

面向视力筛查的移动端距离测量系统校准策略研究

——基于Vivo手机的实验验证

杨 盈, 钟惠文, 王 溯, 邓佳欣, 陶数数, 肖霄雨, 李继红*

吉首大学医学院, 湖南 吉首

收稿日期: 2026年8月11日; 录用日期: 2026年9月5日; 发布日期: 2026年9月16日

摘 要

目的: 探讨基于动态手势识别和距离测量的移动端视力筛查APP中距离测量功能的校准可行策略, 为提升视力筛查的准确性与便捷性提供科学依据。方法: 招募21名志愿者(7~20岁), 使用5款不同型号的Vivo智能手机在室内光线环境下, 以0.2 m为梯度, 在1.0 m~2.0 m的六个距离梯度下进行三次重复测量, 共获取1890份有效数据。记录APP显示距离与真实物理距离并计算校准系数 k 。采用变异系数(CV)、过原点线性回归(决定系数 R^2)、双因素方差分析(ANOVA)评估测量稳定性及影响因素; 计算平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE), 并结合Bland-Altman一致性分析对比统一校准与个性化校准的效果。结果: 个体内测量稳定性极高, 平均CV范围仅为0.51%~1.65%; APP显示距离与真实物理距离间存在极强的线性关系, 平均决定系数 R^2 高达0.9936。双因素方差分析显示, 手机型号($F=532.53, p<0.001$)与测试人员($F=27.51, p<0.001$)对测距系数的主效应均显著。在校准效果上, 采用全局统一系数校准的MAE为8.302, RMSE为10.87; 而采用个性化系数校准后, MAE降至1.15, RMSE降至1.71, 误差改善幅度达86.1%, Bland-Altman分析亦显示个性化校准具有极高的一致性。结论: 该APP测距系统线性度良好, 无需限定特定位置, 可采用“单点校准”。因手机型号与个体面部特征对测距系数影响显著, 不可套用统一系数, 基于特定个体的单点个性化校准为最优策略。

关键词

视力筛查, 距离测量, 校准策略

A Study on Calibration Strategies for Mobile Distance Measurement Systems for Vision Screening Applications

—Experimental Verification Using Vivo Smartphone Platforms

*通讯作者。

文章引用: 杨盈, 钟惠文, 王溯, 邓佳欣, 陶数数, 肖霄雨, 李继红. 面向视力筛查的移动端距离测量系统校准策略研究[J]. 交叉科学快报, 2026, 10(5): 1299-1308. DOI: 10.12677/isl.2026.105153

Ying Yang, Huiwen Zhong, Su Wang, Jiaxin Deng, Shushu Tao, Xiaoyu Xiao, Jihong Li*

Medical College of Jishou University, Jishou Hunan

Received: August 11, 2026; accepted: September 5, 2026; published: September 16, 2026

Abstract

Objective: This paper aims to investigate feasible calibration strategies for the distance measurement function of a mobile vision screening APP based on dynamic gesture recognition and distance measurement, and to provide evidence for improving screening accuracy and practicality. **Methods:** Twenty-one volunteers (aged 7~20 years) participated. Measurements were performed using five Vivo smartphone models under indoor lighting at six distance intervals (1.0~2.0 m, 0.2 m increments), with triplicate readings, yielding 1890 valid data points. The calibration coefficient k was derived from the APP-displayed and true distances. Coefficient of variation (CV), regression through the origin (R^2), and two-way ANOVA were used to assess stability and influencing factors. Mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) were calculated, and unified versus individualized calibration were compared via Bland-Altman analysis. **Results:** Intra-individual variability was minimal, with mean CV ranging from 0.51% to 1.65%. A strong linear correlation was found between APP-displayed and actual distances (mean $R^2 = 0.9936$). Two-way ANOVA showed significant main effects of smartphone model ($F = 532.53$, $p < 0.001$) and participant ($F = 27.51$, $p < 0.001$) on the coefficient. Unified calibration yielded MAE of 8.302 and RMSE of 10.87, whereas individualized calibration reduced these to 1.15 and 1.71, respectively, achieving an 86.1% error reduction. Bland-Altman analysis confirmed superior consistency for individualized calibration. **Conclusion:** The APP's distance measurement system demonstrates excellent linearity, supporting a single-point calibration approach without requiring a fixed position. Given the significant effects of device model and individual facial morphology, a universal coefficient is inappropriate. Individualized single-point calibration is recommended as the optimal strategy.

