

Sistem Antropometri Lingkar Kepala Manusia berbasis *Machine Vision*

Susetyo Bagas Bhaskoro¹, Sandy Bhawana Mulia², Afiq Hasydhiq³

¹ Program Studi Sistem Siber-Fisik, Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

² Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Politeknik Manufaktur Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

³ Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Politeknik Manufaktur Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

[Diserahkan: 5 Maret 2025, Direvisi: 23 Mei 2025, Diterima: 14 Juli 2025]

Penulis Korespondensi: Susetyo Bagas Bhaskoro (email: bagas@polman-bandung.ac.id)

INTISARI — Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem antropometri otomatis berbasis *machine vision* yang terintegrasi dalam *medical cyber-physical system* (MCPS) untuk mengukur lingkar kepala manusia. Lingkar kepala merupakan salah satu parameter penting dalam pemantauan pertumbuhan, terutama untuk mendeteksi gangguan seperti mikrosefalia (*microcephaly*) dan makrosefali (*macrocephaly*) yang dapat berdampak pada perkembangan kognitif dan kesehatan individu secara menyeluruh. Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan penerapan sistem antropometri yang memungkinkan pengukuran dilakukan secara otomatis, akurat, tanpa kontak fisik, serta dapat diakses secara *real-time* oleh tenaga kesehatan. Sistem ini dirancang dengan pendekatan berbasis *machine vision*, menggunakan teknologi deteksi objek dan metode penghitungan keliling model elips dalam menentukan lingkar kepala secara noninvasif. Sistem ini memanfaatkan kamera beresolusi 1.920×1.080 piksel (1080p) dengan kecepatan 30 fps dan bidang pandang sebesar 60° yang dipasang pada mekanisme pergerakan tiga sumbu menggunakan motor *stepper* guna menangkap citra kepala tampak depan dan tampak samping secara otomatis. Proses pengukuran diawali dengan deteksi objek kepala dan penyesuaian *bounding box* untuk memperoleh parameter lebar kepala. Penghitungan dilakukan dengan metode jarak Euclidean, lalu digunakan pendekatan geometri model elips untuk estimasi lingkar kepala. Hasil pengujian menunjukkan tingkat kesalahan terendah sebesar 2,29% pada jarak 50 cm dengan pencahayaan 300 lux. Evaluasi kinerja menggunakan *confusion matrix* menghasilkan akurasi 92,8%, presisi 100%, *recall* 97,5%, dan *F-measure* 98,7%. Sistem ini memberikan solusi efektif bagi tenaga medis dalam melakukan skrining pertumbuhan secara cepat, akurat, aman, serta mendukung layanan kesehatan jarak jauh, khususnya di wilayah dengan akses terbatas terhadap fasilitas medis.

KATA KUNCI — Sistem Antropometri, Lingkar Kepala, Alat Ukur Nonkontak, *Machine Vision*, Keliling Elips, *Medical Cyber-Physical System*.

I. PENDAHULUAN

Antropometri merupakan ilmu yang berkaitan dengan pengukuran dimensi dan proporsi tubuh manusia. Ilmu ini digunakan untuk memahami variasi ukuran tubuh dalam berbagai populasi dan mendeteksi perubahan yang mungkin disebabkan oleh faktor lingkungan, pola hidup, atau kondisi medis tertentu [1]. Prosedur pengukuran dalam antropometri terbagi menjadi dua pendekatan utama: tradisional dan modern. Metode tradisional umumnya mengandalkan alat sederhana, seperti pita ukur, kaliper, dan instrumen manual lainnya. Kelebihan pendekatan ini terletak pada penggunaannya yang mudah dan biaya operasional yang relatif rendah. Namun, keterbatasan muncul pada aspek akurasi dan konsistensi hasil karena sangat dipengaruhi oleh keterampilan pengukur serta rentan terhadap kesalahan subjektif.

Sebaliknya, metode modern menawarkan pendekatan berbasis citra dua dimensi (2D), seperti pengolahan gambar dan video [2], [3] serta teknik pengukuran tiga dimensi (3D) [4], [5] yang menghasilkan representasi morfologis tubuh manusia dengan tingkat presisi yang tinggi. Teknologi ini, yang memanfaatkan pemindai 3D, fotogrametri, atau kombinasi sensor, mampu menangkap detail struktural secara objektif dan konsisten, sehingga meningkatkan reliabilitas pengukuran dibandingkan dengan metode konvensional.

Sejalan dengan perkembangan teknologi, konsep *cyber-physical system* (CPS) telah diperluas ke berbagai sektor, termasuk layanan kesehatan. CPS adalah integrasi antara sistem komputasi dan entitas fisik melalui jaringan komunikasi

digital yang memungkinkan terciptanya lingkungan cerdas, adaptif, dan terhubung.

Penelitian ini secara khusus memfokuskan implementasi *medical cyber-physical system* (MCPS) [6], yakni penerapan prinsip CPS dalam sistem medis. Dengan mengadopsi teknologi antropometri digital, pengukuran parameter tubuh manusia dapat dilakukan secara lebih cepat, akurat, dan efisien. Pendekatan ini relevan untuk berbagai aplikasi medis, mulai dari proses diagnosis hingga pemantauan kondisi dan rehabilitasi pasien, sekaligus mendukung pengembangan layanan kesehatan presisi yang bersifat personal dan otomatis.

Fokus utama penelitian ini adalah pengukuran parameter lingkar kepala secara 2D. Lingkar kepala merupakan indikator penting dalam memantau pertumbuhan dan perkembangan individu secara berkala [7]. Pengukuran ini bertujuan untuk mendeteksi potensi gangguan pertumbuhan, seperti mikrosefalia atau makrosefali [8], yang dapat berdampak pada perkembangan kognitif dan kondisi kesehatan secara umum. Deteksi dini sangat diperlukan agar intervensi medis dapat dilakukan secara tepat waktu [9]. Selain itu, pemantauan ukuran kepala juga bermanfaat bagi tenaga medis dalam melakukan evaluasi kesehatan pasien, terutama dalam situasi yang membatasi kontak fisik langsung antara dokter dan pasien.

Metode pengukuran yang diusulkan dalam penelitian ini mengadopsi sistem telemetri berbasis citra yang dirancang untuk memberikan kemudahan akses bagi pasien maupun tenaga medis. Teknologi ini memungkinkan pengukuran dilakukan dari jarak jauh tanpa memerlukan kehadiran fisik di

fasilitas kesehatan, sehingga sangat membantu individu dengan keterbatasan mobilitas [10]. Sistem ini juga mendukung pemantauan jangka panjang dengan akurasi tinggi dan mengurangi potensi bias subjektif yang umum terjadi pada metode manual. Dengan data yang terstandardisasi dan konsisten, tenaga medis dapat melakukan analisis perkembangan ukuran kepala secara lebih objektif, sehingga proses diagnosis menjadi lebih tepat dan berbasis data.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan teknologi *machine vision* dalam pengukuran antropometrik. Salah satunya memanfaatkan citra digital untuk mengukur dimensi kepala melalui teknik pengolahan citra [3]. Studi lain menggunakan OpenPose untuk mendeteksi bagian tubuh seperti lingkaran dada, perut, dan pinggang, kemudian menghitung ukurannya menggunakan rumus keliling elips [1]. Penelitian terkait sistem telemetri juga ditemukan dalam studi pengendalian kamera berbasis deteksi posisi manusia yang jatuh menggunakan kombinasi sensor akselerometer dan giroskop [11]. Studi tersebut menggunakan *wearable device* yang terpasang langsung pada tubuh. Pendekatan serupa diterapkan pula dalam pengukuran *bio-signal* melalui *wearable device* [12], meskipun efektivitasnya masih dibatasi oleh kebutuhan akan kontak langsung.

