·调查报告与分析·

基于人脸图像关键特征尺寸识别的口罩适用性推荐研究

杨新金[1]，谢伟群[1]，黄振宇[1]，沈逸雄[1]，叶霖[1]，李海[2]，杨倬波[2]，廖祝[2]，李思米[3]

1. 广东省东莞市疾病预防控制中心，东莞 523000；
2. 华南理工大学，广州 510000；
3. 广州信满坤科技服务有限公司，广州 510000
通信作者：廖祝，E-mail：liaoz@mail.scut.edu.cn

【摘　要】目的 通过人脸图像特征识别获取人脸关键特征尺寸，进而基于特征尺寸构建口罩适用性关联模型，为用户快速推荐适宜的口罩，从而降低感染风险。**方法** 采集志愿者的正面人脸照片并进行口罩密闭性能测试，以获取面部特征尺寸信息和口罩适用性数据。对面部特征尺寸样本数据进行降维和聚类处理，进而构建面部聚类与口罩密闭性能测试数据之间的关联模型。通过该模型实现基于人脸图片的口罩快速推荐。**结果** 共采集了 245 名志愿者的人脸图像数据，每位志愿者从 5 款常见口罩中随机挑选 2～3 款口罩进行密闭性测试，得到总计 589 条口罩密闭性能测试数据，每款口罩的测试数量在 115～125 次。经统计分析，其中两款口罩 ENVIP3DF（84.3%）和 801-N95（68.9%）的测试通过率较高，差异有统计学意义（χ^2=127.546，P<0.05）。采用大部分数据进行模型训练、少量数据作为检验。检验结果显示，第一位志愿者对随机两款口罩的测试得分和推荐度分别为 ENVIP3DF（200，95.0%）和 801-N95（145，94.6%）；第 5 位志愿者对随机两款口罩的测试得分和推荐度分别为 801-N95（152，64.7%）和 9 132（52，39.4%）。对于每位志愿者来说，口罩的实际密闭性能测试得分与所提出的口罩适用性推荐关联模型之间存在显著正相关（r=0.642，P<0.05），所提方法可根据人脸图像处理数据准确预测口罩密闭性测试结果。**结论** 该方法能够基于人脸图片快速推荐最佳口罩，适用于紧急情况或不便采用标准口罩密闭性测试的场合。

【关键词】 口罩密闭性；面部特征尺寸；口罩适用性推荐

Mask suitability recommendation based on facial image key feature dimension recognition

YANG Xinjin[1], XIE Weiqun[1], HUANG Zhenyu[1], SHEN Yixiong[1], YE Lin[1], LI Hai[2], YANG Zhuobo[2], LIAO Zhu[2], LI Simi[3] (*1. Center for Disease Control and Prevention of Dongguan City*, *Guangdong Province*, *Dongguan* 523000, *China*; *2. South China University of Technology*, *Guangzhou* 510000, *China*; *3. Guangzhou TerraTrust Tech Service Co., Ltd.*, *Guangzhou* 510000, *China*)
Corresponding author: LIAO Zhu, E-mail: liaoz@mail.scut.edu.cn

【Abstract】 Objective To develop a mask suitability correlation model based on facial features extracted from facial images using facial recognition technology, enabling rapid mask recommendations for users and reducing infection risk. **Methods** Frontal facial photographs of volunteers were collected, and mask sealing performance tests were conducted to obtain facial feature dimensions and mask suitability data. Dimensionality reduction and clustering were applied to the facial feature data, and a correlation model was established between facial clusters and mask sealing performance data. This model facilitates rapid mask recommendations based on facial images. **Results** Facial image data from 245 volunteers were collected. Each volunteer randomly selected 2–3 masks from five common types for sealing performance tests, resulting in a total of 589 mask sealing performance data points, with each mask type tested 115–125 times. Statistical analysis revealed that two masks, ENVIP3DF (84.3%) and 801-N95 (68.9%), had higher passing rates, with a statistically significant difference (χ^2=127.546, P<0.05). The majority of the data was used for model training, and a small portion was used for validation. Validation results showed that for volunteer 1, the test scores and recommendation degrees for two randomly selected masks were ENVIP3DF (200, 95.0%) and 801-N95 (145, 94.6%), respectively; for volunteer 5, the scores and recommendation degrees were 801-N95 (152, 64.7%) and 9 132 (52, 39.4%), respectively. For each volunteer, there was a significant positive correlation between the actual mask sealing performance test score and the proposed mask suitability recommendation correlation model (r=0.642, P<0.05). The proposed method can accurately predict mask sealing test results based on facial image processing data. **Conclusions** This method can rapidly

