

Development of a LED Lighting System with Variable Illuminance and Color Temperature

Yuka TANIGUCHI,^{*} Mitsunori MIKI^{**} and Keiko ONO^{***}

(Received January 6, 2012)

In recent years there has been increasing interest in office environments, and it has been reported that improvement of the lighting environment in offices improves intellectual productivity. Some of these reports have indicated that work efficiency is improved by changing the lighting environment in accordance with human biorhythms. We constructed a system that provides individual illuminance and color temperature preferred by workers, and we carried an experiment to clarify the favorite illuminance and color temperature in the office. But general Japanese offices use fluorescent lamps, they have a limitation on variable range of color temperature, therefore, it is possible that workers can't select their preferred color temperature.

In this research, we built a lighting system to realize the illuminance and color temperature requested by the user with LED lights become prevalent in recent years. The system implements required illuminance and color temperature by changing the color with LED lights which have 4 colors LED (red, blue, green and yellow) with possible dimming. We conducted experiments to verify the built system, and we confirmed that it converges target illuminance and target color temperature. And we confirmed that it is possible to make practicable in offices about color rendering property. So, the built system can be used in office environment. Then using the constructed system, it is possible for us to examine even more about improvement of the lighting environment in offices.

Key words : Intelligent lighting system, LED lights, Illuminance, Color temperature

キーワード : 知的照明システム, LED 照明, 照度, 色温度

指定された照明環境を実現する LED 照明システム

谷口 由佳, 三木 光範, 小野 景子

1. はじめに

近年オフィス環境への関心が高まり, 光環境の改善は知的生産性の向上に繋がることが報告されている^{1, 2)}. その中でも人間の生体リズムに応じて光環境を変えることで仕事の能率を向上させることが報告され

ている^{3, 4)} 光環境には照度および色温度という指標がある. 照度とは光によって照らされている任意の場所の明るさで, 単位は lx (ルクス) である. また, 色温度とは光の色を定量的な数値で表現する尺度で単位は K (ケルビン) である⁵⁾. 照明の色温度を低くする

^{*} Graduate School of Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6921, Fax:+81-774-65-6716, E-mail:ytaniguchi@mikilab.doshisha.ac.jp

^{**} Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6796, E-mail:myoshimi@mail.doshisha.ac.jp

^{***} Department of Electronics and Informatics, Ryukoku University, Kyoto

Telephone:+81-775-43-7495 E-mail:kono@rins.ryukoku.ac.jp

ことで、くつろぎが感じられ、反対に高くすることで爽やかさが感じられることが報告されている⁶⁾。これらの指標は人の生体および心理に影響を与える要因としてあげられる。

このことから、我々は個々のオフィスワーカーに合わせて個別の照明環境を提供する知的照明システムを提案し、作業を行うのに適した光環境の検討を行っている。この知的照明システムは、既に実機による動作実験が行われ、その高い性能と実用性が検証されている⁷⁾。照度に着目した研究では、オフィスワーカーの仕事内容などによって求められる照度が異なるという研究結果が報告されている^{8, 9)}。さらに、個人、作業内容、体調によって好む照度および色温度は異なることが先行研究よりわかっている。これらのことから、照度および色温度を個別に提供することでオフィスワーカーの知的生産性、創造性および快適性を向上できると考えられる。しかし、現在一般に普及している蛍光灯照明器具では調光範囲が狭く、色温度の実現範囲が限定されている。そのため、ワーカーや被験者が選択したいと感じる色温度が実現できなかった可能性がある。このような背景から、本稿では色温度の実現範囲が広い色温度可変型 LED 照明器具を用いて幅広い照度および色温度を実現する照明システムを構築し、検証実験を行う。

2. 照度および色温度による照明環境の改善

2.1 照度および色温度が人に与える影響

オフィスにおいて、執務に最適な照度および色温度の研究は多く行われている。照度とは単位面積当たり照射される光束（ルーメン）で、単位は lx（ルクス）である。また、完全黒体を加熱するとその温度により、特定の色が放射される。その完全黒体の温度をその光の色温度と呼び、単位は K（ケルビン）である⁵⁾。色温度が低いほど赤みがかかった色で、反対に色温度が高いと青白い色となる。照明の色温度を低くすることで、くつろぎが感じられ、反対に高くすることで爽やかさが感じられるということが報告されている⁶⁾。そのため、暖かみのある雰囲気や落ち着いた雰囲気を作りた