Keywords

Vision Screening, Distance Measurement, Calibration Strategies

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

近视是危害儿童视力健康的主要因素[1]。据 Holden 等预测,到 2050 年,全球将有 50%的人口患近视,即近视人口将达到近 50 亿。我国是儿童青少年近视率较高的国家之一,相关数据显示,2022 年我国学生近视率为 51.9%,小学生、初中生、高中生的近视率分别为 36.7%、71.4%和 81.2%,近视的发生呈现逐年上升的趋势[2]。近视已成为关乎青少年健康的重要公共卫生问题。在此前的研究中,已提出开发一款能够实现动态手势识别和距离测量的视力筛查 APP [3],现本文将基于人脸识别开源代码提出 APP 距离校准可行策略,以此解决不同个体距离识别差异性的问题。

在移动端测距技术领域,当前主流方案可归纳为四类:基于信号强度的 RSSI/BLE,成本低但易受环境干扰;基于飞行时间的 Wi-Fi RTT/FTM,稳定性较好但受限于非视距问题;超宽带 UWB,厘米级高精

度但需专用硬件[4]。本文提出的人脸视觉测距, 相比之下, 人脸测距的核心优势在于无需外部标签或专用硬件, 仅需单目摄像头即可完成近距离场景(如视力筛查)的距离估算, 人脸测距更聚焦于单次距离计算, 属于轻量级纯软件解决方案, 在低成本设备普及性与特定场景适用性上展现出独特价值。

2. 实验设计

2.1. 实验人员

本实验共招募 21 名志愿者参与实验, 年龄范围为 7 岁到 20 岁, 其中包括中小學生 18 名, 成年人 3 名。纳入标准: (1) 具备正常的理解与沟通能力, 能够听懂并配合实验人员的指令调整站位; (2) 能够自主保持头部及身体姿态相对静止, 配合完成各距离梯度的测量; (3) 受试者及监护人(针对未成年人)对实验流程充分知情并自愿签署知情同意书。排除标准: (1) 面部有明显遮挡(如过厚刘海遮挡眼部)或面部有严重影响图像识别的疤痕、畸形者; (2) 患有导致头部不自主晃动或无法保持静止的神经系统疾病或运动障碍者; (3) 因其他身体或精神原因无法配合完成实验测量流程者。

2.2. 实验设备

准备 Vivo S16、Vivo Y50、Vivo S18、Vivo S17t、Vivo Y100i 等五台不同型号的 Vivo 品牌手机以及卷尺(分度值: 1 mm)、三脚架等。

2.3. 实验环境

实验在室内光线恒定、不低于 300 lux 的环境中进行[5], 避免强直阳光或头顶强光直射摄像头, 以防产生眩光或面部阴影影响人脸关键点检测。地面保持平整, 背景墙壁尽量简洁, 减少杂乱背景对图像识别算法的干扰。实验期间保持环境安静, 避免受试者头部大幅度晃动。

2.4. 读数标准

当 APP 显示的实时距离数值稳定在设定值(m) ± 0.05 m 区间内, 且数值波动幅度小于 0.02 m 时, 判定为有效测量状态。读数时双眼平视度数平面。

2.5. 实验流程

21 名志愿者分别利用 5 台设备进行测量, 每次测量以 0.2 m 为梯度, 重复测量三次 1.0 m、1.2 m、1.4 m、1.6 m、1.8 m、2.0 m 六个距离梯度数值, 共收集 1890 个数据。测量前, 受试者手持手机或调整站位, 使 APP 显示距离落入设定值(m) ± 0.05 m 区间。保持姿态稳定, 记录 APP 显示的平均距离读数(D_{app})。同步使用卷尺记录真实物理距离(D_{real})。校准系数 k 计算公式为:

$$k = \frac{\sum \left(\frac{D_{real}}{D_{app}} \right)}{3}$$

2.6. 统计方法

采用 Python 及 Excel 进行数据统计分析与可视化。采用变异系数(CV)评估个体内及组间测量的稳定性与重复性, CV 值越小代表稳定性越高。采用过原点的线性回归分析 APP 显示距离(D_{app})与真实物理距离(D_{real})之间的线性关系, 并计算决定系数(R^2)。采用双因素方差分析(ANOVA)(随机区组设计, 以测试人员为区组)检验不同手机型号及不同测试人员对测距系数的影响主效应是否显著。在校准效果评价方面,

