

面向工业应用的人像产品相似度评价方法

徐韶华, 刘飞[†], 杨大平, 周寒

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 针对现有相似度评价方法难以应用于个性化人像产业中的问题,提出了一种面向工业应用的人像产品相似度评价新方法。提出了基于相似三角形原理的个性化人像产品相似度的定义,为相似度评价提供了标准,根据相似度定义建立了基于特征权重的相似度模型,实现个性化人像产品相似度的定量化计算。提出了基于相似度模型的个性化人像产品相似度的评价方法,指出了面向应用的人像分区与权重确定、数据采集方法。个性化人像浮雕吊坠产品和三维扫描真人人像产品的验证实验表明,用该方法能够准确地评价产品的相似度,对于人像产业发展中控制个性化人像产品的质量以及解决制造商与客户的争议问题均具有较好的应用前景。

关键词: 个性化人像产品; 相似度; 相似三角形; 评价方法

中图分类号: TP393.04

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)05-1458-06

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.039

Similarity evaluation method of portrait products for industrial application

Xu Shaohua, Liu Fei[†], Yang Daping, Zhou Han

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper proposed the similarity evaluation method of portrait products for industrial application, solving the problem of the existing method difficultly applied to the personalized portrait industry. First, it proposed the definition of similarity of personal portrait products based on similar triangulation principle, which provided a standard for similarity evaluation. Then, it established a similarity model based on feature weight according to the definition of similarity, and quantitatively calculated the similarity of personal portrait product. Finally, it proposed the similarity model of personalized portrait product similarity evaluation method, it proposed a method application-oriented of portrait partition, weight determination and data acquisition. Personalized portrait relief pendant products and three-dimensional scanning portrait product verification experiments show that the method can accurately evaluate the similarity of products, it has a good application prospect for the quality control of personal portrait products in the development of portraits industry and the solution of disputes between manufacturers and customers.

Key words: personalized portrait product; similarity; similar triangles; evaluation method

0 引言

目前,以个性化人像产品为基础的个性化人像产业正在兴起,并且发展迅速。市面上的典型产品有名人蜡像馆、真人雕塑、真人浮雕、真人公仔和真人影雕等。个性化人像产业中,产品相似度是个性化人像产业的根本基础,有助于提高生产过程中的能效^[1],以控制成本;也是制造商质量控制和解决与客户争议的关键因素,因此,准确、有效的相似度评价方法对于个性化人像产业具有重大的实用意义。

针对人像相似度评价问题,有关文献进行了深入的研究。现有的人像产品相似度评价研究主要分为两类,即主观定性评价法研究和客观定量评价法研究。在主观评价定性评价法研究方面,Cao等人^[2]在研究人像检索时提出了通过人机交互学习基于人类感知的人脸相似度,准确性较高,但是这种方法需要事先建立一个和人类感知相符的空间,然后将人像数据集嵌入其中,操作周期长,难度较大;Stephan等人^[3]和 Quatrehomme等人^[4]通过主观评价方法评价相似度的过程中,均发现不同

的主观评价方法的评价结果存在较大差异;陈涛等人^[5]采用双层拉普拉斯流形对齐方法,建立了二维人脸图像和三维网格人脸间的相似模型,但是模型的有效性是通过主观评测法衡量的,存在局限性。客观定量评价法方面,Moorthy等人^[6]从特征点中提取 Gabor 特征比较相似度,通过比较多维向量间的相似度评价两个人像模型的相似度;顾晓东等人^[7]基于自适应颜色特征提取的技术,提出一种加权主色优先距离相似度衡量方法,相比于 CHIC 及 OCCD 衡量方法准确度更高,但是特征提取时容易受到环境光线等影响而出现差异^[8];Drira等人^[9]将弹性度量引入到人脸识别中,通过分析比较面部径向曲线来衡量人脸的相似度;李红艳等人^[10]参考现有的通用三维模型相似度评价体系以及三维人脸识别理论的研究成果来探索适用于三维面貌相似度评价的方法,从几何数值计算的角度来评价面貌相似度,这些方法对人像相似度的评价提供了一定的借鉴,但是特征提取困难,操作复杂。

