

Studi Awal Pengembangan Sistem Deteksi *Landmark* pada Citra Sefalogram Lateral Menggunakan YOLOv11

Ica Dewi Monica¹, Sri Oktamuliani^{1*}, Wulandani Liza Putri²

¹Laboratorium Fisika Medis, Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Andalas Kampus Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

²Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Andalas
Jalan Perintis Kemerdekaan No.77. Jati, Padang, 25192, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 20 Februari 2026
Direvisi: 15 Mei 2026
Diterima: 31 Juli 2026

Kata kunci:

Citra sefalogram lateral
Confusion matrix
Identifikasi *landmark*
Ortodontik
YOLOv11

Keywords:

Lateral cephalogram image
Confusion matrix
Identify landmarks
Orthodontics
YOLOv11

Penulis Korespondensi:

Sri Oktamuliani
Email: srioktamuliani@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Identifikasi *landmark* pada citra sefalogram lateral memiliki peran penting dalam diagnosis dan perencanaan perawatan ortodontik karena menjadi dasar analisis pada hubungan skeletal antara struktur wajah dan gigi di rongga mulut. Namun, proses identifikasi *landmark* secara manual memerlukan waktu lama dan berpotensi menimbulkan kesalahan subjektif. Oleh karena itu, teknologi berbasis *Artificial Intelligence* (AI) menjadi solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi dan konsistensi analisis. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem deteksi *landmark* anatomi secara otomatis pada citra sefalogram lateral menggunakan algoritma YOLOv11. Dataset yang digunakan terdiri dari 50 citra sefalogram lateral yang diperoleh dari Instalasi Radiologi RSGM Universitas Andalas dan dianotasi berdasarkan standar *American Board of Orthodontics* (ABO), kemudian dilakukan augmentasi sehingga diperoleh total 110 citra. Proses pelatihan dan pengujian model dilakukan menggunakan varian YOLOv11 “*yolo11s-pose*”. Hasil evaluasi menunjukkan nilai akurasi, presisi, *recall*, dan *F-score* sebesar 1,0 serta nilai *mean Average Precision* (mAP) sebesar 0,995. Secara keseluruhan, model ini menunjukkan potensi yang baik dalam meningkatkan efisiensi identifikasi *landmark* sefalogram, meskipun diperlukan peningkatan jumlah dan variasi data agar performanya lebih andal dalam aplikasi klinis.

Landmark identification on lateral cephalogram images plays a crucial role in orthodontic diagnosis and treatment planning because it forms the basis for analyzing the skeletal relationship between facial structures and teeth in the oral cavity. However, manual landmark identification is time-consuming and potentially leads to subjective errors. Therefore, Artificial Intelligence (AI)-based technology is a potential solution to improve the efficiency and consistency of analysis. This study aims to develop an automatic anatomical landmark detection system on lateral cephalogram images using the YOLOv11 algorithm. The dataset used consisted of 50 lateral cephalogram images obtained from the Radiology Installation of RSGM Andalas University and annotated according to the American Board of Orthodontics (ABO) standards. Then, augmentation was performed to obtain a total of 110 images. The model training and testing process was carried out using the YOLOv11 variant “yolo11s-pose”. The evaluation results showed an accuracy, precision, recall, and F-score of 1.0, with a mean Average Precision (mAP) of 0.995. Overall, this model shows good potential in improving the efficiency of cephalogram landmark identification, but it requires increasing the amount and variety of data for more reliable performance in clinical applications.

Copyright © 2026 Author(s).

I. PENDAHULUAN

Fisika medis berperan penting dalam pengembangan teknologi pencitraan medis, termasuk dalam bidang kedokteran gigi. Salah satu teknik pencitraan yang umum digunakan pada ortodontik adalah citra sefalogram, yaitu citra diagnostik dua dimensi yang dimanfaatkan untuk mengidentifikasi *landmark* anatomi serta menganalisis hubungan skeletal antara struktur wajah dan gigi (Londono et al., 2023). Citra sefalogram memberikan visualisasi tengkorak dalam proyeksi lateral maupun posterior-anterior sehingga membantu dokter dalam mengevaluasi hubungan antar jaringan keras dan jaringan lunak di bidang horizontal dan vertikal (Kasinathan et al., 2017).

