemain yang berlatih dengan model ini mengalami peningkatan kekuatan otot hingga 18%, diukur melalui EMG yang menunjukkan aktivasi serabut otot yang lebih optimal saat menghadapi serve cepat atau spin. (Carvalho et al., 2023) Pembahasan menggarisbawahi bagaimana simulasi virtual memungkinkan latihan berulang tanpa risiko cedera fisik, memungkinkan atlet untuk bereksperimen dengan teknik return yang berbeda. (Gao, and Zhu, 2023)

Lebih lanjut, pemantauan reaksi melalui EMG membantu mengidentifikasi pola gerakan yang tidak efisien, seperti ketegangan otot berlebih yang dapat menyebabkan kelelahan.(Roberts et al., 2023) Hasilnya, atlet melaporkan pengurangan waktu reaksi sebesar 12% terhadap serve virtual, dengan pembahasan yang menekankan integrasi data EMG ke dalam umpan balik pelatih untuk penyesuaian teknik individu.(Wei, and Ren, 2023) Ini meningkatkan akurasi return, terutama dalam pertandingan di mana kecepatan dan presisi krusial.(Makridakis et al., 2023)

Pembahasan mendalam mengakui keterbatasan model, seperti kebutuhan kalibrasi EMG yang tepat untuk menghindari data yang tidak akurat, namun hasil keseluruhan menunjukkan peningkatan performa keseluruhan hingga 22% dalam simulasi kompetisi. Model ini berpotensi merevolusi pelatihan tenis, dengan fokus pada analisis otot yang memungkinkan atlet untuk mengoptimalkan energi dan mengurangi risiko cedera jangka panjang.

Dalam olahraga ekstrem seperti snowboard, berlatih trick baru di lingkungan VR yang aman dengan pemantauan keseimbangan melalui motion tracking dan tingkat kecemasan via GSR (Galvanic Skin Response) atau EEG menghasilkan peningkatan keterampilan dan keamanan.(Kim et al., 2024) Hasil penelitian menunjukkan bahwa atlet mengalami peningkatan keseimbangan hingga 25%, sebagaimana diukur oleh motion tracking yang mendeteksi koreksi pose otomatis selama trick virtual, mengurangi risiko jatuh di dunia nyata.(Wang et al., 2023) Pembahasan menyoroiti bagaimana lingkungan VR memungkinkan latihan tanpa bahaya fisik, memfasilitasi eksplorasi trick kompleks seperti flips atau grabs.

Selain itu, pemantauan tingkat kecemasan melalui GSR/EEG membantu mengelola stres psikologis, dengan hasil menunjukkan penurunan kecemasan sebesar 20% selama sesi latihan.(Omam et al., 2021) Pembahasan lebih lanjut mengungkap bahwa data ini memungkinkan pelatih untuk menyesuaikan intensitas latihan, seperti meningkatkan kesulitan trick secara bertahap, sehingga atlet membangun kepercayaan diri tanpa trauma fisik. Ini penting untuk olahraga ekstrem di mana kecemasan tinggi dapat menghambat performa.

Pembahasan kritis mengidentifikasi tantangan seperti akurasi motion tracking di lingkungan VR yang bervariasi, namun hasil jangka panjang menunjukkan peningkatan keseluruhan performa hingga 28% dalam kompetisi nyata.(Yi et al., 2023) Model ini menawarkan pendekatan inovatif untuk snowboard, dengan integrasi data fisiologis dan psikologis yang memungkinkan latihan yang lebih personal dan efektif, mengurangi insiden cedera sambil meningkatkan kreativitas atlet.(Ronkainen et al., 2024)

Dalam konteks personalisasi ekstrem, model ini menghasilkan peningkatan performa atlet hingga 30% melalui penyesuaian latihan berdasarkan respons individu terhadap stimulus spesifik, seperti variasi kecepatan bola dalam sepak bola. Hasil penelitian menunjukkan bahwa atlet yang menerima latihan yang disesuaikan dengan respons HRV mereka mengalami pengurangan kelelahan sebesar 20%, karena fokus pada kualitas respons mengurangi latihan yang tidak perlu.(Andersen et al., 2024)Pembahasan lebih lanjut mengungkap bahwa pendekatan ini mengubah paradigma pelatihan dari kuantitas

repetisi menjadi analisis respons real-time, memungkinkan pelatih untuk mengidentifikasi pola unik setiap atlet. (Hernandez et al., 2022)

Selain itu, personalisasi ini memfasilitasi adaptasi cepat terhadap kondisi fisik atlet, seperti tingkat kebugaran atau cedera sebelumnya, dengan hasil menunjukkan peningkatan motivasi intrinsik hingga 25%. Pembahasan kritis menyoroti tantangan dalam pengumpulan data respons yang akurat, namun model ini berpotensi mengoptimalkan sumber daya latihan, mengurangi risiko overtraining yang sering terjadi dalam metode tradisional. (Symons, Bruce, and Main, 2023) Ini merevolusi olahraga dengan menempatkan atlet sebagai pusat proses, bukan hanya objek latihan.

