

基于关键点邻域分析的头影图像标尺刻度度量*

王龙** 熊珍珍

广东东软学院人工智能学院, 佛山 528225

摘 要 在基于头影测量的正畸诊断和治疗过程中, 对头影图像关键点间距离等参数的精确测量, 可以在病理评估和治疗决策中起着重要的作用。但是人工测量费时费力且容易产生多变性, 因此实现关键点间的自动距离测量具有重要的现实意义。本文提出了一种自适应头影图像亚像素级标尺检测与刻度度量算法, 首先基于关键点检测和邻域特征相似性分析等方法准确提取标尺区域, 其次采用最小二乘法拟合计算出标尺的倾斜角度, 再根据倾斜角度对标尺区域进行倾斜校正, 最后采用傅里叶分析实现亚像素级的标尺刻度度量, 进而可应用于头影图像分析。实验结果表明, 该方法可以适配不同场景下的头影图像标尺检测与刻度度量。

关键字 头影图像分析, 标尺检测与刻度度量, 关键点检测, 傅里叶分析

Cephalometric Ruler Scale Measurement Based on Key Point Neighborhood Analysis *

WangLong** Xiong Zhenzhen

College of Artificial Intelligence,
Neusoft Institute Guangdong,
Foshan, 528225, China

Abstract—In the process of the cephalometry orthodontic diagnosis and treatment, precise measurement of parameters such as distances between landmark points plays a crucial role in pathological assessment and therapeutic decision. However, manual measurements are time-consuming and prone to variability, so making the automation of inter-landmark distance measurement is very important and practical significance. This paper proposes an adaptive subpixel-level ruler detection and scale calibration algorithm for cephalometric images. The method first accurately extracts the ruler region using keypoint detection and neighborhood feature similarity analysis. Next, the tilt angle of the ruler is computed with least squares fitting, and then make the ruler region tilt correction by the tilt angle. Finally, Fourier analysis is applied to achieve subpixel-level ruler scale measurement and then can be applied to cephalometric image analysis. Experimental results demonstrate that the proposed approach robustly adapts to diverse cephalometric imaging scenarios for both ruler detection and scale calibration.

Keywords—Cephalometric Image Analysis, Ruler Detection And Scale Calibration, Keypoint Detection, Fourier Analysis

1 引 言

头影测量是正畸和正颌外科中不可或缺的诊断工具, 是治疗计划制定和手术矫正常用的标准工具^[1-2]。在头影测量分析中, 当颅骨及周围软组织的关键点被识别定位出来^[3], 通过嵌入在头影图像中的标尺信息, 可以计算出关键点之间的连线距离和角度等参数^[4]。这些参数有助于牙齿畸形的精确定位, 从而制定精确的治疗计划。在传统的头影图像测量分析中, 正畸医生通过在头影图像上手动识别关键点^[4-5]后, 通常使用游标卡尺等测量工具手动计算这些关键点之间的角度、距离或比例关系^[6]。然后将这些测量值与规范参考值进行比较, 以制定治疗计划。然而, 使用游标卡尺或

类似工具的人工测量容易受到不稳定因素的影响, 导致测量存在误差, 影响诊断的准确性^[7]。此外, 手工测量本质上是耗时和低效的。

随着计算机技术的迅速发展, 人工智能算法现在可以自动检测头影图像中的标尺信息。通过标尺刻度识别精确地确定像素与毫米的比值 (pixel/mm), 可以实现关键点之间的连线距离和角度参数的完全自动化测量^[6]。目前标尺刻度检测技术主要有基于图像算法技术与基于深度学习技术两种方式。如 Guo 等^[9]首先通过回归树投票检测并裁剪标尺感兴趣区域, 然后检测标尺角点并旋转至垂直方向, 最后采用像素追踪法定位首末刻度以计算像素长度。该方法的平均刻度精度范围控制在 1mm 以内; Jiang 等^[10]基于深度学习方法, 研究构建了一个两阶段级联卷积神经网络, 在头影图像上同时定位蝶鞍点、鼻根点以及两个标尺标

*基金资助: 本文得到广东东软学院 2025 年质量工程项目资助

**通讯作者: 王龙 wanglong@nuit.edu.cn。

记点来辅助标尺长度预测,而非单纯依赖标尺点的视觉特征,标尺刻度误差小于 0.3 mm,但该方法对图像质量要求较高。总之,与传统的手工测量方法相比,基于计算机技术的方法显著提高了头影测量分析的效率和准确性^[11]。