Penelitian lain mengkaji pengukuran dimensi tubuh dalam 2D dan 3D menggunakan metode *convolutional body dimensions*, *point cloud*, *skinned multi-person linear* (SMPL), dan *non-linear regressor* [13]. Selain itu, terdapat studi mengenai estimasi berat badan menggunakan pendekatan *body surface area* melalui rumus tabung elips dan regresi linier [14], [15], serta metode Viola-Jones untuk deteksi objek dan pengukuran lingkaran pinggang [16]. Dalam penelitian ini, diusulkan sistem telemetri berbasis deteksi objek yang dikombinasikan dengan perhitungan keliling model elips untuk mengukur lingkaran kepala secara otomatis. Sistem ini dilengkapi kamera yang bergerak pada dua sumbu dan dilengkapi mekanisme pengaturan tinggi-rendah secara otomatis guna mengidentifikasi objek secara mandiri.

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan sistem antropometri otomatis melalui integrasi Medical CPS, kamera bergerak multi-sumbu, dan algoritma pendeteksi objek berbasis model elips untuk pengukuran lingkaran kepala secara nonkontak, *real-time*, dan presisi. Pendekatan ini mengatasi keterbatasan metode tradisional yang bergantung pada alat manual, seperti pita ukur atau *wearable device* yang membutuhkan kontak langsung dan berisiko menghasilkan data yang tidak konsisten [3], [11], [12]. Sementara itu, metode modern berbasis pemodelan 3D seperti SMPL dan *point cloud* [13] sering kali membutuhkan perangkat mahal dan pengaturan yang kompleks. Sistem *wearable* juga memiliki keterbatasan untuk kelompok pengguna dengan hambatan mobilitas atau di wilayah dengan infrastruktur kesehatan terbatas.

Solusi yang ditawarkan dalam penelitian ini mengedepankan metode pengukuran otomatis, efisien, dan dapat diakses secara jarak jauh melalui sistem telemetri berbasis *machine vision*. Pendekatan ini merupakan alternatif noninvasif yang cerdas, mudah digunakan, dan kompatibel dengan platform *telemedicine*, sehingga berpotensi mentransformasi praktik pemantauan pertumbuhan, terutama di wilayah dengan keterbatasan layanan medis. Keunggulan sistem memungkinkan proses skrining dilakukan secara lebih cepat, aman, dan akurat. Implikasinya tidak hanya terbatas pada aspek diagnosis, tetapi juga mencakup pemanfaatan untuk

evaluasi klinis, pemantauan status gizi, hingga desain alat pelindung kepala yang berbasis data antropometrik valid dan objektif.

Struktur penulisan artikel ini disusun sebagai berikut: Bagian II dan Bagian III membahas rancangan sistem serta algoritma yang digunakan, termasuk proses pengujian yang dilakukan. Bagian IV menyajikan hasil eksperimen dan analisis data, sedangkan Bagian V berisi kesimpulan dari penelitian ini.

II. KINERJA SISTEM

A. GAMBARAN UMUM

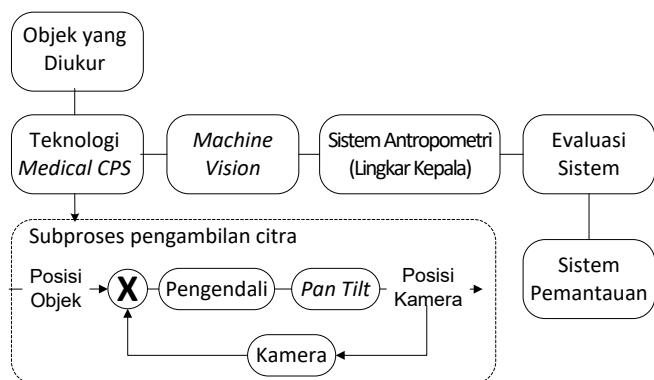
Gambar 1 menunjukkan kinerja sistem telemetri untuk pengukuran lingkaran kepala manusia berbasis *machine vision* yang memanfaatkan teknologi MCPS. Berdasarkan Gambar 1, diagram blok pertama, yaitu MCPS, memiliki subproses utama untuk melakukan akuisisi data. Proses ini dimulai dengan pengambilan citra objek menggunakan sensor kamera yang berfungsi sebagai perangkat utama dalam sistem pengukuran. Citra yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan titik tengah (*centroid*) atau pusat geometri dari objek yang diukur. Penentuan *centroid* ini sangat penting karena menjadi referensi dalam proses stabilisasi posisi objek, sehingga hasil pengukuran lebih akurat dan konsisten [17]-[19].

Setelah titik *centroid* diperoleh, sistem melanjutkan ke tahap identifikasi dan klasifikasi citra menggunakan *machine vision*. Dalam tahap ini, citra dianalisis berdasarkan karakteristik proporsi tubuh manusia guna mengoptimalkan akurasi deteksi dan pengukuran [11], [12]. *Machine vision* berperan penting dalam proses ini karena memungkinkan otomatisasi deteksi objek tanpa perlu interaksi manual, sehingga mengurangi kesalahan akibat faktor manusia.

Dalam penelitian ini, kamera diintegrasikan sebagai komponen utama dari sistem fisik (*physical system*) dalam kerangka MCPS. Kamera berperan sebagai sensor visual yang menangkap citra untuk selanjutnya diproses oleh sistem secara otomatis. Implementasi perangkat ini memungkinkan pemantauan dilakukan tanpa kontak langsung dengan objek yang diukur, yang sangat relevan dalam konteks pengurangan interaksi fisik, seperti pada pasien dengan keterbatasan mobilitas atau dalam kondisi epidemik tertentu. Integrasi teknologi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi pengukuran secara otomatis, sekaligus memperluas akses terhadap layanan kesehatan berbasis telemetri.

Penggunaan *centroid* dalam penelitian ini memiliki beberapa tujuan utama. Salah satunya adalah untuk menentukan referensi posisi rata-rata objek yang berfungsi dalam menstabilkan serta menyesuaikan pengukuran berdasarkan titik tengah objek [17]. Dengan pendekatan ini, sistem dapat melakukan pengukuran secara lebih akurat, terutama dalam proses pemantauan berbasis *machine vision*.

Penelitian ini memerlukan perhitungan jarak yang konsisten, yang melibatkan konversi ukuran objek dari piksel ke milimeter. Konversi ini sangat penting karena dalam proses pengukuran, jarak antara kamera dan objek harus diketahui terlebih dahulu sebelum ukuran dalam piksel dapat diubah ke satuan milimeter. Dengan mengetahui titik tengah objek, sistem dapat menghitung perubahan posisi serta menyesuaikan skala pengukuran untuk mendapatkan hasil yang lebih presisi. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan aspek koreksi perspektif dan distorsi geometri. Dalam penelitian pendahuluan, ditemukan bahwa beberapa gambar yang diambil mengalami perubahan perspektif atau distorsi akibat sudut pengambilan yang berbeda.



Gambar 1. Kinerja sistem telemetri lingkar kepala manusia berbasis *machine vision*.

Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi ulang guna meningkatkan akurasi pengukuran. Dalam proses penentuan *centroid*, nilai rata-rata piksel dalam area tertentu dihitung dengan menggunakan metode pencarian momen gambar. Metode ini memungkinkan perhitungan berbagai properti gambar, seperti radius, area, dan pusat massa yang selanjutnya digunakan untuk menentukan koordinat pusat (x, y) dari kontur objek [18]. Lebih lanjut, penelitian ini juga mengintegrasikan sistem *machine vision* dengan algoritma deteksi objek yang bertujuan untuk mendeteksi keberadaan manusia serta objek di sekitarnya dalam sebuah gambar.

Deteksi ini dikategorikan ke dalam dua jenis, yaitu *soft detection* dan *hard detection*. *Soft detection* hanya mendeteksi keberadaan objek tanpa menentukan lokasinya secara spesifik, sedangkan *hard detection* tidak hanya mengidentifikasi objek, tetapi juga menentukan posisi dan ukurannya secara akurat [20]. Selanjutnya, penelitian ini berlanjut ke tahap analisis antropometri yang berfokus pada pengukuran berbagai fitur tubuh manusia.

