Pengukuran Keseimbangan Statis Dan Dinamis Berbasis IMU Untuk Mendeteksi Risiko Jatuh

Muhammad Rizki Adzani
Teknik Biomedis
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
mrizkiadzani@student.telkomuniversity.ac.id

Tito Waluyo Purboyo
Teknik Biomedis
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
titowaluyo@telkomuniversity.ac.id

Liana Nafisa Saftari
Teknik Biomedis
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
liananafisasaftari@telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — Keseimbangan tubuh merupakan kemampuan untuk mempertahankan posisi tubuh tetap stabil melalui integrasi sistem visual, vestibular, dan proprioseptif. Evaluasi keseimbangan umumnya dilakukan menggunakan metode *Sensory Organization Test* (SOT), namun implementasinya masih memerlukan peralatan khusus yang kurang portabel. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengukuran keseimbangan tubuh berbasis *Inertial Measurement Unit* (IMU) menggunakan pendekatan *Modified Sensory Organization Test* (SOT) untuk menganalisis karakteristik goyangan tubuh pada berbagai kondisi sensorik. Sistem dikembangkan menggunakan sensor MPU6050 yang dipasang pada tubuh dan diproses menggunakan algoritma Madgwick Filter untuk memperoleh sudut pitch dan roll. Pengujian dilakukan pada empat kondisi Modified SOT yang merepresentasikan variasi masukan visual dan proprioseptif. Data dianalisis menggunakan parameter *Root Mean Square* (RMS), *Peak-to-Peak* (P2P), *Equilibrium Score* (ES), rasio sensorik, serta uji *test-retest reliability* menggunakan *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan kondisi sensorik memengaruhi stabilitas postural yang ditandai oleh peningkatan RMS dan P2P serta penurunan ES pada kondisi yang lebih menantang. Selain itu, sistem menunjukkan tingkat reliabilitas yang baik berdasarkan hasil pengujian ICC. Dengan demikian, sistem berbasis IMU yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai alternatif alat evaluasi keseimbangan tubuh yang portabel dan objektif.**

Kata kunci* — *IMU, Madgwick Filter, Keseimbangan Tubuh, RMS, Peak-to-Peak, Sensory Organization Test, Equilibrium Score

I. PENDAHULUAN

Keseimbangan tubuh merupakan kemampuan untuk mempertahankan stabilitas postural melalui koordinasi sistem visual, vestibular, dan proprioseptif yang bekerja secara terintegrasi. Kemampuan ini berperan penting dalam berbagai aktivitas sehari-hari karena memungkinkan tubuh mempertahankan posisi yang stabil baik dalam kondisi statis maupun dinamis. Gangguan pada salah satu sistem sensorik dapat menyebabkan penurunan kemampuan keseimbangan yang ditandai dengan meningkatnya *postural sway* serta berkurangnya kemampuan tubuh dalam mempertahankan posisi pusat massa (*Center of Mass*/*COM*) di dalam bidang tumpu (*Base of Support*/*BOS*) [1]. Oleh karena itu, evaluasi keseimbangan tubuh menjadi aspek penting dalam bidang kesehatan, rehabilitasi, olahraga, dan biomekanika.

Seiring perkembangan teknologi, sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) banyak digunakan sebagai alternatif sistem pengukuran keseimbangan karena memiliki ukuran yang ringkas, biaya yang relatif rendah, serta mampu melakukan pengukuran secara real-time [2]. Sensor IMU yang terdiri dari accelerometer dan gyroscope telah dimanfaatkan untuk mengukur orientasi tubuh, menganalisis karakteristik *postural sway*, serta mengevaluasi performa keseimbangan pada berbagai populasi. Penggunaan IMU juga menawarkan fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan sistem laboratorium konvensional sehingga berpotensi diterapkan pada lingkungan klinis maupun non-klinis.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pengukuran karakteristik keseimbangan secara umum tanpa mengevaluasi kontribusi masing-masing sistem sensorik yang berperan dalam mempertahankan stabilitas postural. Selain itu, penelitian yang mengintegrasikan sensor IMU dengan pendekatan *Sensory Organization Test* (SOT) untuk menganalisis perubahan keseimbangan akibat manipulasi informasi visual dan proprioseptif masih relatif terbatas. Padahal, pendekatan tersebut dapat memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai mekanisme kontrol keseimbangan tubuh dan peran masing-masing sistem sensorik dalam menjaga stabilitas postural