通过上述可以看出,现有文献在人像相似度方面作了大量的研究。但是在相似度评价方面,主观定性评价法评价周期长,评价结果因人而异,准确性很难保证;客观定量评价法研究

收稿日期: 2016-12-30; 修回日期: 2017-02-17

作者简介: 徐韶华(1990-),男,硕士,主要研究方向为个性化人像产品建模及数控加工技术;刘飞(1948-),男(通信作者),教授,博士,主要研究方向为制造系统工程、网络化制造和绿色制造(fliu@cqu.edu.cn);杨大平(1992-),男,硕士,主要研究方向为个性化人像产品数控加工技术;周寒(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为个性化人像产品数控加工技术。

方面,有的特征提取时容易受到环境影响,有的特征提取困难,操作复杂;因此现有方法难以应用于个性化人像产品产业中。有鉴于此,本文对个性化人像产品相似度量化评价的新方法进行了研究。

1 基于相似三角形原理的个性化人像产品相似度的定义方法

个性化人像产品相似度的定义是相似度评价研究的基础,但是现有文献对个性化人像产品相似度定义的研究反而不多,不过也有一些研究。例如,Jain 等人^[11]提到了聚类问题中的相似性定义,并在三维人脸的相似度定义上得到了应用^[12],但是这种方法对人脸图像的光照环境(强度、方向等)要求太高;Chen 等人^[13]证明利用图像梯度信息可以确定同一三维物体不同图像间的相似性,在人像相似度定义上得到了一定的应用,但是这种方法在解决非正面人脸的相似性定义时效果较差;庄小芳^[14]归纳总结了中外研究中的图像相似度定义中常见的理论;张秀琴等人^[15]在人脸识别研究中提到了基于最近邻法的人脸图像相似度定义,但是需要提取图像特征并建立图像的特征矩阵。

综上所述,在相似度定义方面,现有方法是从各个不同角度提出的,尚缺乏能够应用于个性化人像产品相似度的定义方法。鉴于此,本文对个性化人像产品的量化评价方法进行了研究。

1.1 相似度定义方法的提出

个性化人像产品分为三维形式和二维形式,为了叙述简单,先以二维产品为例说明。二维个性化人像产品是一种曲边形,如果两个二维人像相似,它们所对应的曲边形是相似的,显然,这两个曲边形上任意对应三点组成的三角形是相似的,并且相似比相等;当然,也可以说任意对应的四个点或者多个点组成的多边形相似,但是计算难度大,难以建立相似度模型,因此采用三角形来描述这一特性。相反,如果一个曲边形上任意对应三点组成的三角形都相似,并且相似比相等,只要三角形数量多到一定程度,容易证明这两个曲边形是相似的。以图1为例,图中的两个曲边形上任意三个对应点组成的三角形都相似,并且相似比相等,那么这两个曲边形相似。

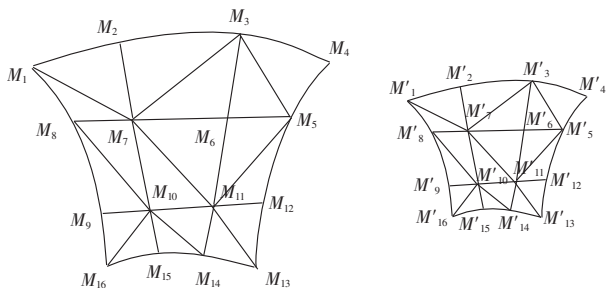


图1 曲边形三角形划分示意图

空间形体可以通过三角形来实现无限逼近,不难证明,对于空间形体这一性质同样适用。考虑到个性化人像产品分为二维曲边形形式和三维空间形体形式,从上述的性质中得到启发,通过个性化人像产品上的点来构建三角形,并通过三角形的相似原理对相似度进行定义。

1.2 相似度的定义方法

个性化人像产品的相似度是指产品与原像之间的相似度,

原像是指个性化人像产品制作时的原型,可以是照片,也可以是模型或者真人等。因而,个性化人像产品的相似度可以定义如下:

个性化人像产品上的任意三点 $((x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j)$ 和 $(x_k, y_k, z_k))$ 所形成的三角形,称为一个基础三角形,与原像上的对应三点 $((X_i, Y_i, Z_i), (X_j, Y_j, Z_j)$ 和 $(X_k, Y_k, Z_k))$ 所形成的三角形应具有相似性。其中,基础三角形的三边长 a, b, c 分别为

$$\begin{cases} a = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \\ b = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2} \\ c = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2 + (z_j - z_k)^2} \end{cases} \quad (1)$$