基于头影图像的标尺刻度度量技术,既要检测出标尺的刻度区域,并保证高检测率,也要对刻度区域进行精度的度量,保证较高的亚像素级精度。因此,本文提出了一种利用关键点检测和基于特征聚类的头影图像自动标尺刻度测量算法。该方法首先通过使用邻域特征相似性度量对关键点进行聚合来准确定位标尺区域,对检测到的标尺区域进行傅里叶分析,可以获取亚像素级别的标尺刻度信息。实验结果表明,与现有方法相比,本文选用的方法在保持标尺刻度区域检测成功率的同时,测量精度也获得了提高。

2 头影图像预处理

2.1 各向异性扩散滤波

在头影图像标尺区域中,其刻度区域具有规则的形态特征,因此可以通过稳健的关键点提取方法检测出标尺及刻度区域。但由于图像分辨率的不同^[12],特别是低分辨率会导致刻度区域模糊,影响定量测量的精度。为了解决这一问题,采用各向异性扩散滤波作为关键的预处理步骤,选择性地增强标尺刻度边缘特征,优化刻度信息的量化准确性。假设头影图像灰度图为 $I(x,y)$,各向异性扩散滤波算法表达式如下:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}(c(x,y,t)\nabla I) = \nabla c \nabla I + c(x,y,t)\Delta I \quad (1)$$

$$c(\|\nabla I\|) = e^{-\left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2} \quad (2)$$

式中: Δ 表示 Laplacian 算子, ∇ 表示梯度算子, $c(x,y,t)$ 表示扩散系数,控制扩散速率, K 表示热传导系数,调节边缘敏感性, t 表示扩散时间。因此,各向异性扩散滤波计算图像梯度,可以在扩散过程中保留边缘细节,同时平滑噪声。该方法有效地增强了头影图像中标尺区域的刻度特征,如图 1 所示。

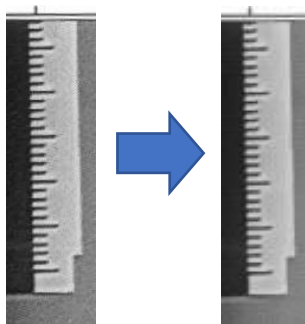


图 1 原图像的标尺区域经过各向异性扩散滤波后的效果

3 基于关键点相似度的标尺区域提取

3.1 关键点检测

在头影图像中,标尺区域可能出现在图像中颅骨左右两侧或存在倾斜角度等位置情况,因此检测标尺区域算法需要同时具有平移和旋转不变性。因此,本文算法采用关键点检测进行标尺区域定位。基于 harris 角点检测算法来可靠地识别标尺刻度区域,同时保持对位置和角度变化的鲁棒性。

假设图像灰度图为 $I(x,y)$,当使用一个带有位移向量 $[u,v]$ 的滑动窗口时,通过计算强度变化度量 $E(u,v)$ 判断窗口位置是否属于关键点:

$$E(u,v) = \sum_{x,y} w(x,y) [I(x+u,y+v) - I(x,y)]^2 \quad (3)$$

对公式(3)进行一阶泰勒展开,得到公式(4)和(5)的表达式:

$$E(u,v) = \sum_{x,y} w(x,y) [u^2 I_x^2 + 2uv I_x I_y + v^2 I_y^2] \quad (4)$$

$$E(u,v) = [u,v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $M = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$, I_x 和 I_y 分别为水平和垂直强度梯度。

当矩阵 M 的特征值 λ_1 和 λ_2 都表现出较大的数量级时,这表明在像素 (x,y) 处沿所有方向的强度变化显著,从而可认为其为一个关键点,如图 2 所示。

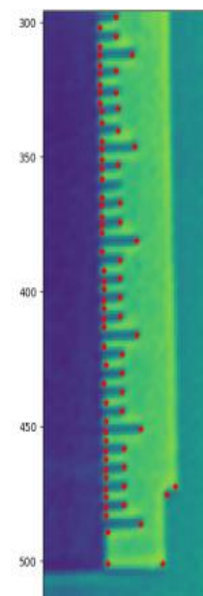


图 2 将计算得到的关键点进行标记

3.2 基于关键点相似度聚类的标尺区域检测

标尺区域上关键点既呈现密集分布又呈现周期性分布, 刻度区域关键点也具有明显均匀的纹理。此双重规则性能够通过综合分析局部纹理特征及其空间分布特征实现标尺刻度区域的稳健提取。