计算平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来量化校准精度, 并采用 Bland-Altman 一致性分析图评估统一系数校准与个性化系数校准的一致性界限与偏差趋势。以 $p < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

3. 人脸距离估算算法

3.1. 算法原理

系统采用 MediaPipe Face Mesh 模型提取人脸关键点, 并基于相似三角形原理(小孔成像模型)估算人脸到摄像头的真实物理距离。

3.2. 像素眼距计算

设两点的归一化坐标分别为 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) , 图像宽高为 $W \times H$, 则两点在图像中的像素坐标差为:

$$\Delta x = (x_1 - x_2)W, \quad \Delta y = (y_1 - y_2)H$$

通过欧氏距离公式计算双眼外眼角的像素间距:

$$L_{\text{pixel}} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

3.3. 相似三角形距离公式

根据小孔成像模型, 如图 1 所示, 真实距离 D 与像素眼距 L_{pixel} 成反比关系。设成年人双眼外眼角的真实物理间距为 $L_{\text{real}} = 0.10 \text{ m}$ (10 厘米), 相机像素焦距为 $f = 800 \text{ px}$ (经验值), 则距离计算公式为:

$$D = (L_{\text{real}} \times f) / L_{\text{pixel}}$$

代入固定参数后, 公式可简化为:

$$D = 800 / L_{\text{pixel}} \quad (\text{单位: 米})$$

最终结果通过 $\text{round}(D, 2)$ 保留两位小数返回。当未检测到人脸或像素眼距过小 ($< 1e-6$) 时, 返回 0.0 表示距离无效。

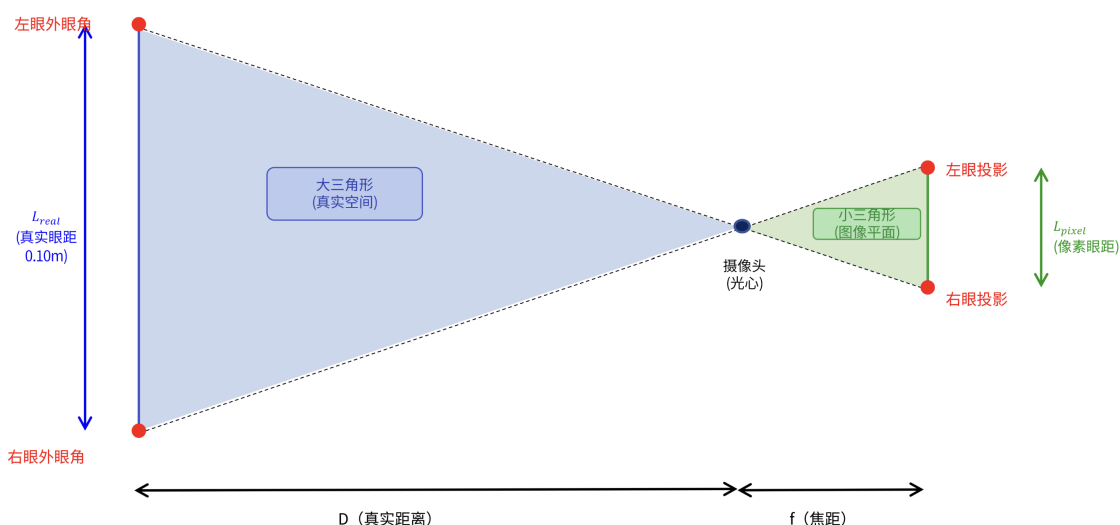


Figure 1. Schematic diagram

图 1. 原理图

4. 结果

4.1. 个体内测量稳定性(CV)描述性统计

由表 1 可知, 在 1890 次距离测量中, 不同型号的手机在不同距离梯度下重复进行距离测量的平均变异系数的均值范围为 0.51%~1.65%。

Table 1. Mean coefficient of variation (CV, %) of different phone models at various distance intervals
表 1. 各手机型号在不同距离梯度下的平均变异系数(CV, %)

