

The Beacon-Type Intelligent Lighting System for Performing Position Estimation of the Office's Using BLE Beacon

Sota NAKAHARA^{**}, Mitsunori MIKI^{*}, Kohei YAMAGUCHI^{**}, Shinya DAINAKA^{**}, Hiroto AIDA^{*}

(Received July 11, 2016)

The Intelligent Lighting System can provide an individual illuminance environment each worker desires, and it can also save energy. When many users leave their desk, this system turns off the unnecessary lighting. As a result, it can achieve high energy saving. From demonstration experiments of Intelligent Lighting System, it was found that some office who does not perform away operations. If you do not want to perform away operation, unnecessary lighting of places that have no office's lights, power consumption is increased. Therefore, in this study we propose the Beacon-Type Intelligent Lighting System that performs standing away seat detected using Bluetooth Low Energy(BLE) beacon and smartphone. This system resident away operation is automated, improving the convenience of the system, a further reduction of power consumption in Intelligent Lighting System is possible.

Key words : intelligent lighting system, office, BLE beacon

キーワード : 知的照明システム, オフィス, BLE ビーコン

BLE ビーコンを用いて執務者の位置特定を行う ビーコン型知的照明システム

中原 蒼太, 三木 光範, 山口 浩平, 提中 慎哉, 間 博人

1. はじめに

近年, オフィス環境が執務者の生産性に及ぼす影響に関する研究が広く行われており, オフィス環境を改善することが, 執務者の知的生産性向上につながると報告されている¹⁾. 特に, オフィス環境のうち照明環境に着目した研究では, 執務に最適な明るさ (照度)

を執務者ごとに提供することがオフィス環境の改善に有効であるとされている²⁾. また, オフィスビルにおけるエネルギーの消費量は年々増加傾向にあり問題となっている. オフィスビルにおいて照明による消費電力は全消費電力の約 20 % から 25 % を占めており^{3,4)}, 照明の消費電力削減がオフィスの消費電力削減につながる.

* Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto, Japan

Telephone:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6716, E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp

** Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto, Japan

Telephone:+81-774-65-6924, Fax:+81-774-65-6716, E-mail:snakahara@mikilab.doshisha.ac.jp

そこで著者らは、オフィス環境において執務者の知的生産性向上およびオフィスの省エネルギー化を目的とし、執務者が個別に要求する照度を低消費電力で実現する知的照明システムの研究開発を行っている⁵⁾。

現在の知的照明システムにおいて、執務者が知的照明システムを利用するには、照度センサの在席ボタンを押すか、Web UI から在席操作を行い、執務者が一時的に席を離れる際や退社する際には同様に照度センサや Web UI から離席操作を行う。知的照明システムは執務者からの在席操作、離席操作に応じて執務者付近の照明の調光、または消灯を行う。そのため、執務者が一時的に席を離れる際や退社時に離席操作を行わない場合、執務者がいない場所の照明が点灯し続けることになり、消費電力の削減効果が減少する。

一方で、近年 O2O マーケティングの位置特定技術として BLE ビーコン（以下、ビーコン）に注目が集まっている^{6,7)}。ビーコンは自身の識別情報を近距離に発信し、スマートフォンはその識別情報からおおよその位置を特定することが可能である。そこで、ビーコンとスマートフォンを用いて、執務者の位置を特定し、知的照明システムにおける在離席操作を自動化するビーコン型知的照明システムを提案する。提案するビーコン型知的照明システムにより、システムが執務者の在離席を検知し、知的照明システムにおける執務者のシステムの利便性向上を目指す。

2. 知的照明システム

2.1 概要

知的照明システムは、調光可能な照明、制御 PC、照度センサ、および電力計を一つのネットワークに接続することで構成される。各照明の明るさ（光度）を変化させることによって執務者の目標照度を実現し、かつ省エネルギー性を実現する。知的照明システムの構成を Fig. 1 に示す。

各照明に接続された制御装置が照度情報および消費電力情報を基に最適化手法を用いて、執務者に感知されない範囲で光度を変化させる。これを繰り返すことで、執務者の要求する照度を省電力で実現する。

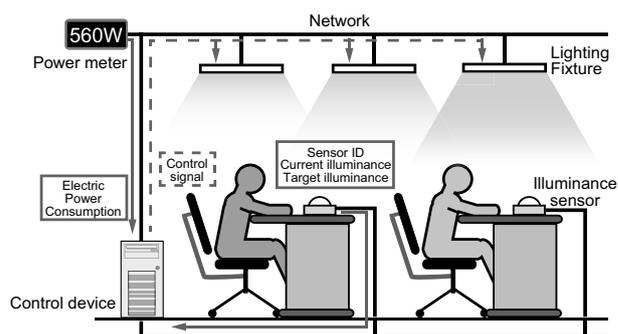


Fig. 1. Configuration of Intelligent Lighting System.