(1) 计算刻度区域纹理特征均值。标尺刻度区域表现出均匀独特的纹理特性, 从而实现了平均纹理特征值的计算。实现以下的计算工作流程:

首先, 计算每个关键点邻域窗口的质心, 并沿质心的垂线将窗口划分为左右两个子区域, 利用 Sobel 算子计算两个子区域的梯度幅值, 如图 3 所示。

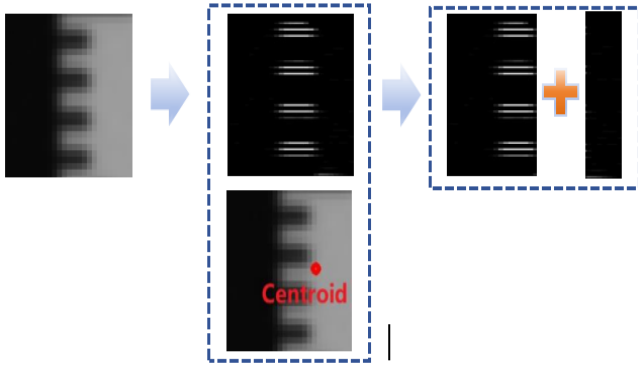


图 3 基于关键点邻域分析量化标尺刻度的特异性特征

其次, 将左右两个子区域的梯度幅值投影到纵轴上, 生成离散序列 $a_n = \{a_1, \dots, a_n\}$ 和 $b_n = \{b_1, \dots, b_n\}$, 通过序列的元素比较得到纹理特征 d , 其表达式如式(6)所示:

$$d = \frac{1}{e^{\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|}} \quad (6)$$

最后, 由于标尺刻度区域的纹理形态相似, 通过计算 $d_{\text{mean}} = \text{mean}(d_1, \dots, d_n)$ 对纹理特征进行归一化处理。

(2) 关键点邻域相似度检测。首先对检测到的每个关键点区域提取纹理特征, 然后将这些特征与预先计算的标尺刻度的平均纹理值进行比较, 保留满足预定义相似度阈值的关键点用于进一步分析。然后判断在该关键点的邻近范围内是否存在邻近关键点, 每个相邻关键点根据相同纹理相似度阈值进行评估, 并保留满足阈值的关键点, 该迭代过程可以构建关键点连通域, 将空间相邻且纹理一致的关键点进行分组, 从而实现聚类, 降低了关键点的数量。如图 4 所示。

(3) 标尺区域提取。遍历每个关键点连通域, 基于聚合组成关键点的坐标来计算其最小包围盒。由于头影图像标尺呈现垂直方向矩形形态的几何约束, 采用椭圆拟合方法对最小包围盒进行验证, 提取椭圆的长轴 a 和短轴 b 长度, 然后将纵横比(a/b)与预定阈值进行比较, 满足阈值的纵横比的连通域被分类为标尺区域, 如图 5 所示。 a 和 b 均可由式(7)(8)计算得到。