手机型号	100 cm	120 cm	140 cm	160 cm	180 cm	200 cm	均值
Vivo S17t	0.85	0.62	1.15	0.51	0.72	0.65	0.75
Vivo S18	1.32	1.05	0.86	1.24	0.98	0.85	1.05
Vivo Y50	1.65	1.48	1.35	1.22	1.40	1.15	1.38
Vivo Y100	1.18	0.95	1.02	1.35	1.15	1.28	1.16
Vivo S16	0.92	0.85	0.76	1.15	0.88	0.95	0.92
均值	1.18	0.99	1.03	1.09	1.03	0.98	-

4.2. 各测试员校准系数随距离变化全景

图 2 展示了 21 位测试人员分别利用 5 台设备测量所得共 105 组测试校准系数随距离变化的折线全景图。从图中可以直观看出, 以变异系数(CV)作为稳定性评价标准: $CV < 5\%$ 判定为“稳定”, $5\% \leq CV < 10\%$ 为“较稳定”, $CV \geq 10\%$ 为“不稳定”。统计结果显示, 105 组中 103 组(98.1%)的 CV 小于 5%, 属于稳定等级; 2 组(1.9%)属于较稳定等级; 无组达到不稳定标准。

4.3. 各手机型号测距系数变异系数

由图 3 可知, 不同型号手机的测距系数均值范围为 0.5353~0.7020。VivoS17t 的平均系数最高, VivoY50 的平均系数最低。个体间变异系数范围为 4.78%~5.78%, 平均 CV 为 5.26%。

4.4. 各测试人员测距系数变异系数

由图 4 可知, 个体间变异系数范围为 7.03%~12.11%, 平均 CV 为 10.71%。

4.5. 组内系数稳定性

如图 5 所示, 过原点线性回归的平均决定系数 R^2 为 0.9936, 进一步证实了 APP 显示距离与现实距离之间存在极强的线性关系。

4.6. 双因素方差分析(ANOVA)

以手机型号和测试人员为两个因素, 进行双因素方差分析, 结果见表 2。双因素方差分析(随机区组设计, 以测试人员为区组)结果显示: 手机型号的主效应显著($F = 532.53, p = 0.0000e+00$), 表明不同手机型号的测距系数存在显著差异; 测试人员的主效应显著($F = 27.51, p = 0.0000e+00$), 表明不同测试人员的测距系数存在显著差异。

