红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

基于深度学习的室内照明智能调节系统

陈寒梅　于春荣　刘智超

Intelligent adjustment system of indoor lighting based on deep learning

Chen Hanmei, Yu Chunrong, Liu Zhichao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210829

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于深度学习的光纤网络异常数据检测算法

Optical fiber network abnormal data detection algorithm based on deep learning

红外与激光工程. 2021, 50(6): 20210029　https://doi.org/10.3788/IRLA20210029

深度学习算法及其在光学的应用

Deep learning algorithm and its application in optics

红外与激光工程. 2019, 48(12): 1226004　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1226004

基于深度学习的目标跟踪方法研究现状与展望

Status and prospect of target tracking based on deep learning

红外与激光工程. 2017, 46(5): 502002　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0502002

深度学习的MPCANet火灾图像识别模型设计

Design of MPCANet fire image recognition model for deep learning

红外与激光工程. 2018, 47(2): 203006　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0203006

基于深度学习的序列图像深度估计技术

Depth estimation technique of sequence image based on deep learning

红外与激光工程. 2019, 48(S2): 134　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S226002

基于深度学习的压缩光子计数激光雷达

Compressed photon-counting laser radar based on deep learning

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200380　https://doi.org/10.3788/IRLA20200380

基于深度学习的室内照明智能调节系统

陈寒梅[1,2], 于春荣[1*], 刘智超[3]

(1. 沧州师范学院 计算机科学与工程学院，河北 沧州 061001；
2. 菲律宾圣保罗大学 信息工程学院，菲律宾 马尼拉 3500；
3. 长春理工大学 光电工程学院，吉林 长春 130000)

摘　要：为了实现室内照明的智能控制，根据室内人员实时位置进行跟踪式照明，通过人员覆盖区域完成自适应亮度调节，达到总体节能且局部照明舒适的目的。设计了基于光纤传感网络的智能照明系统，提出了基于深度学习的照明区块化设计与人员实时定位的照明调节算法。区块化设计将照明区域划分成多个等尺寸子区域，划分尺度由光源覆盖间距决定，实现对照明区域的离散处理。再通过状态采集模块对每个子区域进行照度量化分析，将检测结果作为卷积网络输入层的控制参数导入分析模型中。结合封闭体人员定位算法实现对照明子区域定位及照度调节。实验测试了 100 m^2 照明范围内的四种典型情况，获得了各 LED 对测试位置的照度权值，并测试了不同高度对照度值的影响程度。区域内在 x 轴方向的人员定位精度最大误差为−96 cm，在 y 轴方向为 91 cm，均小于预设照明区块的最小单元。文中算法在 LED 个数递增时，收敛时间略优于 ANN 算法，与对应 LED 体量的照明空间相比，收敛时间满足应用需求，验证了其具有大范围照明智能调节的能力。

关键词：智能照明；　光纤传感；　深度学习；　区块化设计
中图分类号：TP18　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3788/IRLA20210829

Intelligent adjustment system of indoor lighting based on deep learning

Chen Hanmei[1,2], Yu Chunrong[1*], Liu Zhichao[3]

(1. School of Computer Science and Engineering, Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001, China;
2. Information and Engineering College of SPUP, Saint Paul University Philippines, Manila 3500, Philippines;
3. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: To achieve intelligent control of indoor lighting, tracking lighting is performed according to the real-time position of indoor personnel, and adaptive brightness adjustment is completed through the coverage area of personnel, so as to achieve the purpose of overall energy savings and comfortable local lighting. An intelligent lighting system based on a fiber optic sensor network is designed, and a lighting adjustment algorithm based on deep learning lighting block design and real-time positioning of personnel is proposed. The block design divides the lighting area into multiple equal-sized subareas, and the division scale is determined by the light source coverage interval to realize the discrete processing of the lighting area. Then, through the state acquisition module to perform quantification analysis on each sub-region, the detection results are imported into the analysis model as the control parameters of the input layer of the convolutional network. The closed-body personnel positioning