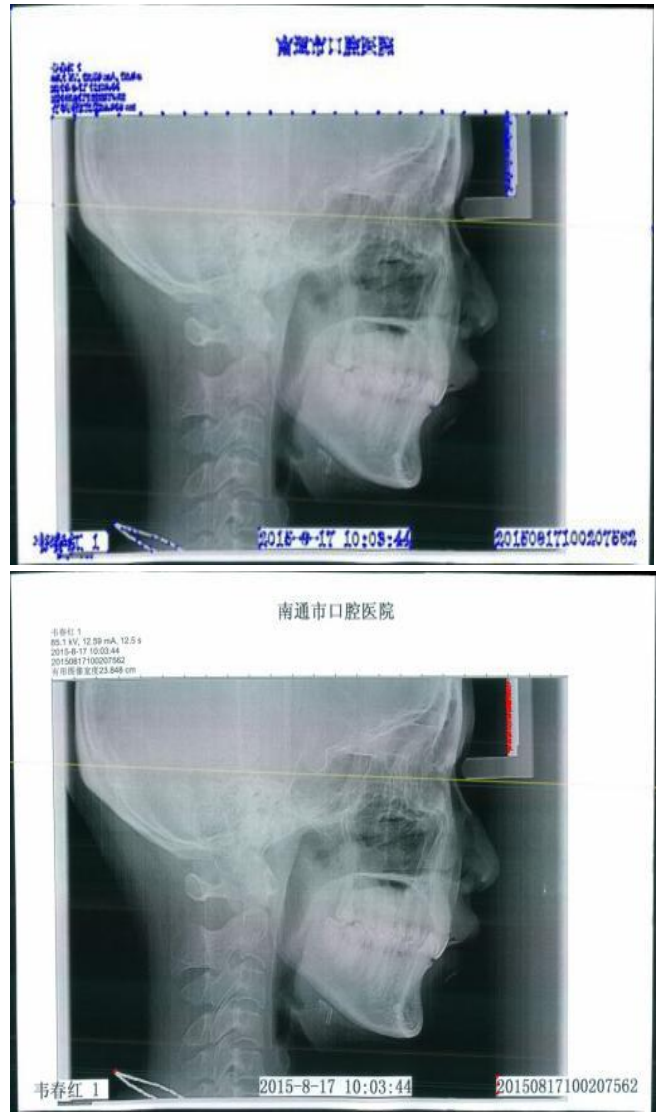


图 4 上图: 对初步检测的关键点进行标记 下图: 关键点经过邻域相似度聚类后, 只留下了标尺区域的关键点标记



图 5 对标尺刻度关键点做椭圆拟合

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (7)$$

公式(7)可以转化为公式(8):

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = 1 \quad (8)$$

式中: $P = \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b^2} \end{bmatrix}$, 则可以同时计算特征值 λ_1 和 λ_2 ,

从而 $a = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}, b = \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}$ 。

4 头影图像标尺刻度的度量分析

4.1 头影图像标尺刻度的倾斜角度计算

在头影图像中, 潜在的标尺偏角可能会影响测量的准确性。因此, 需要进行倾斜精校正, 以保证标尺刻度信息的精确提取。

基于对检测到的标尺区域内关键点坐标的空间分布进行最小二乘法直线拟合, 可以确定标尺刻度的倾斜角度, 该拟合直线的倾角直接对应于标尺偏离参考轴的角度偏差。

假设头影图像标尺区域内有 n 组关键点, 其坐标分别为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, 这些关键点可以拟合为一个线性模型 $f(x) = kx + b$, 表示它们的空间分布。为了确定最优参数 k 和 b , 可以使用最小二乘法最小化目标函数 L , 定义如下:

$$L = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (9)$$

当目标函数 L 取最小值时, 基于梯度下降算法优化推导出线性方程的参数 k 和 b , 从而可以计算出拟合直线的倾斜角, 定量结果如图 6 所示。

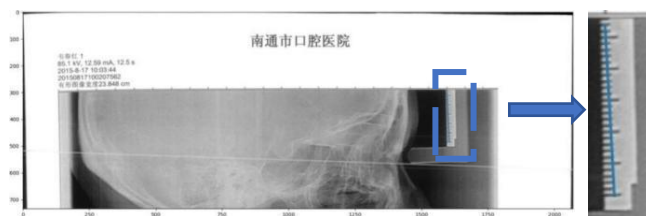


图 6 基于最小二乘法的关键点直线拟合倾斜角计算

4.2 倾斜校正

在确定标尺刻度区域的倾斜角度后, 基于仿射变换进行倾斜校正, 以实现精确的刻度信息。假设图像原点 $(0,0)$ 为旋转中心, 通过顺时针旋转 θ 度, 将图像上的每个像素点 $P_i(x_i, y_i)$ 变换到其校正位置 $P_j(x_j, y_j)$, 即公式(10):

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过对标尺刻度区域内的所有像素进行旋转变换, 实现刻度区域倾斜校正, 如图 7 所示。