原像上的三角形三边长 A, B, C 分别为

$$\begin{cases} A = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \\ B = \sqrt{(X_i - X_k)^2 + (Y_i - Y_k)^2 + (Z_i - Z_k)^2} \\ C = \sqrt{(X_j - X_k)^2 + (Y_j - Y_k)^2 + (Z_j - Z_k)^2} \end{cases} \quad (2)$$

若个性化人像产品和原像完全相似,则有

$$a/A = b/B = c/C \quad (3)$$

因此,称

$$F = \frac{\left| \frac{a/A - b/B}{b/B} \right| + \left| \frac{b/B - c/C}{c/C} \right| + \left| \frac{c/C - a/A}{a/A} \right|}{3} \quad (4)$$

为该基础三角形的非相似度,称

$$T = |F - 1| \quad (5)$$

为该基础三角形的相似度;符合分布原则且足够多的基础三角形的相似度的加权和,称为该个性化人像的相似度。符合分布原则是指个性化人像产品中的每个特征中至少包含一个基础三角形;权重是指由于人眼对于不同的特征敏感度不同,导致了不同的基础三角形对相似度的贡献不同,所以需要对每个基础三角形赋予其相应的权重。

2 个性化人像产品相似度模型

个性化人像产品的相似度定义中为量化表达相似度提供了理论依据,如何根据定义定量地表达出个性化人像产品的相似度是相似度模型的主要研究内容。

2.1 面向人像特征的基础三角形选取方法

人像上的点中有一部分点反映人像的结构特征,称为特征点。每个人像具有唯一确定的特征点。显然,对于两个人像来说,如果采用对应的特征点作为基础三角形顶点来对它们进行相似度评价,那么当这些三角形都对应相似,且相似比相同时,这两个人像是完全相似的。因此,基于特征点选取基础三角形在保证相似度评价结果准确性的同时,还能极大地降低计算量。

任意三个不共线的特征点都能组成基础三角形,但是实际上在选取基础三角形时,会存在很多重复选取的情况,以图2所示的空间四边形为例。

图2(a)中的基础三角形有四个,实际上,两个基础三角形就可以实现图中多边形的相似度计算,如图2(b)所示,其他基础三角形是从不同的角度进行的重复性计算,没有选取的必要。因此,在选取基础三角形时,需要确定合适的选取策略,降低重复工作量。

因此,面向人像特征的基础三角形选取可以参考三角网格

划分方法,通过相邻顶点来实现对曲面的逼近,如图 3 所示。假设一个人像上有 $N(N \geq 3)$ 个不共线的特征点来选取基础三角形,总共可以组成 $(N-2)$ 个网格三角形,基础三角形可以在这些网格三角形中选取。

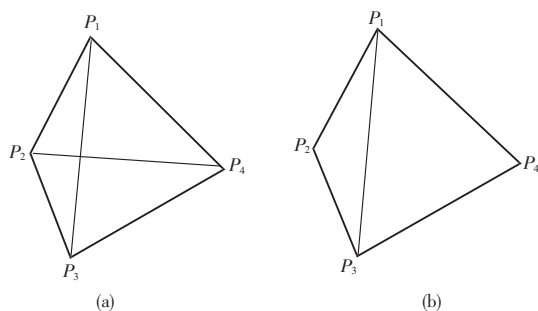


图 2 基础三角形选取对比图

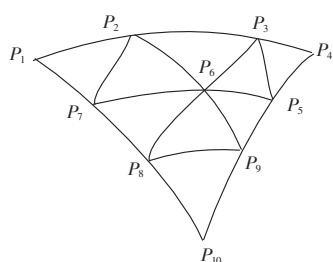


图 3 三角网格细分示意图

2.2 个性化人像产品相似度模型

人像上有无数个特征,选取基础三角形后,根据相似度的定义及式(5),第 l 个特征的相似度模型可以用式(6)表示:

$$S_l = \frac{\sum_{t=1}^n T_t}{n} \quad (6)$$

$$T_t = |F_t - 1| \quad (7)$$

式(7)中: t 表示该分区中的第 t 个基础三角形, $t=1,2,3,\dots,n$; T_t 表示第 t 个基础三角形的相似度。

每个特征的权重记为 δ_l ,因此,个性化人像产品的相似度计算模型可以表示为

$$\text{SIM} = \sum_{l=1}^m \delta_l S_l \quad (8)$$

3 基于相似度模型的个性化人像产品相似度的评价方法

3.1 基础三角形的确定方案

人像的复杂性决定了特征点是无穷多的,因此,基于特征点选取基础三角形效率较低;同时,由于人眼视觉特性,评价人像相似度时,人们观察的是人像的局部区域而非具体的特征点。所以,为了保证相似度评价结果更加合理,参考运动图像专家组 MPEG-4^[16,17] 提出的脸部定义参数(face definition parameter, FDP)中的 84 个特征点,对人脸进行区域划分。FDP 特征点位置如图 4 所示。