Antropometri ini mencakup dua kategori utama, yaitu antropometri statis, yang berhubungan dengan pengukuran bentuk dan komposisi tubuh, serta antropometri dinamis, yang mencakup kemampuan gerak, kekuatan tubuh, serta penggunaan ruang dalam berbagai aktivitas [13], [21], [22]. Tabel I menyajikan spesifikasi alat bantu serta standar kebutuhan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian guna memastikan sistem bekerja secara optimal dalam proses pengukuran lingkar kepala berbasis telemetri.

Penelitian ini kemudian dilanjutkan dengan analisis antropometri yang berfokus pada pengukuran fitur tubuh manusia. Dalam proses pengukuran, objek akan duduk pada media kursi dengan posisi menghadap langsung ke perangkat pengukuran untuk memastikan kestabilan dan konsistensi data yang diperoleh.

Guna mendapatkan hasil pengukuran yang lebih akurat, sistem pengambilan gambar dirancang dengan tiga opsi jarak antara objek dan kamera. Jarak terdekat yang digunakan dalam sistem adalah 50 cm, sedangkan jarak terjauh mencapai 70 cm. Pemilihan variasi jarak ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses deteksi serta menyesuaikan pengukuran dengan berbagai kondisi pencahayaan dan sudut pandang kamera. Dengan adanya pengaturan jarak ini, sistem dapat menganalisis perbedaan hasil pengukuran yang mungkin terjadi akibat perubahan perspektif dan menentukan jarak optimal untuk akurasi terbaik.

Gambar 2 menunjukkan tahapan pengambilan citra objek oleh kamera. Posisi objek dan sudut pandang kamera diatur agar sesuai dengan standar pengukuran yang telah ditetapkan.

TABEL I
SPESIFIKASI STANDAR KEBUTUHAN

No	Ketentuan	Penjelasan
1	Posisi pengukuran pada objek	Posisi duduk dengan ketinggian 35–45 cm.
2	Resolusi kamera	1.920×1.080 (1.080p), 30 fps, dan bidang pandang sebesar 60° .
3	Intensitas cahaya	250–450 lux.
4	Mikrokontroler	NodeMCU ESP8266, tegangan masukan: 3.3–5 V, GPIO: 13 pin, Kanal PWM: 10 kanal, pin ADC: 1 pin, flash memory: 4 MB, kecepatan clock: 40/26/24 MHz
5	Motor stepper	Motor stepper bipolar NEMA, 17HS4401, sudut langkah $1,8^\circ$ (200 langkah/revolusi), holding torque: 40 N.cm.
6	Driver motor	A4988, microstep resolution full, 1/2, 1/4, 1/8 dan 1/16.
7	Sistem mekanik	Dimensi lintasan horizontal: $1.470 \times 40 \times 20$ mm (sudut 45°), dimensi lintasan vertikal: $800 \times 20 \times 20$ mm, penggerak dudukan kamera: V-slot wheel dan timing belt.

Pengaturan ini bertujuan untuk memastikan akuisisi data visual berlangsung optimal serta mengurangi potensi distorsi maupun kesalahan dalam proses analisis citra.

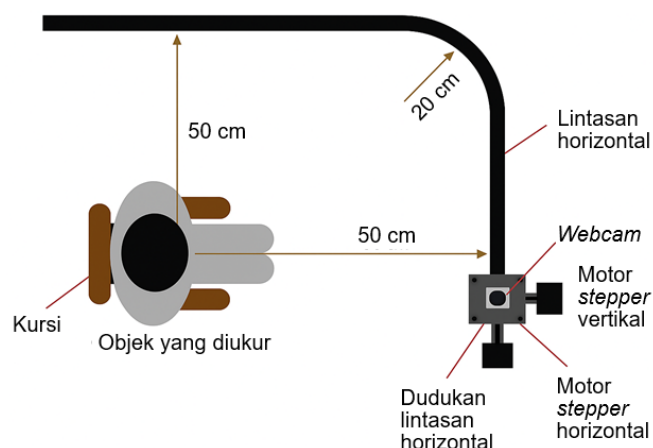
Gambar 3 menunjukkan lintasan horizontal pergerakan kamera yang dirancang untuk bergerak secara otomatis ke kiri dan ke kanan. Mekanisme ini memungkinkan sistem untuk menyesuaikan posisi kamera guna memperoleh sudut pandang terbaik dalam proses pengukuran. Pergerakan kamera ini hanya akan diaktifkan apabila sistem mendeteksi keberadaan objek yang akan diukur pada posisi yang telah ditentukan sebelumnya.

Setelah objek berhasil diidentifikasi, sistem akan secara otomatis melakukan pengambilan gambar. Gambar yang diperoleh kemudian disimpan untuk diproses lebih lanjut pada tahap ekstraksi fitur dan pengukuran. Tahap ekstraksi ini berfungsi untuk mengisolasi informasi penting dari citra, seperti bentuk dan dimensi objek, guna memastikan bahwa hasil pengukuran memiliki tingkat akurasi yang tinggi [23], [24].

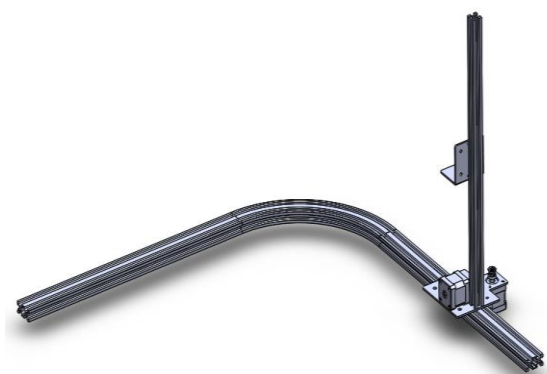
Dengan adanya pergerakan otomatis pada lintasan horizontal, sistem ini dapat mengoptimalkan sudut pengambilan gambar, sehingga pengukuran menjadi lebih presisi. Selain itu, mekanisme ini juga mengurangi keterlibatan manusia dalam proses pengambilan gambar, sehingga meminimalkan potensi kesalahan akibat faktor subjektivitas atau kesalahan manual. Hal ini menjadikan sistem lebih efisien dan andal dalam melakukan pengukuran berbasis *machine vision*.

Pada rancangan mekanis ini, sistem akan dilengkapi dengan lintasan mobilitas dudukan kamera yang bergerak pada dua sumbu menggunakan motor stepper sebagai penggerak utama. Lintasan ini dirancang untuk memungkinkan kamera bergerak secara presisi dalam dua arah, yaitu vertikal dan horizontal, guna menyesuaikan sudut pandang dan posisi pengukuran secara otomatis.

Pergerakan horizontal lintasan dirancang membentuk pola huruf L, dengan bagian sudutnya dibuat menyerupai kurva seperempat lingkaran. Desain ini memungkinkan sistem untuk menangkap citra objek dari dua sudut pandang utama, yaitu tampak depan dan tampak samping. Dengan demikian, sistem dapat memperoleh data pengukuran yang lebih komprehensif



Gambar 2. Lintasan untuk kamera dapat bergerak secara otomatis.



Gambar 3. Lintasan kamera untuk proses pengambilan dan ekstraksi gambar.

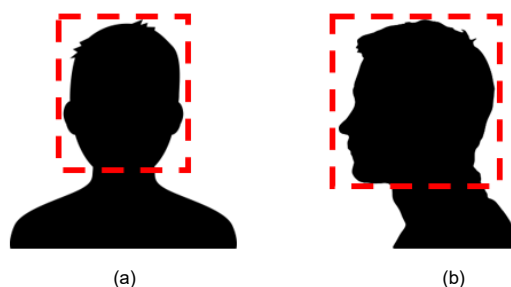
dan akurat, terutama dalam analisis bentuk serta dimensi objek yang diukur.