收稿日期:2021−11−08;　**修订日期**:2021−12−06
基金项目:国家自然科学基金青年项目 (61703056); 吉林省优秀青年人才基金项目 (20190103154 JH); 沧州市重点研发计划指导项目 (204102001)
作者简介:陈寒梅, 女, 讲师, 硕士, 主要从事计算机应用技术、Web 开发等方面的研究。
通讯作者:于春荣, 男, 高级实验师, 主要从事物联网技术及应用方面的研究。

algorithm is combined to realize the positioning of the lighting subarea and the illuminance adjustment. The experiment tested four typical situations within the illumination range of 100 m^2, obtained the illuminance weight value of each LED on the test location, and tested the degree of influence of the illuminance value of different heights. The maximum error of personnel positioning accuracy in the *x*-axis direction in the area is −96 cm, and it is 91 cm in the *y*-axis direction, both of which are smaller than the minimum unit of the preset lighting block. When the number of LEDs increases, the convergence time of this algorithm is slightly better than that of the ANN algorithm. Compared with the lighting space of the corresponding LED volume, the convergence time meets the application requirements, verifying its ability to intelligently adjust lighting over a large range.

Key words: intelligent lighting; optical fiber sensing; deep learning; block design

0 引 言

随着工业化全球化进程的加快,各种建筑业的规模持续扩大,建筑的高能耗问题也凸显出来[1]。建筑照明的智能化控制成为了节约能源与环境保护的重要议题,得到了人们的广泛关注[2]。建筑中的照明用电约占建筑能耗总量的 16% 以上[3],减少资源浪费,提高光能利用率对于节能减排具有重要意义。

智能控制逐渐成为国内外照明领域的一项研究热点。Philips 公司提出的一种无线照明设计,降低了照明电路布网的复杂程度,再配合手机终端的辅助可以避免无效照明带来的能耗损失[4]。Kandasamy 等人[5]采用 ANN-IMC 算法对采光位姿进行控制,提高了采光系统 20% 的能量获取率。Nagy Z 等人[6]通过用户群的使用时间特性分布,设计了一种照明供给平衡方案,提高了用户照明使用率。Paulauskaite-Taraseviciene A 等人[7]将人工神经网络应用于居民照明系统,使照明范围智能化,从而降低了总体能量消耗。Wen Y J 等人[8]采用动态网络变换照明顺序,实验结果显示面向相对照明需求时其优化后的系统能源效率提升了 10%。Cheng Z等人[9]采用百叶窗结构实现了对建筑物内外温度的控制,使系统可控范围得到了很好的提升。主流研究方向目的主要是节能,实现手段主要是通过智能控制减少无效照明[10−13]。但以上研究中也都存在一些不足,大部分优化都是面向具有照明场所的,普适性不高,在建筑物智能照明的推广中有一定的局限性。

为了解决智能照明中大量节点的兼容性与通用性,研究根据数据分析与自适应学习能力的算法显得尤为重要。文中提出了一种基于深度学习的室内照明智能调节系统,设计了适用于照明节点量波动范围大、变化种类多的解算算法。智能照明系统以深度学习等大数据分析算法为依托,在综合分析照明可达性与照明网络合理性的基础上,实现对室内照明的智能调节,实现保证有效照明的条件下能耗降低。

1 智能照明系统

智能照明系统由数据处理模块、光纤通信网络、多路控制开关、状态监测模块、数据处理模块以及显示单元构成。整体结构如图 1 所示。

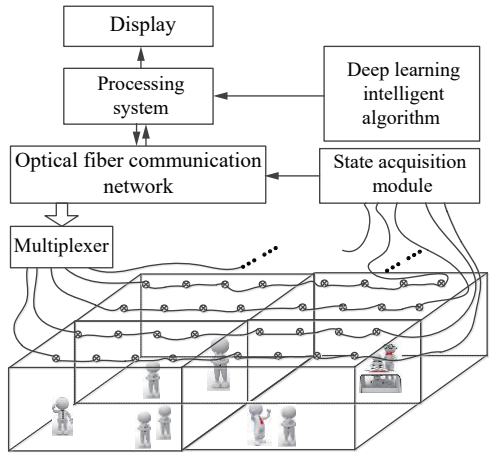

图 1 智能照明系统结构

Fig.1 Intelligent lighting system structure

数据处理模块控制光纤通信网络完成对所有光照明区域的照明通断及照明强度的控制。在照明区域主要位置上分布状态采集模块,并实时将区域照明信息发送给数据处理系统。状态采集模块主要获取对应位置上的照度信息,检测设备采用吊顶型照度仪,监测光谱范围 330~730 nm,照度响应范围 20~2 000 lx。均匀分布于照明空间的顶部。数据处理系统会根据算法数据库对照明区域的人员分布、照明均匀性等进行分析与判断,并最终反馈系统点亮、关闭、增强或减弱相应照明单元,从而达到符合照明要