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1144333
基金项目：2020 年东莞市新型冠状病毒感染防疫防治技术研究及推广应急攻关专项项目（202071715044113）
第一作者：杨新金（1983—），主管医师，学士，研究方向：传染病预防控制和突发公共卫生事件应急管理。
收稿日期：2024-03-04　修回日期：2024-09-20　录用日期：2024-11-27
利益冲突：不存在　伦理审查：已获取　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

recommend optimal masks based on facial images and is suitable for emergencies or situations where standard mask sealing performance testing is inconvenient.
【Keywords】 mask sealing performance; facial key feature dimensions; mask suitability recommendation

2020 年初，新型冠状病毒感染（COVID-19）疫情给全球带来了巨大的冲击，人们对于口罩的认识和使用变得前所未有的重视[1–3]，佩戴符合防疫标准的口罩十分重要[4–6]。医用口罩，如 N95 口罩，被广泛认为是最有效的防护工具之一[7–9]。口罩与使用者脸部的适合性（密合性）是评价口罩防护能力关键的技术指标之一[10–12]。如果所选口罩无法与使用者脸型达到密合，防护口罩可能无法有效地提供呼吸防护[13–15]。目前两个主要问题影响着口罩的密合性。第一，中国的制造商仍然使用美国国家职业安全与健康研究所（National Institute for Occupational Safety and Health，NIOSH）的标准设计产品。然而，这一标准并不能准确地代表中国人的头部和面部测量分布[16]。研究人员发现，中国人的面部特征相比美国人具有面部更宽更短、鼻子更小的特点[17–18]。Liu Y W 等人[19]的研究也发现，按照西方标准设计的头部相关产品并不适合中国人的头部和面部形状。这些研究表明当前口罩制造过程中忽视了中国使用者的实际情况。第二，专业的口罩密合性检验需要昂贵且专业的呼吸器密合性检验设备[5,13,20–23]，这使得一般用户难以得知自己使用的口罩是否完全符合密合性要求。为解决上述口罩适用性问题，本研究提出了一种基于人体面部特征尺寸的口罩适用性推荐方法，通过采集使用者的正面人脸图片信息，使用人工智能处理算法获取人脸面部特征尺寸，并建立人脸特征尺寸与口罩密合性测试数据的关联模型，为使用者快速推荐合适其佩戴的口罩类型，降低紧急情况或无法进行专业密闭性口罩测试时的感染风险。

1　对象与方法

1.1　口罩密闭性能测试

1.1.1　测试对象（表 1）　本研究随机采集了东莞市各级医疗卫生机构共 245 名志愿者的人脸图片数据。每名志愿者随机选取 ENVIP3DF，9132，N95-01 型，N95（折叠式）和 801-N95 共 5 款常用口罩（见表 1）中的 2～3 款，分别测试口罩密闭性能并采集测试数据，共获得 589 条口罩密闭性能测试数据。本研究经东莞市疾病预防控制中心伦理委员会批准 [批号：20240001]，且所有研究对象均签署了知情同意书。

表 1　常用口罩种类和参数
Table 1　Common mask types and parameters

种类	 ENVIP3DF	 9 132	 N95-01型	 N95（折叠式）	 801-N95
佩戴方式	头戴式	头戴式	耳带式	耳带式	头戴式
防护等级	FFP3	N95	KN95	KN95	N95
认证标准	EN149:2001	NIOSH N95	GB 2626—2006	GB 2626—2006	NIOSH N95
大小	均码	均码	均码	均码	均码
形状	杯状	折叠	折叠	折叠	折叠
产地	欧洲	中国	中国	中国	中国