Sementara itu, pergerakan vertikal pada lintasan berfungsi untuk menyesuaikan tinggi dan rendahnya posisi kamera terhadap objek. Mekanisme ini sangat penting agar sistem dapat menyesuaikan posisi kamera dengan variasi tinggi objek yang diukur, sehingga citra yang dihasilkan tetap berada dalam bidang pandang optimal. Dengan adanya kombinasi pergerakan vertikal dan horizontal ini, sistem dapat melakukan deteksi dan pengukuran secara fleksibel tanpa perlu intervensi manual, sehingga meningkatkan efisiensi serta akurasi dalam proses analisis berbasis *machine vision*.

B. PERHITUNGAN PANJANG DAN LEBAR KEPALA

Proses pengukuran diawali dengan tahap deteksi objek. Pada tahap ini, sistem difokuskan untuk mengidentifikasi bagian kepala tampak depan dan tampak samping. Deteksi dilakukan guna memastikan bahwa area yang diukur sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan. Gambar 4(a) memperlihatkan *bounding box* yang digunakan untuk menentukan panjang kepala, sedangkan Gambar 4(b) menunjukkan *bounding box* yang digunakan dalam pengukuran lebar kepala.

Setelah kamera berhasil mendeteksi dan mengidentifikasi objek kepala, proses selanjutnya adalah pengukuran lebar kepala. Pengukuran ini dilakukan dengan menyesuaikan posisi *bounding box*, sehingga sistem dapat memperoleh dimensi yang akurat. Dalam tahap ini, sistem akan mengukur bagian kepala pada sumbu horizontal (sumbu x), sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5(a) dan Gambar 5(b). Data yang diperoleh dari kedua gambar tersebut akan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan lebih lanjut.



Gambar 4. Bounding box kepala, (a) tampak depan, (b) tampak samping.

Berdasarkan nilai yang diperoleh dari Gambar 5(a) dan Gambar 5(b), sistem melanjutkan proses pengukuran dengan menerapkan skema model elips. Pendekatan ini memungkinkan estimasi lingkaran kepala yang lebih akurat karena memperhitungkan kontur alami bentuk kepala manusia. Hasil pengukuran divisualisasikan pada Gambar 5(c), yang menampilkan lingkaran kepala hasil perhitungan berbasis model elips sebagai keluaran akhir. Metode ini menghasilkan data yang lebih presisi dan selaras dengan standar antropometri yang digunakan dalam analisis pertumbuhan kepala manusia.

Untuk menentukan lebar objek, penelitian ini menggunakan referensi metode jarak Euclidean, yang digunakan untuk mengukur jarak antara dua titik dalam ruang koordinat [13], [18]. Dalam konteks penelitian ini, metode ini diterapkan untuk mengukur jarak antarkoordinat pada sumbu x, yang kemudian digunakan sebagai nilai lebar dari objek kepala.

Setelah diperoleh nilai lebar dalam satuan piksel, hasil pengukuran ini dikonversi ke dalam satuan sentimeter (cm) guna mendapatkan ukuran objek kepala yang sebenarnya. Proses konversi dilakukan dengan menggunakan (1).

$$\text{Pixel to Metric} = \frac{(\text{PixelWidth})}{(\text{AreaWidth})} \quad (1)$$

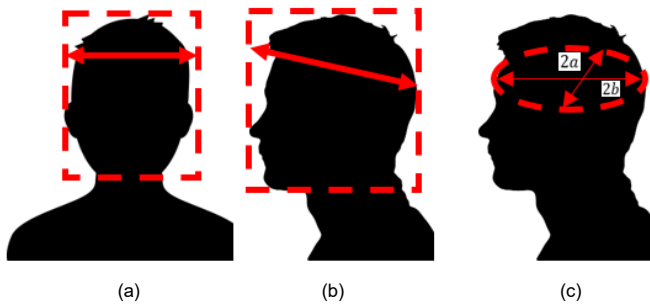
Persamaan (1) digunakan untuk menghitung rasio antara nilai *PixelWidth* (lebar dalam piksel) dari objek yang terdeteksi dalam *bounding box* dengan *AreaWidth* (lebar sebenarnya) dari objek kepala yang diukur. Dengan menggunakan rasio ini, sistem dapat mengonversi ukuran objek dari domain digital (*pixel-based measurement*) ke satuan metrik (*centimeter-based measurement*), sehingga hasil pengukuran lebih akurat dan sesuai dengan standar antropometri. Pendekatan ini memastikan bahwa ukuran kepala yang dihasilkan oleh sistem pengukuran berbasis *machine vision* memiliki tingkat presisi yang tinggi, sehingga dapat digunakan dalam berbagai analisis medis atau antropometri untuk pemantauan pertumbuhan dan perkembangan kepala manusia.

C. PERHITUNGAN LINGKAR KEPALA

Pada tahap perhitungan lingkaran kepala, pendekatan yang digunakan adalah rumus keliling model elips [1], [12], [25], sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 5(c). Hasil pengukuran panjang dan lebar objek tampak depan serta tampak samping akan digunakan dalam perhitungan berdasarkan persamaan pendekatan model elips, seperti yang ditunjukkan dalam (2). Dalam persamaan ini, *a* dan *b* masing-masing merepresentasikan jari-jari mayor dan jari-jari minor dari model elips yang diperkirakan berdasarkan hasil deteksi sistem.

$$LP \approx \pi [3(a + b) - \sqrt{(3a + b)(a + 3b)}] \quad (2)$$

Sebagai bentuk validasi terhadap akurasi perhitungan menggunakan rumus keliling elips, dilakukan pengukuran



Gambar 5. Ilustrasi pengukuran, (a) Pengukuran panjang *bounding box* kepala tampak depan, (b) pengukuran panjang *bounding box* kepala tampak samping, dan (c) pengukuran lingk kepala menggunakan skema model elips.

lingkar kepala secara manual menggunakan pita ukur sebagai metode konvensional. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa lingk kepala objek adalah 55 cm, dengan dimensi lebar tampak depan sebesar 16,4 cm (jari-jari 8,2 cm) dan lebar tampak samping sebesar 17,5 cm (jari-jari 8,75 cm). Perhitungan menggunakan model elips menghasilkan nilai estimasi yang mendekati hasil aktual, dengan selisih sekitar 2 cm dari pengukuran manual. Untuk meningkatkan akurasi sistem, nilai galat (*error*) tersebut dikompensasikan melalui penerapan kalibrasi konversi piksel ke metrik (*pixel-to-metric*) dalam algoritma pengukuran. Penyesuaian ini diharapkan dapat meningkatkan presisi hasil akhir, sehingga sistem dapat diandalkan sebagai alat bantu dalam analisis antropometri berbasis teknologi.

D. PENGUJIAN SISTEM PENGUKURAN LINGKAR KEPALA

Proses pengujian sistem dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran lingk kepala yang dihasilkan oleh sistem dengan hasil pengukuran manual menggunakan pita ukur sebagai acuan. Tujuan perbandingan ini adalah untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem dalam melakukan estimasi dimensi kepala secara otomatis. Setelah seluruh data pengukuran diperoleh, dilakukan perhitungan tingkat akurasi melalui analisis persentase galat (*error percentage*), guna menilai deviasi hasil sistem terhadap nilai referensi manual.