求条件下的智能节能照明设计。

2 基于深度学习的调节算法

2.1 卷积神经网络

卷积神经网络[14](Convolutional Neural Networks, CNN) 通过卷积运算完成神经网络的构建。通常 CNN 分为输入层、卷积层、激活层、池化层以及全连接层[15]。输入层对应室内照明设备的分布、照明区域人员分布、照明设备状态信号等。卷积层由物理量之间的量纲变化关系决定，从而建立各个输入层数据之间的计算模型。激活层常用函数包括 Sigmoid 函数、Tanh 函数和 ReLU 函数，在文中采用 ReLU 函数，因为照明变化的特征量很弱，采用 Sigmoid 函数容易造成梯度消失问题，而采用 Tanh 函数的运算量大，对于大量照明源控制而言，其延时效果明显，故采用可以分段优化计算的 ReLU 函数更合理。

2.2 照明位置的区块化

室内智能照明的核心是实现照明程度充足的前提下减少能耗，而照明充足是针对室内人员而言的，故快速获取人员位置与分布，并根据人员位置实时变化信息与位置分布信息完成照明系统照明强度的自动调节是研究的主要内容。故实现调节算法的第一个重要步骤是完成智能控制区域内人员的定位分离，以 10.0 m×10.0 m 的区域为例，将待测区域划分为三个尺度上的区域，分别是 5.0 m×5.0 m、2.5 m×2.5 m、1.0 m×1.0 m。划分依据有两个，一是光源有效照明范围，二是光源之间的距离。所以划分区域以能够获取光照并且其权重系数不超过相隔一个光源为宜。每次数据采集后在迭代嵌套区域框后，会得到任意人员位置的三个锚定框，则限定区域边界条件可表示为：

$$\begin{cases} m_x = \sigma(t_x) + n_x \\ m_y = \sigma(t_y) + n_y \end{cases} \tag{1}$$

而对应点的高度与宽度位置可表示为：

$$\begin{cases} m_g = p_g \mathrm{e}^{t_g} \\ m_k = p_k \mathrm{e}^{t_k} \end{cases} \tag{2}$$

式中：t_x , t_y, t_g, t_k 是卷积神经网络预测的每个单元格上每个边界框的对应坐标值；x 和 y 表示直角坐标系中其 x 与 y 的值；g 和 k 表示高度值与宽度值；n_x 和 n_y 表示目标在设定中心位置上的偏移程度；p_g 和，p_k 表示高度与宽度对应的预测边界框。

预测网络的最小单元由卷积层、BN 层和 Leaky ReLU 层组成。在卷积操作后添加批量归一化，再采用 Compose 作为堆叠网络层解决梯度弱化的问题。

2.3 定位算法

设 A 为归一化输入空间，并将 A 划分为相等的网格。划分的网格交点数记为 P_j (j= 1, 2, ⋯, L)，对应的权重为 q_j。则封闭球体空间定义[16] 为：

$$U = \left\{ x \middle| \left\| x - P_j \right\| \leqslant R_b, x \in A \right\} \tag{3}$$

式中：R_b 表示封闭球体的半径，其范围为 (0, 1)。同时，定义球面上的高斯函数为：

$$g_{j(x_k)} = \exp\left(\frac{\left\| x - P_j \right\|^2}{\sigma^2} \right) \tag{4}$$

式中：x 为任何点；σ=2.5。

在该封闭空间中，以活动节点为中心的封闭球体的误差补偿函数为：

$$y_k = S_k [b_1, b_2, \cdots, b_L][q_1, q_2, \cdots, q_L]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