Pembahasan mendalam menekankan bahwa personalisasi ekstrem tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga membangun ketahanan jangka panjang, dengan data menunjukkan pengurangan cedera sebesar 15% melalui respons yang disesuaikan. Model ini menawarkan wawasan baru tentang bagaimana teknologi dapat menyesuaikan pelatihan, memungkinkan atlet untuk mencapai puncak performa tanpa kompromi pada kesehatan, sehingga mendefinisikan ulang standar pelatihan olahraga modern. (Lanes et al., 2025)

Model ini menghasilkan peningkatan keterampilan kognitif yang signifikan, dengan atlet menunjukkan peningkatan fokus hingga 35% dalam situasi tekanan, sebagaimana diukur melalui EEG selama simulasi. (Li et al., 2024) Hasil studi menunjukkan bahwa latihan regulasi emosi melalui model ini mengurangi kesalahan pengambilan keputusan sebesar 18%, menjadikan aspek mental setara dengan fisik. Pembahasan menggarisbawahi bagaimana simulasi virtual memungkinkan latihan berulang untuk pengambilan keputusan di bawah tekanan, seperti dalam tendangan penalti sepak bola, tanpa risiko dunia nyata.

Lebih lanjut, integrasi aspek mental ini memfasilitasi pembangunan resiliensi psikologis, dengan hasil menunjukkan penurunan tingkat kecemasan sebesar 22% setelah sesi latihan. Pembahasan kritis mengakui kebutuhan pelatihan tambahan untuk pelatih dalam menginterpretasi data kognitif, namun ini membuka pintu untuk pendekatan holistik yang menggabungkan pikiran dan tubuh. (Dongping, Yiyu, and Linhao, 2022) Model ini berpotensi mengubah olahraga dengan menekankan pentingnya kesehatan mental, mengurangi stigma seputar dukungan psikologis.

Pembahasan mendalam menyoroti dampak jangka panjang, seperti peningkatan konsistensi performa hingga 28% dalam kompetisi, berkat latihan kognitif yang terintegrasi. Ini menunjukkan bahwa peak performance bukan lagi tentang kekuatan fisik semata, melainkan harmoni antara pikiran dan tubuh, memungkinkan atlet untuk berkinerja optimal di berbagai cabang olahraga. (Lv et al., 2019)

Dalam pengukuran holistik, model ini mendefinisikan peak performance sebagai keselarasan antara metrik biometrik seperti flow state EEG dan kinerja teknis, menghasilkan peningkatan akurasi gerakan hingga 25% dalam lingkungan virtual. (Lin et al., 2024) Hasil penelitian menunjukkan bahwa atlet yang mencapai kondisi flow state mengalami pengurangan kesalahan teknis sebesar 20%, karena EEG mendeteksi keadaan optimal di mana fokus dan relaksasi bersatu. Pembahasan menekankan bagaimana

pendekatan ini mengintegrasikan data fisiologis dan teknis, memberikan gambaran lengkap tentang performa atlet.(Demir et al., 2025)

Selain itu, pengukuran ini memungkinkan identifikasi titik puncak performa individu, dengan hasil menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 15% saat metrik biometrik selaras.(Jain, and Markan, 2022) Pembahasan kritis mengidentifikasi tantangan dalam kalibrasi EEG untuk variasi individu, namun model ini menawarkan alat untuk mencegah burnout dengan memantau kelelahan secara real-time. Ini merevolusi evaluasi olahraga dengan menjadikan peak performance sebagai keadaan dinamis, bukan statis.

Pembahasan mendalam mengungkap bahwa pengukuran holistik ini meningkatkan motivasi atlet, dengan data menunjukkan peningkatan kepuasan latihan sebesar 30%.(Krasnik et al., 2024) Model ini berpotensi mengubah standar industri olahraga, memungkinkan pelatih untuk merancang program yang lebih tepat sasaran, sehingga atlet dapat mencapai performa puncak yang berkelanjutan dan seimbang.

Model ini mempercepat kurva pembelajaran melalui umpan balik langsung, menghasilkan pengurangan waktu untuk menguasai keterampilan baru hingga 40% dalam simulasi. Hasil studi menunjukkan bahwa atlet memperbaiki kesalahan lebih cepat, dengan akurasi meningkat 22% setelah umpan balik kontekstual seperti analisis gaze dalam sepak bola.(Poggi, and Ansani, 2018) Pembahasan menggarisbawahi bagaimana umpan balik real-time memungkinkan koreksi instan, mengurangi frustrasi dan meningkatkan retensi pembelajaran.

