

FDM全彩色3D打印机颜色匹配标定算法研究

徐宏伟* 叶文斌 马顺尧 张航

西安理工大学印刷包装与数字媒体学院,西安,710048

摘要:对所开发的全彩色熔融沉积建模(FDM)3D打印机混色效果进行试验分析,验证了所设计的混色喷头的混色均匀性。在此基础上提出了基于FDM 3D打印聚乳酸(PLA)丝材和BP神经网络的RGB-CMYKW颜色匹配标定算法。将CMYW四色丝材按照不同比例混合,获得529种混色样片。利用SOFV-1xi图像采集设备在标准D50光源下对混色样片进行图像颜色(RGB)信息提取,同时结合标准色卡对同一采集条件下提取的信息进行颜色校正,得到529个RGB-CMYW的颜色转换子样。对子样进行训练,确定了FDM 3D打印全彩色颜色匹配标定算法。利用所开发的全彩色FDM 3D打印机进行24色片打印,分析计算打印色片与标准24色卡的对应色差,结果表明,色差普遍较小,能较好地复制颜色特征。同时进行了实际的三维彩色模型设计及打印,进一步验证了所提出的颜色匹配算法的可靠性和实用性。

关键词:熔融沉积建模3D打印;颜色匹配;混色;标定算法;神经网络

中图分类号:TH140.7;TP206.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Color Matching Calibration Algorithm for FDM Full Color

3D Presses

XU Hongwei* YE Wenbin MA Shun Yao ZHANG Hang

Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048

Abstract: Experimental analyses were conducted on the color mixing effect of the developed full-color FDM 3D printers, verifying the color mixing uniformity of the designed mixing nozzles. Thus, an RGB-CMYKW color matching calibration algorithm was proposed based on FDM 3D printing of polylactic acid (PLA) filament and BP neural network. CMYW four-color silk materials were mixed in different proportions to obtain 529 mixed color samples. Using SOFV-1xi image acquisition equipment to extract color (RGB) information from mixed color samples under standard D50 light source, and combining the color information extracted from the standard color card under the same acquisition conditions for color correction, 529 RGB-CMYW color conversion sub samples were obtained. The sub samples were used for training to determine the FDM 3D printing full-color matching calibration algorithm. The developed full-color FDM 3D printer was used to print 24 color chips, and the corresponding color differences among the printed color chips and the standard 24 color card were analyzed and calculated. Results indicate that the color error difference is generally small and the color features may be well replicated. At the same time, actual 3D color model design and printing are carried out, further verifying the reliability and practicality of the proposed color matching algorithm.

Key words: fused deposition modeling(FDM) 3D printing; color matching; color mixing; calibration algorithm; neural network

0 引言

3D打印是当前广为应用的一种增材制造方法^[1-4]。目前我国各种3D设备的保有量位居世界前列,近年来我国颁布的一系列相关文件为3D打印设备的进一步发展提供了助力^[5]。3D打印出的实体模型可以有效复原所设计的三维模型(以

下简称“设计模型”)的形状特征,但是颜色特征的可靠复制现在尚未很好地实现。市场上常见的熔融沉积建模(fused deposition modeling, FDM)3D打印机主要仍是单色打印。为了体现颜色特征,也有一些多喷头打印的多色FDM 3D打印机,虽然增加了颜色信息^[6],但是却无法表达所设计三维模型的所有颜色特征。在打印中,多喷头打印不但成本更高,对运动特性的控制要求也高,易增加断点造成模型的缺陷^[7]。

收稿日期:2024-08-05

基金项目:“十四五”装备预研项目(9090102050301)

当前全彩色3D打印是主流研究方向之一。这种打印机克服了多色打印的缺点,通过混色使得三维模型颜色信息得到复制^[8]。尚晓峰等^[9]提出了一种熔融沉积成形彩色打印机,但是仅停留在对进丝速度的控制,忽略了三维模型颜色信息的准确复制。袁方敏等^[10]利用减法混色法设计了三色混色FDM 3D打印机,但无法打印白色(C、M、Y三色均为零)。截止目前的文献报道,未见FDM全彩色3D打印颜色准确复制的方法。针对这一情况,本文以所开发的FDM全彩色3D打印机为实验平台,建立了基于聚乳酸(PLA)丝材的RGB-CMYKW的色彩匹配标定方法。

