

# 基于聚类 and 形态参数的人体体型分析研究进展

顾冰菲<sup>1,2,3</sup>, 张健<sup>1</sup>, 徐凯忆<sup>1</sup>, 赵崧灵<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学 服装学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 浙江省服装工程技术研究中心, 浙江 杭州 310018; 3. 浙江理工大学 丝绸文化传承与产品设计数字化技术文化和旅游部重点实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**从形态参数分析和聚类方法两方面综述了人体体型相关的国内外研究成果。为更加细致地划分人体体型研究的不同方向,将形态参数分为整体体型参数和局部形态特征参数,其中局部形态根据人体部位与服装结构的关联性,共分为颈部、肩部、胸部、腰腹臀部和下肢。针对人体体型分析方法,总结了3种常用的聚类分析方法,包含K-means聚类分析、两步聚类分析和模糊聚类分析。基于现有成果展望了人工智能技术及人体自动测量技术在体型分析方面的发展前景,为其在服装尺码设置、三维人体建模和数字化服装等领域的应用提供参考。

**关键词:**形态分类;整体体型分析;局部特征;聚类方法;人体测量;人工智能

中图分类号:TS 941.17 文献标志码:A 文章编号:2096-1928(2023)04-0307-08

## Research Progress of Human Body Shape Analysis Based on Clustering and Morphological Parameters

GU Bingfei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, XU Kaiyi<sup>1</sup>, ZHAO Songling<sup>1</sup>

(1. School of Fashion Design and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Clothing Engineering Research Center of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. Key Laboratory of Silk Culture Heritage and Products Design Digital Technology, Ministry of Culture and Tourism, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** This article reviews the domestic and foreign research achievements related to human body shape from the perspectives of morphological parameter analysis and clustering methods. In order to delineate the different perspectives of human body shape analysis more carefully, the morphological parameters are divided into overall body shape parameters and local morphological feature parameters for analysis. Among them, local forms are divided into neck, shoulder, chest, waist, abdomen, hip and lower limbs according to the relevance of body parts and garment structure. For human body shape analysis methods, three commonly used cluster analysis methods are summarized, including K-means cluster analysis, two-step cluster analysis and fuzzy cluster analysis. Finally, the development prospect of artificial intelligence technology and automatic human body measurement technology in body shape analysis is foreseen to provide reference for its application in the fields of clothing size setting, 3D body modeling and digital clothing.

**Key words:** Morphological classification, overall body shape analysis, local features, clustering methods, anthropometry, artificial intelligence

服装合体度一直被视为评估服装质量和消费者满意度的核心要素<sup>[1-3]</sup>,研究者就消费者对服装

合体性的满意度展开调查,结果显示超过50%的消费者认为自己找不到合身的服装<sup>[4-5]</sup>。体型是影响

收稿日期:2023-02-15; 修订日期:2023-06-10。

基金项目:国家自然科学基金项目(61702461);中国纺织工业联合会科技指导性项目(2018079);中国纺织工业联合会应用基础研究项目(J202007);浙江理工大学优秀研究生学位论文培育基金项目(LW-YP2021054)。

作者简介:顾冰菲(1987—),女,副教授,硕士生导师。主要研究方向为数字化服装技术。Email:gubf@zstu.edu.cn

服装合体度的主要因素<sup>[6]</sup>,了解消费者的体型特点并开发适合不同体型的服装样板非常重要,即人体体型分析是服装样板和尺寸设计的先决条件<sup>[7]</sup>。体型分析对于满足目标人群在服装设计和大规模定制方面的个性化需求尤为重要。通过对人体体型进行分类,可以更准确、更个性化地设计和生产各类成衣产品。

众多学者在人体体型分析领域不断探索,体型分析的研究过程大致分为以下几个步骤:①获取人体形态表征参数,包括人体基本参数以及一些能描述人体细节形态的比例参数和角度参数;②采用降维手段从众多人体参数中获取最具代表性的少数变量用以体型分类,如变异系数、主成分分析、R 型聚类;③根据分类变量对人体数据信息进行聚类分析,常用方法有 K-means 聚类、两步聚类和模糊聚类等。人体体型类别可以应用在尺寸设计和服装样板等领域,以提高消费者对服装合体性的满意度。

因此,人体体型分析对于服装个性化定制及三维人体建模等研究具有重要意义。文中从整体体型分析和局部形态分析两个角度出发,概述了人体体型分析的研究现状,对比了 3 种聚类方法的优缺点,最后展望了人工智能技术及人体自动测量技术在人体体型分析方面的发展前景。