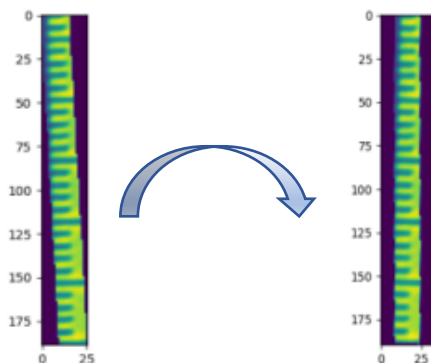


图 7 刻度区域的倾斜校正

4.3 基于傅里叶分析的标尺刻度度量

为了实现标尺刻度的精确度量, 对倾斜校正后的刻度区域基于傅里叶频谱分析进行度量。计算流程主要包括以下几个阶段:

(1) 基于一阶差分方法的刻度区域垂直梯度计算。

(2) 将梯度幅值剖面的垂直投影生成直方图曲线, 可以明显看出, 该直方图中的峰值位置与刻度的空间域位置精确对应。

(3) 提取梯度直方图极大值对应的位置坐标在整个刻度区域内呈现周期性振荡。对该波形进行傅里叶频谱分析揭示了主要频率成分, 其中基频 f_{max} 通过关系公式(11)表征了关键点间的间距:

$$\Delta x = \frac{N}{f_{max}} \quad (11)$$

式中: Δx 为每毫米像素, N 为空间波形的采样长度, 如图 8 所示。

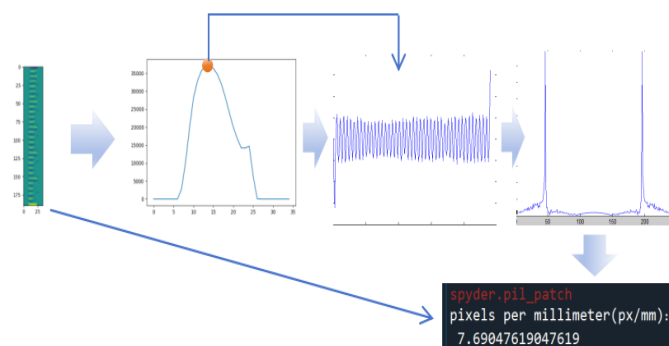


图 8 基于傅里叶频谱分析的高精度刻度测量

5 实验结果

应用本文所提出的方法可以在不同的头影图像中检测标尺的刻度区域，如图 9 所示。该方法在几何变化、部分遮挡场景和角度偏差等条件下保持了良好的标尺刻度检测能力。

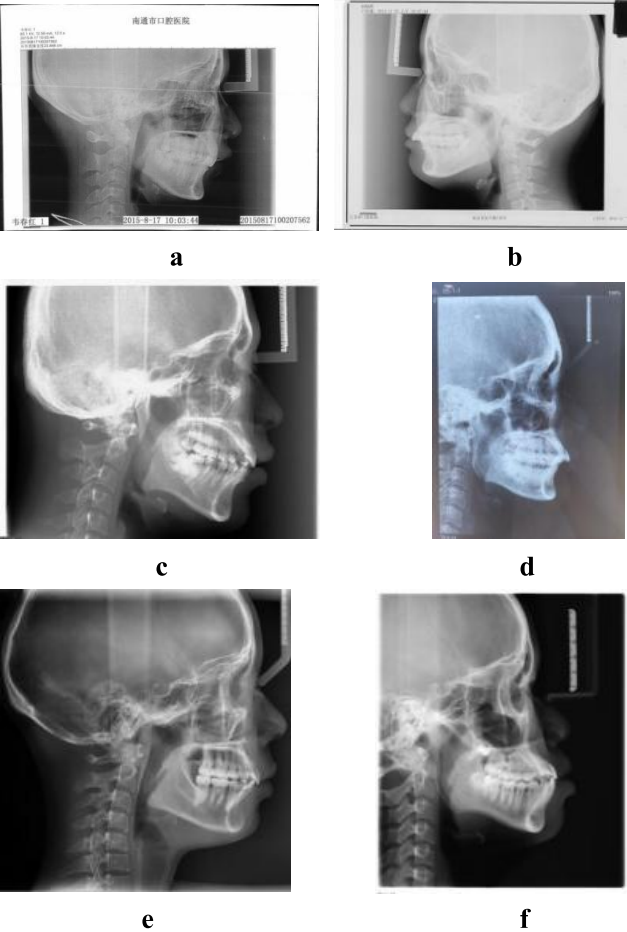


图 9 头影图像样本

5.1 检测精度对比

在获得刻度区域后，本文比较了傅里叶分析和基于均值计算方法的测量精度。首先通过一阶差分方法计算刻度区域的梯度，然后采用 Otsu 阈值法分割出标尺的刻度线，采用连通域标记法分析量化刻度线数目count，最后将检测到的标尺区域长度length除以刻度线数目count，计算刻度精度平均值average，公式(12)如下：