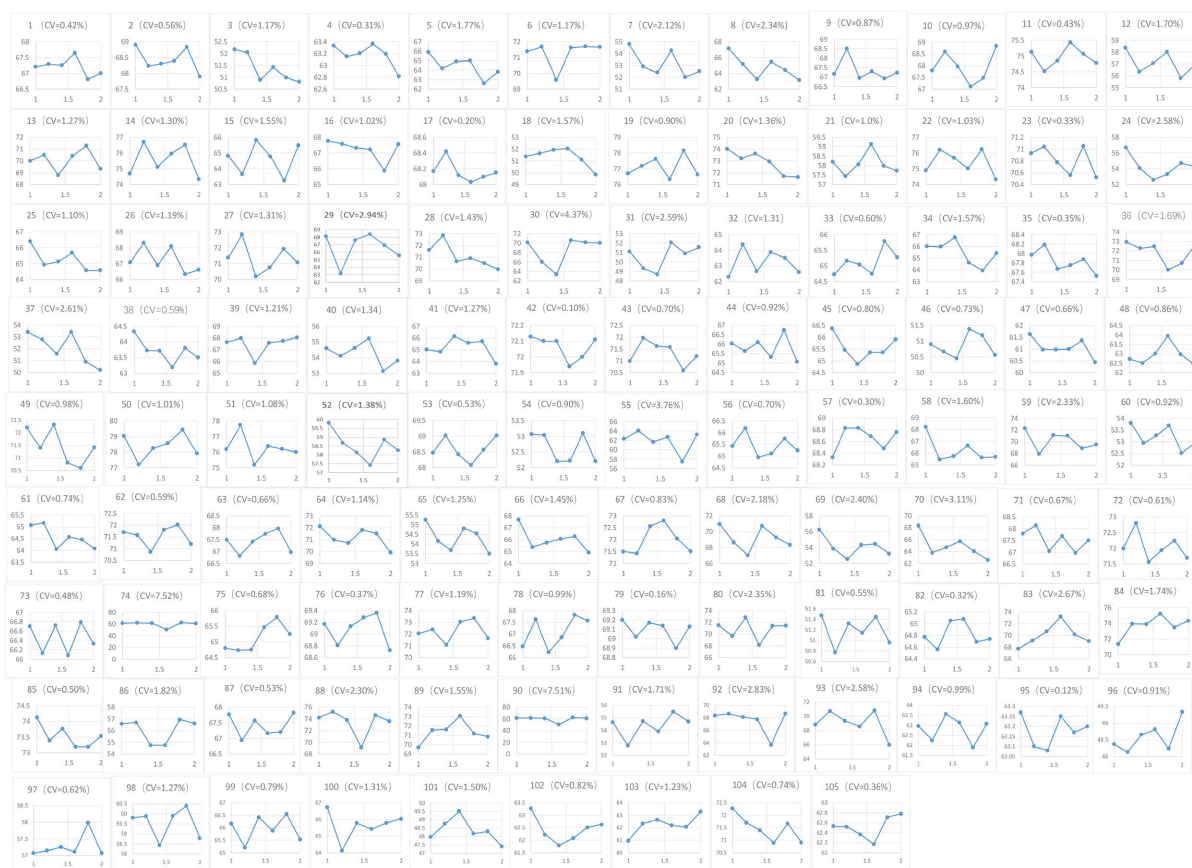


Figure 2. Calibration coefficients and coefficients of variation across distance for each group of testers