Citra sefalogram merupakan prosedur diagnostik utama pada bidang ortodontik. Namun, citra ini memiliki beberapa keterbatasan yang dapat menghambat interpretasi klinis, seperti tumpang tindihnya struktur kraniofasial, asimetri wajah, variasi anatomi antarindividu, serta perbedaan posisi kepala saat proses akuisisi citra (Lee et al., 2024). Faktor-faktor tersebut sering kali menimbulkan tantangan dalam proses interpretasi citra yang akurat dan efisien oleh dokter gigi.

Proses analisis citra sefalogram, khususnya dalam identifikasi *landmark*, masih menjadi tahap yang rentan terhadap kesalahan (Juneja et al., 2021). *Landmark* anatomi berperan penting dalam menilai hubungan antara dasar tengkorak dengan rahang atas dan rahang bawah, serta sebagai acuan dalam perencanaan perawatan ortodontik (Zhao et al., 2023). Identifikasi *landmark* secara manual membutuhkan ketelitian tinggi, bersifat subjektif, memerlukan waktu yang relatif lama, dan hasilnya sangat bergantung pada pengalaman serta keterampilan klinis (Khalid et al., 2024).

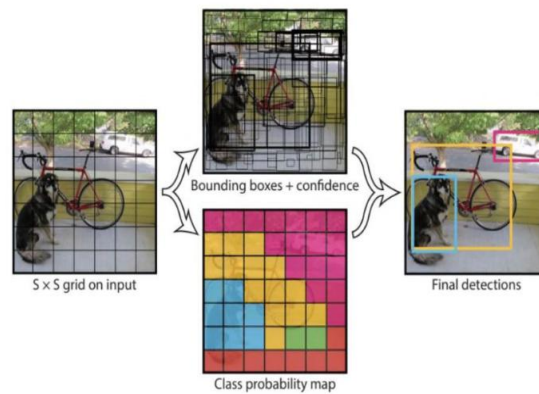
Seiring dengan pesatnya perkembangan *Artificial Antelligence* (AI), teknologi otomatis berbasis *deep learning* hadir sebagai solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan efektivitas dan akurasi deteksi *landmark*. Pendekatan ini mampu menghasilkan analisis yang lebih cepat, konsisten, dan objektif dibandingkan metode manual konvensional (Li et al., 2022). Perkembangan *deep learning* dan *computer vision* dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam analisis citra medis, termasuk pada deteksi *landmark* sefalogram (Yang et al., 2023). Salah satu arsitektur *deep learning* yang banyak digunakan adalah *Convolutional Neural Network* (CNN), yang memiliki kemampuan unggul dalam mengenali pola visual pada citra (Liu et al., 2023).

Salah satu metode berbasis CNN yang paling populer untuk deteksi objek adalah *You Only Look Once* (YOLO). YOLO terkenal karena kemampuannya melakukan deteksi objek secara *real-time* dengan satu kali proses inferensi (*single forward pass*) dengan tingkat akurasi yang tinggi (Kang & Kim, 2023). Algoritma ini terus mengalami pengembangan dari versi pertama hingga YOLOv11, yang dirilis pada 30 September 2024. Versi terbaru ini dirancang dengan arsitektur yang lebih efisien dan ringan, serta mampu melakukan berbagai tugas seperti deteksi objek, segmentasi, klasifikasi, dan estimasi pose (He et al., 2024).

Berbagai penelitian telah membuktikan keunggulan YOLO dalam aplikasi medis. (Prativi et al., 2024) menunjukkan bahwa YOLOv5 mampu mendeteksi sebagian besar *landmark* secara akurat hanya dengan 350 citra sefalogram lateral. (Tafala et al., 2024) melaporkan keberhasilan YOLOv8 pada dataset 400 citra, sementara (Hwang et al., 2021) memperoleh hasil komprehensif menggunakan YOLOv3 pada 2183 citra sefalogram. Pada YOLOv11, (Jegham et al., 2024) melaporkan peningkatan signifikan dalam segmentasi objek dibandingkan YOLOv10, terutama dalam hal efisiensi komputasi dan kecepatan inferensi. Bahkan pada aplikasi non-medis, YOLOv11 terbukti efisien dalam deteksi objek secara *real-time* dengan jumlah data terbatas (Aguswandi et al., 2025).