1.1.2　口罩密闭性能测试（表 2）　为了确定口罩的密闭性，通常采用定量密闭性测试[10]。具体的测试方案采用美国 OSHA 29CFR 1 910.134 规定的密合性检验法[15]，见表 2。在测试动作之后，对口罩内外颗粒物的比值进行加权平均，得出一个特定的 Fit-Factor 的数值。Fit-Factor≥100 分，表示佩戴者佩戴此款口罩，在多组测试动作之后可以稳定地将环境中的颗粒物，降低至≤1/100，视为通过测试（PASS）；<100 分则视为测试失败（FAIL）。这些测试方法的结合将有助于确保呼吸器在工作环境中有效地阻挡有害气溶胶和颗粒物，保证使用者的健康安全。

表 2　OSHA 密合性检验法测试步骤
Table 2　OSHA fit test method steps

测试动作	描述
正常呼吸60 s	按照正常的呼吸频率和深度呼吸
深呼吸60 s	按照最大呼吸量呼吸
左右转头60 s	左右转头至尽头时，停住呼吸一次，再转向另外一侧，往复进行
上下转头60 s	上下转头至尽头时，停住呼吸一次，再转向另外一侧，往复进行
朗读60 s	大声说话
咧嘴笑15 s	控制面部肌肉使面部扭曲
弯腰60 s	弯腰至90°时，停住呼吸一次，再直立，停住呼吸一次，往复进行
再次正常呼吸60 s	按照正常的呼吸频率和深度进行呼吸

1.1.3 统计分析　采用 SPSS 25.0 软件对口罩密闭性能测试数据进行处理及统计分析。计数资料以频数和百分比进行描述性分析。组间比较采用 Pearson χ^2 检验，以是否通过测试（0=否，1=是）为因变量。检验水准 α=0.05。

1.2 人体面部特征尺寸的提取（图 1）　口罩的密闭性能与一些人体面部特征尺寸息息相关[13–15]，为了建立这种联系，需进一步分析人脸图片。由于传统的人体面部特征尺寸测量工作量较大、成本昂贵且不准确，本研究选择接入旷视 Face++的面部特征分析 API，通过行业领先的 AI 图片处理算法替代人工测量。该 API 可根据上传的单张正面人脸图片，分析并提取出相关的人体面部特征，见图 1。整个人体面部特征尺寸提取与数据处理过程均通过 Python 语言编程实现，具体过程如下：(1)对拍摄获得的人脸图片进行预处理；(2)接入旷视 Face++的面部特征分析 API，得到所有的人体面部特征尺寸；(3)筛选出与口罩适用性相关的 7 个主要有效数据；(4)对所有试验者的人脸照片批处理，制作出对应的人体面部特征尺寸数据集。

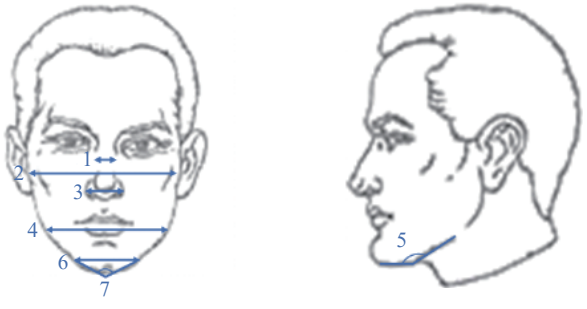


图 1　人体面部特征尺寸示意：(1)鼻梁宽度；(2)颧骨宽度；(3)鼻翼宽度；(4)下颌角宽度；(5)下颌角度数；(6)下巴宽度；(7)下巴角度

Fig. 1　Schematic diagram of human facial feature dimensions: (1) nasal bridge width; (2) zygomatic width; (3) nostril width ; (4) Mandible length, (5) Mandible angle, (6) Jaw width, (7) Jaw angle