い場合は低色温度の照明を用い、涼しくさわやかな雰囲気を作りたい場合は高色温度の照明を用いるといった用途がある。蛍光灯は日本工業規格によって「昼光色（5700～7100 K）」、「昼白色（4600～5500 K）」、「白色（3800～4500 K）」、「温白色（3250～3800 K）」および「電球色（2600～3250 K）」の5種類に区別されている。日本の一般的なオフィスでは色温度 5000 K の昼白色蛍光灯が使用されている場合が多い。また、照明の照度を高くするとワーカーの覚醒レベルが高く保たれ、作業効率は向上することが報告されている。このことから、オフィスの休憩時間中のみ低照度にするなどの照明制御法の研究が行われている。その効果として作業効率の向上が期待できると考えられている。さらに、人間の生体リズム（サーカディアンリズム）に応じて光環境を変えることで仕事の効率を向上させることが報告されている。このことから、我々は個々のオフィスワーカーに合わせて個別の照明環境を提供する照明システムを提案し、作業を行うのに適した光環境の検討を行っている。先行研究の結果、個人によって好む照明環境は異なることがわかっており、個人、作業内容、体調によって好む照度および色温度は異なることがわかっている。このような照度および色温度に関する研究では蛍光灯が用いられているが、蛍光灯では色温度の実現範囲が狭く、実現できない色温度が存在していた。そこで、近年普及してきている幅広い色温度を実現できる LED 照明を用いて照度および色温度の選好に関する研究を行う必要があると考えられる。そこで、本研究では色温度の調光範囲が広い LED を用いて任意の照度および色温度を実現する照明システムを構築する。

2.2 黒体（放射）軌跡

第 2.1 節でも述べたように、本研究では LED 照明器具を用いて照明システムを構築する。そこで、色温度の制御の指標として、色度を用いる。色度とは色を数値的に表現したものであり、色度図とは RGB の 3 原色の混合により生成される全ての色を網羅して、その色位置を座標化して表現したものである。その色度図上で色温度を表現することができる。黒体の温度が

変化したとき、黒体放射の色度座標がたどる色度図上の曲線のことを黒体（放射）軌跡という。本研究ではこの黒体軌跡を用いて色温度の制御を行う。色度図には Luv 表色系の uv 色度図（CIE1960 UCS 色度図）を用い、uv 色度図上にプロットした黒体放射を用いる。Luv 表色系の uv 色度図上の黒体軌跡を Fig. 1 に示す。

光源の光色を表すものとして使用される相関色温度とは、その光源の uv 色度座標にもっとも近い色度座標を持つ黒体放射の絶対温度として定義される。試料光源の色度座標からもっとも近い黒体放射のもつ色度座標は、CIE1960 UCS 表色系において試料光源の色度座標の点から、黒体放射軌跡に垂線を下ろしたときの交点として求められ、またその垂線を等色温度線という。このことは CIE1960 UCS 表色系において、すべての等色温度線は黒体放射軌跡に直交することを意味する。CIE1960 UCS 色度図における黒体放射軌跡及び等色温度線を Fig. 2 に示す。

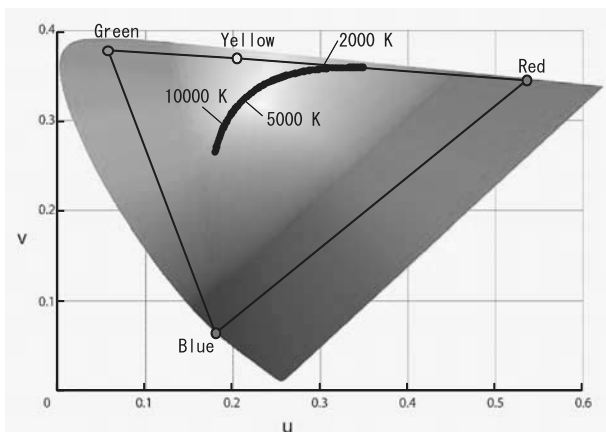


Fig. 1. Blackbody (radiation) locus.