## 1 体型分析参数

### 1.1 体型分类

早期的人体体型被定义为近似于某种图形的

人体整体轮廓形态,大多根据主观视觉上观察到的形状对人体整体形态进行分类,如梨形、葫芦形、沙漏形等<sup>[8]</sup>。SIMMONS K 等<sup>[9]</sup>在开发人体形状分类软件时,首先将人体形状设定为沙漏形、椭圆形、三角形、倒三角形和矩形 5 个类别,随后为这些形状类别提供人体的各项参数数值范围,用以识别。CONNELL L J 等<sup>[10]</sup>研发的体形量表包含沙漏形、梨形、矩形和倒三角形 4 个形状,并利用分级量表的形式来判断人体体型趋于某类形状。这些人体体型主观描述形式大多用来粗浅地评价人体外观形态,无法为服装样板合体性制作提供较为有用的数据信息。

为了更精确地进行整体体型分析,一些人体测量的描述性数值(如体重指数、腰臀围比等)被提出来,构成了使用定量分析方法进行人体形态分类的基础<sup>[11]</sup>。EMANUEL I<sup>[12]</sup>开发了一套程序为所有体型制定标准尺寸表。首先将人体体型根据体质量分为 4 个等级,在相同的体质量范围内,再根据身高细分为两类,最终将人体体型分为 8 类。19 世纪中期,比利时数学家凯特勒提出了身体质量(Body Mass Index,BMI)指数来评价一个人的健康情况。如今 BMI 指数已经成为国际通用的人体分类指标,主要用来评价人体的胖瘦情况,然而由于不同国家和地区的人体形态存在差异,因此各国对于 BMI 指数的划分也有所不同,具体见表 1。由于 BMI 指数是根据体质量和身高来判断胖瘦的,不能反映身体各个部位的尺寸,因此用在服装行业中的局限性较大。

表 1 各国 BMI 指数分级标准  
Tab.1 BMI grading criteria

| 类别    | 世界卫生组织标准  | 亚洲标准      | 中国标准      | 新加坡标准     |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 偏瘦    |           | <18.5     |           |           |
| 正常    | 18.5~24.9 | 18.5~22.9 | 18.5~23.9 | 18.5~22.9 |
| 超重    | ≥25.0     | ≥23.0     | ≥24.0     | ≥23.0     |
| 偏胖    | 25.0~29.9 | 23~24.9   | 24~27.9   | 23~27.4   |
| 肥胖    | 30.0~34.9 | 25~29.9   | ≥28.0     | ≥27.5     |
| 重度肥胖  | 35.0~39.9 | ≥30.0     |           |           |
| 极重度肥胖 |           | ≥40.0     |           |           |

随着工业技术的发展,人体测量学被广泛用于人体形态分类研究<sup>[13]</sup>。众多学者提出使用各种人体参数对人体进行形态描述和体型分类。在成衣行业早期,一直使用落差测量(胸围、腰围和臀围之间的差异)对体型进行分类<sup>[14]</sup>,各国据此制定成衣行业规格号型标准<sup>[15]</sup>,如中国、日本、韩国、英国等都使用这种方法创建国家服装尺码系统<sup>[16]</sup>,且经过

多次修订后对其号型标准进行了完善。以女装号型为例,美国将女性按照年龄划分为少女、女青年、成熟女青年和妇女 4 类,并在每类中细分号型;日本将女装号型规格分为 S,M,ML,L,LL 5 类;我国现行女装号型是根据人体胸腰围差值将人体体型分为 Y(19~24 cm)、A(14~18 cm)、B(9~13 cm)、C(4~8 cm) 4 类<sup>[17]</sup>。但是,仅以胸腰差划分人体体

型类别无法详细区分各部位的形态差异,并且不同年龄段的人体体型具有不同特点。因此,随着时代的发展和市场需求,人体整体形态划分已经很难适应当下服装合体性的需求,而人体局部形态特征的分析逐步成为学者的研究热点。

1.2 局部形态分析

1.2.1 基于相关尺寸参数的局部形态分类 根据服装样板结构与人体的关联,可将人体分为颈部、肩部、胸部、腰腹臀部和下肢 5 部分。为了更好地表征人体局部形态,常使用局部部位宽度、厚度、围度、比例等参数,然而此类基础参数只能简单描述人体信息,不能表征特征部位的形态信息。因此,引入了一些人体体表角度参数。

针对颈部形态分析时,常用的有颈根围、颈中围、颈长和颈宽等局部部位的基础参数。黄灿艺等<sup>[18]</sup>采用颈中差(颈根围与颈中围的差值)和颈中比(颈根围与颈中围的比值)两项派生变量将青年男性的颈部形态分为细型、偏细型、中间型、稍粗型、偏粗型、较粗型和粗型 7 类,随后据此制定了青年男性颈部尺寸规格。针对肩部形态分析,除了肩宽、肩厚和肩围等常用参数,肩斜角作为肩部的独特角度参数,也一直是研究肩部形态的常用变量。