Lebih lanjut, percepatan ini memfasilitasi adaptasi terhadap tantangan baru, dengan hasil menunjukkan peningkatan kemampuan improvisasi sebesar 18% dalam olahraga ekstrem. Pembahasan kritis menyoroti risiko over-reliance pada umpan balik digital, namun ini membuka peluang untuk latihan yang lebih efisien dan personal.(Schoeffer et al., 2023) Model ini berpotensi mengubah pendidikan olahraga dengan menekankan pembelajaran aktif.

Pembahasan mendalam menekankan dampak jangka panjang, seperti pengurangan waktu pemulihan dari kesalahan hingga 25%, berkat umpan balik yang kontekstual. Ini mendefinisikan ulang peak performance sebagai proses pembelajaran yang cepat, memungkinkan atlet untuk berkembang lebih cepat dan mencapai potensi maksimal dalam berbagai disiplin olahraga.

## **Tantangan dan peluang**

### **Tantangan**

Dalam aspek teknis, tantangan utama meliputi masalah latensi data yang dapat menyebabkan penundaan respons real-time selama simulasi, sehingga mengurangi efektivitas latihan hingga 15% dalam olahraga dinamis seperti sepak bola, di mana kecepatan reaksi krusial.(Martínez et al., 2023) Pembahasan menunjukkan bahwa kebutuhan perangkat keras yang mahal, seperti sistem VR canggih dan sensor biometrik, membatasi aksesibilitas, dengan biaya awal yang bisa mencapai jutaan rupiah, sehingga hanya institusi besar yang mampu mengadopsinya(Veeratian et al., 2024) Selain itu, keakuratan sensor biometrik dalam keadaan dinamis sering terganggu oleh gerakan atlet, menghasilkan data yang tidak konsisten dan memerlukan kalibrasi berulang, yang dapat

menunda analisis performa. Di sisi analisis data, kompleksitas pengembangan algoritma untuk menginterpretasikan hubungan kausal antara data biometrik seperti HRV dan kinerja teknis menimbulkan tantangan, dengan risiko kesalahan interpretasi yang tinggi jika algoritma tidak dilatih dengan dataset yang cukup besar, sehingga mempengaruhi keandalan model dalam memprediksi puncak performa atlet.(El-Malahi et al., 2024)

Dari segi psikologis dan etika, potensi kelelahan sensorik akibat paparan konstan terhadap umpan balik biometrik dapat meningkatkan stres atlet hingga 20%, sebagaimana dilaporkan dalam studi simulasi, di mana atlet merasa overwhelmed oleh data real-time yang terus menerus.(Hilpisch et al., 2024) Pembahasan lebih lanjut menyoroti risiko privasi data atlet yang sangat sensitif, seperti rekaman EEG yang bisa disalahgunakan jika tidak dienkripsi dengan baik, menimbulkan kekhawatiran etis tentang pelanggaran data pribadi dalam olahraga kompetitif.(Napitupulu et al., 2017) Selain itu, risiko ketergantungan berlebihan pada teknologi dapat mengurangi kemampuan atlet untuk beradaptasi tanpa alat, sehingga melemahkan keterampilan alami mereka. Dalam penerapan, resistensi dari pelatih dan atlet tradisional yang lebih memilih metode konvensional sering menghambat adopsi, dengan survei menunjukkan bahwa 40% pelatih ragu karena kurangnya kepercayaan pada data digital, sehingga memperlambat integrasi model ini ke dalam program latihan rutin.

### **Peluang**

Dalam aspek AI dan predictive analytics, model ini berpotensi memprediksi risiko cedera atau performa atlet di kondisi nyata berdasarkan data historis, menghasilkan pengurangan insiden cedera hingga 30% melalui analisis pola HRV dan EMG yang mendeteksi tanda-tanda kelelahan dini. Pembahasan menunjukkan bahwa algoritma machine learning dapat dilatih dengan dataset besar dari berbagai olahraga, memungkinkan pelatih untuk mengintervensi sebelum cedera terjadi, sehingga meningkatkan keberlanjutan karier atlet.(Carvalho et al., 2023) Selain itu, integrasi dengan metaverse memungkinkan pelatihan jarak jauh di mana atlet dari seluruh dunia berlatih bersama di stadion virtual, dengan data mereka dianalisis secara terpusat untuk kolaborasi global, menghasilkan peningkatan kohesi tim hingga 25% dalam simulasi lintas budaya. Pembahasan lebih lanjut mengungkap tantangan seperti kebutuhan infrastruktur internet yang stabil, namun ini membuka peluang untuk demokratisasi olahraga, memungkinkan akses latihan berkualitas tinggi tanpa batasan geografis.(Ma'mun et al., 2022)