3. 照度および色温度可変型 LED 照明システムの構築

3.1 システムの概要

要求された照度および色温度を実現する照度および色温度可変型 LED 照明システムの構築を行う。今回は単一の箇所での実現を目指す。本システムは調光可能な Sharp 製フルカラー LED の赤、緑、青および黄（以下 R,G,B および Y とする）の 4 色それぞれの光度を調節することで任意の照度および色温度を実現す

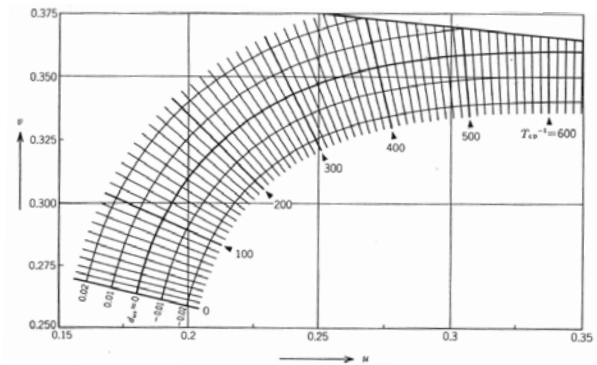


Fig. 2. Blackbody (radiation) locus and isothermperature line in chromaticity diagram of CIE1960 UCS.

る。照度、色温度および uv 値は色彩照度計を用いてフィードバック制御を行う。なお、第 2 章でも述べたように色温度は Fig. 1 で示した u,v 値を用いて制御を行う。

3.2 システムの構成

システムは 29 灯の調光可能な Sharp 製フルカラー LED 照明、制御コンピュータおよび色彩照度計から構成される。フルカラー LED 照明はデジタル信号によって明るさを変化できる。フルカラー LED 照明の信号値と光度の関係を Fig. 3 に示す。

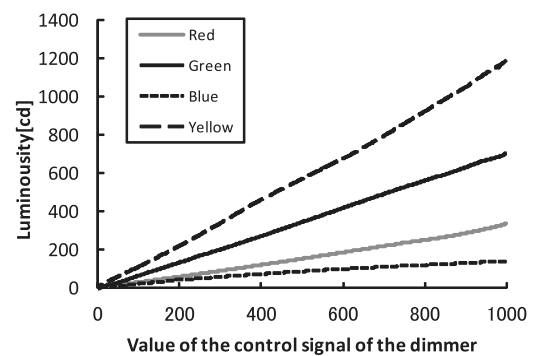


Fig. 3. Connection of luminosity and signal.

また、色彩照度計（コニカミノルタ、CL-200）を用いて照度、色温度および u,v 値を取得する。この色彩照度計は、これらの値を RS232C ケーブルによりデジタル信号として出力することが可能である。色彩照度計を Fig. 4 に示す。



Fig. 4. Chroma sensor (KONICA MINOLTA, CL-200) .

3.3 システムの制御方法

照度および色温度可変型 LED 照明システムの具体的な処理の流れについて説明する. 本システムでは要求された照度および色温度の実現を行う. フルカラー LED 照明を用いて, R,G,B および Y の光度を変化させることによって幅広い照度および色温度を実現する. 色温度に関しては Fig. 1 で示した色度を用いて制御を行う. 以下に, 制御の流れを説明する.

- Step1** : 目標照度および目標色温度 (目標色度) を設定する.
- Step2** : 700 lx, 4000 K で初期点灯する.
- Step3** : 現在色度を取得する.
- Step4** : 目標色度を満たしている場合は 5へ進み, 満たしていない場合は目標色度を実現するための R,G,B および Y の光度増減量を計算し, それに応じて光度を増減させる.
- Step5** : 現在照度を取得する.
- Step6** : 目標照度を満たしていない場合は過不足分に応じて R,G,B および Y の光度を増減する.
- Step7** : 目標照度または色温度が変更された場合は 3 に戻る.
- Step8** : 上記 Step3~Step7 を繰り返す.

以上の処理により, 要求された照度および色温度を実現する. **Step4** では, 現在色度に対して, 目標色度が色度図上のどの範囲に位置しているかを判定する. その結果から不足している色の光度を増加, 過大な光

度を減少させることで目標の色度に近づける. なお, 構築したシステムは目標値から 20 lx, 20 K の範囲内に収束した場合は動作を行わない.

4. システムの動作実験

4.1 実験概要

第 3 章で構築したシステムの検証実験を行う. フルカラー LED29 台, 制御用 PC および色彩照度計 1 台を用いて, 単一の照度および色温度を実現できているかについて検証する. 目標照度を 350~800 lx, 色温度を 3000~7000 K の範囲内で 7 パターンを設定し, 検証実験を行う. 目標値の設定を Table 1 に示す.

Table 1. Target illuminance and target color temperature.

Pattern	Target illuminance [lx]	Target color temperature [K]
1	500	3000
2	800	3500
3	600	4000
4	400	4500
5	350	5000
6	600	6000
7	800	7000

実験は同志社大学理工学部知的オフィス環境創造システム実験室で行い, Sharp 製の調光可能なグリッド天井用フルカラー LED 照明 (DLA016E) を用いる. 実験環境を Fig. 5 に示す.