表 2 局部形态分析常用参数

Tab.2 Common parameters for local morphological analysis

| 部位   | 基础参数                                 | 派生参数   | 角度参数                      |
|------|--------------------------------------|--|---------------------------|
| 颈部   | 颈根(中)宽,颈根(中)厚,颈根围,颈中围,颈长             | 颈横矢径比(颈宽/颈厚),颈中差(颈根围-颈中围),颈中比(颈根围/颈中围)               | 前倾角                       |
| 肩部   | 肩宽,肩厚,肩围                             | 肩横矢径比(肩宽/肩厚)   | 肩斜角                       |
| 胸部   | 胸宽,胸厚,胸围,上胸围(女),下胸围(女),乳深(女),乳房体积(女) | 胸横矢径比(胸宽/胸厚),上下胸围差(女)                                | 背入角,上(下)乳房角(女),内(外)乳点角(女) |
| 腰腹臀部 | 腰(腹,臀)宽度(厚度,围度,高度)                   | 臀腰差(臀围-腰围),腰臀宽比(腰宽/臀宽),腰臀厚比(腰厚/臀厚),腰(腹,臀)横矢径比(宽度/厚度) | 背侧角,臀凸角,体侧角               |
| 下肢   | 大腿围,小腿围,膝围,踝围,大腿根宽,大腿根厚,腿长           | 大腿宽厚比(大腿根宽/大腿根厚),大腿小腿围比(大腿根围/小腿围),膝围踝围比(膝围/踝围)       | 膝曲角                       |

1.2.2 基于相关截面形状的局部形态分析 人体截面可以分为矢状截面、冠状截面(纵截面)和横断面(横截面)3 种,具体如图 1<sup>[22]</sup>所示。相比用各种宽度、厚度和围度等变量来描述人体局部形态,截面形状更能直观且准确地反映人体局部形态<sup>[23]</sup>。基于此,学者采用各种不同的方法和参数对人体截面轮廓曲线进行描述,从而将人体曲线量化并进行分析,使用的曲线描述参数有曲率半径、小波系

王婷等<sup>[19]</sup>采用肩斜角、颈矢额径比(颈厚与颈宽的比)和肩矢额径比(肩厚与肩宽的比)等 15 项参数来表征颈肩部形态,经过分析,利用肩斜角、背入角、肩矢额径比和腋下矢额径比 4 个聚类参数将青年女性颈肩部形态分为 4 类,并根据各类形态特点分别命名为:圆宽肩体、扁窄肩体、圆落肩体和驼背扁肩体。在分析胸部形态时,常用胸围、胸高、胸厚和胸宽等参数,PAEK K J 等<sup>[20]</sup>通过测定 297 位青年男性的胸部相关参数,经过因子分析后,采用 6 个公因子分别从胸部厚度、胸部宽度、乳房突出程度 3 个方面,根据样本数据的频数将青年男性胸部形态粗略地分为 4 类。另外,由于女性生理形态的特殊性,在对女性胸部形态进行分析时,可选择的参数相比较男性多,如上胸围、下胸围、乳房体积<sup>[21]</sup>和各种乳房角度等女性特有参数。针对腰腹臀部分析时,通常将腰腹臀作为一个整体部位进行形态分析,常用参数包括腰腹臀各部位的宽度、厚度和围度,以及各种比例和角度等。

人体局部形态分析选取的参数大多基于人体体表所能获取的参数,尽量包含可以细致表征人体形态的各种参数。各关键部位形态分析的常用参数见表 2。

数<sup>[24]</sup>、转向角函数<sup>[25]</sup>和椭圆傅里叶描述子<sup>[26]</sup>等。另外,人体局部横截面面积也可用作形态分析<sup>[27]</sup>。

从横截面角度来讲,人体可视为由多个平行横截面组成的分层结构,如图 1(b)所示。庞程方<sup>[28]</sup>采用三维人体扫描仪获取了 213 名在校男大学生的三维点云数据,并利用 Imageware 逆向工程软件截取肩部、胸部、腰部和臀部的横截面特征曲线,然后提取截面曲率半径作为各部位的形态表征参数,随

后对各部位形态进行聚类分析。

从纵截面角度分析,矢状截面和冠状截面均可被称为纵截面,矢状截面是人体侧面截面,冠状截面是人体正面截面,如图 1(c)所示。人体纵截面可视为人体的正、侧面轮廓,能清晰地表达出人体的整体曲势。姚怡等<sup>[24]</sup>通过截取青年女性躯干的纵截面轮廓点云数据,并采用三次样条函数将截面轮廓数据拟合为连续闭合曲线,然后提取曲线的小波系数用以表征曲线的整体特征,根据小波系数将青年女性躯干形态分为 4 类。