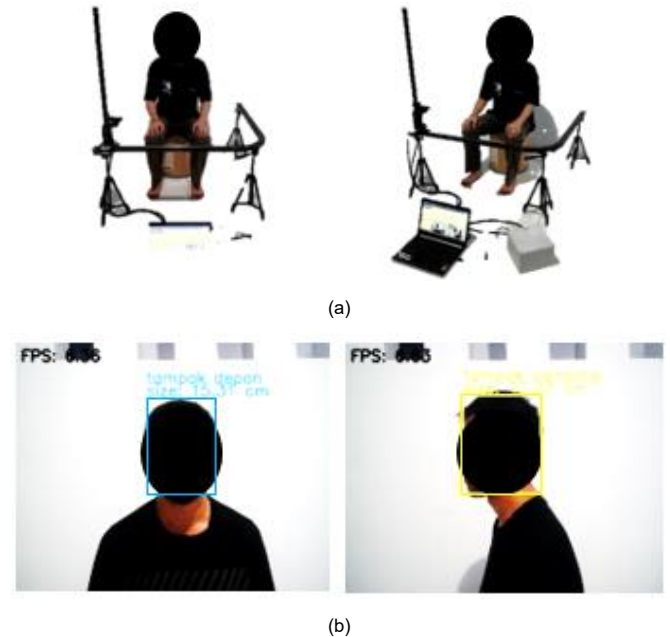
Nilai akurasi sistem dihitung dengan mengambil 100% dikurangi nilai galat yang dihasilkan dalam pengukuran [14]. Dengan kata lain, makin kecil nilai galat, makin tinggi tingkat akurasi sistem. Persamaan (3) digunakan untuk menghitung nilai akurasi dan galat dalam sistem.

$$\begin{aligned} \text{galat} &= (\text{nilai pengukuran sistem} \\ &\quad - \text{nilai pengukuran manual}) \\ &\quad / (\text{nilai pengukuran manual}) \times 100\% \\ \text{Akurasi} &= 100\% - \text{galat.} \end{aligned} \quad (3)$$

Dengan menerapkan perhitungan pada (3), dapat diperoleh gambaran mengenai keandalan sistem dalam melakukan pengukuran secara otomatis. Jika nilai akurasi yang dihasilkan mendekati 100%, sistem dapat dikatakan memiliki kinerja yang baik dan dapat digunakan sebagai alternatif pengukuran lingk kepala secara telemetri berbasis *machine vision*.

III. PENGUJIAN SISTEM

Pada Gambar 6(a), terlihat bahwa objek yang akan diukur duduk menghadap dudukan kamera. Posisi kamera dan objek diatur sesuai dengan jarak yang telah ditentukan untuk memastikan pengukuran dilakukan secara optimal. Kamera akan secara otomatis menyesuaikan posisinya agar



Gambar 6. Implementasi, (a) implementasi sistem telemetri pada objek manusia, (b) Implementasi *bounding box* pada sistem telemetri.

mendapatkan tampilan yang tepat sebelum memulai proses deteksi dan pengukuran.

Penelitian ini mengintegrasikan sistem *machine vision* dengan algoritma deteksi objek untuk mendeteksi keberadaan manusia maupun objek lain di sekitarnya dalam suatu citra digital. Deteksi ini dibagi menjadi dua jenis, yakni *soft detection* dan *hard detection*. *Soft detection* hanya mengidentifikasi eksistensi objek tanpa informasi spasial, sedangkan *hard detection* mampu menentukan posisi, ukuran, serta batas wilayah objek secara presisi [20]. Untuk memastikan bahwa kepala yang terdeteksi memenuhi kriteria pengukuran, sistem secara otomatis menyesuaikan posisi kamera agar objek berada tepat di tengah bidang pandang (*center of frame*) dengan orientasi frontal yang akurat.

Proses dimulai dengan tahap *frame alignment*, yakni penyesuaian awal yang dilakukan melalui pemindaian area citra dan evaluasi hasil deteksi menggunakan *bounding box*. Apabila objek berada di luar zona optimal atau memiliki orientasi yang tidak sesuai, kamera akan menyesuaikan posisinya secara otomatis melalui aktuatur hingga memenuhi standar proporsionalitas dan orientasi yang telah ditentukan. Validasi tambahan dilakukan berdasarkan parameter simetri wajah, kejernihan citra, serta potensi gangguan visual, seperti keberadaan aksesori dominan. Pendekatan ini memastikan bahwa hanya citra dengan kualitas dan posisi optimal yang digunakan dalam pengukuran, sehingga meningkatkan akurasi serta konsistensi sistem dalam proses deteksi dan perhitungan lingk kepala secara otomatis.

Setelah objek berhasil terdeteksi, baik tampak depan maupun tampak samping, sistem melanjutkan dengan pengukuran lebar kepala sebagai parameter utama dalam estimasi lingk kepala. Proses ini divisualisasikan pada Gambar 6(b), yang menampilkan hasil deteksi yang digunakan dalam perhitungan dimensi kepala berbasis model elips. Pendekatan tersebut terbukti memberikan hasil pengukuran yang lebih akurat dan stabil dibandingkan dengan metode manual.

Hasil dari tampilan depan dan samping kemudian disimpan dalam server sebagai data referensi untuk proses pelatihan dan

pengujian model. *Dataset* awal terdiri atas 420 sampel dan dibagi dengan rasio 80:20 antara data latih dan uji, guna memastikan model memperoleh data yang memadai untuk pembelajaran serta diuji menggunakan data yang tidak pernah dilihat sebelumnya.

Pada tahap pengujian, sistem dievaluasi berdasarkan dua kategori utama, yakni tampilan depan dan samping kepala. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan anotasi referensi dengan hasil prediksi sistem. Kinerja sistem dianalisis menggunakan *confusion matrix* yang menjadi dasar perhitungan metrik evaluasi seperti akurasi, presisi, *recall*, dan *F1-score* untuk mengukur efektivitas sistem dalam mendeteksi serta mengukur lingk kepala secara otomatis.

Pengujian lanjutan juga dilakukan dengan melibatkan objek manusia yang mengenakan aksesoris pada wajah atau kepala, seperti kacamata, masker, dan topi, untuk menilai pengaruh elemen tersebut terhadap akurasi deteksi. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7(a), pengujian ini bertujuan mengidentifikasi potensi gangguan atau bias yang dapat memengaruhi kinerja sistem pengukuran berbasis *machine vision*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model masih mampu mendeteksi objek manusia yang menggunakan aksesoris penutup kepala berwarna hitam. Hal ini terjadi karena aksesoris tersebut masih menyerupai karakteristik rambut, sehingga tidak terlalu memengaruhi proses deteksi. Namun, model mengalami kesulitan dalam mendeteksi wajah saat objek menggunakan masker yang menutupi sebagian besar area tampak depan. Kesalahan ini disebabkan oleh ketidaksesuaian antara data yang digunakan dalam pelatihan model dan kondisi pengujian karena *dataset* yang digunakan tidak mencakup variasi wajah dengan masker.

Selain pengujian pada manusia, pengujian tambahan juga dilakukan pada objek selain manusia, seperti animasi atau boneka, untuk mengevaluasi kemampuan model dalam membedakan objek manusia dengan nonmanusia. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model tidak menghasilkan deteksi apapun pada objek animasi maupun boneka karena tidak terdapat anotasi yang sesuai dengan *dataset* yang telah dilatih. Namun, dalam beberapa kondisi tertentu, terjadi kesalahan deteksi (*false positive*), yaitu model secara keliru mengidentifikasi objek nonmanusia sebagai manusia, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7(b). Kesalahan ini kemungkinan disebabkan oleh kemiripan karakteristik visual antara objek uji dan objek manusia dalam *dataset*, terutama jika objek memiliki bentuk wajah atau proporsi tubuh yang menyerupai manusia.

Dari hasil pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa model yang dikembangkan telah mampu mendeteksi objek manusia dengan baik serta membedakan antara objek yang termasuk dalam kelas yang telah dilatih dengan yang tidak. Namun, masih terdapat peluang untuk meningkatkan ketegaran (*robustness*) model, terutama dalam menangani variasi aksesoris wajah serta mengurangi kemungkinan kesalahan deteksi pada objek yang menyerupai manusia.