YOLOv11 bekerja dengan cara membagi citra input menjadi beberapa wilayah kecil, di mana setiap wilayah dievaluasi untuk menentukan keberadaan objek. Wilayah yang terdeteksi memuat objek akan menghasilkan prediksi *bounding box* yang merepresentasikan lokasi objek tersebut. Setiap *bounding box* ditentukan oleh parameter koordinat pusat (x, y), lebar (w), tinggi (h), serta nilai *confidence score* yang menunjukkan tingkat keyakinan model terhadap keberadaan objek pada area tersebut.

Keunggulan utama YOLOv11 terletak pada kecepatan dan efisiensinya dalam proses deteksi, yang dilaporkan mampu mencapai hingga 180 frame per-second pada konfigurasi optimal. Selain itu, arsitektur YOLOv11 mendukung berbagai deteksi adaptif yang memungkinkan pengenalan objek dengan variasi ukuran secara lebih presisi. Secara umum, alur kerja YOLOv11 ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Algoritma kerja YOLOv11
(Batubara & Awangga, 2020)

Meskipun YOLOv11 menunjukkan performa yang unggul dalam berbagai aplikasi deteksi citra medis, masih terdapat beberapa tantangan dalam pengembangannya pada citra sefalogram, seperti variasi struktur anatomi antarpasien, perbedaan resolusi citra, serta gangguan visual seperti *noise* dan distorsi geometris. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengimplementasikan algoritma YOLOv11 dalam mendeteksi *landmark* anatomi secara otomatis pada citra sefalogram lateral. Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi diagnosis ortodontik, serta dapat menjadi langkah awal dalam pengembangan sistem berbasis *Artificial Intelligence* (AI) di bidang kedokteran gigi, khususnya di Rumah Sakit Gigi dan Mulut (RSGM) Universitas Andalas.

II. METODE

2.1 Pengumpulan Dataset

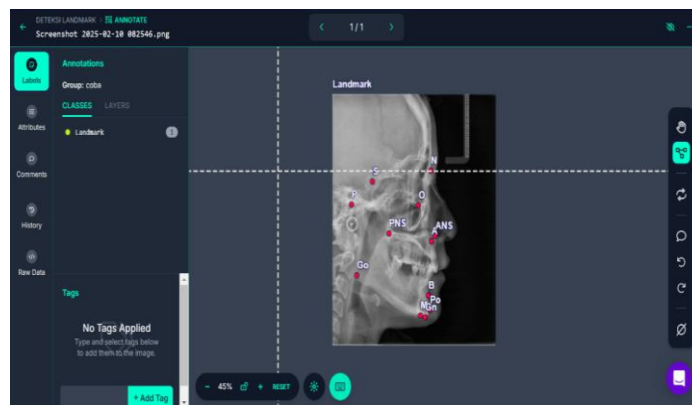
Pengumpulan dataset penelitian berupa citra digital sefalogram lateral berformat PDF sebanyak 50 citra pasien yang diperoleh dari Instalasi Radiologi RSGM Universitas Andalas pada periode Januari 2024 hingga Februari 2025. Penggunaan citra digital sefalogram lateral pada penelitian ini dikarenakan citra tersebut dapat menampilkan keseluruhan struktur kraniofasial secara jelas sehingga dapat digunakan dalam proses identifikasi *landmark* ortodontik. Contoh citra sefalogram yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 2, yang memperlihatkan struktur tulang, rahang, dan gigi pasien.



Gambar 2 Citra sefalogram lateral
(Sumber: RSGM UNAND)

2.2 Proses Labelling dan Augmentasi

Proses *labeling* dilakukan menggunakan *platform roboflow* untuk memberikan anotasi terhadap 12 *landmark* anatomi kraniofasial pada citra sefalogram lateral. Tahapan diawali dengan membuat kerangka (skeleton) sebagai acuan pemetaan posisi 12 *landmark* yang akan dianotasi. Seluruh *landmark* dianotasi dalam satu *bounding box* yang disesuaikan dengan anatomi kraniofasial berdasarkan standar *American Board of Orthodontics* (ABO), yaitu standar yang digunakan dalam bidang ortodontik untuk menentukan *landmark* anatomi pada citra sefalogram, sehingga hasil anotasi sesuai dengan anatomi kraniofasial yang sebenarnya. Seluruh anotasi kemudian divalidasi dan dikoreksi oleh tiga dokter gigi spesialis ortodontik untuk memastikan akurasi dan konsistensi anotasi. Proses labeling landmark pada *platform roboflow* ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu dengan menempatkan titik-titik landmark ortodontik pada struktur anatomi kraniofasial sesuai posisi anatomi yang telah ditentukan.