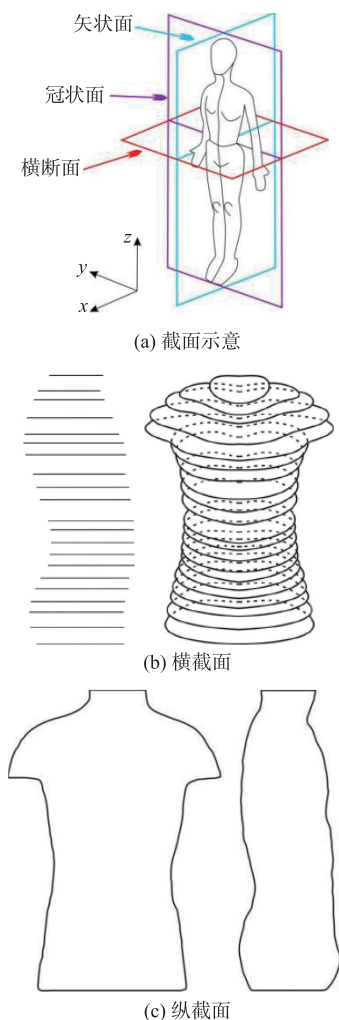


图 1 人体截面

Fig. 1 Human body sections

## 2 聚类方法

### 2.1 K-means 聚类

K-means 聚类作为分类的探索性数据分析工具,是体型分析中最常用的一种聚类方式。由于所选取的聚类数目  $K$  值直接影响着最终的分析结果,因此如何选取  $K$  值是首要解决的问题。

目前  $K$  值选取一般有 4 种方法。①依据前人的研究经验或参考国家号型标准。阮婷等<sup>[29]</sup>根据肩部形态及以往的肩斜分类方法<sup>[30]</sup>,运用 K-means 聚类将前肩宽、左肩斜度和胸背宽比各分为 3 类,最终经过类别组合后将青年男性的肩部形态分为 27 种。②通过对比多次聚类结果来确定  $K$  值。这种方法基于客观的数据,对比所得结果较为合理精确,缺点是耗费时间。MAHNIC NAGLIC M 等<sup>[31]</sup>选取了青年男性人体的 16 个测量值来计算其上下身的曲线角度,在对上身形态进行聚类时,通过对比聚类数为 2,3 和 4 时的聚类结果,发现聚类数为 3 时的聚类结果最优,最终将青年男性上身形态分为 3 类;在对下身形态进行聚类时,通过对比聚类数为 2,3 时的聚类结果,最终将青年男性下身形态分为 3 类。③根据混合  $F$  统计量、伪  $T^2$  统计量和伪  $F$  统计量等确定最佳聚类数目。吴巧英等<sup>[32]</sup>提出使用臀胸差、臀腰差及身臀比对学龄前儿童进行体型分析,采用混合  $F$  统计量确定最佳聚类数目,将儿童体型分为 3 类。④依据轮廓系数 (silhouette coefficient) 等聚类算法的有效性指标确定最优  $K$  值。徐凯忆等<sup>[33]</sup>将腰部、腹部、臀部、大腿根部和膝部的宽厚比作为聚类变量,结合轮廓系数和聚类结果的  $F$  统计量将青年女性下肢形态分为 3 类。

K-means 聚类在对大规模数据集进行分析时,聚类速度较快,且聚类结果较好。然而,K-means 聚类的聚类数目需要提前确定,虽然已经有了较多确定  $K$  值的方法,但很难确保能够选择到最优  $K$  值。

### 2.2 两步聚类

两步聚类相比 K-means 聚类法,最大的特点是能够自动确定最终的聚类个数。王军等<sup>[34]</sup>选择东北地区的青年女性为研究对象,采用主成分分析后从人体的 21 项腰臀部特征参数中提取 5 个形态因子,经过两步聚类分析后将东北青年女性的腰臀部形态分为 3 类。CHUNG M J 等<sup>[35]</sup>对中国台湾的 7 800 名 6 ~ 18 岁的男女人体数据进行分析,经两步聚类后,针对小学、初中和高中学生开发了 12 种尺寸测量系统。

两步聚类算法自动程度高,真正利用统计量作为距离指标进行聚类,根据一定的统计标准自动确定最佳的类别数,聚类结果更加可信。

### 2.3 模糊聚类

模糊聚类的本质是一种动态聚类,相比 K-means 聚类和两步聚类硬性聚类的方法,模糊聚类最终得到的是样本所属每个类别的概率。LIU K X 等<sup>[36]</sup>提出了一种基于三角模糊数对下半身形状