1.3 基于 PCA 和 *K*-means 的口罩适用性推荐方法

1.3.1 PCA 降维算法（图 2）　主成分分析（principal component analysis，PCA）是一种将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的降维算法。本研究用于分析的主要人体面部特征尺寸数据变量有 7 个，相关人脸数据量和维度均较多，不利于之后的聚类分析。所以选择在保留原始数据 90% 以上的信息情况下，对人体面部特征尺寸数据集进行降维处理，通过训练得到基于 PCA 的降维模型与降维后的数据集。见图 2。

1.3.2 *K*-means 聚类算法　*K* 均值（*K*-means）是一种基于样本集合划分的聚类分析算法。为了进一步探究人体面部特征尺寸与口罩适用性之间的联系，将利用 *K*-means 算法对降维后的人体面部特征尺寸数据集进行聚类处理。为了确定聚类的簇，也就是 *K* 的值，一般通过误差平方和（*SSE*）来评估聚类模型中簇内密集性：

$$SSE = \sum_{k=1}^{K} \sum_{x_i \in C_k} |x_i - m_k|^2$$

其中，C_K 是第 K 个簇，x_i 是 C_K 中的样本点，m_k 是所有样本的均值，*SSE* 为所有聚类样本的聚类误差，代表聚类效果的好坏程度。另外，还采用轮廓系数 S 来评估综合簇内密集性和簇间分散性：

$$S = \frac{b-a}{\max(a,b)}$$

其中，a 为同簇内不相似程度的平均值，体现凝聚度，而 b 为其他簇的不相似程度的最小值，体现分离度。轮廓系数 S 的取值范围为 [–1，1]，当 S 越接近 1 时，表明样本的聚类是合理的；当 S 越接近–1 时，聚类效果越差。

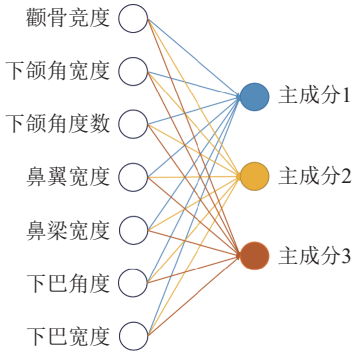


图 2　PCA 降维算法原理示意

Fig. 2　Schematic diagram of the PCA dimensionality reduction algorithm

1.3.3 口罩适用性推荐方法（图 3）　为了定量评估口罩适用性推荐程度，本研究需要建立一个 Score 分值模型，利用之前 *K*-means 模型的聚类结果，综合计算得到目标对象的人体面部特征尺寸数据对应的具体口罩 Fit-Factor 分数，其公式为：

$$\frac{Ms - M_A}{Ms - M_{else}} = \frac{T - T_A}{T - T_{else}}$$

其中，M_S 为输出的口罩分数，M_A 为目标对象所在簇的平均口罩分数，M_{else} 为其他平均口罩分数，T 为输入的人体面部特征尺寸数据，T_A 为目标对象所在簇的中心数据，T_{else} 为其他所有簇的平均中心数据。

需要注意的是，除了 ENVIP3DF 这款口罩之外，其他 4 款口罩的 Fit-Factor 分值均限定在 0～200，且最高分为 200。因此，在计算 ENVIP3DF 的平均 Fit-Factor 分值时，存在一定的偏差。为解决该问题，需将 ENVIP3DF 中高于 200 的 Fit-Factor 分值重新定义为 200。这样可以得到了一个更加合理的分值范围，同时最高得分也代表了最优测试性能。最后，归一化口罩分数将其转化为推荐度。整个口罩推荐方法均通过 Python 语言编程实现，过程如图 3 所示。为了验证本研究提出的方法的有效性，本研究选取了 5 名志愿者进行实