II. KAJIAN TEORI

A. Keseimbangan Tubuh

Keseimbangan tubuh merupakan kemampuan untuk mempertahankan posisi tubuh tetap stabil baik dalam kondisi statis maupun dinamis melalui koordinasi sistem sensorik dan motorik. Secara biomekanika, keseimbangan terjadi ketika proyeksi *Center of Mass* (COM) berada di dalam *Base of Support* (BOS) [1]. Kemampuan mempertahankan keseimbangan dipengaruhi oleh integrasi informasi yang berasal dari sistem visual, vestibular, dan proprioseptif. Sistem visual memberikan informasi mengenai orientasi tubuh terhadap lingkungan, sistem vestibular mendeteksi perubahan posisi dan pergerakan kepala, sedangkan sistem proprioseptif memberikan informasi mengenai posisi serta pergerakan segmen tubuh.

B. *Sensory Organization Test* (SOT)

Sensory Organization Test (SOT) merupakan metode evaluasi keseimbangan yang digunakan untuk menilai kontribusi sistem visual, vestibular, dan proprioseptif dalam mempertahankan stabilitas postural. Prinsip dasar SOT adalah memanipulasi kondisi sensorik sehingga tubuh dipaksa untuk mengandalkan sistem sensorik tertentu dalam menjaga keseimbangan [3]. Pada penelitian ini digunakan *Modified SOT* yang terdiri dari empat kondisi pengujian, yaitu mata terbuka dengan permukaan stabil, mata tertutup dengan permukaan stabil, mata terbuka dengan permukaan tidak stabil, serta mata tertutup dengan permukaan tidak stabil. Perbedaan kondisi tersebut digunakan untuk mengevaluasi perubahan kemampuan keseimbangan berdasarkan dominasi sistem sensorik yang digunakan.

C. *Inertial Measurement Unit* (IMU)

Inertial Measurement Unit (IMU) merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur percepatan dan kecepatan sudut suatu objek. Sensor IMU umumnya terdiri dari accelerometer dan gyroscope yang mampu mendeteksi perubahan orientasi dan gerakan tubuh. Pada penelitian ini digunakan sensor MPU6050 untuk memperoleh data gerakan tubuh selama pengujian keseimbangan.

D. Parameter Analisis Keseimbangan

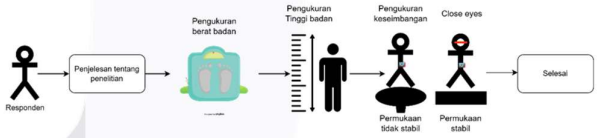
Root Mean Square (RMS) merupakan parameter yang digunakan untuk menggambarkan besar rata-rata goyangan tubuh selama pengujian. Nilai RMS dihitung dari akar kuadrat rata-rata kuadrat sinyal sudut yang diperoleh dari data pitch dan roll. Semakin besar nilai RMS menunjukkan semakin besar amplitudo goyangan tubuh sehingga mengindikasikan penurunan stabilitas postura.

Equilibrium Score (ES) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan individu dalam mempertahankan stabilitas postural selama pengujian. Nilai ES dinyatakan dalam persentase dengan rentang 0–100, dimana nilai yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan keseimbangan yang lebih baik dan nilai yang lebih rendah menunjukkan peningkatan ketidakstabilan postural.

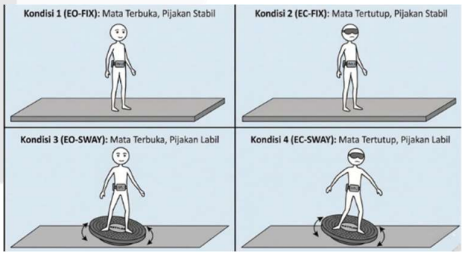
Intraclass Correlation Coefficient (ICC) merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi reliabilitas hasil pengukuran melalui pendekatan *test-retest*. Nilai ICC menunjukkan tingkat konsistensi hasil pengukuran yang diperoleh pada pengujian berulang. Semakin tinggi nilai ICC menunjukkan tingkat reliabilitas yang semakin baik sehingga sistem pengukuran dapat dianggap konsisten dan dapat digunakan secara berulang

III. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi keseimbangan tubuh menggunakan sistem berbasis *Inertial Measurement Unit* (IMU). Sistem pengukuran dikembangkan menggunakan sensor MPU6050 yang terhubung dengan ESP32 dan dipasang pada tubuh partisipan untuk merekam data percepatan serta kecepatan sudut dengan frekuensi sampling 100 Hz. Data yang diperoleh diproses menggunakan algoritma Madgwick Filter untuk menghasilkan sudut pitch dan roll. Pengujian dilakukan pada 20 partisipan sehat menggunakan metode *Modified Sensory Organization Test* (SOT) yang terdiri dari empat kondisi, yaitu mata terbuka pada permukaan stabil, mata tertutup pada permukaan stabil, mata terbuka pada permukaan tidak stabil, serta mata tertutup pada permukaan tidak stabil. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis menggunakan parameter *Root Mean Square* (RMS), *Peak-to-Peak* (P2P), dan *Equilibrium Score* (ES), serta dihitung rasio visual, vestibular, dan proprioseptif untuk mengevaluasi kontribusi masing-masing sistem sensorik terhadap keseimbangan tubuh. Analisis statistik dilakukan menggunakan Python dengan uji normalitas Shapiro-Wilk dan uji homogenitas Levene sebagai uji asumsi. Data yang memenuhi asumsi parametrik dianalisis menggunakan *One-Way Repeated Measures ANOVA*, sedangkan data yang tidak memenuhi asumsi dianalisis menggunakan *Friedman Test*. Selain itu, reliabilitas sistem dievaluasi melalui metode *test-retest reliability* menggunakan *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC)



(a)



(b)

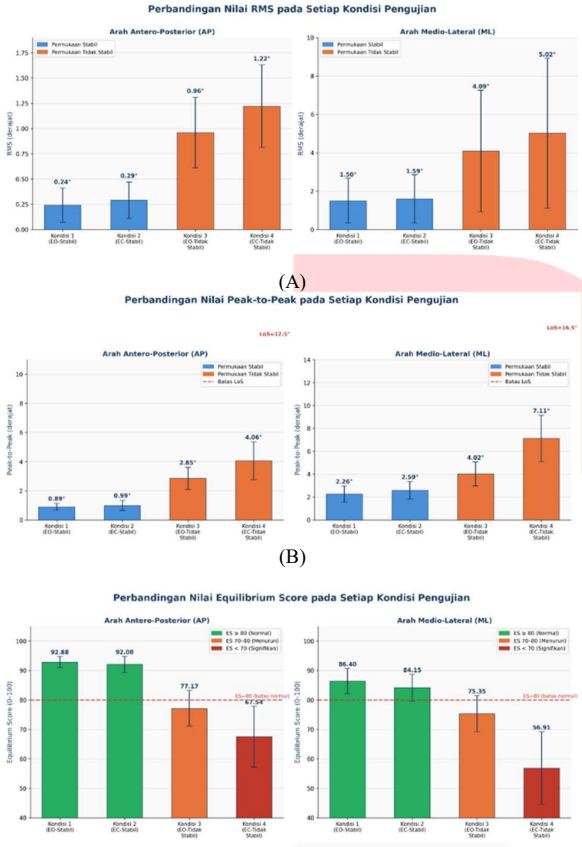
GAMBAR 1
Metode pengambilan data (a), dan kondisi pengujian menggunakan metode *Sensory Organization Test* (SOT)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Analisis Parameter Keseimbangan Tubuh

Gambar 1 pada kondisi 1 (mata terbuka, permukaan stabil), rata-rata RMS arah AP sebesar 0,24° dan ML sebesar 1,50°, menunjukkan performa keseimbangan tubuh yang sangat baik. Nilai ini konsisten dengan literatur dewasa muda

sehat. Pada kondisi 2 (mata tertutup, permukaan stabil), terjadi peningkatan kecil pada nilai RMS (AP: 0,29°; ML: 1,59°) yang mengindikasikan bahwa penghilangan input visual memberikan dampak kecil pada goyangan tubuh, sementara sistem proprioseptif dan vestibular mampu mengompensasi secara efektif.