A. PENGUJIAN PENDETEKSIAN OBJEK

Tabel II menampilkan hasil pengujian terhadap beberapa parameter yang berpengaruh terhadap proses deteksi objek dalam algoritma deteksi objek. Parameter yang diuji meliputi perbedaan intensitas cahaya serta perbedaan jarak antara objek dan kamera. Pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan tiga variasi tingkat intensitas cahaya serta tiga variasi jarak objek



(a)



(b)

Gambar 7. Pengujian, (a) pengujian menggunakan aksesoris pada wajah, (b) pengujian menggunakan objek selain manusia.

TABEL II
PENGUJIAN PARAMETER INTENSITAS CAHAYA

Lux	Objek	Kelas Deteksi	Jarak (cm)		
			50	60	70
300	Objek tanpa penutup kepala	Tampak depan	✓	✓	✓
		Tampak samping	✓	✓	✓
	Objek menggunakan penutup kepala	Tampak depan	✓	✓	✓
		Tampak samping	✓	✓	✓
160	Objek tanpa penutup kepala	Tampak depan	✓	✓	✓
		Tampak samping	✓	✓	✓
	Objek menggunakan penutup kepala	Tampak depan	✓	✓	✓
		Tampak samping	✓	✓	×
70	Objek tanpa penutup kepala	Tampak depan	✓	✓	✓
		Tampak samping	✓	✓	✓
	Objek menggunakan penutup kepala	Tampak depan	✓	✓	×
		Tampak samping	✓	✓	×

terhadap kamera untuk mengevaluasi pengaruh faktor-faktor ini terhadap kinerja deteksi sistem.

Berdasarkan hasil pengujian, model algoritma deteksi objek mampu melakukan deteksi objek dalam rentang intensitas cahaya 200–400 lux. Apabila intensitas cahaya kurang dari 200 lux, model mengalami kesulitan dalam mendeteksi objek karena minimnya kontras antara objek dan latar belakang, yang menyebabkan *bounding box* tidak terbentuk dengan baik. Sebaliknya, pada intensitas cahaya di atas 400 lux, model masih mampu mendeteksi objek, tetapi dalam beberapa kasus terjadi refleksi cahaya berlebih, yang dapat mengganggu akurasi hasil deteksi.

Selain itu, jarak antara objek dan kamera juga terbukti berpengaruh terhadap hasil deteksi. Pada jarak optimal, antara 50–60 cm, deteksi dapat dilakukan dengan baik. Namun, jika jarak terlalu dekat (< 50 cm) atau terlalu jauh (> 60 cm), model mengalami penurunan akurasi karena perubahan perspektif yang menyebabkan distorsi ukuran objek dalam gambar. Hasil pengujian ini membuktikan bahwa intensitas cahaya dan jarak objek dengan kamera memiliki peran penting dalam keberhasilan deteksi objek, sehingga perlu dilakukan kalibrasi

pencahayaan dan penentuan jarak optimal agar sistem bekerja secara maksimal.

B. PENGUJIAN PENGUKURAN LINGKAR KEPALA

Pada pengujian sistem pengukuran lingkaran kepala, dilakukan evaluasi terhadap tingkat akurasi hasil pengukuran yang diperoleh dari sistem yang telah dirancang, sebagaimana ditampilkan pada Tabel III. Pengujian dilakukan terhadap enam sampel objek, dengan masing-masing sampel diukur pada tiga jarak berbeda untuk menganalisis pengaruh variasi jarak terhadap akurasi pengukuran. Selama proses pengujian, intensitas pencahayaan dipertahankan dalam kisaran 300–400 lux, sedangkan jarak antara objek dan kamera divariasikan menjadi 50 cm, 60 cm, dan 70 cm.

Hasil pengukuran yang diperoleh dari sistem kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran manual menggunakan pita ukur, dengan tujuan untuk menghitung nilai akurasi dan galat dari sistem. Berdasarkan hasil pengujian yang tercantum dalam Tabel III, ditemukan bahwa rata-rata galat dari keseluruhan pengukuran pada tiga jarak berbeda adalah 2,999%. Dari ketiga jarak tersebut, pengujian pada jarak 50 cm menunjukkan hasil terbaik, dengan nilai galat rata-rata sebesar 2,299%, yang berarti bahwa sistem memberikan hasil yang paling akurat pada jarak tersebut.

Beberapa faktor yang berkontribusi terhadap nilai galat dalam pengukuran meliputi jarak objek ke kamera, posisi tubuh objek saat duduk di kursi, serta intensitas cahaya dalam ruangan. Ketiga faktor ini dapat memengaruhi deteksi *bounding box* dan perhitungan dimensi kepala, sehingga penting untuk memastikan stabilitas posisi objek dan pencahayaan yang optimal agar sistem dapat bekerja dengan akurasi maksimal.

C. PENGUJIAN LINGKAR KEPALA OBJEK BEDA USIA

Selain menguji akurasi pengukuran berdasarkan variasi jarak, dilakukan juga pengujian lingkaran kepala berdasarkan perbedaan usia objek. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa sistem dapat melakukan pengukuran secara akurat pada berbagai rentang usia, terutama untuk anak-anak, karena dimensi kepala anak lebih kecil dibandingkan orang dewasa. Data hasil pengukuran berdasarkan parameter usia disajikan dalam Tabel IV.

Pengujian ini dilakukan terhadap tiga sampel objek dengan kategori usia berbeda, yaitu usia ≤ 10 tahun, $12 \leq x \leq 23$ tahun, dan ≥ 24 tahun. Semua objek diukur pada jarak 50 cm dari kamera untuk memastikan hasil pengukuran tidak dipengaruhi oleh variasi jarak.

Berdasarkan hasil pengujian dalam Tabel IV, terlihat bahwa nilai galat rata-rata pengukuran adalah 2,002%. Pengukuran pada kategori usia ≥ 24 tahun menunjukkan galat paling kecil, yaitu 0,179%, yang berarti sistem mampu mendeteksi lingkaran kepala dengan sangat akurat pada objek dewasa. Pada kategori usia ≤ 10 tahun, galat yang dihasilkan sebesar 1,569%, masih dalam rentang yang dapat diterima. Namun, pada kategori usia $12 \leq x \leq 23$ tahun, nilai galat mencapai 4,259%, yang merupakan galat terbesar di antara ketiga kelompok usia.

Hasil ini menunjukkan bahwa akurasi sistem lebih tinggi pada objek dengan ukuran kepala yang lebih besar atau pada kategori usia $12 \leq x \leq 23$ tahun dan ≥ 24 tahun. Kemungkinan penyebab galat yang lebih tinggi pada kelompok remaja adalah variasi bentuk kepala yang lebih kompleks atau faktor pencahayaan dan posisi objek yang tidak optimal selama proses pengukuran. Pengujian ini memberikan wawasan bahwa sistem dapat terus dioptimalkan untuk meningkatkan akurasi,

TABEL III
PENGUJIAN PENGUKURAN LINGKAR KEPALA

Jarak (cm)	No.	Pengukuran Manual (cm)	Pengukuran Sistem (cm)	Galat (%)
50	1.	56,0	56,65	1,161
	2.	55,8	56,21	0,735
	3.	54,0	52,30	3,148
	4.	55,0	55,52	0,945
	5.	54,5	51,90	4,771
	6.	54,0	52,36	3,037
Rata-rata galat pengukuran				2,299
60	1.	56,0	51,50	8,036
	2.	55,8	54,41	2,491
	3.	54,0	53,30	1,296
	4.	55,0	53,94	1,927
	5.	54,5	52,79	3,138
	6.	54,0	51,80	4,074
Rata-rata galat pengukuran				3,494
70	1.	56,0	54,45	2,768
	2.	55,8	56,90	1,971
	3.	54,0	51,43	4,759
	4.	55,0	53,31	3,073
	5.	54,5	53,70	1,468
	6.	54,0	51,20	5,185
Rata-rata galat pengukuran				3,204

TABEL IV
PENGUJIAN LINGKAR KEPALA PARAMETER OBJEK BEDA USIA

Usia Objek	Pengukuran Manual (cm)	Pengukuran Sistem (cm)	Galat (%)
≤ 10	51	50,2	1,569
$12 \leq x \leq 23$	54	56,3	4,259
≥ 24 th	56	56,1	0,179
Rata-rata galat pengukuran			2,002

khususnya pada objek dengan dimensi kepala yang lebih kecil (usia ≤ 10 tahun) atau lebih bervariasi.