验验证。考虑到口罩密闭性能测试的工作量和成本，5 名志愿者只对其中两款口罩进行了随机测试。

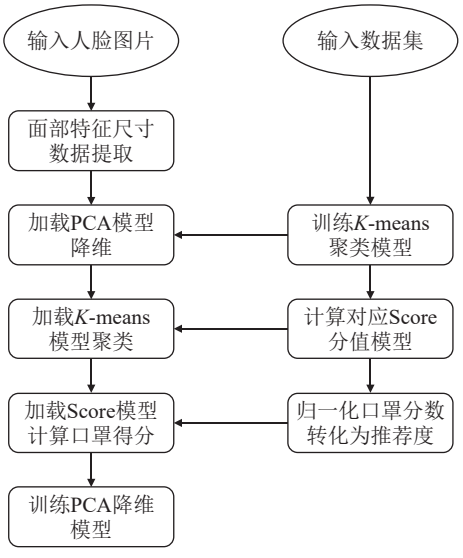


图 3　基于人体面部特征尺寸的口罩适用性推荐方法过程

Fig. 3　Process of mask suitability recommendation method based on human facial characteristic dimensions

2 结　果

2.1　口罩密闭性能测试情况（表 3）　本次共采集了 245 名志愿者的数据，每名志愿者均从 5 款口罩中随机选择 2～3 款口罩进行测试，得到总计 589 条口罩密闭性能测试数据。每款口罩的测试总数均在 115～125 次之间，构成比 19.5%～21.2%，呈现均匀分布，因此数据具备较高的合理性和可靠性。经统计分析，只有 ENVIP3DF（84.3%）和 801-N95（68.9%）两款口罩的测试通过（合格）率高于 50.0%。相比之下，9 132（25.0%），N95-01 型（31.6%）以及 N95（折叠式，34.4%）口罩的通过率明显低于 ENVIP3DF 和 801-N95 两款口罩，差异有统计学意义（χ^2=127.546，P<0.05）。通过口罩密闭性能测试情况可知，ENVIP3DF 和 801-N95 这两款口罩的整体防护效果要好于其他 3 款，这一结果与市场上的实际反馈相吻合。

表 3　口罩测试情况

Table 3　Mask test results

款式	总计/次	构成比/%	未通过数/次	通过数/次	通过率/%
ENVIP3DF	115	19.5	18	97	84.3
9 132	116	19.7	87	29	25.0
N95-01型	117	19.9	80	37	31.6
N95（折叠式）	125	21.2	82	43	34.4
801-N95	116	19.7	36	80	68.9
合计	589	100.0	303	286	48.6

2.2　PCA 降维结果（图 4）　为了提高后续计算和分析的效率，经过降维处理后，数据的维度从 7 维减少至 3 维时，仍然包含原始数据的 93.4% 的信息，并实现了数据量的减少高达 57.1%，这一降维过程显著加速了后续计算与分析的进行。

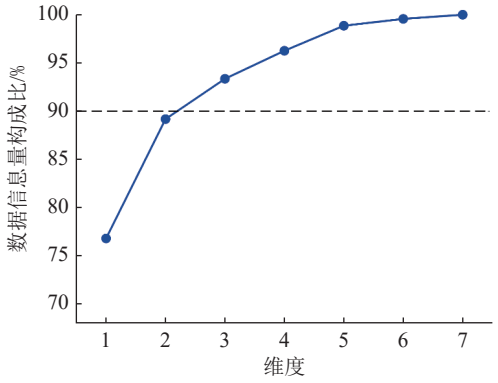


图 4　降维到不同维度数时包含的数据信息量构成比

Fig. 4　Proportion of data information contained when reducing the dimensionality to different numbers of dimensions

2.3　*K*-means 聚类结果（图 5、6）　计算不同 *K* 值下的 *SSE* 可以发现，在 *K*<7 的范围内，*SSE* 随着 *K* 的增加显著减少，而当 *K*>7 时，*SSE* 的下降幅度急剧减小，趋于平稳。因此，可以合理推断拐点位于 *K*=7。进一步考察不同 *K* 值下的 *S*，可看到在 *K*=3，*K*=5 以及 *K*=7 时，*S* 均取得较高的数值。鉴于本次研究对象涉及 5 款口罩类型，过小的聚类簇数量可能无法很好地区分人脸特征。因此，倾向于选择 *K*=5 或 *K*=7 可能更为合适，见图 5。通过综合考虑这两个性能指标，可以得出 *K*=7 是最优的选择。聚类结果见图 6。