$$average=\frac{length}{count} \tag{12}$$

对两种方法检测得到的标尺刻度的测量精度进行对比分析，结果见表 1，可以观察到本文提出的方法取得了最佳的结果。

表 1 将两种方法的计算结果与手动测量的地面真实值(如图 9 所示的头影图像标尺刻度测量)进行比较分析

头影图像 标尺	实际测量值 (pix/mm)	傅里叶分析 (pix/mm)	平均值 (pix/mm)
a	7.75	7.69	7.44
b	10.44	10.43	10.57
c	2.95	2.93	2.89
d	5.88	5.82	5.96
e	10.48	10.40	10.37
f	4.51	4.43	4.65

6 结论

本文基于头影图像实现了一种亚像素级标尺刻度测量方法，对不同场景下的头影图像标尺都具有良好的检测效果和刻度测量精度。该方法具有以下特点：

- (1) 利用关键点检测结合邻域特征相似度评估的方法精确识别标尺刻度信息；
- (2) 为了减少潜在的标尺误差影响，采用最小二乘法计算标尺的倾斜角，然后进行倾斜校正，从而提高测量精度；
- (3) 采用傅里叶分析提取标尺刻度区域的主频分量，实现了亚像素级的测量精度。

参考文献

[1] Tenti F V. Cephalometric analysis as a tool for treatment planning and evaluation[J]. The European Journal of Orthodontics, 1981, 3(4): 241-245.

[2] Leonardi R, Giordano D, Maiorana F, Spampinato C. Automatic cephalometric analysis[J]. The Angle orthodontist, 2008, 78(1): 145-151.

[3] Jiang, Y., Li, Y., Wang, X., Tao, Y., Lin, J., Lin, H.: Cephalformer: Incorporating global structure constraint into visual features for general cephalometric landmark detection[C]. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. pp. 227 - 237. Springer (2022).

[4] Kiełczykowski M, Kamiński K, Perkowski K, Zadurska M, Czochrowska E. Application of Artificial Intelligence (AI) in a Cephalometric Analysis: A Narrative Review[J]. Diagnostics (Basel). 2023 Aug;13(16):2640.

[5] Rauniyar S, Jena S, Sahoo N, Mohanty P, Dash BP. Artificial Intelligence and Machine Learning for Automated Cephalometric Landmark Identification: A Meta-Analysis Previewed by a Systematic Review[J]. Cureus. 2023 Jun 25;15(6):e40934.

[6] Harris, C. and Stephens, M. A Combined Corner and Edge Detector[C]. Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, Manchester, 31 August-2 September 1988, 147-151.

- [7] Gao P, Lu K, Xue J, et al. A coarse-to-fine facial landmark detection method based on self attention mechanism[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020, 23: 926-938.
- [8] Juneja M, Garg P, Kaur R, et al. A review on cephalometric landmark detection techniques[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2021, 66: 102486.
- [9] J. Guo, S. Wang and H. Li, Automatic Calculation of Resolution in Lateral Cephalogram Based on Scale Mark Detection[C], 2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Suzhou, China, 2019, pp. 1-6.
- [10] Jiang F, Guo Y, Zhou Y, et al. Automated calibration system for length measurement of lateral cephalometry based on deep learning[J]. Physics in Medicine and Biology. 2022 Nov;67(22).
- [11] Payer, C., Štern, D., Bischof, H., Urschler, M.: Integrating spatial configuration into heatmap regression based cnns for landmark localization[J]. Medical image analysis 54, 207 - 219 (2019)
- [12] Lindner C, Wang CW, Huang CT, Li CH, Chang SW, Cootes TF. Fully Automatic System for Accurate Localisation and Analysis of Cephalometric Landmarks in Lateral Cephalograms[J]. Sci Rep. 2016 Sep 20;6:33581.