FDP 特征点反映的是人像的脸部几何特征,通用性强,数据量小,在人像领域得到广泛的应用。MPEG-4 小组将 FDP 特征点分为 11 个组,如下巴、眼睛和嘴等,因此,采用 FDP 特征点将人像分区来计算人像的相似度,不仅可以反映出人像的特征,并且能够大大降低计算量,提高计算效率。以鼻子上的五个 FDP 特征点 9.6、9.7、9.13、9.3、9.14 为例,这五个点没有共线的三个点,所以总共可以组成三个基础三角形,如图 5 所示。

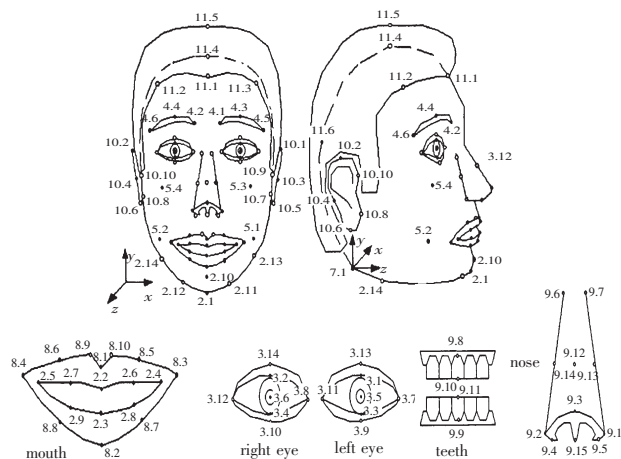


图 4 FDP 特征点

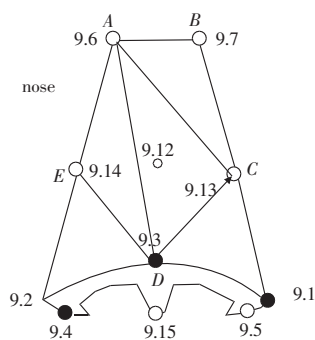


图 5 鼻子区域及其基础三角形示意图

同时,考虑到人像的差异性,有的人像上存在痣或疤痕等特殊特征,因此,在确定这些特征的基础三角形时,除了 FDP 特征点外,需要适当增加额外的特征点数量,保证相似度计算的准确性与合理性。

显然,分区后的每个区域都可以看做是一个整体的特征,因此,式(8)中的特征相似度计算方法仍然适用。

3.2 面向应用的权重确定

Takahasi 等人^[18] 的调查结果表明,人脸的不同区域对整体相似度的贡献度不同,其中眼睛的贡献度较大,因此,需要对分区后的每个区域都需要赋予对应的权重。

面向应用的权重确定要求权重能够符合人眼视觉特性,从而保证相似度计算结果合理性。本文基于调查统计的方式确定权重:根据 FDP 特征点的分组,将一张照片训练样本分为不同的区域,并对每个不同的区域分别进行识别实验,统计每一个区域的识别数 ω_u ,然后根据式(9)计算各个区域的权重 α_u :

$$\alpha_u = \frac{\omega_u}{\sum_{u=1}^n \omega_u} \quad (9)$$

其中: $u=1,2,3,\dots,n$ 表示一个训练模型中第 j 个区域。

3.3 数据采集方法

数据采集是相似度评价的基础,数据采集方法的合理与否决定了相似度结果的准确与否,如何准确、快速地选取原像与个性化人像产品上的 FDP 特征点,是数据采集方法的关键。

3.3.1 二维图像的特征点提取

现有的二维图像特征提取方法操作过程复杂,计算难度大、周期长,不适用于工业应用。因此,为了保证提取效率及提取的准确性,考虑到图像的基本构成单位是像素点,通过像素点的标定选取 FDP 特征点。二维图像放大到一定的倍数后,