1 色彩匹配原理

FDM 3D打印一般通过三维模型的STL文件或3MF文件提取相应模型特征信息,通过前处理软件生成打印G代码^[11],并在FDM机上进行分层打印叠加形成和设计模型一样的3D打印实体模型。与STL文件不同,3MF文件包含颜色信息,但均为色光三原色RGB色彩信息,而实际自然界中的物质颜色都是由物光三原色CMY合成的^[12]。不同的色域空间^[13]存在颜色匹配问题,在印刷技术中,一般采用纽伦堡方程等实现色域的转换以及颜色的匹配^[14]。但是FDM 3D打印材料PLA的呈色效果与油墨完全不同,考虑应用RBF神经网络建立打印机的色空间转换模型^[15],这种方法对解决用PLA材料打印的实体模型与设计三维模型的颜色匹配有一定的帮助。应用神经网络完成色彩空间转换以及颜色匹配的方法,可节省内存空间,速度较快,合适的网络结构和训练方法可使颜色精度达到应用要求^[16]。

FDM 3D打印PLA丝材是通过在PLA材料中添加着色剂等添加剂才有相应的呈色效果。此外,PLA丝材还会被PLA材料的基底颜色影响,在3D打印过程中会随着温度的变化先熔融再冷结晶,这个过程会影响最终材料的呈色效果^[17]。基于此,本文以实验所获子样为基础数据,利用神经网络建立颜色匹配模型,保证打印出的实体模型有效复制设计模型的颜色特征,从而达到“所见即所得”的效果。

2 全彩色3D打印机结构

考虑到白色在实际3D打印中无法实现CMY色材混合,所以本研究将FDM 3D打印机的基本颜色设置为CMYKW五色,其中K是黑色,W是

白色。在原台式FDM 3D打印机的基础上设计开发了带有上料功能的五色丝材架,一起组成FDM全彩色3D打印机,见图1。可以看出,丝材架上放置了CMYKW五色PLA丝材,每个丝材都通过一个由步进电机控制的送丝机构给台式FDM 3D打印机送丝。

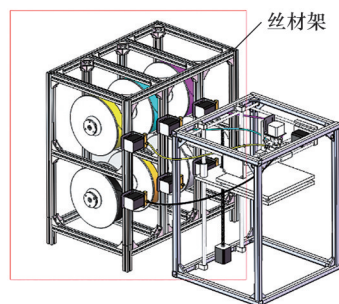


图1 FDM全彩色3D打印机

Fig.1 FDM full color 3D printer

为了保证5种不同颜色丝材的可靠混合,开发了5个送丝口的混色喷头,见图2。可以看出,所开发的混色喷头有5个丝材输入入口,分别为C(青色)、M(品红色)、Y(黄色)、K(黑色)、W(白色)。丝材通过送丝机构按一定比例进入混色喷头进行混色,然后通过混色喷头出口打印在工作台表面。由于送丝机构的速度不同,所以进入混色喷头各色丝材的量也不同,从而使混合的颜色不同。

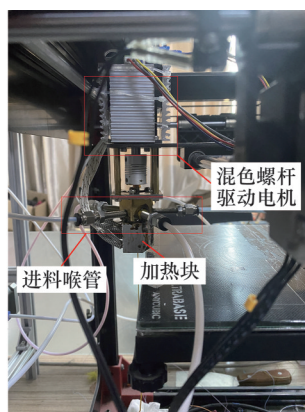


图2 五色混色喷头

Fig.2 Five-color mixing nozzle

通过混色系统进行多种颜色混色的均匀性实验。前期混色实验中发现,只要加入黑色,整个模型颜色就为黑色,所以黑色只能作为专色使用,这里采用CMYW共4种丝材来进行检验样件的打印。设计了15 mm×15 mm×2 mm的打印样片模型,按送丝比例C:M:Y:W为0.27:0.497:0.292:0.005,进行混色打印,打印样件见图3。图3中,样件上有明显挤出丝材的走线轨迹。由于样件表面不平,而光线会影响颜色的呈色效果,为了更好地检测其颜色的均匀性,选取样件上打印

丝材顶部位置为检测位置,在其打印轨迹路线上较均匀地选取了10个检测点,图中数字1~10即为所选取测试点的序号。对这些测试点的颜色进行提取,得到其相应的颜色信息见表1。