4.2 実験結果

目標照度を 350~800 lx および色温度を 3000~7000 K の範囲内で 7 パターンを設定し, 検証実験を行った. 目標値を Table 1 に示す値に設定した際の照度および色温度の収束結果をそれぞれ Fig. 6 および Fig. 7 に示す.

Fig. 6 より, 照度は 20~50 回程, 調節を繰り返すことで収束していることを確認した. また, Fig. 7 よ

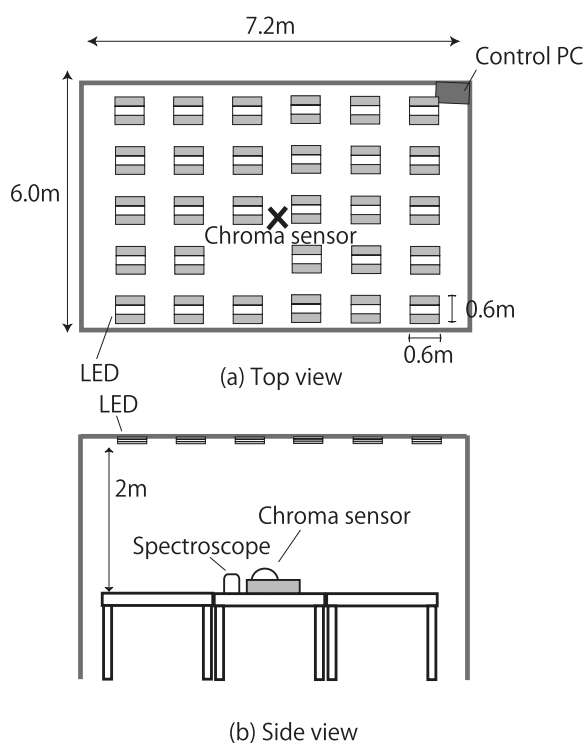


Fig. 5. Experimental environment.

り、色温度は 30~50 回程度、調節を繰り返すことで収束していることを確認した。7 パターンの照度および色温度の収束結果を Table 2 に示す。

Table 2 より、照度、色温度共に目標値の上下 20 lx の 20 K の範囲内に収束することを確認できた。この値は人の目では気づかない程度の変化であるため収束したと言える。

5. 演色指数の評価

演色指数とは、8 種類の試験色の見え方を標準の光源（自然光に最も近い光）と比較して、光源の違いによる見え方を人間が総合的に評価する指標である。8 種類の試験色で色差を求めた評価式によって、平均的な演色指数を求める。演色指数は人間の感性に左右される数値であり、演色指数を算出するには対象の光源の下で色の見え方を、人間がその都度評価しなければならない。単位は Ra（アールエー）で表わされ、100 に近くなるほど、その光源の光が標準の光源に近く、自然光に近い表現性を持つる光源である。一般的に、白熱電球やハロゲン球は Ra 100 で、三波長型蛍光灯は Ra 88 である。また、オフィスや学校、工場などの

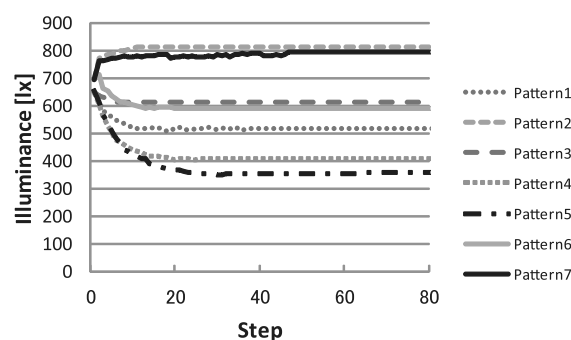


Fig. 6. History of illuminance.

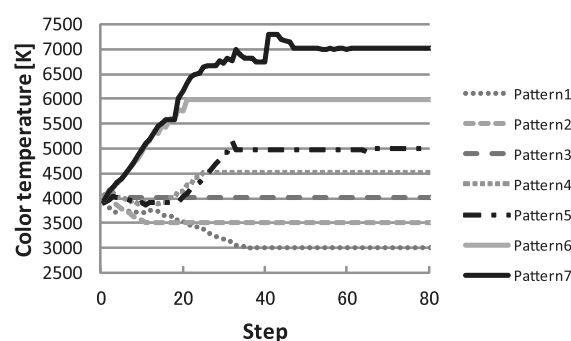


Fig. 7. History of color temperature.