Gambar 3 Labeling landmark pada *platform roboflow*

Setelah proses *labeling*, dilakukan proses augmentasi citra untuk meningkatkan jumlah serta variasi dataset. Teknik augmentasi yang diterapkan meliputi transformasi *grayscale* sebesar 25%, penyesuaian *saturation* sebesar 25%, *brightness* sebesar 20%, dan *exposure* sebesar 15%, serta penambahan efek blur sebesar 1,5px dan *noise* sebesar 1,25%. Proses augmentasi ini meningkatkan jumlah dataset dari 50 citra menjadi 110 citra, sekaligus mensimulasikan berbagai kondisi pencitraan klinis, sehingga meningkatkan kemampuan generalisasi model.

2.3 Implementasi YOLOv11

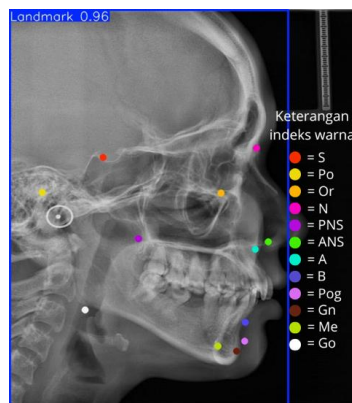
Implementasi YOLOv11 dilakukan pada data yang telah melalui proses *labeling* dan augmentasi untuk mendeteksi *landmark* anatomi pada citra sefalogram lateral. Proses implementasi YOLOv11 dilakukan pada *platform kaggle* dengan varian model “*yolov11s-pose*”, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 4 Proses implementasi YOLOv11 pada *platform kaggle*

III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil implementasi YOLOv11 menunjukkan bahwa model mampu mengidentifikasi lokasi *landmark* anatomi pada citra sefalogram lateral menggunakan metode deteksi objek berbasis titik kunci,

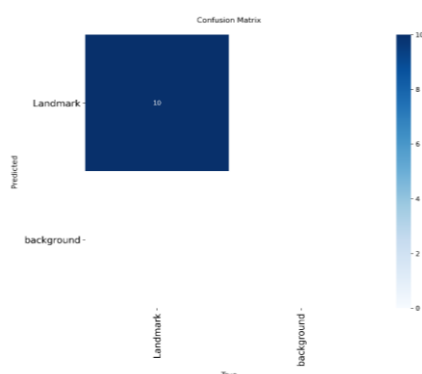
seperti *Sella*, *Nasion*, dan *Gonion*, termasuk pada citra dengan variasi kontras dan tingkat *noise* yang berbeda. Setiap hasil deteksi *landmark* disertai dengan nilai *confidence score* yang menunjukkan tingkat keyakinan model terhadap keberadaan *landmark*. Contoh hasil deteksi *landmark* setelah diimplementasikan menggunakan YOLOv11 dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Hasil deteksi *landmark* dengan implementasi YOLOv11

Gambar 5 menunjukkan hasil deteksi otomatis *landmark* pada citra sefalogram lateral yang berhasil diidentifikasi oleh model YOLOv11 pada struktur kraniofasial pasien. Setiap *landmark* ditampilkan menggunakan label dari masing-masing landmark ortodontik, yaitu Setiap landmark ditampilkan menggunakan warna yang berbeda untuk membedakan jenis landmark ortodontik, yaitu *Sella* (S), *Porion* (Po), *Orbitale* (Or), *Nasion* (N), *Posterior Nasal Spine* (PNS), *Anterior Nasal Spine* (ANS), *Point A* (A), *Point B* (B), *Pogonion* (Pog), *Gnathion* (Gn), *Menton* (Me), dan *Gonion* (Go).