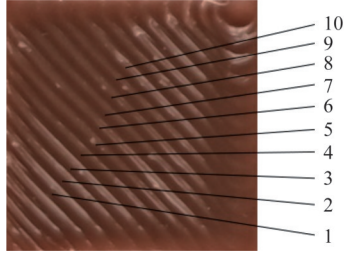


图3 混色打印色片

Fig.3 Color mixing print samples

表1 10个点的RGB值

Tab.1 The RGB values of the 10 points

序号	R	G	B
1	116	71	50
2	116	69	51
3	114	69	50
4	117	71	48
5	116	69	49
6	118	73	49
7	118	71	48
8	118	71	49
9	115	70	48
10	117	72	51

由表1可以看出,10个点的RGB值相近,排除光线影响,可以认为是一致的,因此采用所开发的全彩色FDM 3D打印机作为实验平台进行混色子样的制作。

3 颜色匹配标定模型

3.1 混色子样的制作

确定了全彩色FDM 3D打印机作为混色实验平台后,需要确定实验子样数。将CMYW各种颜色的PLA的送丝速度均分为4级,按照不同的比例进行单色、双色、三色和四色混合。由此可以计算出不重复子样个数的计算公式:

$$N = \sum_{m=1}^n C_n^m [P^m - (P-1) - f(m)] \quad (1)$$

式中: n 为可选颜色个数; m 为所选颜色个数; P 为每种颜色的细分等级; $f(m)$ 表示 m 位数中必须包含2和4的所有排列组合个数。

由式(1)可以计算出不重复子样的个数 N 为529。分别按不同比例进行打印并压平得到529个子样样片,部分子样色片如图4所示。图4中子样色片均为双色按比例混合的子样样片,样片的上方写有颜色和相应的比例。

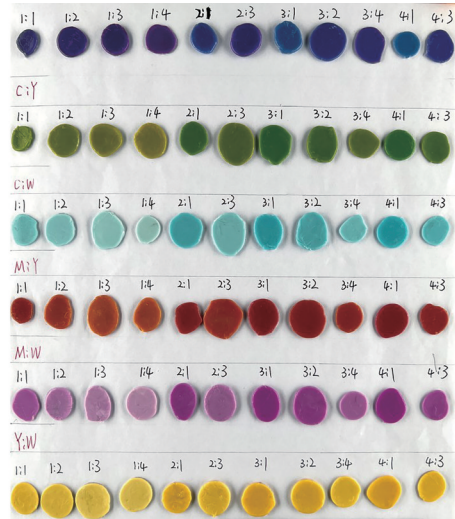


图4 部分子样色片

Fig.4 Partial sub-sample

3.2 混色子样数据提取以及颜色信息校正

采用GTI公司的SOFV-1xi设备在100%亮度下进行拍摄取样,恒定光源灯箱输出标准D50光源,观察区域尺寸为50 cm×61 cm。

使用孟塞尔标准24色卡(Colorchecker Classic)与混合后的色块在恒定光源灯箱下拍照,保存为raw的文件格式,拍摄后的照片如图5所示。

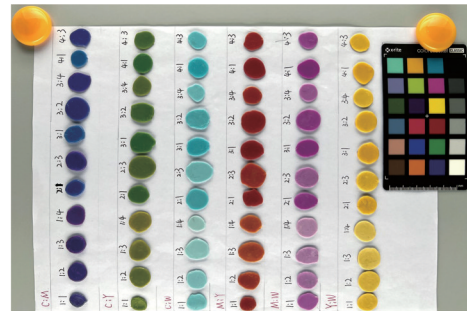


图5 标准光源下色片与色卡照片

Fig.5 Photo of sample and color card under standard light source

对所有子样拍片并保存为raw格式,使用ColorChecker Passport软件对所有数字图片进行初始校色,获得dcp配置文件;再将raw格式的子样数字图片导入lightroom模块中,选择刚建立的配置文件;使用曲线工具对整幅数字图片进行校正。由于提取的是颜色的RGB值,故采用改进型RGB色差计算公式,计算精度与CIEDE2000相近,具有较高的可靠性。对标准、校正前以及校正后的灰度色阶RGB值进行对比,计算两者与标准灰度色阶的色差:

$$\Delta E = k \sqrt{\left(2 + \frac{r}{256}\right)(\Delta R)^2 + 4(\Delta G)^2 + \left(2 + \frac{255-r}{256}\right)(\Delta B)^2} \quad (2)$$