式中：b_L 由公式 (4) 计算得到；q 为权重系数向量；S_k 为权重系数。由此对区域内所有点进行分类，就能将人员位置精确到区块化中的最小单元，并根据实时变化进行迭代。

2.4 照明调节模型构建

当获取人员位置时，就可以根据人员位置构建最佳视觉照明强度分布函数，从而将光强调节至最优能耗比。首先，设一次采样在 (x, y) 点的光照强度定义为：

$$I^{(i)}(x, y) = \sum_t u^{(i)}(x, y, t) \tag{6}$$

式中：i 表示采样次数；u 表示波场；t 表示时间。N 次拍摄的光源照度可以看作是单次拍摄的照度之和：

$$I_{\text{total}}(x, y) = \sum_{i=1}^{N} I^{(i)}(x, y) \tag{7}$$

通过累积求和的方式获取目标位置的光照强度总量就可以计算得到该区域的光能是否符合照明需求，同时得到最优的照明位置及功耗比例，从而实现智能调节。

3 算法实现

3.1 计算方法

对照明区域进行三级区块化划分，将最小一级作为区域最小照明识别范围。设计以 100 m^2 的空间为例，划分尺度分别是边长为 5 m、2.5 m 和 1 m 的正方

形区域。与此同时，获取人员位置的最小识别单元。在此基础上，基于深度学习的照明调节算法步骤有：

(1) 依据区域块完成限定区域边界条件 (m_x, m_y, m_g, m_k) 的初值采集；(2) 通过状态采集模块获取人员所在位置，并在每一个照明调整周期内完成数据更新；(3) 将包含人员的连通区域定义为封闭体，并以照明点作为圆心简化封闭体半径为 R 的圆域 U；(4) 由于人员位置的随机性，所有域都需要为其设置误差补偿函数 y_k，从而提供真实的边界限定区域补偿值，保证该区域内照明符合要求；(5) 由照明设备的当前照度值计算封闭体内照明强度场的分布 I_{total}；(6) 对所有包含人员的区分进行迭代判断，当分布强度在最优照明范围内时不调整；当大于最优照明范围上限时，降低该区域照明强度，降低能耗；当小于最优照明范围下限时，增大该区域照明强度，提高视觉亮度。

3.2 算法实现

按照计算方法设计算法程序流程如图 2 所示。由程序流程图可以看出，在照明区块化划分的基础上，完成两个任务，一是建立定位人员位置的照明有效区域，二是采集该区域内照明设备的照明强度总量。在补偿函数的修正下完成最优照明总量的上下限计算，然后对所有测试数据进行上下限判别与迭代，从而输出最优照明结果。当测试数据不在最优数据范围时，采用修改补偿函数的方式对照明量进行修正，以实现保证照明效果且能耗最低的智能照明方案。

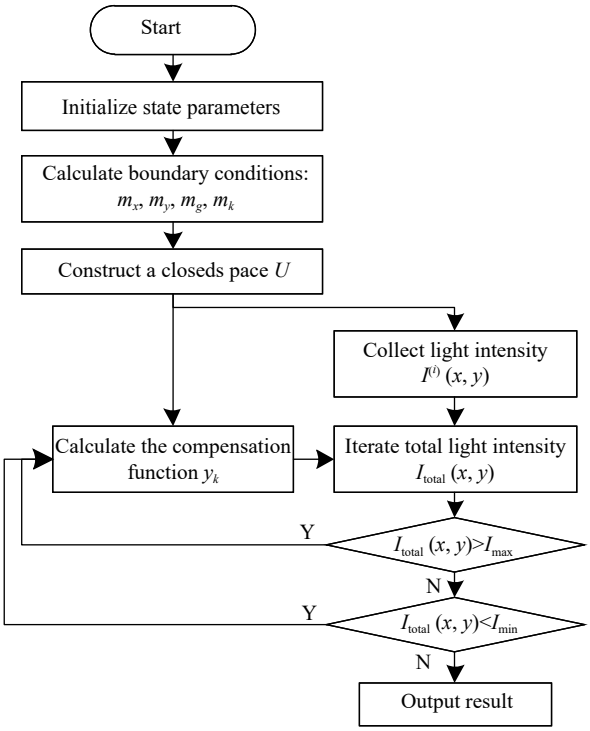

图 2 智能照明控制程序流程图

Fig.2 Flow chart of intelligent lighting control program

4 实 验

4.1 照度测试

为了验证区域内照度符合设计要求，采用 PIC-300 AW 型照度计，照度测试范围 1~200 klx，测量精度为±4%。实验室顶棚横纵方向分别为 x 和 y，以 2.0 m 间距分别悬挂相同 LED 照明光源，整个测试用房间为 100 m^2 (10 m×10 m)，对应 16 个 LED。则照度测试共四种情况，如图 3 所示。