会显现出像素点,如图 6 所示。因此,可以将图像适当放大,并手工标定特征点。

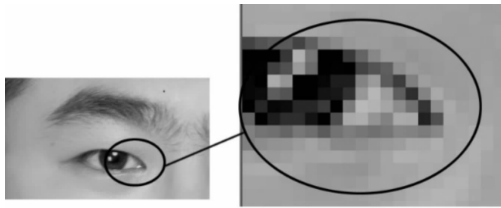


图 6 眼角局部放大示意图

3.3.2 三维图形的特征点提取

同样地,现有三维图形的特征点提取方法数据庞大、提取效率低,因此本文提出基于三维图形点云数据的特征点提取方法:通过获取三维图形的点云数据,然后在点云数据中标定 FDP 特征点。三维图形包括三维虚拟模型和真实三维产品,这两种三维图形的点云获取方式是不同的。

真实三维产品可以通过高精度扫描仪获取其点云数据;三维虚拟模型可以通过曲面离散化处理的方式获取点云数据。

3.4 评价流程

评价流程是整个评价方法的直接体现。本文中的相似度评价流程如图 7 所示。

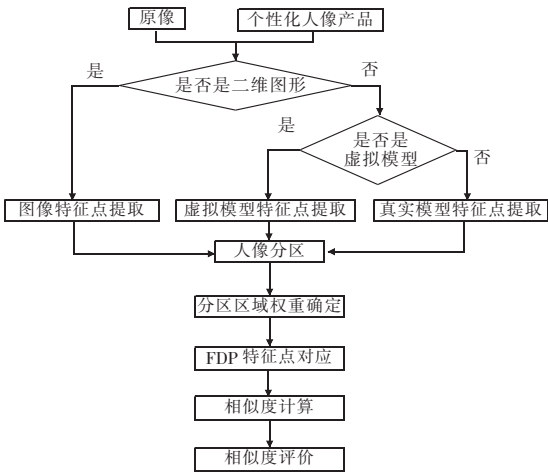


图 7 评价流程

图 7 中的分区区域权重确定环节的数据信息可以重复调用,第一次相似度评价时确定分区区域的权重即可,其他人像的相似度评价可以直接采用同样的权重数据,降低重复工作量。

4 应用案例

4.1 二维产品的相似度评价

真人人像吊坠产品^[19]是典型的二维个性化人像产品,如图 8 所示。



图 8 真人人像吊坠产品

该产品制作过程中没有修改人像的特征,从理论上来说,

该产品具有极高的相似度。因此,本案例通过对其相似度的评价验证本文方法的可行性与有效性。

选取一个吊坠样品,采用高清相机采集吊坠的人像数据。为了计算方便,同时由于在从原像到人像产品的过程中,人脸区域是重点关注的对象,因此本文选取脸部作为计算区域,如图 9(a)所示。参考 FDP 特征点,选取轮廓上的 12 个点,左右眉毛上的各 3 个点,左右眼睛上的各 4 个点,鼻子上的 7 个点,嘴巴上的 7 个点计算相似度。同时,提取原像照片上的 41 个对应特征点,将人脸划分为眼睛、眉毛、鼻子、嘴巴和其他部分五个分区。原像上的分区与基础三角形划分示意图如图 9(b) (划分形式之一)所示,图 9(b)中,黑色实线是眼睛、眉毛、鼻子、嘴巴的基础三角形,白色实线是脸部除去上述部分外的其他区域的基础三角形。

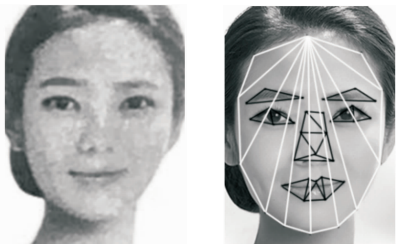


图 9 人脸分区与基础三角形划分示意图

将吊坠产品上的特征点与原像照片上的特征点对应,然后根据式(6),得到每个分区的相似度如表 1 所示。

表 1 各分区的相似度

分区名称	相似度 $S_k/\%$	分区名称	相似度 $S_k/\%$
眼睛	94.17	嘴巴	92.67
眉毛	88.06	其他部分	98.14
鼻子	94.33		