进行分类的模糊分类方法,首先选取身高、腰围和臀腰差作为下半身形状的关键维度;然后根据臀部到腰部的差异将下身形状分为 3 类;最后用三角模糊数的隶属度表示下身形状。结果表明,在不增加体型数量的情况下,模糊分类方法与传统方法相

比,能更准确地表示身体信息。模糊聚类参考隶属概率确定样本所属类别的方法更加可靠。然而,由于模糊聚类的计算过程较为复杂,在对数据进行计算时,数据量也会急剧增长,因此难以处理大规模的数据集。常用聚类方法优缺点见表 3。

表 3 聚类方法优缺点比较

| Tab.3 Comparison of advantages and disadvantages of clustering methods |                                |                           |
|--|--------------------------------|---------------------------|
| 聚类方法   | 优点                             | 缺点                        |
| K-means 聚类法  | 算法简单、快速,能够处理大规模数据集,聚类结果较好      | 聚类数目需要提前人工确定,并且最佳聚类数目较难确定 |
| 两步聚类法  | 自动程度高,可根据算法自行确定最终聚类数目,聚类结果更加可信 | 计算复杂度较高,奇异值影响较大           |
| 模糊聚类法  | 动态聚类的结果更加可靠,更适于处理现实问题          | 计算量较大,难以处理大规模数据集          |

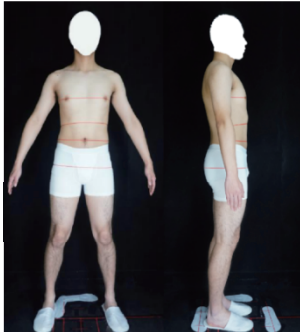
3 展 望

随着计算机科学与人工智能技术的快速发展,众多学者开始探讨如何将计算机和人工智能技术与体型分析相结合,文中从人体自动测量技术和人工智能技术两方面提出一些展望。

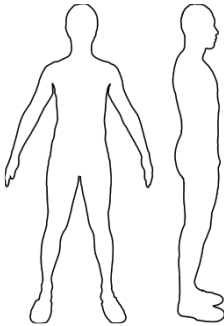
3.1 基于人体自动测量技术的体型分析

近年来,三维测量技术被广泛应用,然而测量设备价格较高及测量场地受限制,使其较难应用于众多企业,因此学者均在探讨如何更加便捷地获取人体形态信息。如从二维人体图像中提取表征人体形态的正、侧面轮廓曲线,进一步研究如何从中提取人体真实尺寸或根据人体二维轮廓建立人体三维模型。早期研究中,学者采用限制照片背景的方法,即拍摄背景为纯黑色,被试人穿着白色紧身内衣,这样有利于分离人体与背景,从而提取人体轮廓,如图 2 所示。GU B F 等<sup>[37]</sup>和 WANG T K 等<sup>[38]</sup>在实验室环境中使用相机拍摄人体正侧面照片(纯黑色背景),随后对照片进行处理后得到人体边缘轮廓。这种方法对拍摄环境要求较高,因此在实际应用中局限性大。

为摆脱严格的实验环境限制,基于边缘检测算子的计算机技术已应用到人体轮廓提取领域,利用边缘算子提取人体轮廓,能够去除多余的边缘并对边缘进行修补。然而,该方法对噪声较敏感,得到的人体轮廓存在瑕疵。李科等<sup>[39]</sup>使用改进后的 Canny 算法结合人体深度图进行人体轮廓提取,并与其他算子得到的轮廓进行对比,证明改进后的算法得到的轮廓更加清晰,但同时可以看到最终预测结果有很多断裂处。



(a) 人体二维图像



(b) 图像轮廓提取

图 2 人体数据和轮廓提取

Fig.2 Human body data and contour extraction

为了能够从复杂背景的人体照片中得到更为理想的边缘轮廓,近年来深度学习技术开始应用于人体轮廓提取领域。DE SOUZA J W M 等<sup>[40]</sup>采集了被测者的正面、侧面和背面图像,建立数据集,利用深度学习技术对人体图像进行语义分割并识别特征点,以人体实际身高与图像身高的比例为基础,测算出人体实际尺寸。然而采集图片时要求被测者仅身穿短裤,并且背景为纯白色,限制条件较多,实用性不佳。