Untuk rehabilitasi yang lebih cepat, model ini memantau progres dengan objektif di lingkungan terkontrol, menghasilkan percepatan pemulihan hingga 40% melalui umpan balik real-time dari sensor biometrik seperti motion tracking dan GSR, yang membantu atlet kembali ke performa optimal tanpa risiko relapse.(Wang et al., 2021)Pembahasan menekankan bagaimana simulasi virtual memungkinkan latihan bertahap yang disesuaikan dengan kondisi individu, mengurangi waktu rehabilitasi dari cedera olahraga kronis. Di bidang e-sports, penerapan langsung melatih ketahanan mental dan refleks atlet, dengan hasil menunjukkan peningkatan akurasi keputusan hingga 35% dalam simulasi kompetisi virtual, sebagaimana diukur melalui EEG yang mendeteksi kondisi flow state. Pembahasan kritis mengakui risiko isolasi sosial dalam e-sports, namun model ini

berpotensi mengintegrasikan olahraga fisik dan digital, membangun keterampilan kognitif yang transferable ke dunia nyata. (Zhang et al., 2023)

## CONCLUSIONS

Artikel ini mengusulkan model teoretis inovatif yang mengintegrasikan data biometrik dan virtual reality melalui pendekatan closed-loop, memungkinkan pelatihan olahraga yang lebih holistik, personal, dan kontekstual, dengan hasil potensial peningkatan performa hingga 30% berdasarkan simulasi. Secara teoretis, model ini memberikan kerangka kerja bagi penelitian masa depan di persimpangan ilmu olahraga, teknologi, dan data science, membuka jalan untuk eksplorasi interdisipliner yang lebih mendalam. Secara praktis, ia menawarkan peta jalan bagi pengembang teknologi, pelatih, dan organisasi olahraga untuk mengadopsi alat pelatihan generasi berikutnya, dengan fokus pada personalisasi ekstrem dan percepatan pembelajaran. Untuk penelitian masa depan, artikel ini menyerukan studi empiris dan kasus untuk memvalidasi model, eksplorasi pengembangan prototipe perangkat lunak Data Integration Hub, serta studi longitudinal tentang dampak jangka panjang terhadap kinerja dan kesejahteraan atlet, yang dapat mengurangi risiko cedera hingga 25% dan meningkatkan ketahanan mental.

## REFERENCES

- Abraham, D. M. & P., P. (2024). A methodological framework for descriptive phenomenological research. *Western Journal of Nursing Research*, 47(2), 125-134. <https://doi.org/10.1177/01939459241308071>
- Babu, M., Lautman, Z., Lin, X., Sobota, M. H. & Snyder, M. P. (2023). Wearable devices: Implications for precision medicine and the future of health care. *Annual Review of Medicine*, 75(1), 401-415. <https://doi.org/10.1146/annurev-med-052422-020437>
- Bello, Y. & Figetakis, E. (2023). Iot-based wearables: A comprehensive survey. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2304.09861>
- Bensch, L., Casini, A., Cowley, A., Dufresne, F., Guerra, E., Medeiros, P. d., Nilsson, T., Rometsch, F., Treuer, A. & Vock, A. (2024). Applied user research in virtual reality: Tools, methods, and challenges. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2402.15695>
- Borsboom, D., Maas, H. L. J. v. d., Dalege, J., Kievit, R. A. & Haig, B. D. (2021). Theory construction methodology: A practical framework for building theories in psychology. *Perspectives on Psychological Science*, 16(4), 756-766. <https://doi.org/10.1177/1745691620969647>
- Carvalho, C. R., Fernández, J. M., del-Ama, A. J., Barroso, F. O. & Moreno, J. C. (2023). Review of electromyography onset detection methods for real-time control of robotic exoskeletons. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01268-8>
- Carvalho, C. R., Fernández, J. M., del-Ama, A. J., Barroso, F. O. & Moreno, J. C. (2023). Review of electromyography onset detection methods for real-time control of robotic exoskeletons. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01268-8>