为了确定每个分区的权重,通过对眼睛、眉毛、鼻子、嘴巴和其他部分五个分区进行识别实验,并统计每个分区的识别率,然后根据式(9)计算每个分区的权重。本次识别实验中,统计样本共计 100 人,样本人员包括购买过产品的客户、随机人员和公司内部职员,样本比例设为 4 : 3 : 3,统计后的样本分布图如图 10 所示。

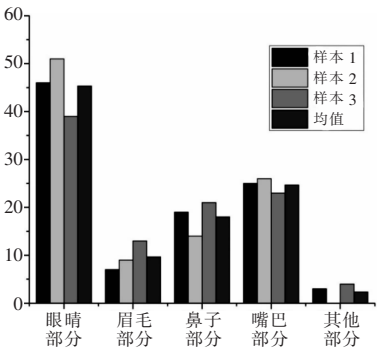


图 10 识别实验样本分布图

每个分区的权重 α_k 如表 2 所示。

表 2 分区权重

分区名称	权重 α_k	分区名称	权重 α_k
眼睛	0.45	嘴巴	0.25
眉毛	0.10	其他部分	0.02
鼻子	0.18		

根据式(8),得到该产品的相似度为 $SIM_1 = 93.29\%$,与文献[18]提供的数据较相符,为了进一步验证本方法的准确性,

另外随机选取五个吊坠产品评价其相似度,结果如表 3 所示。

表 3 吊坠产品相似度

样本名称	分区名称	分区相似度/%	样本相似度/%
吊坠产品 1	眼睛	97.81	95.31
	眉毛	92.56	
	鼻子	91.34	
	嘴巴	94.59	
	其他部分	97.67	
吊坠产品 2	眼睛	89.34	91.18
	眉毛	94.18	
	鼻子	93.57	
	嘴巴	91.49	
	其他部分	92.34	
吊坠产品 3	眼睛	96.60	92.69
	眉毛	89.30	
	鼻子	86.12	
	嘴巴	91.74	
	其他部分	92.47	
吊坠产品 4	眼睛	97.24	95.89
	眉毛	94.60	
	鼻子	90.26	
	嘴巴	97.98	
	其他部分	96.35	
吊坠产品 5	眼睛	93.62	92.10
	眉毛	91.15	
	鼻子	91.90	
	嘴巴	89.98	
	其他部分	90.77	

通过专家评价法和基于欧氏距离的相似度评价法分别验证本文方法。

随机选取 50 人作为评价专家,给出上述六个吊坠产品中每个吊坠产品的相似度。在得到的六组相似度数值中,每组数值分别去掉一个最高值和一个最低值,然后求得剩余数值的均值,即为该吊坠样品的相似度;欧氏距离是测量两个特征矩阵的简单方法,因而常用于图像特征相似度计算。本文通过 MATLAB 软件实现对应位置元素的差来计算特征矩阵的相似度,从而计算图形相似度。上述三种方法下的相似度对比如图 11 所示。

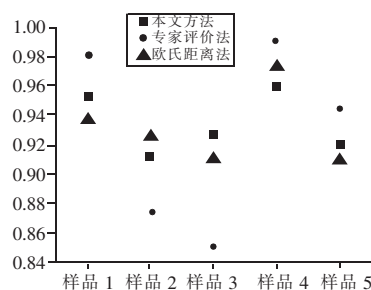


图 11 二维人像相似度评价对比图

与专家评价法相比,本文方法的平均评价误差为 3.91%;与基于欧氏距离的相似度评价法相比,本文方法的平均评价误差为 1.45%,从上述结果可以看出,与现有方法相比,本文方法对二维人像产品的相似度评价准确性较高。

4.2 三维个性化人像产品的相似度评价

同样地,通过专家评价法和基于欧氏距离的相似度评价法分别验证本文方法对三维人像产品相似度评价上的有效性。三维人像产品可以通过“真人→三维扫描→3D 打印”的方式得到,本文随机选取了三个真人,并通过上述流程得到了他们的个性化人像产品,如图 12 所示。