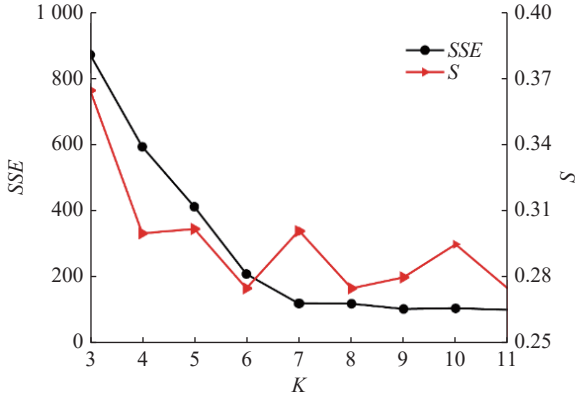


图 5　性能指标 *SSE* 和 *S* 随聚类数 *K* 值的变化

Fig. 5　Changes in performance indicators SSE and S with the number of clusters K

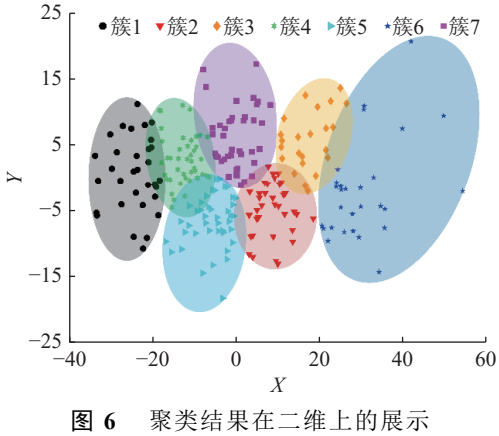


图 6　聚类结果在二维上的展示

Fig. 6　Two-dimensional visualization of the clustering results

2.4　Score 得分结果（图 7）　根据每个簇口罩的平均得分，可看到 ENVIP3DF 和 801-N95 相较于其他 3 种口罩表现出更出色的性能。其平均得分均显著超过 100 分，达到了口罩密闭性能测试通过的标准。见图 7。

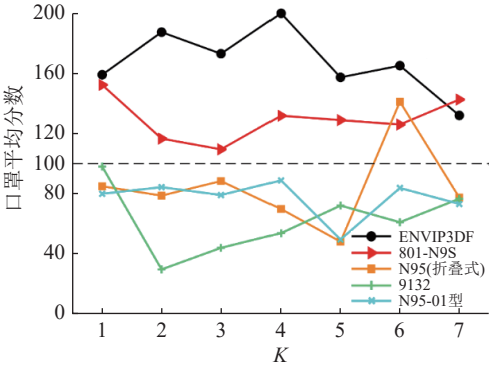


图 7　口罩平均得分结果
Fig. 7　Average score results of masks

2.5　口罩适用性推荐结果（表 4）　口罩的实际密闭性能测试分数越高，其获得的适用性推荐度越高。举例而言，第一位志愿者对 ENVIP3DF 和 801-N95 两款口罩的测试得分分别为 200 和 145，其推荐度分别为 95.0% 和 94.6%；而第 5 位志愿者对 801-N95 和 9 132 两款口罩的测试得分分别为 152 和 52，其推荐度分别为 64.7% 和 39.4%。对于每位志愿者来说，口罩的实际密闭性能测试得分与其适用性推荐度之间存在显著正相关（r=0.642，P<0.05），有效证明了所提方法的有效性。同时，本方法还可以有效预测出剩下 3 款未经过测试的口罩的推荐度。

表 4　口罩测试得分/适用性推荐预测结果/%
Table 4　Masks test score and fitness recommendation prediction results