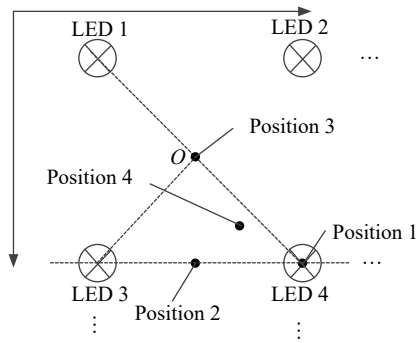

图 3 被照明区域的四种照明情况

Fig.3 Four lighting conditions of the illuminated area

无论人员的位置在何处都可以被视为图 3 中四种情况中的一种。第一位置表示正对某一个灯，第二位置表示两个灯 (x 轴或 y 轴方向) 连线上，第三位置表示两个灯 (x 轴与 y 轴的对角线上) 连线上，第四种表示介于两个灯与中点 O 的三角形中。不同位置照明强度测试结果如表 1 所示。

由表 1 数据可知，距离最近为 1 m 时的测试值，最大为 263 lx，总照度值最大值为 475 lx，实测最大值为 382 lx。对所有合计值与实测值进行分析可知，合计值的 80% 约为实际值，分析认为单个 LED 的测试值之和明显大于合计值，这是因为每次单个 LED 测试时，照度测试计都是截面法向与测试 LED 共线的，而实测时，照度计是水平放置的，所以存在入射角度对其的影响。不过由于其测试数据存在线性比例关系，所以不影响测试效果。从位置 1、2、3、4 的测试结果可以看出，随距离变化的照度增加量与距离值约成二次方量级变化关系。

表 1 不同测试位置的照度测试值

Tab.1 Illumination test values of different test positions

LED		Illuminance value/lx			
		P1	P2	P3	P4
1 m	1	41	41	114	63
	2	86	42	110	102
	3	85	168	117	86
	4	263	164	115	207
Total		475	415	456	458
measured		382	325	362	361
2 m	1	17	22	81	43
	2	54	21	87	87
	3	57	119	83	56
	4	177	115	86	152
Total		305	277	337	338
measured		247	222	272	271

注: P表示Position, 序号见图3。

4.2 位置优化实验

在确定了照度值分布以后, 只需要将人员位置找到, 就可以通过神经网络进行迭代, 将所有人员位置对应区域的照明度调节至适宜值后关闭其他位置的光源, 从而达到智能照明的目的。人员位置实际值与测试计算值的对比如图 4 和图 5 所示。

测试空间分为 x 轴与 y 轴两个方向, 图 4 表示 x 轴方向上人员位置的计算值与实测值, 图 5 表示 y 轴方向上人员位置的计算值与实测值。由测试数据可以看出, 计算值曲线分布与实测值曲线分布基本一致, 个别位置略有偏差, x 轴方向最小误差为 6 cm, 最大误差为−96 cm, y 轴最小误差为 4 cm, 最大误差为 91 cm。可见计算效果最差时也优于 100 cm, 小于一个照明单元的半径值, 所以, 该计算值对于完成基于该照明单元的定位时符合设计要求。

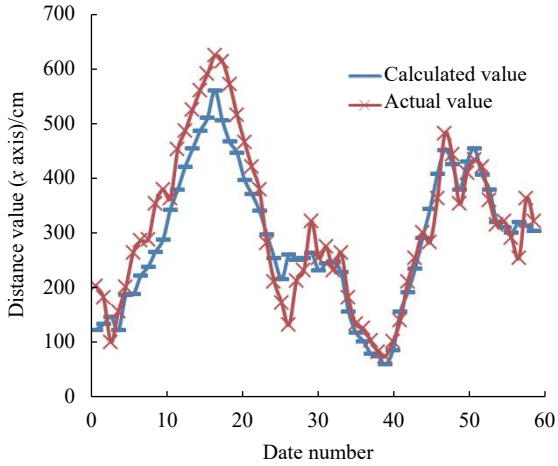

图 4 人员实际位置与计算位置对比 (x 轴)