式中： ΔR 为红色色差， $\Delta R = R_1 - R_2$ ； ΔG 为绿色色差， $\Delta G = G_1 - G_2$ ； ΔB 为蓝色色差， $\Delta B = B_1 - B_2$ ； k 为归一化系数，在标准观测条件下 $k=1/5$ ； $r=(R_1 + R_2)/2$ ；下标1表示孟塞尔标准24色卡中各标准颜色所包含的RGB数值信息，下标2表示对孟塞尔标准24色卡采用GTI公司的SOFTV-1xi设备在100%亮度下进行拍摄取样后的照片提取的相应颜色对应的RGB数值信息。

结合标准24色卡中的灰色色阶进行颜色校正，并与未校正结果的颜色信息对比，结果见表2、表3。由表2和表3可以看出，标准光源下采集的数字照片存在较大的颜色信息误差，最大色差为20.7，超过人眼可识别的色差6。而校正后的颜色信息最大色差为1.4，远小于6，可以满足要求。校正后得到相应的529个子样RGB颜色信息。

表2 校正前灰色色阶色差

Tab.2 Gray scale color difference before correction

灰色色阶	白色	灰度8	灰度6.5	灰度5	灰度3.5	黑色	
标准	R_1	243	200	160	122	85	52
	G_1	243	200	160	122	85	52
	B_1	242	200	160	121	85	52
校正前	R_2	214	188	156	109	71	36
	G_2	212	188	156	109	72	36
	B_2	196	174	142	96	65	34
色差	ΔE	20.7	10	5.9	10.4	9.4	10

表3 校正后灰色色阶色差

Tab.3 Gray scale color difference after correction

灰色色阶	白色	灰度8	灰度6.5	灰度5	灰度3.5	黑色	
标准	R_1	243	200	160	122	85	52
	G_1	243	200	160	122	85	52
	B_1	242	200	160	121	85	52
校正后	R_2	243	199	160	121	85	53
	G_2	242	199	161	121	85	54
	B_2	242	200	159	117	86	54
色差	ΔE	0.4	0.5	0.5	1.4	0.5	1.1

3.3 BP神经网络模型

建立RGB-CMYW单隐藏层BP的神经网络模型，如图6所示。这有利于节省时间。

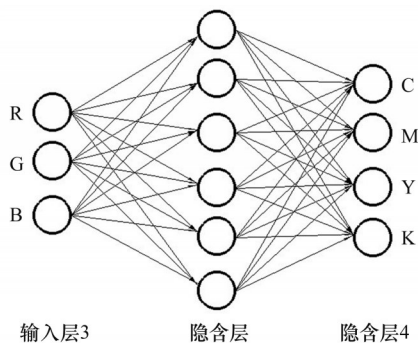


图6 FDM 3D打印色彩匹配标定神经网络模型
Fig.6 Neural network model for color matching calibration for FDM 3D printing

本实验将色块的RGB作为输入层，此神经网络的输入层数为3，输出值为CMYW 4种颜色的比例关系，故此神经网络的输出层的个数为4。隐含层的大致范围可以通过下式确定：

$$h = \sqrt{n + m} + a \quad (3)$$

式中： n 为输入层的数量； m 为输出层的数量； $a=1, 2, \dots, 10$ 。

由此可以计算出隐含层节点 h 值为4~13。实验中使用371个样品作为训练集，79个样品作为验证集，79个样品作为测试集。分别取隐含层节点为4~13之间的数字，对比训练出的均方误差以得到较好的训练结果，如表4所示。可以看出，当隐含层的神经元数为7时误差最小，所以取隐含层的神经元数为7。

表4 不同隐含层节点误差

Tab.4 Node errors for different hidden layers

隐含层节点数	训练均方误差	验证均方误差	测试均方误差	平均误差
4	0.00267	0.00257	0.00233	0.00252
5	0.00206	0.00184	0.00329	0.00240
6	0.00137	0.00127	0.00371	0.00212
7	0.00155	0.00122	0.00153	0.00143
8	0.00132	0.00162	0.00257	0.00184
9	0.00199	0.00196	0.00253	0.00216
10	0.00182	0.00153	0.00153	0.00163
11	0.00170	0.00189	0.00142	0.00167
12	0.00113	0.00208	0.00131	0.00151
13	0.00125	0.00174	0.00170	0.00156