(A)

(B)

(C)

GAMBAR 3
Visualisasi Perbandingan Nilai RMS pada Setiap Kondisi Pengujian (A), Perbandingan Nilai *Peak-to-Peak pada* Setiap Kondisi Pengujian (B), dan Perbandingan Nilai *Equilibrium Score* pada Setiap Kondisi Pengujian (C).

B. Tabel

TABEL 1
Hasil Analisis Parameter RMS, Peak-to-Peak, dan Equilibrium Score pada Arah AP dan ML.

(A)

Parameter	**Arah**	**Kondisi 1 (*Mean* ± *SD*)**	**Kondisi 2 (*Mean* ± *SD*)**	**Kondisi 3 (*Mean* ± *SD*)**	**Kondisi 4 (*Mean* ± *SD*)**
RMS (°)	AP	0,24 ± 0,17	0,29 ± 0,18	0,96 ± 0,35	1,22 ± 0,41
RMS (°)	ML	1,50 ± 1,17	1,59 ± 1,26	4,09 ± 3,17	5,02 ± 3,91
Peak-to-Peak (°)	AP	0,89 ± 0,24	0,99 ± 0,35	2,85 ± 0,76	4,06 ± 1,29
Peak-to-Peak (°)	ML	2,26 ± 0,71	2,59 ± 0,77	4,02 ± 1,04	7,11 ± 2,03
Equilibrium Score	AP	92,88 ± 1,92	92,08 ± 2,77	77,17 ± 6,06	67,54 ± 10,30
Equilibrium Score	ML	86,40 ± 4,31	84,15 ± 4,56	75,35 ± 6,16	56,91 ± 12,33

TABEL 2
Rasio Kontribusi Sistem Sensorik Dalam Menjaga Keseimbangan Tubuh

Sistem Sensorik	**Antero-Posterior (AP)**	**Medio-Lateral (ML)**	**Interpretasi**
Proprioseptif	0,99	0,97	Sangat baik; sistem proprioseptif mendominasi pada kondisi permukaan stabil tanpa visual.
Visual	0,83	0,87	Baik; visual berkontribusi signifikan terutama saat pijakan tidak stabil.
Vestibular	0,72	0,65	Cukup; vestibular menjadi andalan utama hanya ketika visual dan proprioseptif terganggu.

V. KESIMPULAN

Sensor IMU tidak dapat menggantikan force plate sebagai standar emas (golden standard) pengukuran keseimbangan tubuh. Force plate mengukur Center of Pressure (CoP) dan gaya reaksi tanah secara langsung, yang merupakan parameter biomekanik yang tidak dapat direproduksi secara setara oleh IMU. Sensor IMU hanya memberikan estimasi tidak langsung melalui sudut goyangan tubuh yang berkorelasi dengan pergerakan CoM. Korelasi yang bermakna tersebut terwujud melalui dua parameter utama: (a) nilai peak-to-peak yang mencerminkan ekskursi CoM, dan (b) Equilibrium Score 53 54 yang mencerminkan efektivitas menjaga CoM dalam LoS. Nilai ICC yang sangat baik (> 0,90 untuk RMS) dan kemampuan membedakan kondisi sensorik secara statistik signifikan menunjukkan bahwa IMU merupakan alat skrining alternatif yang valid, portabel, dan ekonomis untuk digunakan di fasilitas kesehatan primer

sebagai alat deteksi dini risiko jatuh, meskipun bukan pengganti force plate dengan presisi tinggi di laboratorium. Studi validasi simultan dengan force plate di masa depan sangat disarankan untuk mengkuantifikasi hubungan korelasi secara langsung.

REFERENSI

[1] E. Zemková, "Physiological Mechanisms of Exercise and Its Effects on Postural Sway: Does Sport Make a Difference?," Feb. 14, 2022, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fphys.2022.792875.

[2] J. Shanbhag *et al.*, "Methods for integrating postural control into biomechanical human simulations: a systematic review," Dec. 01, 2023, *BioMed Central Ltd*. doi: 10.1186/s12984-023-01235-3.

[3] S. Sinno *et al.*, "Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children," *J. Am. Acad. Audiol.*, vol. 32, no. 2, pp. 122–136, Feb. 2021, doi: 10.1055/s-0040-1718706.