Fig.4 Comparison of actual and calculated positions of personnel (x axis)

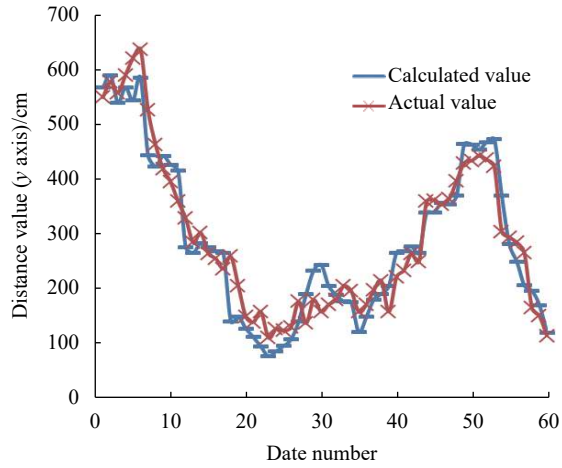

图 5 人员实际位置与计算位置对比 (y 轴)

Fig.5 Comparison of actual and calculated positions of personnel (y axis)

4.3 算法时效性分析

为了验证算法的时效性, 分析了当光源总量及人员总量发生大幅变化时算法的收敛速度, 从而验证算法在实时调节照明强度与变化速度方面, 对待测区域人员的视觉效果的影响程度。测试方法是将算法计算中两个主要输入参量进行增量变化, 然后与传统人工神经网络 (ANN, Artificial Neural Network) 算法进行相同数据量计算时的收敛时间进行对比, 光源量变化与收敛时间的对应关系如图 6 所示, 人员量变化与收敛时间的对应关系如图 7 所示。

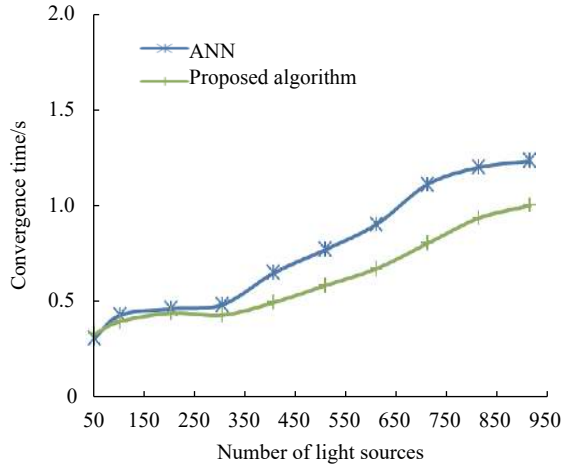

图 6 光源数与收敛时间关系曲线

Fig.6 Curves of the number of light sources and convergence time

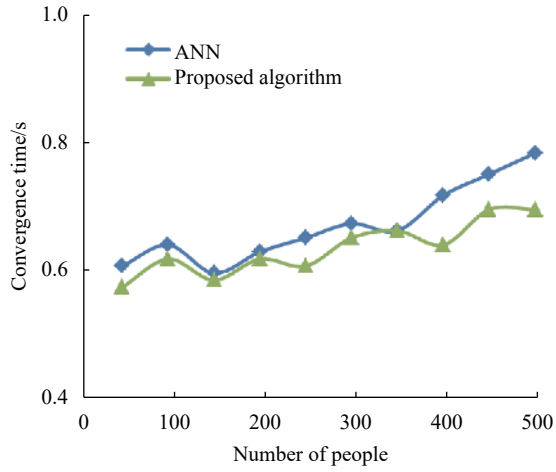

图 7 人员数与收敛时间关系曲线

Fig.7 Curves of the number of people and the convergence time

由图 6 可以看出，当光源总量增大时，收敛时间会有一定的增幅，小于 300 个光源时，收敛时间低于 0.5 s，而超过 800 个时，收敛时间增速变慢，约为 0.95 s。虽有一定增幅，但是从换算光源数可知，该数量的光源可以等效照明面积非常大，总计处理速度约 1 s 左右是能够满足实际应用需求的。