4 实验验证

将24色色卡上的标准颜色信息作为信号的输入，使用隐含层神经元数为7的训练模型进行预测。经过模型计算得到相应的比例关系，再按比例进行打印，得到相应的24色彩色样片。将样片和24色标准色卡在标准光源下拍照采集颜色信息，见图7。

将图7中24色样片和标准色卡进行颜色校正。提取各色块的RGB值，并与标准色卡RGB值对比，计算色差，见表5。可以看出，14号色片的颜色色差最大，为11.56；另外还有6、16、18、19、24号色差超过了阈值6。其中24号黑色是CMY三色混合而成，由于丝材本身存在色差，所以混合出的颜色存在一定色差。从打印出的青色样片5、品红色样片9、黄色样片16以及白色样片19来看，丝材本身就存在色差，并非标准颜色，在色相上基本保持一致，但相对欠饱和。总体而言，配色效果较好。



图7 24色片和标准色卡

Fig.7 The 24-color sample and standard color card

表5 色片对应色差

Tab.5 Verification color block color difference

色片编号	标准颜色RGB值			混合出颜色RGB值			色差 ΔE
	R	G	B	R	G	B	
1	115	82	68	101	79	68	4.52
2	194	150	130	196	149	136	1.95
3	98	122	157	100	123	151	2.07
4	87	108	67	86	105	70	1.58
5	133	128	177	130	128	174	1.34
6	103	189	170	116	173	161	8.11
7	214	126	44	203	121	48	4.36
8	80	91	166	83	93	158	2.89
9	193	90	99	183	95	102	3.97
10	94	60	108	88	63	103	2.73
11	157	188	64	166	179	67	4.73
12	224	163	46	214	161	53	4.03
13	56	61	150	58	70	141	4.72
14	70	148	73	60	123	58	11.56
15	175	54	60	156	58	58	6.41
16	231	199	31	233	182	46	8.09
17	187	86	149	174	89	158	5.21
18	8	133	161	20	121	140	9.31
19	243	243	242	228	227	224	9.70
20	200	200	200	195	196	176	7.52
21	160	160	160	164	165	150	3.89
22	122	122	121	124	125	112	3.16
23	85	85	85	74	74	80	5.76
24	52	52	52	40	34	35	9.85

利用三维建模软件SolidWorks设计了一个楼房的三维彩色模型,见图8。按照第1节所述方

法得到打印的三维彩色模型,见图9。对比图8和图9可以看出,颜色基本一致,实现了打印三维模型与设计三维模型颜色信息的高度复制。

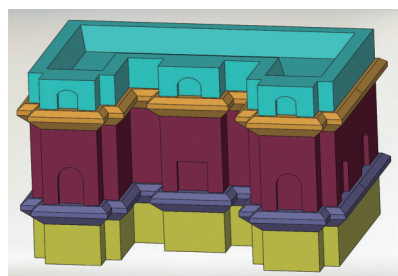


图8 设计的三维彩色模型

Fig.8 The designed 3D color model



图9 打印的三维彩色模型

Fig.9 The printed 3D color model

5 结论

本文在验证所开发的混色喷头用于全彩色FDM 3D打印机时的混色均匀性的基础上,进行了529个不同比例CMYW四色PLA丝材的混色样片的制作;建立了单隐含层BP神经网络的颜色匹配标定算法模型,并通过实际计算确定了隐含层的神经元个数。将打印的24色样片与标准样片进行实际的色差对比分析,发现总体色差不大。但是由于所购买丝材颜色不是标准的CMYW颜色,所以造成基本色相相近,但饱和度欠缺。所设计的三维彩色模型实际打印试验结果表明,基本达到“所见即所得”效果,实现了FDM全彩色3D打印效果。

参考文献:

[1] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1):19-23.
 LU Bingheng. Additive Manufacturing—Current Situation and Future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1):19-23.
 [2] YEH C H, LIN Keng-Ren, SU F C, et al. Optimizing 3D Printed Ankle-foot Orthoses for Patients with Stroke: Importance of Effective Elastic Modulus and Finite Element Simulation[J]. Heliyon, 2024, 10