Evaluasi performa model dilakukan menggunakan *confusion matrix* untuk menilai kemampuan YOLOv11 dalam mengidentifikasi 12 *landmark* anatomi pada citra sefalogram lateral. Tabel *confusion matrix* terdiri dari empat komponen utama, yaitu *True Positive* (TP), *True Negative* (TN), *False Positive* (FP), dan *False Negative* (FN), di mana masing-masing menggambarkan keberhasilan maupun kegagalan YOLOv11 dalam mengidentifikasi *landmark* pada citra sefalogram lateral. *Confusion matrix* yang dihasilkan YOLOv11 dalam mengidentifikasi *landmark* pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Confusion matrix yang dihasilkan YOLOv11

Visualisasi *confusion matrix* pada Gambar 6 menunjukkan dominasi nilai pada diagonal utama berwarna biru gelap dengan nilai 10, yang menandakan bahwa YOLOv11 berhasil mengidentifikasi seluruh dataset pengujian dengan benar (*True Positive*). Sementara itu, seluruh bagian *confusion matrix* di luar diagonal utama menunjukkan nilai 0, sehingga tidak ditemukan kesalahan deteksi berupa *False Positive* maupun *False Negative*. Pada penelitian ini, *True Positive* (TP) merupakan kondisi ketika model berhasil mendeteksi keberadaan suatu *landmark* dan hasil deteksi tersebut benar sesuai dengan posisi *landmark* yang sebenarnya. *True Negative* menggambarkan kondisi ketika model tidak mendeteksi adanya *landmark*, dan pada citra tersebut memang tidak terdapat *landmark* yang relevan. Sementara itu, *False Positive* adalah kondisi ketika model mendeteksi adanya *landmark*, padahal sebenarnya *landmark* tersebut tidak ada. Sebaliknya, *False Negative* terjadi ketika model gagal mendeteksi *landmark* yang sebenarnya ada pada citra sefalogram lateral.

Berdasarkan hasil evaluasi *confusion matrix* dan perhitungan performa model diperoleh nilai akurasi, presisi, *recall*, dan *F-score* masing-masing sebesar 1,0 serta nilai *mean Average Precision* (mAP) sebesar 0,995. Nilai tersebut diperoleh dari hasil pengujian model YOLOv11 dalam mendeteksi 12 *landmark* anatomi pada citra sefalogram lateral. Nilai yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model memiliki performa deteksi yang baik. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Prativi et al. (2024) dan Tafala et al. (2024) yang menunjukkan bahwa algoritma YOLO memiliki kemampuan yang baik dalam mendeteksi landmark pada citra sefalogram lateral. Selain itu, penelitian Jegham et al. (2024) juga melaporkan bahwa YOLOv11 memiliki peningkatan performa dalam efisiensi komputasi dan kecepatan inferensi dibandingkan versi sebelumnya. Meskipun demikian, hasil yang mendekati sempurna ini berpotensi mengindikasikan overfitting, yaitu kondisi ketika model bekerja sangat baik pada data penelitian, tetapi belum tentu memiliki performa yang sama pada data baru dengan variasi berbeda. Oleh karena itu, diperlukan validasi lanjutan dengan dataset yang lebih besar dan bervariasi untuk memastikan kemampuan generalisasi serta relevansi klinis dari model yang dikembangkan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengidentifikasian *landmark* pada citra sefalogram lateral dengan implementasi YOLOv11, dapat disimpulkan bahwa YOLOv11 mampu melakukan deteksi *landmark* secara otomatis dengan performa kuantitatif yang baik, ditunjukkan dengan nilai akurasi, presisi, *recall*, dan *F-score* yang bernilai 1,0, serta nilai *mean Average Precision* (mAP) sebesar 0,995. Namun, nilai performa kuantitatif yang mendekati sempurna tersebut mengindikasikan adanya potensi *overfitting* karena keterbatasan jumlah dan variasi citra dataset. Oleh karena itu, diperlukan penyempurnaan lanjutan untuk mendukung perencanaan perawatan yang lebih optimal di bidang ortodontik. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi langkah awal dalam pengembangan sistem deteksi *landmark* berbasis *Artificial Intelligence* (AI) yang berpotensi mendukung perencanaan perawatan ortodontik secara lebih efisien dan objektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tidak ada.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguswandi, L. H., Triwijoyo, B. K., & Martono, G. H. (2025). Smart Parking Space Detection Using Advanced Deep Learning Techniques. *Journal of Artificial Intelligence and Software Engineering (J-AISE)*, 5(1), 198–204. <https://doi.org/10.30811/jaise.v5i1.6473>
- Batubara, N. A., & Awangga, R. M. (2020). *Tutorial Object Detection Plate Number with Convolution Neural Network (CNN)* (Pertama). Kreatif Industri Nusantara. <https://books.google.co.id/books?id=JAgHEAAAQBAJ>
- He, L., Zhou, Y., & Liu, L. (2024). Research and Application of YOLOv11-Based Object Segmentation in Intelligent Recognition at Construction Sites. *MDPI*, 14(12), 1–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings14123777>