如何根据人体轮廓获取人体真实尺寸也是要解决的难题之一,涉及人体拍摄姿势变化、拍照距离不同与设备影响、照片畸变等一系列问题。因



此,完善人体自动测量技术,从而更加便捷智能地获取人体相关参数对体型进行分析是一大趋势。

### 3.2 基于人工智能技术的体型识别

在对人体体型进行分类后,如何构建合适的模型,精确地进行人体体型识别也是关键技术之一。常用的方法是数理统计方法,即根据聚类结果构建体型判别公式,如 Fisher 判别。CAI X Y 等<sup>[41]</sup>对青年女性腰腹臀形态进行分析,并根据聚类规则构建了 Fisher 判别模型,以此来快速识别青年女性的腰腹臀形态,识别准确率为 90%。然而这样的判别系统过于死板,泛化能力很弱。因此,有学者着力研究利用神经网络等人工智能的方法模拟专家识别过程,如人工神经网络(ANN)<sup>[42]</sup>、支持向量机(SVM)和概率神经网络(PNN)<sup>[43]</sup>等。神经网络的结构一般分为 3 个阶段,输入层、隐含层和输出层。利用神经网络构建人体体型识别系统的识别能力主要依赖于神经网络的训练过程,以体型分类参数

为输入层参数,人体体型类别为输出层参数,中间隐含层的作用即为训练过程,具体如图 3 所示。训练过程是通过误差反馈的形式来寻找输入层参数和输出层参数之间最优的拟合函数关系。随着隐含层层数的增加,神经网络模型的数据表示和函数关系拟合的能力相应有很大提高,但模型的参数数量也随之剧增,因此所需的计算资源和训练时间也会提高,这也是深度学习技术的缺点之一。倪世明等<sup>[44]</sup>采用三维扫描仪获取人体臂部的各项尺寸,经过形态分类后采用优化的 BP 神经网络构建人体的臂部形态识别模型,准确率达 95.45%。可见基于人工智能技术的体型识别准确率比基于经典统计方法的识别模型更高。由于人体数据信息复杂多样,包含着各种不确定性、波动性和非线性数据,根据人工智能算法可使得判别系统在原始数据的基础上不断训练学习,最终得到具有更强泛化能力和稳定性的模型。

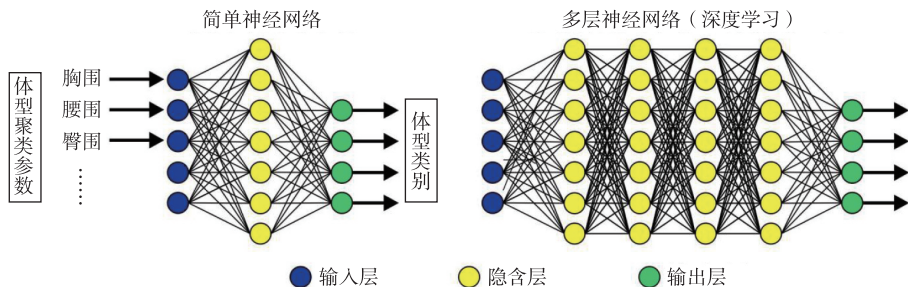


图 3 体型识别神经网络模型

Fig. 3 Neural network model for body shape recognition

## 4 结 语

文中从形态参数分析和聚类方法两方面总结了人体体型分析的具体研究方向、发展现状以及相关研究成果。针对形态参数分析,从整体体型分析的角度,总结了常使用的一些参数,如身高、体质量、BMI 指数和胸腰差等,并分析了目前各国服装号型划分的优缺点;从局部体型分析的角度,总结了颈部、肩部、胸部、腰腹臀部和下肢 5 个部分常用的人体参数,相较采用宽度、厚度和围度等参数对人体局部形态进行描述,人体截面曲线则更能直观且细致地表征人体局部形态。针对聚类方法,总结了 K-means 聚类法、两步聚类法和模糊聚类法 3 种方法的优缺点。最后,在智能化和自动化技术飞速发展的时代,从人体自动测量技术和人体体型智能判别两方面对未来人体体型分析领域研究方向进行展望。人体体型的精确分析,可应用在服装尺码设置、三维人体建模和数字化服装等领域,能帮助服

装企业更加准确了解消费者体型,设计更符合人体特征的产品,提高服装合体度。

### 参考文献:

[ 1 ] SONG H K, ASHDOWN S P. Categorization of lower body shapes for adult females based on multiple view analysis [ J ]. Textile Research Journal, 2011, 81 ( 9 ) : 914-931.

[ 2 ] DE KLERK H M, TSELEPIS T. The early-adolescent female clothing consumer: expectations, evaluation and satisfaction with fit as part of the appreciation of clothing quality [ J ]. Journal of Fashion Marketing and Management, 2007, 11 ( 3 ) : 413-428.

[ 3 ] GILL S. Improving garment fit and function through ease quantification [ J ]. Journal of Fashion Marketing and Management, 2011, 15 ( 2 ) : 228-241.

[ 4 ] CHEN C M. Fit evaluation within the made-to-measure process [ J ]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2007, 19 ( 2 ) : 131-144.

[ 5 ] ALEXANDER M, CONNELL L J, PRESLEY A B.