知的照明システムでは、Simulated Annealing を基盤とした照明制御アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient: ANA/RC) を用いている^{8,9)}。Simulated Annealing は、現在の解から近傍の範囲内で近傍解を生成し、目的関数が改善した場合は近傍解を受理する汎用的な局所探索法である。設計変数を照明光度、制約条件を各照度センサの目標照度とし、探索毎に各照明光度を人の目に感知されない変化幅¹⁰⁾の範囲内でランダムに微小変化させ、最適な点灯パターンの探索を行う。知的照明システムでは1回あたり約2秒の照明制御を30回から100回行うことで、各執務者の目標照度を実現する。以下に照明制御の流れを示す。

- (1) 各照度センサの目標照度を設定する。
- (2) 各照明を初期光度で点灯する。
- (3) 照度センサおよび電力計から計測値を取得する。
- (4) 後述する目的関数に基づき、評価値を計算する。
- (5) 照度/光度影響度に応じて次光度を生成し、次光度で点灯する。
- (6) 照度センサおよび電力計から計測値を取得する。
- (7) 項目(5)における点灯状況の評価値を計算する。
- (8) 目的関数の評価値が改良された場合は次光度を受理し、そうでない場合は元の光度に戻す。
- (9) 項目(3)に戻る。

各照明には、各照度センサとの位置関係に応じて照度/光度影響度が設定されており、その影響度合いに応じてランダムな光度変化に方向性を持たせる。

照明の点灯パターンおよび目標照度実現性を評価する目的関数を式 (1) に示す。

$$f_i = P + w \sum_{i=1}^n g_i \quad (1)$$

$$g_i = \begin{cases} 0 & (Lc_i - Lt_i) \geq 0 \\ R_i(Lc_i - Lt_i)^2 & (Lc_i - Lt_i) < 0 \end{cases}$$

$$R_i = \begin{cases} r_i & r_i \geq T \\ 0 & r_i < T \end{cases}$$

n : 照度センサの数 w : 重み
 P : 消費電力量 L_c : 現在照度 L_t : 目標照度
 r_i : 照度/光度影響度 T : 閾値

式 (1) に示す目的関数は消費電力 P と照度制約 g_i から構成され、各照明ごとに計算する。各照度センサの目標照度を制約条件としたペナルティ g_i は照度/光度影響度により変化し、照度/光度影響度が大きい照明だけペナルティを重要視するように動作する。また、照度/光度影響度 r_i に閾値 T を設けることで、ある照度センサに影響を与える照明を近くの照明に絞ることができる。これにより、照度センサから遠い照明は消費電力の最小化を目的として制御する。

照度/光度影響度とは、照度センサから得られる照度値と照明の光度の関係を示す値である。照度/光度影響度は式 (2) で表される。

$$I = RL \quad (2)$$

I : 照度 [lx], L : 光度 [cd]

R : 照度/光度影響度 [lx/cd]

照度/光度影響度 R は照明環境に依存する値であり、照明環境に変化がない限り定数と見なすことができる。一般的なオフィスの机は移動することは少ないため、知的照明システムの導入環境において照明を1灯ずつ点灯・消灯させることで、事前に照度/光度影響度を計測することができる。

2.2 シミュレーション型制御

前節で述べた知的照明システムでは、各照度センサから得られる照度情報、電力計から得られる消費電力情報を基に最適化手法を用いて光度変化を繰り返すことで、必要な場所に必要な照度を提供している。この方法では、オフィス内のレイアウト変更、照度センサの移動、照明器具の劣化、および外光の影響など、様々な照明環境の変化に柔軟に対応することが可能である。