- Hwang, H. W., Moon, J. H., Kim, M. G., Donatelli, R. E., & Lee, S. J. (2021). Evaluation of automated cephalometric analysis based on the latest deep learning method. *Angle Orthodontist*, 91(3), 329–335. <https://doi.org/10.2319/021220-100.1>
- Jegham, N., Koh, C. Y., Abdelatti, M., & Hendawi, A. (2024). *Evaluating the Evolution of YOLO (You Only Look Once) Models: A Comprehensive Benchmark Study of YOLO11 and Its Predecessors*. 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.00201>
- Juneja, M., Garg, P., Kaur, R., Manocha, P., Batra, S., Singh, P., Singh, S., & Jindal, P. (2021). A review on cephalometric landmark detection techniques. *Biomedical Signal Processing and Control*, 66, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102486>
- Kang, C. H., & Kim, S. Y. (2023). Real-time object detection and segmentation technology: an analysis of the YOLO algorithm. *JMST Advances*, 5(2), 69–76. <https://doi.org/10.1007/s42791-023-00049-7>
- Kasinathan, G., Kumar, S., Kommi, P. B., Sankar, H., & Sabapathy, S. (2017). Reliability in Landmark Plotting between Manual and Computerized Method - A Cephalometric Study. *International Journal of Scientific Study*, 4(12), 2–7. <https://doi.org/10.17354/ijss/2017/100>
- Khalid, M. A., Khurshid, A., Zulfiqar, K., Bashir, U., & Fraz, M. M. (2024). A two-stage regression framework for automated cephalometric landmark detection incorporating semantically fused anatomical features and multi-head refinement loss. *Expert Systems with Applications*, 255, 124840. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124840>
- Lee, H. T., Chiu, P. Y., Yen, C. W., Chou, S. T., & Tseng, Y. C. (2024). Application of artificial intelligence in lateral cephalometric analysis. *Journal of Dental Sciences*, 19(2), 1157–1164. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2023.12.006>
- Li, S., Guo, Z., Lin, J., & Ying, S. (2022). Artificial Intelligence for Classifying and Archiving Orthodontic Images. *BioMed Research International*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/1473977>
- Liu, J., Zhang, C., & Shan, Z. (2023). Application of Artificial Intelligence in Orthodontics: Current State and Future Perspectives. *Healthcare (Switzerland)*, 11(20), 1–27. <https://doi.org/10.3390/healthcare11202760>
- Londono, J., Ghasemi, S., Hussain Shah, A., Fahimipour, A., Ghadimi, N., Hashemi, S., Khurshid, Z., & Dashti, M. (2023). Evaluation of deep learning and convolutional neural network algorithms accuracy for detecting and predicting anatomical landmarks on 2D lateral cephalometric images: A systematic review and meta-analysis. *Saudi Dental Journal*, 35(5), 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.05.014>
- Prativi, S. A., Suksmono, A. B., Rajab, T. L. E., Danudirdjo, D., & Laviana, A. (2024). Automatic landmark detection in cephalometric lateral radiograph using deep learning one-stage detectors. *2024 14th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, 67–72. <https://doi.org/10.1109/ICSET63729.2024.10775273>
- Tafala, I., Ben-Bouazza, F. E., Edder, A., Manchadi, O., Et-Taoussi, M., & Jioudi, B. (2024). Cephalometric Landmarks Identification Through an Object Detection-based Deep Learning Model. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(2), 859–867. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0150286>
- Yang, S., Song, E. S., Lee, E. S., Kang, S. R., Yi, W. J., & Lee, S. P. (2023). Ceph-Net: automatic detection of cephalometric landmarks on scanned lateral cephalograms from children and adolescents using an attention-based stacked regression network. *BMC Oral Health*, 23(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03452-7>
- Zhao, C., Yuan, Z., Luo, S., Wang, W., Ren, Z., Yao, X., & Wu, T. (2023). Automatic recognition of cephalometric landmarks via multi-scale sampling strategy. *Heliyon*, 9(6), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17459>