- (5):e26926.
- [3] LI Zhengrong, XING Wenjing, SUN Jingting, et al. Thermal Network Model for Anisotropic Heat Transfer in 3D Printed Complex Geometry Structures[J]. Building and Environment, 2024, 254: 111381.
- [4] JOSHI S R, RAY S S, KIM S, et al. Potentiality of PLA 3D Printed Macro-structured Feed Spacers with a Rational and Facile Layout for Improved MD Desalination Performance[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 203:293-304.
- [5] 卢秉恒, 侯颖, 张建勋. 增材制造国家标准体系建设与发展规划[J]. 金属加工(冷加工), 2022(4):1-4.
LU Bingheng, HOU Ying, ZHANG Jianxun. Construction and Development Planning of Additive Manufacturing Standard System in China[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2022(4):1-4.
- [6] 吴卫国, 汪建晓, 魏翱翔, 等. 一种多色3D打印机的设计与分析[J]. 制造技术与机床, 2019(8):17-21.
WU Weiguo, WANG Jianxiao, WEI Aoxiang, et al. Design and Analysis of a Multi-color 3D Printer [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(8):17-21.
- [7] 王垚垚, 臧剑波, 石禹鹏, 等. 基于机械系统动力学自动分析的多喷头3D打印机运动学研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(27):33-36.
WANG Yaoyao, ZANG Jianbo, SHI Yupeng, et al. Research on Kinematics of Multi-nozzle 3D Printer Based on Automatic Analysis of Mechanical System Dynamics [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(27):33-36.
- [8] 李子秋, 甘新基, 宋桂阳, 等. 基于FDM彩色3D打印自适应控制系统的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(5):109-112.
LI Ziqiu, GAN Xinji, SONG Guiyang, et al. The Control System of Color 3D Printing Based on FDM [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(5):109-112.
- [9] 尚晓峰, 王国民. 熔融沉积成型彩色打印技术研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(15):81-87.
SHANG Xiaofeng, WANG Guomin. Research of Fused Deposition Modeling Colorful Printing Technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(15):81-87.
- [10] 袁方敏, 杨丽琳, 李伟. FDM彩色3D打印机系统设计设计与仿真[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(10): 172-177.
YUAN Fangmin, YANG Lilin, LI Wei. Design and Simulation of FDM Colorful 3D Printer System [J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(10):172-177.
- [11] 余道洋. 3D打印机G代码预处理优化算法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(1):85-89.
YU Daoyang. G Code Preprocessing Optimization Algorithm for 3D Printers[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(1):85-89.
- [12] XU Yanfang, LIU Wenyao. Description of Color Gamuts of Desktop Color Printers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S3):265-269.
- [13] 陈谊, 姚海根, 冷高亮. 彩色复制中色域映射算法研究现状[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊1): 789-791.
CHEN Yi, YAO Haigen, LENG Gaoliang. Research on Gamut Mapping Algorithms in Colorized Reproduction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S1):789-791.
- [14] 刘玉盛. 色料三原色Y、M、C——正确用光、用色[J]. 丝网印刷, 2006, 24(7):11-14.
LIU Yusheng. Process Colors Y M C—to Use Light and Color Correctly [J]. Screen Printing, 2006, 24(7):11-14.
- [15] 张群. 基于RBF神经网络的色空间转换模型[J]. 包装工程, 2009, 30(5):71-73.
ZHANG Qun. Color Space Conversion Model Based on RBF Neural Network [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5):71-73.
- [16] 王强, 彭辉, 杨根福. 印刷媒体色彩变换方法的研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2009, 1(1):60-64.
WANG Qiang, PENG Hui, YANG Genfu. The Comparison of Color Transform in Print Media [J]. China Printing and Packaging Study, 2009, 1(1): 60-64.
- [17] 顾海, 黄天成, 张捷, 等. FDM工艺中不同色彩PLA丝材的特性分析[J]. 合成树脂及塑料, 2022, 39(2):66-69.
GU Hai, HUANG Tiancheng, ZHANG Jie, et al. Properties of PLA Filaments with Different Colors Made by FDM Technology [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(2):66-69.

(编辑 王旻玥)

作者简介:徐宏伟*(通信作者),男,1968年生,博士、副教授。主要研究方向为印刷包装机械及其自动化,3D打印技术及控制系统研究。E-mail:xuhongwei@xaut.edu.cn.

本文引用格式:

徐宏伟,叶文斌,马顺尧,等. FDM全彩色3D打印机颜色匹配标定算法研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(9):2081-2086.
XU Hongwei, YE Wenbin, MA Shun Yao, et al. Research on Color Matching Calibration Algorithm for FDM Full Color 3D Presses [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):2081-2086.