图 2. 各组测试人员校准系数随距离变化趋势及变异系数

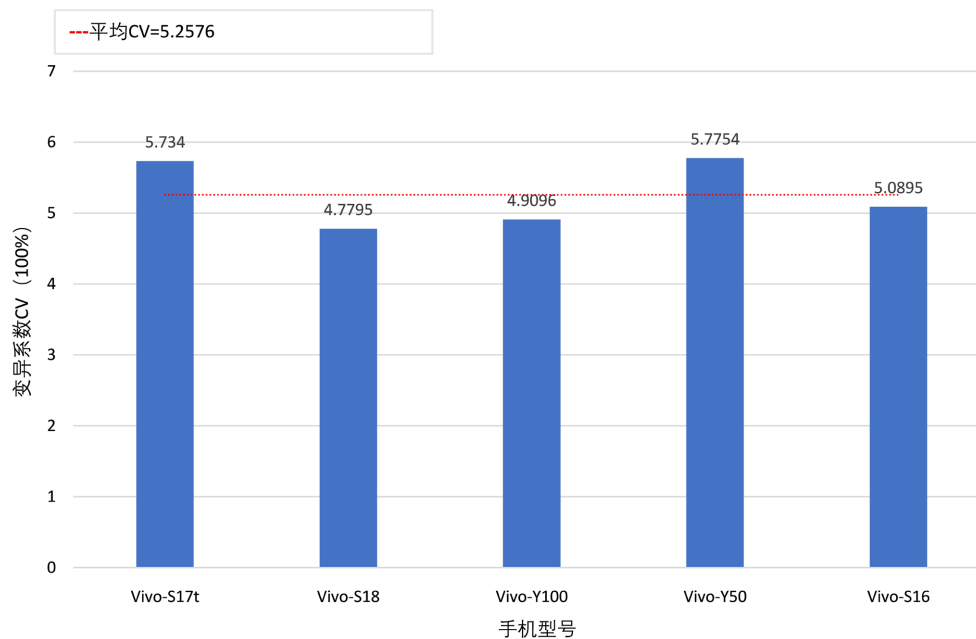


Figure 3. Coefficient of variation of ranging coefficients by phone model

图 3. 各手机型号测距系数变异系数

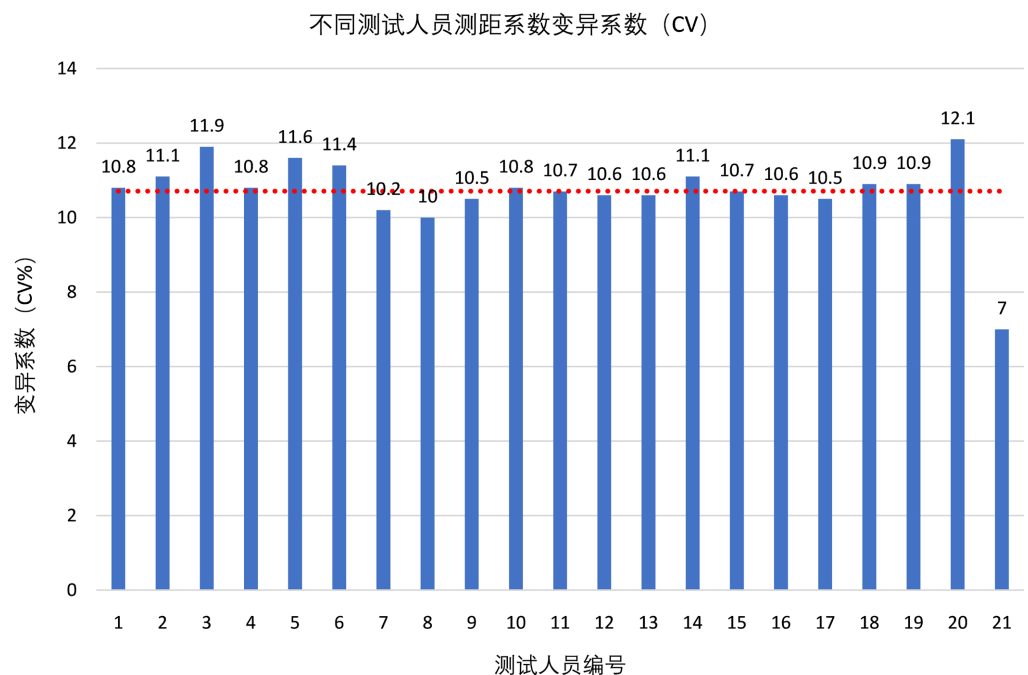


Figure 4. Coefficient of variation of ranging coefficients by tester
图 4. 各测试人员测距系数变异系数

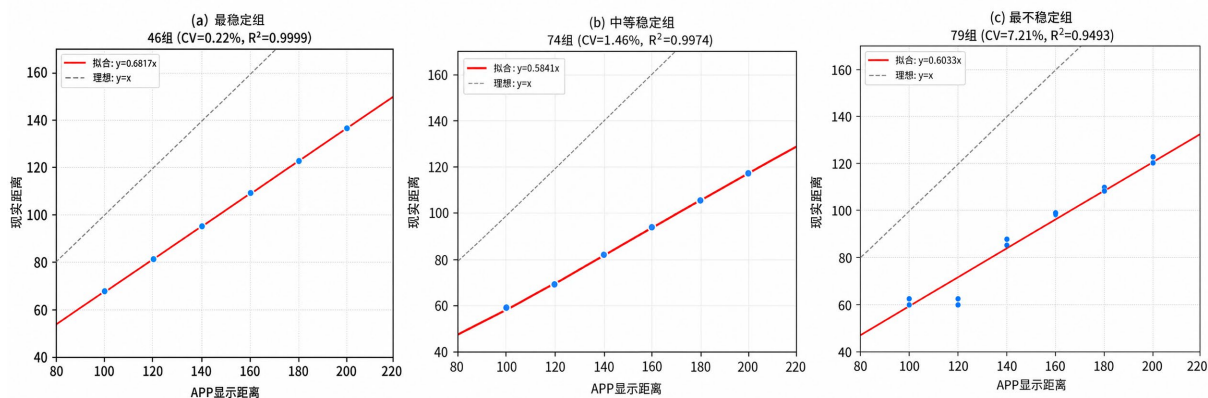


Figure 5. Distance scatter plots and regression fits for different stability-level groups (most stable, moderately stable, and least stable)
图 5. 不同稳定性水平组的距离散点图与回归拟合(最稳定组、中等稳定组、最不稳定组)

Table 2. Two-way ANOVA table for ranging coefficients (randomized block design)
表 2. 表测距系数双因素方差分析表(随机区组设计)

	平方和(SS)	自由度(df)	均方(MS)	<i>F</i> 值	<i>p</i> 值
手机型号	0.3975	4.0000	0.0994	532.5278	0.0000
测试人员	0.1027	20.0000	0.0051	27.5066	0.0000
误差(型号 × 人员)	0.0149	80.0000	0.0002	nan	nan
总计	0.5151	104.0000	nan	nan	nan