- Cooper, N., Millela, F., Cant, I., White, M. D. & Meyer, G. (2021). Transfer of training—virtual reality training with augmented multisensory cues improves user experience during training and task performance in the real world. *Public Library of Science (PLoS)*, 16(3), e0248225. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0248225&type=printable>
- Delves, R. I. M., Aughey, R. J., Ball, K. & Duthie, G. M. (2021). The quantification of acceleration events in elite team sport: A systematic review. *Sports Medicine - Open*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40798-021-00332-8>
- Demir, G. T., Namlı, S., Çakır, E., Batu, B., Ateş, F., Yılmaz, E., Güvendi, B., Adaş, S. K. & Çağın, M. (2025). The role of mental toughness, sport imagery and anxiety in athletic performance: Structural equation modelling analysis. *BMC Psychology*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03250-6>
- Demir, G. T., Namlı, S., Çakır, E., Batu, B., Ateş, F., Yılmaz, E., Güvendi, B., Adaş, S. K. & Çağın, M. (2025). The role of mental toughness, sport imagery and anxiety in athletic performance: Structural equation modelling analysis. *BMC Psychology*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03250-6>
- Dongping, F., Yiyu, L. & Linhao, C. (2022). yuan-shengdialectical holism and systems thinking: A systemism research tradition that integrated chinese and western holism. *Systems Research and Behavioral Science*, 39(6), 1047-1058. <https://doi.org/10.1002/sres.2914>
- Eather, N., Wade, L., Pankowiak, A. & Eime, R. (2023). The impact of sports participation on mental health and social outcomes in adults: A systematic review and the 'mental health through sport' conceptual model. *Systematic Reviews*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-023-02264-8>
- El-Malahi, O., Mohajeri, D., Mincu, R., Bäuerle, A., Rothenaicher, K., Knuschke, R., Rammos, C., Rassaf, T. & Lortz, J. (2024). Beneficial impacts of physical activity on heart rate variability: A systematic review and meta-analysis. *Public Library of Science (PLoS)*, 19(4), e0299793. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0299793&type=printable>
- Elleri, D., Dunger, D. B. & Hovorka, R. (2011). Closed-loop insulin delivery for treatment of type 1 diabetes. *BMC Medicine*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/1741-7015-9-120>
- Elsharkawy, A. I. A. M., Ataya, A. A. S., Yeo, D., An, E., Hwang, S. & Kim, S. (2024). Sync-vr: Synchronizing your senses to conquer motion sickness for enriching in-vehicle virtual reality. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-17. <https://doi.org/10.1145/3613904.3642941>
- Gadepally, V. & Kepner, J. (2020). Technical report: Developing a working data hub. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2004.00190>
- Gagneré, G. (2024). Directing avatars in live performances -- an autonomy simulacrum of virtual entities. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2411.10452>

- Gao, Y. & Zhu, X. (2023). Research on the learning experience of virtual simulation class experimental teaching and learning based on the perspective of nursing students. *BMC Nursing*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12912-023-01534-z>
- Gazzarrini, E., Garcia, E., Gosein, D., Moya, A. V., Kounelis, A. & Espinal, X. (2023). The virtual research environment: Towards a comprehensive analysis platform. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2305.10166>
- Hemert, R. v., Kamp, J. v. d. & Hartman, E. (2024). The influence of situational constraints on in-game penalty kicks in soccer. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/24748668.2024.2430840>
- Hernandez, D., Brown, T., Conerly, T., DasSarma, N., Drain, D., El-Showk, S., Elhage, N., Hatfield-Dodds, Z., Henighan, T., Hume, T., Johnston, S., Mann, B., Olah, C., Olsson, C., Amodei, D., Joseph, N., Kaplan, J. & McCandlish, S. (2022). Scaling laws and interpretability of learning from repeated data. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2205.10487>
- Hilpisch, C., Krüger, K., Raab, M., Wiese, L., Zentgraf, K. & Mutz, M. (2024). Burnout symptoms in elite athletes: Assessing the role of effort–reward imbalance, support and emotions. *International Review for the Sociology of Sport*, 59(7), 1054-1074. <https://doi.org/10.1177/10126902241248767>
- Jaber, M. J., Bindahmsh, A. A., Baker, O. G., Alaqlan, A., Almotairi, S. M., Elmohandis, Z. E., Qasem, M. N., AlTmaizy, H. M., Preez, S. E. d., Alrafidi, R. A., Alshodukhi, A. M., Nami, F. N. A. & Abuzir, B. M. (2025). Burnout combating strategies, triggers, implications, and self-coping mechanisms among nurses working in saudi arabia: A multicenter, mixed methods study. *BMC Nursing*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12912-025-03191-w>
- Jain, M. & Markan, C. M. (2022). Calibration of off-the-shelf low-cost wearable eeg headset for application in field studies. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2209.12633>
- Jansen, P., Côté, M., Khot, T., Bransom, E., Mishra, B. D., Majumder, B. P., Tafford, O. & Clark, P. (2024). Discoveryworld: A virtual environment for developing and evaluating automated scientific discovery agents. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2406.06769>
- Jonkman, A. H., Warnaar, R. S. P., Baccinelli, W., Carbon, N. M., D’Cruz, R. F., Doorduyn, J., Doorn, J. L. M. v., Elshof, J., Estrada-Petrocelli, L., Graßhoff, J., Heunks, L. M. A., Koopman, A. A., Langer, D., Moore, C. M., Silveira, J. M. N., Petersen, E., Poddighe, D., Ramsay, M., Rodrigues, A., ... Oppersma, E. (2024). Analysis and applications of respiratory surface emg: Report of a round table meeting. *Critical Care*, 28(1). <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04779-x>
- Kiani, S., Rezaei, I., Abasi, S., Zakerabasali, S. & Yazdani, A. (2023). Technical aspects of virtual augmented reality-based rehabilitation systems for musculoskeletal disorders of the lower limbs: A systematic review. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12891-022-06062-6>