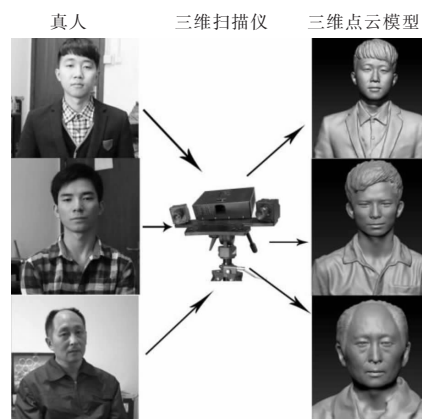


图 12 三维人像产品生产流程示意图

分别通过专家评价法、基于欧氏距离的相似度评价法和本文方法计算三个人像的相似度,得到结果对比如图 13 所示。

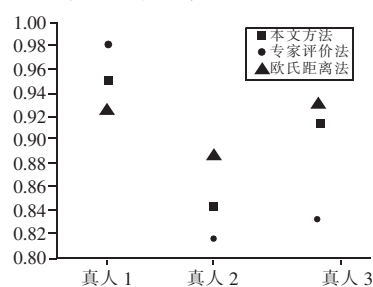


图 13 三维人像相似度评价对比图

与专家评价法相比,本文方法的平均评价误差为 4.64%;与基于欧氏距离的相似度评价法相比,本文方法的平均评价误差为 2.67%,从上述结果可以看出,与现有方法相比,本文方法对三维人像产品的相似度评价准确性也较高。

4.3 相似度评价结果分析与讨论

通过案例 1 和 2 的评价结果可见,专家评价法主观性太强,结果难以控制,相似度容易出现两极分化现象,即“像的相似度特别高,不像的相似度特别低”。客观评价法需要借助软件和相关算法等工具才能实现,计算过程冗杂、周期较长。本文方法在评价结果上与上述两种方法接近;同时,本文方法对于相似度高低的反映与上述两种方法一致,说明本文提出的相似度评价方法对于二维和三维个性化人像产品相似度评价都具有较高的准确性。

此外,由于本文方法的简单性和可靠性,对控制个性化人像产品的质量和解决与客户的争议问题也能起到较好的作用:在质量控制方面:a)质检员可以采取总检方式和随机抽检方式,检测产品相似度是否满足要求;b)当产品相似度不满足要求时,可以根据相似度评价过程中每个分区的相似度,针对性地修改,优先修改权重高、相似度低的区域。在解决与客户争议问题方面,本方法是基于相似三角形原理的客观定量评价方法,并且权重基于调研统计数据确定的,符合人们的视觉特性,因此,与现有的主观定性评价法相比,评价结果不受主观因素影响;与客观定量评价法相比也能保证评价结果的准确性,因而在个性化人像产业中具有较好的应用前景。

5 结束语

个性化人像产品的相似度是个性化人像产业的基础和关键。针对现有评价方法的不足,提出了一种面向工业应用的人

人像产品相似度评价方法。该方法主要包括以下几个方面:

a)提出了基于相似三角形原理的个性化人像产品相似度定义。根据相似三角形原理定量描述了人像产品相似度定义,将相似这一抽象概念量化表达,为相似度评价提供了基础。

b)建立了基于相似度定义的相似度模型。面向人像特征选取基础三角形,并对每个特征赋予相应的权重,实现个性化人像产品相似度的量化计算。

c)提出了基于相似度模型的个性化人像产品相似度的评价方法。从实际应用的角度出发,提出了基于 FDP 特征点的基础三角形确定方案,然后根据 FDP 特征点将个性化人像产品分为不同的分区,分别获取每个分区的相似度;并基于人眼视觉特性,对每个分区赋予不同的权重,最后通过各个分区的加权和,获取个性化人像产品的相似度。另外,为了保证特征点采集效率和评价结果的准确性,提出了基于像素点和点云的数据采集方法。