测试对象	ENVIP3DF	801-N95	N95（折叠式）	9 132	N95-01型
1	200/95.0	145/94.6	—/35.0	—/85.8	—/43.5
2	—/35.0	—/95.0	143/55.8	—/73.5	180/60.2
3	—/95.0	174/64.5	—/56.6	—/35.0	114/52.3
4	—/95.0	—/65.6	18/40.2	—/35.0	179/50.8
5	—/95.0	152/64.7	—/ 51.6	52/39.4	—/35.0

注：表中“—”表示为未经过测试的口罩的测试得分。

3　讨　论

科学研究已明示，口罩作为一种重要的防护工具，具有过滤空气中悬浮颗粒的能力，从而保护佩戴者免受病原体的侵害。特别是在医院和其他医疗卫生机构中，医用口罩的应用已明显降低了病毒传播的风险。在新冠病毒感染疫情大流行期间，口罩无处不在，成为了当时社会中的一种标志。然而，公众所使用的口罩种类繁多，相关数据相当混乱，质量也参差不齐。本研究结果表明，对于研究所使用的 5 款口罩，其中 ENVIP3DF 和 801-N95 这两款的平均 Fit-Factor 测试得分均高于 100，通过率也高于 50.0%，防护效果对于大部分人来说普遍较好，但这两款口罩的成本也相对较高。最重要的是，不同使用者的人脸面部特征尺寸会影响不同口罩与其脸部的适合性，其防护效果也是因人而异。因此，对于不同人群而言，实现有针对性的防护至关重要。

本研究提出了一种基于人脸特征尺寸的口罩适用性推荐方法。首先，对志愿者的脸部特征尺进行了降维和聚类处理，然后训练了脸部特征尺寸与口罩密闭性测试数据的关联判别模型。最终，利用此模型对用户的正面人脸照片进行分析，以获取其面部特征尺寸信息，并根据该信息提供口罩适用性的推荐建议。由于口罩密闭性测试工作量较大且成本较高，每名志愿者只是随机选取 5 款口罩中的 2～3 款分别进行口罩密闭性能测试，所以本研究需要训练一个准确的模型，来有效预测每位志愿者对于 5 款口罩的得分。本研究结果表明，将人脸特征尺寸数据从 7 维降维到 3 维时仍然可以保留超过 90.0% 的信息量，且数据量减少了 57.1%，可以有效提高研究效率。对于本研究所使用的 5 款口罩，综合考虑 *SSE* 和 *S* 两个性能指标，将人脸分为 7 类最为合理。以上这些数据结果都可以进一步帮助训练更为精确的模型。本研究的实验结果证明了本方法最初设计的有效性和合理性。结果显示，口罩的实际密闭性能测试分数与本方法的适用性推荐之间存在明显正相关性。口罩测试分数越高对应的推荐度越高，对于有限的口罩测试得分可以得知，得分高于 100 分的口罩对应的推荐度均高于 50.0%。另外，尽管缺少部分款式口罩的测试数据，但通过本方法可以对所有款式的口罩都预测出其推荐度。该方法的优点在于其简便和高效，它能够基于个体面部数据为不同的佩戴者提供最佳口罩推荐，对不同人群实现有针对性的防护。特别是在医疗卫生等对口罩防护要求高和需求量大的领域，这一方法不仅能够确保医护人员的安全，还有望进一步降低相关成本。

需要指出的是，本研究所采集的试验对象均来自广东省东莞市的医疗卫生机构，因工作性质和地理位置的局限，存在一些数据方面的限制。样本数据的代表性较差，未考虑到未成年人和老年人的群体差异；同时，研究地域分布不均，主要集中在南方，特别是广东省。未来的研究可以进一步弥补这些限制，将开展不同种族、不同地区人群的面型的研究，得出更多的数据，更广泛地

考察口罩适用性,为企业研发不同尺寸的防护口罩提供科学依据。

参考文献

[1] 周艳萍, 姜怡, 饶翩, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情期间公众使用口罩现状调查 [J]. 护理研究, 2020, 34(11): 2041-2044.