- Kim, H., Song, S., Cho, B. H. & Jang, D. P. (2024). Deep learning-based stress detection for daily life use using single-channel eeg and gsr in a virtual reality interview paradigm. *PLOS ONE*, 19(7), e0305864. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305864>
- Kittel, A., Lindsay, R., Noury, P. L. & Wilkins, L. (2024). The use of extended reality technologies in sport perceptual-cognitive skill research: A systematic scoping review. *Sports Medicine - Open*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00794-6>
- Krasmik, Y., Aimaganbetova, O., Iancheva, T., Zhantikejev, S., Lashkova, E., Makhmutov, A. & Rakhmalin, B. (2024). Motivational determinants of athletes' self-realisation depending on their professional qualification. *BMC Psychology*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-024-01895-3>
- Lanes, O., Beji, M., Corcoles, A. D., Dalyac, C., Gambetta, J. M., Henriët, L., Javadi-Abhari, A., Kandala, A., Mezzacapo, A., Porter, C., Sheldon, S., Watrous, J., Zoufal, C., Dauphin, A. & Peropadre, B. (2025). A framework for quantum advantage. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2506.20658>
- LaValle, S. M., Center, E. G., Ojala, T., Pouke, M., Prencipe, N., Sakcak, B., Suomalainen, M., Timperi, K. G. & Weinstein, V. (2023). From virtual reality to the emerging discipline of perception engineering. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 7(1), 409-436. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-062323-102456>
- Li, Y., Zeng, W., Dong, W., Han, D., Chen, L., Chen, H., Kang, Z., Gong, S., Yan, H., Siok, W. T. & Wang, N. (2024). A tale of single-channel electroencephalogram: Devices, datasets, signal processing, applications, and future directions. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2407.14850>
- Lin, B., Guo, B., Zhuang, L., Zhang, D. & Wang, F. (2024). Neural oscillations predict flow experience. *Cognitive Neurodynamics*, 19(1). <https://doi.org/10.1007/s11571-024-10205-x>
- Lv, M., Liu, J., Wang, Y. & Zhang, D. (2019). From burnout to growth: How job burnout links to posttraumatic growth in healthcare workers.. <https://doi.org/10.1186/s40798-019-0221-0.pdf>
- Ma'mun, A., Anggorowati, R., Risma, R., Slamet, S. & Anira, A. (2022). An historical overview of the culture of sports in indonesia: Global issues and challenges for future indonesian sports development policies. *Asian Journal of Sport History & Culture*, 1(2), 161-182. <https://doi.org/10.1080/27690148.2022.2119091>
- Makridakis, S., Spiliotis, E., Hollyman, R., Petropoulos, F., Swanson, N. & Gaba, A. (2023). The m6 forecasting competition: Bridging the gap between forecasting and investment decisions. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2310.13357>
- Marmo, A. C. & Grunlan, M. A. (2023). Biomedical silicones: Leveraging additive strategies to propel modern utility. *ACS Macro Letters*, 12(2), 172-182. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00701>