- Clothing fit preferences of young female adult consumers [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2005, 17(1): 52-64.
- [6] CHEN C M. Analysis of upper physical characteristics based on angle measurements [J]. *Textile Research Journal*, 2011, 81(3): 301-310.
- [7] SUN J, CAI Q Y, LI T, et al. Body shape classification and block optimization based on space vector length [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2019, 31(1): 115-129.
- [8] LI P, CORNER B, PAQUETTE S. Shape analysis of female torsos based on discrete cosine transform [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2015.
- [9] SIMMONS K, ISTOOK C L, DEVARAJAN P. Female figure identification technique (FFIT) for apparel, part II: development of shape sorting software [J]. *Journal of Textile and Apparel*, 2004, 4(1): 1-14.
- [10] CONNELL L J, ULRICH P V, BRANNON E L, et al. Body shape assessment scale: instrument development for analyzing female figures [J]. *Clothing and Textiles Research Journal*, 2006, 24(2): 80-95.
- [11] FURNHAM A, TAN T N, MCMANUS C. Waist-to-hip ratio and preferences for body shape: a replication and extension [J]. *Personality and Individual Differences*, 1997, 22(4): 539-549.
- [12] EMANUEL I. A height-weight sizing system for flight clothing [M]. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Wright Air Development Center, Air Research and Development Command, United States Air Force, 1959.
- [13] CHOI S, ASHDOWN S P. 3D body scan analysis of dimensional change in lower body measurements for active body positions [J]. *Textile Research Journal*, 2011, 81(1): 81-93.
- [14] YOON M K, NAM Y J, KIM W. Classifying male upper lateral somatotypes using space vectors [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2016, 28(1): 115-129.
- [15] HSU C H. Applying a bust-to-waist girth ratio approach to develop body measurement charts for improving female clothing manufacture [J]. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2008, 25(3): 215-222.
- [16] CHUN-YOON J, JASPER C R. Garment-sizing systems: an international comparison [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1993, 5(5): 28-37.
- [17] 朱碧空, 李月. 女装号型分类方法对比研究与优化 [J]. *毛纺科技*, 2018, 46(4): 41-45.
- ZHU Bikong, LI Yue. Contrastive study and optimization of the female size standards [J]. *Wool Textile Journal*, 2018, 46(4): 41-45. (in Chinese)
- [18] 黄灿艺, 张欣. 青年男性颈部分类与尺寸规格分析 [J]. *纺织学报*, 2007, 28(1): 91-94.
- HUANG Canyi, ZHANG Xin. Analysis on neck clustering of young men and size specifications of shirts [J]. *Journal of Textile Research*, 2007, 28(1): 91-94. (in Chinese)
- [19] 王婷, 顾冰菲. 基于二维图像的青年女性颈肩部形态自动识别 [J]. *纺织学报*, 2020, 41(12): 111-117.
- WANG Ting, GU Bingfei. Automatic identification of young women's neck-shoulder shapes based on images [J]. *Journal of Textile Research*, 2020, 41(12): 111-117. (in Chinese)
- [20] PAEK K J, LEE J R. A study on characteristics and correspondence of men's back and chest types [J]. *Fashion and Textile Research Journal*, 2004, 6(3): 357-366.
- [21] HYUN S B. A study on breast type classification and discrimination using manual measurement-focusing on Korean women in their 20s [J]. *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, 2020, 25(5): 137-146.
- [22] 倪世明. 基于纵截面曲线形态的青年女性体型识别研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
- [23] 金娟凤, 庞程方, 陈伟杰, 等. 青年男性肩点横截面曲线及其体型细分 [J]. *纺织学报*, 2016, 37(8): 100-106.
- JIN Juanfeng, PANG Chengfang, CHEN Weijie, et al. Study on subdivision of young male's shoulder shapes and cross-section curve [J]. *Journal of Textile Research*, 2016, 37(8): 100-106. (in Chinese)
- [24] 姚怡, 马静, 吴欢, 等. 基于小波系数的青年女性体型分类及原型纸样 [J]. *纺织学报*, 2017, 38(12): 119-123.
- YAO Yi, MA Jing, WU Huan, et al. Young female body shape classification and prototype patterns based on wavelet coefficient [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(12): 119-123. (in Chinese)
- [25] 夏凤勤, 毋戈, 谢昊洋, 等. 基于人体纵截面特征曲线的体型分类 [J]. *纺织学报*, 2017, 38(6): 86-91.
- XIA Fengqin, WU Ge, XIE Haoyang, et al. Classification of body shape based on longitudinal section curve [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(6): 86-91. (in Chinese)
- [26] 夏明, 陈益松, 张文斌. 基于椭圆傅里叶的人体胸围断面形状研究 [J]. *纺织学报*, 2014, 35(7): 107-112, 116.
- XIA Ming, CHEN Yisong, ZHANG Wenbin. Shape analysis of bust slice using Elliptic Fourier [J]. *Journal of Textile Research*, 2014, 35(7): 107-112, 116. (in Chinese)
- [27] 王祺明. 基于人体三围截面面积的江浙地区女性体型