4.7. 统一校准与个性化校准的效果对比

由表 3 所示, 采用全局统一系数($k=0.6520$)进行校准时, MAE 为 8.302, RMSE 为 10.87; 采用每组个性化系数进行校准时, MAE 降至 1.15, RMSE 降至 1.71。个性化校准使 MAE 降低了 86.1%, 效果提升显著(图 6)。

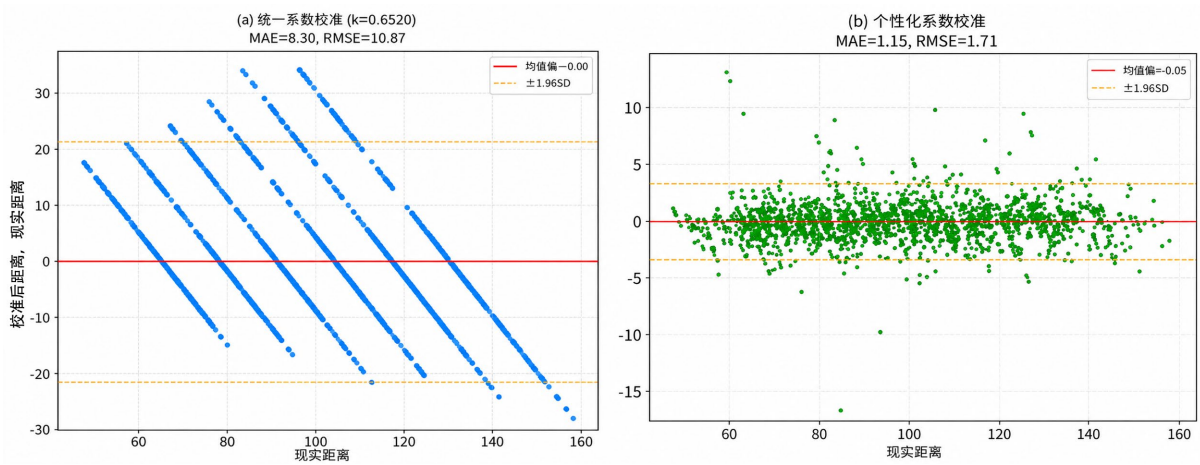


Figure 6. Bland-Altman agreement analysis comparing unified coefficient (a) and individualized coefficient (b) calibration
图 6. 统一系数(a)与个性化系数(b)校准的 Bland-Altman 一致性分析

Table 3. Accuracy comparison of the two calibration methods
表 3. 两种校准方法的精度对比

校准方法	MAE	RMSE	误差均值	误差标准差
统一系数校准	8.302	10.872	-0.000	10.875
个性化系数校准	1.153	1.710	-0.052	1.710
改善幅度	MAE 降低 86.1%, RMSE 降低 84.3%			-

5. 讨论

本研究通过 21 名受试者与 5 款不同型号智能手机交叉配对实验, 系统评估了基于动态手势识别和距离测量的视力筛查 APP 在距离校准方面的可行性与策略。主要发现与讨论如下。

5.1. 距离校准是否需要特定的位置

本研究中 APP 测距的过原点线性回归平均决定系数(R^2)高达 0.9936, 且 82.4%的组别(R^2)大于 0.99。这表明 APP 显示距离与现实距离之间存在极强的正比例线性关系。同时, 在不同距离梯度(1.0 m~2.0 m)下的个体内变异系数极低(均值范围为 0.51%~1.65%)。这提示, 在进行视力筛查时, 距离校准不需要局限于某个特定的绝对位置。只要在 APP 有效识别范围内(1.0 m~2.0 m), 系统测距具有良好的线性度。因此, 实际应用中可采用“单点校准”策略——即让用户在任意方便测量的距离(如 1.2 m 处)使用卷尺进行一次真实距离测量并输入系统计算校准系数 k , 即可推算出全量程的准确距离, 极大地简化了用户的校准流程。