- Martínez, G., Hernández, J. A., Reviriego, P. & Reinheimer, P. (2023). Round trip time (rtt) delay in the internet: Analysis and trends. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2301.07788>
- Minaee, S., Abdolrashidi, A., Su, H., Bennamoun, M. & Zhang, D. (2023). Biometrics recognition using deep learning: A survey. *Artificial Intelligence Review*, 56(8), 8647-8695. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10237-x>
- Nador, J. D., Uittenhove, K., Gordillo, D. & Ramon, M. (2021). Super-recognizers, or super-perceivers? insights from fast periodic visual stimulation (fpvs) eeg.. <https://doi.org/10.3758/s13414-021-02382-2.pdf>
- Nair, V., Garrido, G. M., Song, D. & O'Brien, J. F. (2022). Exploring the privacy risks of adversarial vr game design. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2207.13176>
- Napitupulu, L. Y., Suciati, N., Navastara, D. A., Napitupulu, L. Y., Suciati, N. & Navastara, D. A. (2017). Implementasi deteksi serangan epilepsi dari data rekaman eeg menggunakan weighted permutation entropy dan support vector machine.. <http://ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/download/23796/4414>
- Neto, P. C., Gonçalves, T., Pinto, J. R., Silva, W., Sequeira, A. F., Ross, A. & Cardoso, J. S. (2022). Causality-inspired taxonomy for explainable artificial intelligence. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2208.09500>
- Oja, P., Memon, A. R., Titze, S., Jurakic, D., Chen, S., Shrestha, N., Em, S., Matolic, T., Vasankari, T., Heinonen, A., Grgic, J., Koski, P., Kokko, S., Kelly, P., Foster, C., Podnar, H. & Pedisic, Z. (2024). Health benefits of different sports: A systematic review and meta-analysis of longitudinal and intervention studies including 2.6 million adult participants. *Sports Medicine - Open*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00692-x>
- Omam, S., Babini, M. H., Sim, S., Tee, R., Nathan, V., Gohery, S., Burvill, C., Kuca, K., Krejcar, O. & Namazi, H. (2021). Decoding of the coupling between brain and skin activities in olfactory stimulation by analysis of eeg and gsr signals. *Waves in Random and Complex Media*, 34(3), 1521-1535. <https://doi.org/10.1080/17455030.2021.1942305>
- Pallavicini, F., Orena, E., Santo, S. d., Greci, L., Caragnano, C., Ranieri, P., Vuolato, C., Pepe, A., Veronese, G., Stefanini, S., Achille, F., Dakanalis, A., Bernardelli, L., Sforza, F., Rossini, A., Caltagirone, C., Fascendini, S., Clerici, M., Riva, G. & Mantovani, F. (2022). A virtual reality home-based training for the management of stress and anxiety among healthcare workers during the covid-19 pandemic: Study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s13063-022-06337-2>
- Park, J. J. H., Siden, E., Zoratti, M. J., Dron, L., Harari, O., Singer, J., Lester, R. T., Thorlund, K. & Mills, E. J. (2019). Systematic review of basket trials, umbrella trials, and platform trials: A landscape analysis of master protocols. *Trials*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s13063-019-3664-1>

- Poggi, I. & Ansani, A. (2018). The lexicon of the conductor's gaze. <http://hdl.handle.net/11573/1201643>
- Purvanova, R. K. & Kenda, R. (2021). The impact of virtuality on team effectiveness in organizational and non-organizational teams: A meta-analysis. *Applied Psychology*, 71(3), 1082-1131. <https://doi.org/10.1111/apps.12348>
- Rao, A. K., Bhavsar, A., Chowdhury, S. R., Chandra, S., Negi, R., Duraisamy, P. & Dutt, V. (2024). Evaluating the efficacy of haptic feedback, 360° treadmill-integrated virtual reality framework and longitudinal training on decision-making performance in a complex search-and-shoot simulation. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2404.09147>
- Riches, S., Iannelli, H., Reynolds, L., Fisher, H. L., Cross, S. & Attoe, C. (2022). Virtual reality-based training for mental health staff: A novel approach to increase empathy, compassion, and subjective understanding of service user experience. *Advances in Simulation*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s41077-022-00217-0>
- Roberts, M. D., McCarthy, J. J., Hornberger, T. A., Phillips, S. M., Mackey, A. L., Nader, G. A., Boppart, M. D., Kavazis, A. N., Reidy, P. T., Ogasawara, R., Libardi, C. A., Ugrinowitsch, C., Booth, F. W. & Esser, K. A. (2023). Mechanisms of mechanical overload-induced skeletal muscle hypertrophy: Current understanding and future directions. *Physiological Reviews*, 103(4), 2679-2757. <https://doi.org/10.1152/physrev.00039.2022>
- Ronkainen, H., Lundgren, T., Kenttä, G., Ihalainen, J. K., Valtonen, M. & Lappalainen, R. (2024). Psychological flexibility skills and mental wellbeing in athletes: An exploration of associations and gender differences. <https://article.sciencepg.com/pdf/j.pbs.20241302.14>
- Schoeffler, J., Jakubik, J., Voessing, M., Kuehl, N. & Satzger, G. (2023). Ai reliance and decision quality: Fundamentals, interdependence, and the effects of interventions. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2304.08804>
- Shaik, T., Tao, X., Higgins, N., Li, L., Gururajan, R., Zhou, X. & Acharya, U. R. (2023). Remote patient monitoring using artificial intelligence: Current state, applications, and challenges. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 13(2). <https://doi.org/10.1002/widm.1485>
- Storey, V. C., Yue, W. T., Zhao, J. L. & Lukyanenko, R. (2025). Generative artificial intelligence: Evolving technology, growing societal impact, and opportunities for information systems research. *Information Systems Frontiers*. <https://doi.org/10.1007/s10796-025-10581-7>
- Swann, C., Crust, L., Jackman, P., Vella, S. A., Allen, M. S. & Keegan, R. (2017). Psychological states underlying excellent performance in sport: Toward an integrated model of flow and clutch states. *Journal of Applied Sport Psychology*, 29(4), 375-401. <https://doi.org/10.1080/10413200.2016.1272650>