- 分类[J]. 纺织学报, 2016, 37(5): 131-136.
- WANG Qiming. Female body classification in Jiangsu and Zhejiang based on cross-sectional area of body [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(5): 131-136. (in Chinese)
- [28] 庞程方. 基于横截面形态的青年男性体型细分与识别研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
- [29] 阮婷, 袁惠芬, 韦玉辉, 等. 基于三维人体测量的青年男性肩部形态分类[J]. 服装学报, 2020, 5(6): 488-492.
- RUAN Ting, YUAN Huifen, WEI Yuhui, et al. Young male shoulder morphology classification based on three-dimensional body measurement [J]. Journal of Clothing Research, 2020, 5(6): 488-492. (in Chinese)
- [30] 张文斌, 方方. 服装人体工效学[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008: 141-143.
- [31] MAHNIC NAGLIC M, PETRAK S. A method for body posture classification of three-dimensional body models in the sagittal plane[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(2): 133-149.
- [32] 吴巧英, 冯婉婉. 长江下游地区学龄前女童体型的分类[J]. 纺织学报, 2013, 34(4): 111-116.
- WU Qiaoying, FENG Wanwan. Body classification of preschool girls from lower region of the Yangtze River[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(4): 111-116. (in Chinese)
- [33] 徐凯忆, 钟泽君, 蔡晓裕, 等. 基于青年女性下肢形态分类的特征部位围度拟合[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(1): 204-211.
- XU Kaiyi, ZHONG Zejun, CAI Xiaoyu, et al. Circumference fit of characteristic parts based on the morphological classification of young women's lower limbs[J]. Advanced Textile Technology, 2022, 30(1): 204-211. (in Chinese)
- [34] 王军, 李晓久, 潘力, 等. 东北地区青年女性腰臀部体型特征与分类[J]. 纺织学报, 2018, 39(4): 106-110.
- WANG Jun, LI Xiaojie, PAN Li, et al. Waist hip somatotype and classification of young women in Northeast China [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(4): 106-110. (in Chinese)
- [35] CHUNG M J, LIN H F, WANG M J J. The development of sizing systems for Taiwanese elementary and high-school students [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37(8): 707-716.
- [36] LIU KX, WANG J P, TAO X Y, et al. Fuzzy classification of young women's lower body based on anthropometric measurement[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2016, 55: 60-68. (in Chinese)
- [37] GU B F, LIU G L, XU B G. Individualizing women's suit patterns using body measurements from two-dimensional images [J]. Textile Research Journal, 2017, 87(6): 669-681.
- [38] WANG T K, GU B. Automatic recognition and 3D modeling of the neck-shoulder human shape based on 2D images[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2021, 33(5): 796-810.
- [39] 李科, 毋涛, 刘青青. 基于深度图与改进 Canny 算法的人体轮廓提取[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(5): 67-72.
- LI Ke, WU Tao, LIU Qingqing. Human contour extraction based on depth map and improved canny algorithm [J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(5): 67-72. (in Chinese)
- [40] DE SOUZA J W M, HOLANDA G B, IVO R F, et al. Predicting body measures from 2D images using Convolutional Neural Networks [C]//2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Glasgow: IEEE, 2020: 1-6.
- [41] CAI X Y, GU B F, HE H Z. Classification analysis of young female students' waist-abdomen-hip based on body photos[J]. Textile Research Journal, 2021, 91(11/12): 1409-1418.
- [42] ZOU F Y, DING X J, ZHANG S J, et al. Application of neural network to identification of young females' body type [C]//2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Taipei: IEEE, 2007: 2257-2261.
- [43] 毛倩, 周捷, 王琪. 基于 GRNN 和 PNN 的西部青年女性乳房形态识别[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(4): 7-13.
- MAO Qian, ZHOU Jie, WANG Qi. Breast shape recognition of young women in the west of China based on GRNN and PNN [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(4): 7-13. (in Chinese)
- [44] 倪世明, 白云龙, 蒋益群. 基于 MEA-BP 神经网络的青年女性臂部体型识别[J]. 丝绸, 2022, 59(5): 42-49.
- NI Shiming, BAI Yunlong, JIANG Yiqun. Young female arm body shape recognition based on MEA-BP neural network [J]. Journal of Silk, 2022, 59(5): 42-49. (in Chinese)

(责任编辑: 卢杰)