場所で推奨される演色指数がある。それらを表したランプの演色指数と用途を Table 3 示す。

今回、構築したシステムがオフィスや教育機関で使用可能かについて判断するために、分光分布から演色指数を測定するファイバマルチチャンネル分光器を用いて測定を行った。使用したファイバマルチチャンネル分光器を Fig. 8 に示す。

測定した結果を Table 4 に示す。

Table 4 に示すように演色指数は Ra 85~95 の範囲に納まっている。この範囲は Table 3 で示した表の中で、オフィスおよび学校で好ましい場所の範囲に入っている。そのため、構築した LED 照明システムはオフィスや学校での実用が可能であることが分かった。

6. むすび

近年、オフィスの光環境改善に注目が集まってきており、光環境を改善することで知的生産性や快適性を向上させる研究がされてきた。個人や作業内容、体調

Table 2. Experimental result.

Pattern	Illuminance (difference)[lx]	Color temperature (difference)[K]
1	517 (17)	3010 (10)
2	813 (13)	3511 (11)
3	613 (13)	4011 (11)
4	409 (9)	4514 (14)
5	357 (7)	4994 (6)
6	589 (11)	5988 (12)
7	797 (3)	7011 (11)



Fig. 8. Spectrometer.

によって好まれる照度および色温度が異なることがわかっている。そこで個人が自由に選択できる幅広い光環境の提供が必要あると考えられる。しかしオフィスで一般的に用いられている蛍光灯照明器具は色温度の可変範囲が制限されている。そこで本稿では、幅広い範囲の照度および色温度を実現する照明システムをLED照明器具を用いて構築した。要求した照度および色温度を赤、青、緑および黄色の光度を調整することで実現し、構築したシステムの検証実験を行った。その結果、要求した照度および色温度の上下 20 lx、20 K 範囲内に収束させることが可能であることが分った。また、構築したシステムの演色性評価は Ra 85~90 の

Table 3. Lamp of color rendering property and use.

range	preffered place	allowable
$Ra \geq 90$	Laboratory examination・ Museum	
$90 > Ra \geq 80$	House・Hotel・ Restaurant・ Shop・Office・ School・Hospital	
$80 > Ra \geq 60$	General factory	Office・School
$60 > Ra \geq 40$	Tunnel・Highway	General factory
$40 > Ra \geq 20$	Tunnel・Highway	

Table 4. Valuation of color rendering property.

Pattern	Color rendering property [Ra]
1	91.8
2	87.0
3	92.4
4	88.5
5	92.6
6	90.4
7	94.7

範囲であったため、オフィス、学校および病院での実用が可能であることが分かった。以上のことより、LED照明による照度および色温度の制御が可能となり、要求された照度および色温度を実現することが可能となった。このシステムを用いることで、オフィスにおける光環境改善に関する更なる検討を行うことが可能となった。

参 考 文 献

- 1) Olli Seppanen, William J. Fisk: A Model to Estimate the Cost-Effectiveness of Improving Office Work through Indoor Environmental Control, Proceedings of ASHRAE, 2005
- 2) Mark J. Mendell, G. A. Heath: Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature, Indoor Air, Vol.15, No.1, pp.27-52, 2005
- 3) Fumiaki Obayashi, Misa Kawauchi, Masaaki Terano, Kazuhiro Tomita, Yoko Hattori, Hiroshi Shimoda, Hirotake Ishii, Hidekazu Yoshikawa, Development of an Illumination Control Method to Improve Office Productivity, 12th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol.9, No.2, pp.939-947, 2007
- 4) 載倩穎, 井上学, 下村義弘, 岩永光一, 勝浦哲夫, オフィス空間における照明色温度の日内変動が心理整理機能に与える影響, 日本生理人類学会誌 Vol5 特別号 (2) (第 44 回大会要旨集), pp12-pp13, 2000
- 5) 社団法人照明学会, 照明ハンドブック, オーム社, 2003
- 6) Nadeen Abbas, Dinesh Kumar, Neil Mclachlan: The Psychological and Physiological Effects of Light and Color on Space Users, Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, pp.1228-1231, 2005
- 7) 小野景子, 三木光範, 米澤基: 知的照明システムのための自律分散最適化アルゴリズム, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.130, No.5, pp.750-757, 2010
- 8) Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, S. Noel Simpson, Individual Lighting Control: Task Performance, Mood and Illuminance journal of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, 2000
- 9) 三木光範, 廣安知之, 富島千歳: 照度・色温度可変型照明システムを用いた実執務空間における最適な光環境, 第 8 回情報科学フォーラム講演論文集, p493-p494, 2008