[2] 郑智源, 王萍, 王一洋, 等. 中国农村居民新冠病毒感染流行时期口罩佩戴与更换情况及其影响因素分析 [J]. 中国公共卫生, 2023, 39(2): 186-190.

[3] 徐嫚, 程幼夫, 肖力, 等. 新冠疫情期间四川省居民口罩使用及防护现状相关因素分析 [J]. 中国公共卫生, 2020, 36(5): 831-835.

[4] 王梅, 张宏顺, 蒋绍锋, 等. 防护口罩的过滤性及舒适性评价 [J]. 医疗卫生装备, 2023, 44(3): 49-53.

[5] 王春华, 姑丽巴哈尔·吾布力, 王燕. 基于标准防护下佩戴口罩有效率的研究 [J]. 新疆中医药, 2023, 41(3): 67-69.

[6] 陈亿洋, 张新林, 杨丹, 等. 医用口罩防护有效性的智能指示标签研究进展 [J]. 包装工程, 2023, 44(9): 162-169.

[7] 蒋璐蔓. N95 过滤式防护口罩适合性及其随时间变化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[8] 赵平, 郭莹莹, 杨光, 等. 医用外科口罩过滤效率的评价与分析 [J]. 中国检验检测, 2022, 30(6): 59-60.

[9] Loeb M, Bartholomew A, Hashmi M, et al. Medical masks versus N95 respirators for preventing COVID-19 among health care workers: a randomized trial[J]. Annals of Internal Medicine, 2022, 175(12): 1629-1638.

[10] 贾雅静, 赵静雅, 陈芳艳, 等. 医用防护口罩密合性的检测研究 [J]. 中国工业医学杂志, 2023, 36(3): 235-238.

[11] 陈奕桥, 田宏. 不同脸型对普通医用口罩密闭性影响的测试与分析 [J]. 辽宁丝绸, 2021(2): 25-26.

[12] Koh X Q, Sng A, Chee J Y, et al. Outward and inward protection efficiencies of different mask designs for different respiratory activities[J]. Journal of Aerosol Science, 2022, 160: 105905.

[13] 张雪艳, 徐擎, 杨咪咪, 等. 医用防护口罩适合性与头面部尺寸的关系 [J]. 中国工业医学杂志, 2022, 35(6): 501-504,528.

[14] 薛佳殷, 蔡昕芯, 田亚娟, 等. 医用防护口罩定性适合性检验及其影响因素 [J]. 中华医院感染学杂志, 2022, 32(10): 1586-1589.

[15] 杨磊. 自吸过滤式个体呼吸防护技术关键问题的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2006.

[16] Du L L, Zhuang Z Q, Guan H Y, et al. Head-and-face anthropometric survey of Chinese workers[J]. Annals of Occupational Hygiene, 2008, 52(8): 773-782.

[17] Yang L, Shen H G, Wu G. Racial differences in respirator fit testing: a pilot study of whether American fit panels are representative of Chinese faces[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2007, 51(4): 415-421.

[18] Yu Y Y, Benson S, Cheng W J, et al. Digital 3-D headforms representative of Chinese workers[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2012, 56(1): 113-122.

[19] Liu Y W, Xi P C, Joseph M, et al. Variations in head-and-face shape of Chinese civilian workers[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2015, 59(7): 932-944.

[20] Stemen D, Ge M, Hwang D, et al. Frame to improve the fit of N95 filtering face mask respirators[J]. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2021, 63(6): e362-e366.

[21] Regli A, Sommerfield A, von Ungern-Sternberg B S. The role of fit testing N95/FFP2/FFP3 masks: a narrative review[J]. Anaesthesia, 2021, 76(1): 91-100.

[22] Zhuang Z Q, Benson S, Viscusi D. Digital 3-D headforms with facial features representative of the current US workforce[J]. Ergonomics, 2010, 53(5): 661-671.

[23] Zhuang Z Q, Groce D, Ahlers H W, et al. Correlation between respirator fit and respirator fit test panel cells by respirator size[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2008, 5(10): 617-628.