IV. HASIL

Setelah dilakukan beberapa pengujian terhadap sistem, hasil yang diperoleh disajikan dalam Tabel V, yang menunjukkan hasil pengujian tampak depan dan tampak samping objek. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan model dalam mendeteksi objek dengan nilai *confidence* $\geq 0,9$ (deteksi yang sangat akurat) dan *confidence* $< 0,9$ (deteksi kurang akurat atau tidak terdeteksi dengan baik).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar objek berhasil terdeteksi dengan baik, meskipun terdapat beberapa sampel yang menunjukkan nilai *confidence* lebih rendah. Terdapat sejumlah faktor yang berkontribusi terhadap kesalahan deteksi, antara lain sebagai berikut. Pertama, ketika sistem diuji menggunakan objek nonmanusia, seperti boneka atau animasi, model tidak memberikan hasil deteksi yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan *dataset* pelatihan yang hanya mencakup objek manusia. Kemudian, penggunaan aksesoris, keberadaan aksesoris seperti masker, kacamata, atau rambut panjang yang menutupi wajah menyebabkan penurunan nilai *confidence*. Model mengalami kesulitan dalam mengenali objek apabila fitur wajah tidak tampak dengan jelas. Ketiga, kondisi pencahayaan dan posisi objek, pencahayaan yang tidak optimal, serta posisi kepala yang tidak sesuai dengan pola dalam data pelatihan turut menyebabkan penurunan akurasi deteksi atau kegagalan dalam identifikasi objek. Berdasarkan temuan tersebut, hasil pengujian secara lebih rinci disajikan pada Tabel

TABEL V
HASIL PENGUJIAN *DATASET* TAMPAK DEPAN DAN TAMPAK SAMPING

Hasil Pengujian <i>Dataset</i>	<i>Confidence</i> $\geq 0,9$	<i>Confidence</i> $< 0,9$
Tampak depan	39	3
Tampak Samping	39	3

TABEL VI
CONFUSION MATRIX DARI *DATASET* TAMPAK DEPAN DAN TAMPAK SAMPING

Kelas Prediksi		Kelas Anotasi	
		Positive (1)	Negative (0)
Positive (1)	TP: 74	FP: 0	
	FN: 2	TN: 4	

TABEL VII
CONFUSION MATRIX DARI *DATASET* HASIL PENGUJIAN OBJEK SECARA *REAL-TIME* TAMPAK DEPAN DAN TAMPAK SAMPING

Kelas Prediksi		Kelas Anotasi	
		Positive (1)	Negative (0)
Positive (1)	TP: 20	FP: 0	
	FN: 0	TN: 0	

VI, yang menggambarkan faktor-faktor utama yang memengaruhi tingkat akurasi sistem dalam mendeteksi objek.

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari Tabel VI, dilakukan perhitungan metrik kinerja (*performance metrics*) untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mendeteksi dan mengukur lingkaran kepala secara otomatis. Metrik evaluasi yang dihitung meliputi akurasi, presisi, *recall*, dan *F-measure*.

Hasil perhitungan metrik kinerja adalah sebagai berikut. Pertama, akurasi sebesar 92,8% menunjukkan tingkat ketepatan keseluruhan model dalam melakukan deteksi yang benar dibandingkan dengan total sampel yang diuji. Selanjutnya, presisi sebesar 100% menunjukkan bahwa semua objek yang terdeteksi benar-benar merupakan objek yang sesuai dengan *dataset* yang dilatih. Tidak ada kesalahan dalam mendeteksi objek yang bukan bagian dari kelas yang ditargetkan. Ketiga, *recall* sebesar 97,5% menunjukkan bahwa sebagian besar objek yang seharusnya terdeteksi memang berhasil terdeteksi, meskipun masih terdapat beberapa objek yang tidak dikenali akibat faktor tertentu, seperti pencahayaan atau aksesoris yang digunakan. Terakhir, *F-measure* 98,7% merupakan nilai rata-rata harmonis dari presisi dan *recall*, yang menunjukkan bahwa model memiliki keseimbangan yang sangat baik antara presisi dan sensitivitas deteksi.

Dari hasil evaluasi ini, dapat disimpulkan bahwa sistem pengukuran lingkaran kepala berbasis *machine vision* memiliki kinerja yang sangat baik, dengan tingkat galat yang rendah. Meskipun masih terdapat beberapa tantangan dalam hal pencahayaan, posisi objek, dan aksesoris yang digunakan oleh objek, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem ini memiliki akurasi yang tinggi dan dapat digunakan sebagai metode alternatif dalam pengukuran lingkaran kepala secara otomatis.

Berdasarkan hasil pengujian secara *real-time*, Tabel VII menunjukkan *confusion matrix* untuk deteksi objek tampak depan dan tampak samping. Hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut. Diperoleh *true positive* (TP) sejumlah 20. Sistem berhasil mendeteksi objek yang seharusnya terdeteksi sebagai positif (objek manusia yang sesuai). *False positive* (FP) = 0 berarti tidak ada kesalahan dalam mendeteksi objek yang bukan bagian dari kelas target sebagai positif; tidak ada deteksi salah terhadap objek nonmanusia. Selanjutnya, *false negative* (FN) = 0, yang berarti tidak ada objek yang seharusnya

terdeteksi tetapi tidak terdeteksi. Semua objek yang harusnya masuk kelas target berhasil dideteksi. Terakhir, *true negative* (TN) = 0. Tidak ada sampel negatif dalam pengujian ini, sehingga nilai TN tidak relevan dalam konteks ini.

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sistem bekerja dengan sangat baik untuk deteksi objek tampak depan dan tampak samping dalam kondisi *real-time* karena tidak ada kesalahan dalam deteksi (FP = 0, FN = 0). Sistem memiliki akurasi 100% dalam skenario ini, yang menunjukkan keandalannya dalam mengenali objek manusia yang sesuai dengan *dataset* pelatihan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem telemetri lingkaran kepala berbasis *machine vision* yang mengintegrasikan algoritma deteksi objek dan pendekatan eliptis untuk perhitungan keliling mampu mengotomatisasi proses deteksi dan pengukuran secara presisi, dengan tingkat galat relatif berkisar antara 2,299% hingga 3,494%. Sistem ini terbukti meningkatkan efisiensi serta konsistensi dalam akuisisi data antropometri dan berkontribusi pada pengembangan teknologi biometrik yang dapat terhubung dengan perangkat pintar serta platform telemetri medis. Aplikasinya menjangkau berbagai sektor, mulai dari kesehatan masyarakat, industri *wearable device*, hingga pemantauan populasi secara *real-time*. Pengujian juga menunjukkan bahwa sistem masih dapat dioptimalkan untuk meningkatkan akurasi, khususnya pada individu dengan variasi dimensi kepala yang lebih ekstrem, seperti anak-anak usia di bawah 10 tahun. Untuk itu, arah pengembangan ke depan mencakup peningkatan generalisasi terhadap keragaman morfologi, validasi pada beragam kondisi lingkungan, penyempurnaan kinerja sistem dalam konteks operasional yang dinamis, serta penerapan mekanisme adaptif yang memungkinkan penyesuaian otomatis terhadap posisi dan jarak objek guna menjaga konsistensi pengukuran.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Susetyo Bagas Bhaskoro dan Sandy Bhawana Mulia; metodologi, Susetyo Bagas Bhaskoro; perangkat lunak, Susetyo Bagas Bhaskoro, Afq Hasydhiqi, dan Sandy Bhawana Mulia; validasi, Susetyo Bagas Bhaskoro dan Afq Hasydhiqi; analisis formal, Sandy Bhawana Mulia; investigasi, Sandy Bhawana Mulia dan Afq Hasydhiqi; sumber daya, Susetyo Bagas Bhaskoro dan Sandy Bhawana Mulia; kurasi data, Susetyo Bagas Bhaskoro dan Afq Hasydhiqi; penulisan—penyusunan draf asli, Susetyo Bagas Bhaskoro; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Sandy Bhawana Mulia; visualisasi, Sandy Bhawana Mulia dan Afq Hasydhiqi.