5.2. 同一型号的手机能否统一校准系数

双因素方差分析结果显示, 手机型号的主效应显著($F=532.53, p<0.001$)。不同型号手机的测距系数

均值范围为 0.5353~0.7020，且各手机型号的个体间变异系数在 4.78%~5.78%之间。这说明不同手机由于前置摄像头的焦距、传感器尺寸及出厂焦距标定的差异，会导致测距系数存在显著不同。因此，同一型号的手机不建议直接套用同一校准系数，更不可跨型号套用。但是，如果同一型号手机出厂参数完全一致，理论上可以采用该型号的均值作为“默认系数”以实现快速初始化，但仍建议在条件允许时进行个体校准以消除装配误差。

5.3. 测试者面部特征对测距系数的影响

以测试人员为区组的双因素方差分析同样显示测试人员主效应显著($F = 27.51, p < 0.001$)。不同测试人员的测距系数均值范围为 0.5828~0.7092，且个体间平均 CV 高达 10.71%。这表明基于人脸关键点检测的测距算法受个体面部解剖特征(如瞳距、眼鼻比例、面部深度等)影响较大。因此，不同测试者不能共用同一校准系数。视力筛查 APP 必须建立“一人一系数”的个性化校准机制，在用户首次使用时完成专属的校准步骤。

5.4. 统一校准与个性化校准的效益对比与策略选择

研究表明，若采用全局统一系数($k = 0.6520$)校准，其 MAE 高达 8.30，RMSE 为 10.87，误差在临床视力筛查中已属于不可接受范围；而采用每组个性化系数校准后，MAE 降至 1.15，RMSE 降至 1.71，误差改善幅度高达 86.1%。Bland-Altman 一致性分析也进一步印证了个性化校准具有极高的一致性。结合 4.1 与 4.3 的结论，最优的距离校准策略应为：“基于特定个体的单点个性化校准”。

6. 局限性分析

尽管本研究系统分析了视力筛查 APP 的距离校准策略并验证了个性化校准的必要性，但仍存在以下局限性：

(1) 设备品牌覆盖局限

实验设备的品牌覆盖面有限。本研究仅选取了 Vivo 品牌下的 5 款智能手机作为测试设备。虽然结果揭示了不同型号间测距系数存在显著差异，但由于 Android 生态系统碎片化严重，不同手机厂商(如华为、小米、苹果)在摄像头传感器尺寸、焦距标定标准及图像处理算法上存在巨大差异。例如，iPhone 的 True Depth 摄像头与 Vivo 的普通前置摄像头在光学结构上截然不同，可能导致测距系数的非线性偏移。因此，本研究得出的校准系数参考范围可能无法直接推广至所有主流智能手机型号。在接下来的研究当中，应纳入 iPhone、华为 Mate 系列等主流机型，重点考察不同镜头模组(如超广角、长焦)对测距精度的影响机制。

(2) 受试者样本代表性不足

本研究招募的 21 名志愿者中，成年人仅 3 名，主要样本为 7~20 岁的中小學生。虽然覆盖了视力筛查的主要目标人群，但样本量相对较小，且未充分考虑极端面部特点对关键点检测的干扰。未来需纳入更多年龄层(尤其是老年人)、不同种族及面部特征的受试者以增强泛化能力。

(3) 实验环境理想化

实验在室内光线恒定(300~500 Lux)、背景简洁的环境下进行。然而，家庭场景中的光线变化(如逆光、昏暗)、复杂背景杂波以及受试者头部的随机晃动，在实际应用中可能对 MediaPipe 人脸关键点检测的稳定性构成挑战，进而影响距离测量的实时精度。

参考文献

- [1] 孙佳, 杨鲲. 健康中国背景下儿童青少年近视综合防控模式研究[J]. 甘肃医药, 2020, 39(6): 555-557.

- [2] 于瀛琦. 儿童青少年近视的防控策略研究[J]. 中国医药导刊, 2026, 28(4): 455-459.
- [3] 龙姝佳, 易晓英, 杨盈, 马清, 李继红. 湘西地区儿童近视防控二级预防现状调查及可持续干预策略研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 1267-1275. <https://doi.org/10.12677/acm.2026.1641360>
- [4] Petroff, A.M. (2015) Ultra Wideband Two-Way Time-of-Flight Distance Measurement Provides Sub-Centimeter Range Measurement Accuracy. *2015 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, Vancouver, 19-24 July 2015, 212-212. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI.2015.7303496>
- [5] 陶芳标. 《儿童青少年近视防控公共卫生综合干预技术指南》专题解读[J]. 中国学校卫生, 2023, 44(10): 1445-1449.