由图 7 可以看出，测试数据是以大约 300 个光源(约 20 个拟控制房间)为准，对人数增量与收敛时间的关系进行了分析。随着人数的增多，收敛时间有所增加，但是两种算法的增加时间都很小，都在 0.2 s 以内，基本可以忽略，说明收敛控制主要还是受光源总量的影响较大。

5 结 论

文中提出了一种基于深度学习的智能照明调节系统。通过将室内照明状态作为输入参数，再由神经网络完成区域内人员的快速定位，结合两个主要照明程度控制参数完成对照明区域选择及照明强度调节的计算，实现智能照明的目的。实验对不同照明状态、不同人员位置以及收敛时间进行了测试、分析与对比，结果显示：所提算法能够很好地确定照明区域的边界及人员位置，整体计算时间符合应用需求。

参考文献：

[1] Jing S Q, Wei D, Wang X, et al. Research progress of indoor LED lighting control strategies and technologies [J]. ***Building Science***, 2020, 36(6): 136-146. (in Chinese)

[2] Tang S, Kalavally V, Ng K Y, et al. Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing system [J]. ***Energy & Buildings***, 2017, 138: 368-376.

[3] Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search [J]. ***Nature***, 2016, 529(7587): 484-489.

[4] Patorski K, Trusiak M, Tkaczyk T. Optically-sectioned two-shot structured illumination microscopy with Hilbert-Huang processing [J]. ***Opt Express***, 2014, 22(8): 9517-9527.

[5] Kandasamy N K, Karunagaran G, Spanos C, et al. Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting [J]. ***Building and Environment***, 2018, 139: 170-180.

[6] Nagy Z, Yong F Y, Schlueter A. Occupant centered lighting control: A user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption [J]. ***Energy and Buildings***, 2016, 126: 310-322.

[7] Paulauskaite-Taraseviciene A, Morkeviciu N, Janaviciute A, et al. The usage of artificial neural networks for intelligent lighting control based on resident's behavioural pattern [J]. ***Elektronika Ir Elektrotechnika***, 2015, 21(2): 72-79.

[8] Wen Y J, Agogino A M. Personalized dynamic design of networked lighting for energy-efficiency in open-plan offices [J]. ***Energy & Buildings***, 2011, 43(8): 1919-1924.

[9] Cheng Z, Zhao Q, Wang F, et al. Satisfaction based Q-learning for integrated lighting and blind control [J]. ***Energy & Buildings***, 2016, 127: 43-55.

[10] Yin Z D, Jiang X, Yang Z T, et al. WUB-IP: A high precision UWB positioning scheme for indoor multiuser applications [J]. ***IEEE Syst J***, 2019, 13(1): 279-288.

[11] Wu Y, Jiang B, Lu N. A descriptor system approach for estimation of incipient faults with application to high-speed railway traction devices [J]. ***IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems***, 2019, 49(10): 2108-2118.

[12] Xiao B, Lin Q, Chen Y. A vision-based method for automatic tracking of construction machines at nighttime based on deep learning illumination enhancement [J]. ***Automation in Construction***, 2021, 127: 103721-1-13.

[13] Guo J K. Study on lighting accurate detection and intelligent control system in highway tunnel [J]. ***Tunnel Construction***, 2020, 40(2): 76-81. (in Chinese)

[14] Gao S Z, Li T C. Design of intelligent control system of classroom lighting based on single chip microcomputer [J]. ***Control Engineering of China***, 2020, 27(11): 2010-2015. (in Chinese)

[15] Huo Y, Ma X X. Design of intelligent energy-saving lighting control system based on ZigBee and neural network [J]. ***Modern Electronics Technique***, 2020, 43(20): 61-66. (in Chinese)

[16] Pandharipande A, Newsham G R. Lighting controls: Evolution and revolution [J]. ***Lighting Research & Technology***, 2018, 50(1): 115-128.