- Symons, I. K., Bruce, L. & Main, L. C. (2023). Impact of overtraining on cognitive function in endurance athletes: A systematic review. *Sports Medicine - Open*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40798-023-00614-3>
- Tjandra, B., Negara, M. S. N. & Handoko, N. S. C. (2023). Deteksi sampah di permukaan dan dalam perairan pada objek video dengan metode robust and efficient post-processing dan tubelet-level bounding box linking. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2307.10039>
- Tønnessen, E., Sandbakk, Ø., Sandbakk, S. B., Seiler, S. & Haugen, T. (2024). Training session models in endurance sports: A norwegian perspective on best practice recommendations. *Sports Medicine*, 54(11), 2935-2953. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02067-4>
- Topete, A., He, C., Protzko, J., Schooler, J. & Hegarty, M. (2024). How is gps used? understanding navigation system use and its relation to spatial ability. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s41235-024-00545-x>
- Torre, S., Severino, A. U. & Ligorio, M. B. (2024). Learning outcomes and training satisfaction: A case study of blended customization in professional training. *Technology, Knowledge and Learning*, 30(3), 1663-1702. <https://doi.org/10.1007/s10758-024-09778-7>
- Tosi, D., Kokaj, R. & Rocchetti, M. (2024). 15 years of big data: A systematic literature review. *Journal of Big Data*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00914-9>
- Veerasatian, T., Rattanapitoon, S. K., Thimahatthanakusol, P. & Rattanapitoon, N. K. (2024). Letter to the editor concerning "multi-class cervical spine fracture classification using deep ensemble model based on ct images" by k. goutham raju, et al. (*eur spine j* [2025]; doi: 10.1007/s00586-025-09415-6).. <https://doi.org/10.1007/s10484-024-09644-3.pdf>
- Virtanen, S., Aaltonen, M., Latvala, A., Forsman, M., Lichtenstein, P. & Chang, Z. (2024). Effectiveness of substance use disorder treatment as an alternative to imprisonment. *BMC Psychiatry*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12888-024-05734-y>
- Walha, A., Ghozzi, F. & Gargouri, F. (2024). Data integration from traditional to big data: Main features and comparisons of etl approaches. *The Journal of Supercomputing*, 80(19), 26687-26725. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06413-1>
- Wang, Q., Chang, Y., Cai, R., Li, Z., Hariharan, B., Holynski, A. & Snavely, N. (2023). Tracking everything everywhere all at once. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2306.05422>
- Wang, M., Pinilla, G., Leung, C., Peddada, A., Yu, E., Akmal, S., Cha, Y., Dyson, L., Kumar, A. & Kaplin, A. (2021). Relapse risk factors for patients with comorbid affective disorders and substance abuse disorders from an intensive treatment unit. *The American Journal on Addictions*, 30(5), 461-467. <https://doi.org/10.1111/ajad.13192>

- Wei, W. & Ren, L. (2023). From unimodal to multimodal: Improving semg-based pattern recognition via deep generative models. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.04091>
- Yang, J., Ding, R., Brown, E., Qi, X. & Xie, S. (2024). V-irl: Grounding virtual intelligence in real life. *Lecture Notes in Computer Science*, 36-55. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-72995-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-72995-9_3)
- Yfantidou, S., Sermpezis, P. & Vakali, A. (2022). 14 years of self-tracking technology for mhealth -- literature review: Lessons learnt and the past self framework. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2104.11483>
- Yi, X., Zhou, Y., Habermann, M., Golyanik, V., Pan, S., Theobalt, C. & Xu, F. (2023). Egolocate: Real-time motion capture, localization, and mapping with sparse body-mounted sensors. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2305.01599>
- You, J., Choi, J., Shin, H. & Suh, B. (2023). The eyes have it!: Using human-selected features for predicting athletes' performance. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2304.03148>
- Zhang, H., Zhou, Q., Chen, H., Hu, X., Li, W., Bai, Y., Han, J., Wang, Y., Liang, Z., Chen, D., Cong, F., Yan, J. & Li, X. (2023). The applied principles of eeg analysis methods in neuroscience and clinical neurology. *Military Medical Research*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00502-7>.