REFERENSI

- [1] X.Y. Gan, H. Ibrahim, dan D.A. Ramli, "A simple vision based anthropometric estimation system using webcam," *J. Phys., Conf. Ser.*, vol. 1529, no. 2, hal. 1–7, Jun. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1529/2/022067.
- [2] B.R. Lv dkk., "Automatic measurement of scanned human body in fixed posture," dalam *2010 IEEE 11th Int. Conf. Comput.-Aided Ind. Des. Concept. Des.*, 1, 2010, hal. 575–578, doi: 10.1109/CAIDCD.2010.5681284.
- [3] R.A. Ertürk dan M.E. Karnaşak, "Anthropometric measurements with 2D images," dalam *Proc. 7th Int. Conf. Comput. Sci. Eng. UBMK 2022*, 2022, hal. 1–6, doi: 10.1109/UBMK55850.2022.9919504.

- [4] N. Werghi, Y. Xiao, dan J.P. Siebert, "A functional-based segmentation of human body scans in arbitrary postures," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B (Cybern.)*, vol. 36, no. 1, hal. 153–165, Feb. 2006, doi: 10.1109/TSMCB.2005.854503.
- [5] P.R.M. Jones dan M. Rioux, "Three-dimensional surface anthropometry: Applications to the human body," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 28, no. 2, hal. 89–117, Sep. 1997, doi: 10.1016/S0143-8166(97)00006-7.
- [6] S.J. Oks dkk., "Cyber-physical systems in the context of industry 4.0: A review, categorization and outlook," *Inf. Syst. Front.* vol. 26, no. 5, hal. 1731–1772, Okt. 2024, doi: 10.1007/s10796-022-10252-x.
- [7] R. Shabariah, Farsida, dan I. Parameswari, "Hubungan ukuran lingkaran kepala dengan perkembangan anak usia 12-36 bulan berdasarkan skala denver development screening test-ii (DDST-II) di Posyandu RW 03 Mustika Jaya Bekasi Timur November 2016," *J. Kedokt. Kesehat.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.24853/jkk.15.1.46-55.
- [8] H. Sahli dkk., "Statistical analysis based on biometric measures for fetal head anomaly characterization," dalam *2018 IEEE 4th Middle East Conf. Biomed. Eng. (MECBME)*, 2018, hal. 237–242, doi: 10.1109/MECBME.2018.8402440.
- [9] X. Ju dkk., "3D head shape analysis of suspected Zika infected infants," dalam *2018 11th Int. Congr. Image Signal Process. BioMed. Eng. Inform. (CISP-BMEI)*, 2018, hal. 1–4, doi: 10.1109/CISP-BMEI.2018.8633125.
- [10] N. Kalantari dan V.G. Motti, "zCare: Designing a mobile application to support caregivers of patients with congenital Zika syndrome," dalam *2018 IEEE Int. Conf. Healthc. Inform. (ICHI)*, 2018, hal. 276–283, doi: 10.1109/ICHI.2018.00038.
- [11] R.A. Melita, S.B. Bhaskoro, dan R. Subekti, "Pengendalian kamera berdasarkan deteksi posisi manusia bergerak jatuh berbasis multi sensor accelerometer dan gyroscope," *ELKOMIKA: J. Tek. Energi Elekt. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 6, no. 2, hal. 259–273, Mei 2018, doi: 10.26760/elkomika.v6i2.259.
- [12] M. Kurzyński, P. Ryba, M. Markowski, dan M. Woźniak, "Medical telemetry system for monitoring and localization of patients - Functional model and algorithms for biosignals processing," *Int. J. Electron. Telecommun.*, vol. 56, no. 4, hal. 445–450, Nov. 2010, doi: 10.2478/v10177-010-0060-x.
- [13] D. Škorvanková, A. Riečický, dan M. Madaras, "Automatic estimation of anthropometric human body measurements," 2021, *arXiv:2112.11992*.
- [14] A.B. Abadi dkk., "Perhitungan indeks massa tubuh less contact berbasis computer vision dan regresi linear," *Matrik: J. Manaj. Tek. Inform. Rekayasa Komput.*, vol. 21, no. 3, hal. 629–638, Jul. 2022, doi: 10.30812/matrik.v21i3.1512.
- [15] C. Xiang, B. Liu, L. Zhao, dan X. Zheng, "Three-dimension deep model for body mass index estimation from facial image sequences with different poses," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 107, hal. 1–11, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jvcir.2024.104381.
- [16] B.A. Fimaskoro, S. Aulia, dan D. Rimasa, "Identification of fencing athletes based on anthropometric measurements using mediapipe pose," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 13, no. 1, hal. 11–17, Feb. 2024, doi: 10.22146/jnteti.v13i1.8145.
- [17] K. Yan dkk., "Face recognition based on convolution neural network," dalam *2017 36th Chin. Control Conf. (CCC)*, 2017, hal. 4077–4081, doi: 10.23919/ChiCC.2017.8027997.
- [18] B. Strbac, M. Gostovic, Z. Lukac, dan D. Samardzija, "YOLO multi-camera object detection and distance estimation," dalam *2020 Zooming Innov. Consum. Technol. Conf. (ZINC)*, 2020, hal. 26–30, doi: 10.1109/ZINC50678.2020.9161805.
- [19] A. Hazarika, A. Vyas, M. Rahmati, dan Y. Wang, "Multi-camera 3D object detection for autonomous driving using deep learning and self-attention mechanism," *IEEE Access*, vol. 11, hal. 64608–64620, Jun. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3288112.
- [20] S.B. Bhaskoro, S. Aminah, dan K. Taqi, "Attendance system on moving objects through face recognition using MTCNN and CNN," dalam *2021 3rd Int. Symp. Mater. Elect. Eng. Conf. (ISMEE)*, 2021, hal. 184–189, doi: 10.1109/ISMEE54273.2021.9774257.
- [21] N.-L. Dao, T. Deng, dan J. Cai, "Fast and automatic body circular measurement based on a single kinect," dalam *Signal Inf. Process. Assoc. Annu. Summit Conf. (APSIPA)*, 2014, hal. 1–4, doi: 10.1109/APSIPA.2014.7041571.
- [22] M. Chao, C. Kai, dan Z. Zhiwei, "Research on tobacco foreign body detection device based on machine vision," *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 42, no. 15, hal. 2857–2871, Nov. 2020, doi: 10.1177/0142331220929816.
- [23] S.B. Bhaskoro, E.A. Salsabillah, dan A.F. Rifa'i, "Sistem identifikasi manusia bergerak jatuh berdasarkan ekstraksi suara dan citra," *JTRM (J. Teknol. Rekayasa Manufaktur)*, vol. 4, no. 2, hal. 101–116, Okt. 2022, doi: 10.48182/jtrm.v4i2.94.
- [24] S.B. Bhaskoro, H. Supriyanto, dan S. Falah, "Sistem identifikasi jumlah produk berbasis pengolahan citra dengan algoritma YOLO pada proses pengepakan industri manufaktur," *JTRM (J. Teknol. Rekayasa Manufaktur)*, vol. 6, no. 1, hal. 13–28, Apr. 2024, doi: 10.48182/jtrm.v6i1.114.
- [25] Y. Liu, A. Sowmya, dan H. Khamis, "Single camera multi-view anthropometric measurement of human height and mid-upper arm circumference using linear regression," *PLoS One*, vol. 13, no. 4, hal. 1–22, Apr. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0195600.