d)个性化人像浮雕吊坠产品和三维扫描真人人像产品的验证实验表明,上述方法能够准确地量化评价产品的相似度,对于人像产业发展中控制个性化人像产品的质量以及解决制造商与客户的争议问题均具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] Cai Wei, Liu Fei, Zhou Xiaona, *et al.* Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry[J]. *Energy*, 2016, 114: 623-633.
- [2] Cao Chong, Ai Haizhou. Facial similarity learning with humans in the loop[J]. *Journal of Computer Science & Technology*, 2015, 30(3): 499-510.
- [3] Stephan C N, Arthur R S. Assessing facial approximation accuracy: how do resemblance ratings of disparate faces compare to recognition tests? [J]. *Forensic Science International*, 2006, 159(1): 159-163.
- [4] Quatrehomme G, Balaguer T, Staccini P, *et al.* Assessment of the accuracy of three-dimensional manual craniofacial reconstruction: a series of 25 controlled cases[J]. *Deutsche Zeitschrift Für Die Gesamte Gerichtliche Medizin*, 2007, 121(6): 469-475.
- [5] 陈涛, 张红民, 刘军发. 异构人脸在流形空间中的相似模型研究[J]. *计算机科学与探索*, 2013, 7(2): 152-159.
- [6] Moorthy A K, Mittal A, Jahanbin S, *et al.* 3D Facial similarity: automatic assessment versus perceptual judgments[C]//Proc of the 4th IEEE International Conference on Biometrics: Theory Applications and Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 1-7.
- [7] 顾晓东, 杨诚. 新的颜色相似度衡量方法在图像检索中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(10): 2286-2292.
- [8] 马媛媛. 可变光照下的人脸识别算法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [9] Drira H, Ben A B, Srivastava A, *et al.* 3D face recognition under expressions, occlusions, and pose variations[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2013, 35(9): 2270-2283.
- [10] 李红艳, 武仲科, 周明全. 基于几何特征的三维面貌相似度评价[C]//第六届图像图形技术与应用学术会议. 2011: 105-111.
- [11] Jain A K, Murty M N, Flynn P J. Data clustering: a review[J]. *ACM Computing Surveys*, 1999, 31(3): 264-323.
- [12] 魏衍君, 杨明莉. 基于聚类建模的三维人脸识别技术研究[J]. *陕西科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 30(2): 77-81.
- [13] Chen H F, Belhumeur P N, Jacobs D W. In search of illumination invariants[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Computer Society, 2000: 254-261.
- [14] 庄小芳. 基于混合图结构的图像相似度的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [15] 张秀琴, 陈立潮, 潘理虎. 基于 DCT 和分块 2D2PCA 的人脸识别[J]. *太原科技大学学报*, 2014, 35(5): 333-338.
- [16] ISO/IEC 14496-1: 1999, Coding of audio-visual objects: systems, amendment 1 [S]. 1999.
- [17] ISO/IEC 14496-2: 1999, Coding of audio-visual objects: visual, amendment 1 [S]. 1999.
- [18] Takahasi K, Ueda H, Miyahara T, *et al.* A study on face similarity using knowledge processing methods[C]//Proc of Tencon IEEE Region. Melbourne, Qld., Australia: IEEE Press, 2005: 1-6.
- [19] 刘飞, 徐韶华, 王舟洲, 等. 一种雕刻有个性化人像浮雕的吊坠体的制造方法: 中国, ZL 201510579764.5 [P]. 2016-01-06.
- [10] Koenig D. Unknown input proportional multiple integral observer design for linear descriptor systems: appalachian to state and fault estimation[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2005, 50(2): 212-217.
- [11] Chee P T, Edwards C. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults [J]. *Automatica*, 2002, 38(10): 1815-1821.
- [12] Chee P T, Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2003, 13(5): 443-463.
- [13] Gao Zhiwei, Ding X C. Actuator fault robust estimation and fault-tolerant control for a class of nonlinear descriptor systems[J]. *Automatica*, 2007, 43(5): 912-920.
- [14] Gao Zhiwei, Daniel W C. Proportional multiple-integral observer design for descriptor systems with measurement output disturbances[J]. *Control Theory Application*, 2004, 151(3): 279-288.
- [15] Yang Junqi, Zhu Fanglai, Sun Xiaojie. State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on associated observers[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2013, 27(10): 846-858.
- [16] Gao Zhiwei, Wang Hong. Descriptor observer approaches for multivariable systems with measurement noise and application in fault detection and diagnosis [J]. *Systems and Control Letters*, 2006, 55(4): 304-313.
- [17] Yang Junqi, Zhu Fanglai, Wang Xin. Robust sliding-mode observer-based sensor fault estimation, actuator fault detection and isolation for uncertain nonlinear systems [J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2015, 13(5): 1037-1046.
- [18] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 35-78.
- [19] Christoffer S, Thomas E, Jakob S. Robust and fault tolerant linear parameter varying control of wind turbines[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(4): 645-659.
- [20] Odgaard P F, Stoustrup J, Kinnaert M. Fault tolerant control of wind turbines: a benchmark model[C]//Proc of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes. 2009: 155-160.

(上接第 1445 页)