一方、オフィスには窓のないオフィスや、窓があっても周りのビルの影響で外光がほとんど入らないオフィスも存在する。このような環境では外光の影響を考慮する必要がないため、事前に照度/光度影響度を計測することで、各照明の点灯光度から各照度センサの照度を推定することが可能である。各照度センサの照度を計算機内で推定することで、制御装置の内部処理のみで照明の最適な点灯パターンが探索可能である。このように、照明環境に変化がなく、外光の影響のないオフィス環境においては、照度収束までの照明制御回数を削減する知的照明システムの制御方法が存在する¹¹⁾。この制御方法では、電力情報および照度情報を推定し、推定した値を用いて計算機内で最適化を繰り返すことで、電力計および照度センサから情報取得することなく最適な照明の点灯パターンを探索する。この場合、照明の制御に照度センサから取得した照度情報を用いる必要はないため、照度センサの設置は不要となる。そして、計算機上で探索した照明の点灯パターンを実環境の照明に反映することで、1回の照明制御で各執務者の目標照度を実現する。以降、照度収束までの照明制御回数を削減する知的照明システムの制御方法をシミュレーション型制御と呼ぶ。

3. ビーコン

ビーコンとは、低消費電力の近距離無線技術「Bluetooth Low Energy」(BLE) を利用した位置特定技術である。ビーコンは自身の識別情報を一定時間間隔で近距離に発信する。自身の識別情報として、ビーコンから以下の情報を発信する。

Proximity UUID

所属するグループを識別するための値で、一意の ID を設定

Major

UUID が同じビーコンを識別するための値

Minor

UUID および major も同じビーコンを識別するための値

Measured Power

ビーコンから 1m 地点での受信電波強度の実測値

4. ビーコン型知的照明システム

4.1 ビーコン型知的照明システムの概要

ビーコン型知的照明システムは、ビーコンとスマートフォンを用いることで在離席操作を自動化する知的照明システムである。ビーコン型知的照明システムの構成を Fig. 2 に示す。

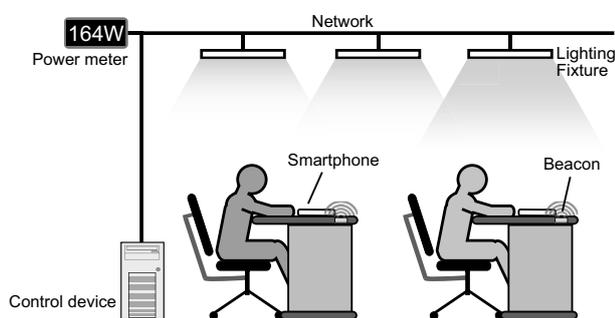


Fig. 2. Configuration of Beacon-type Intelligent Lighting System.

執務者は部屋に入室し着席すると、机の所定の場所にスマートフォンを置く。すると、執務者のスマートフォンは机に設置されたビーコン電波を検知し、制御 PC に在席処理命令を送信する。また、執務者が退室した際はスマートフォンがビーコン電波を受信できなくなったことを検知し、制御 PC に離席処理命令を送信する。これにより、現在の知的照明システムにおいて執務者が手動で行っていた在離席操作が自動化される。

4.2 システム構成

Fig. 2 の通り、制御 PC、調光可能な照明、電力計を 1 つのネットワークに接続し、ビーコンを執務者の各机に 1 台ずつ設置する。各執務者は部屋に入室し着席すると、机の所定の場所にスマートフォンを置く。1 秒につき 1 回、合計 5 秒間スマートフォンでの RSSI を計測し、5 回連続で RSSI が近接していると判定できる閾値以上でかつ、最も強いビーコンの位置を執務者の位置と判定する。本システムにおいて執務者が部屋に入室し、システム上で在席になるまでの流れを以下に示す。

- (1) 執務者が部屋に入室する。
- (2) スマートフォンはビーコンから識別情報を受信する。
- (3) スマートフォンは受信したビーコンの識別情報および執務者が設定した目標照度をシステムに送信する。
- (4) システムはスマートフォンから受信した識別情報からスマートフォンの位置を特定し、受信した目標照度で知的照明システムの在席処理を行い、照明を点灯または調光する。

また、離席処理は、在席時に受信していたビーコン電波をスマートフォンが受信できなくなった際に行われる。

5. 在離席判定に用いる RSSI 閾値の設定

5.1 概要

本システムでは、執務者の在離席を判定するにあたり、近接しているかどうか判定するための閾値として、ビーコンからの執務者のスマートフォンでのビーコン電波の RSSI を利用する。近接判定用の RSSI 閾値を設定するため、ビーコンとスマートフォンの距離を変化させた際の実環境における RSSI の変化を検証する必要がある。そこで本章では、ビーコンとスマートフォンの距離を変化させた際の、スマートフォンでの RSSI を計測し、閾値の検討を行う。

5.2 実験環境

ビーコンとスマートフォンの距離を変化させた際の RSSI を計測した。本測定実験は、同志社大学香知館知的オフィス環境創造システム実験室で行った。実験環境を Fig. 3 に示す。

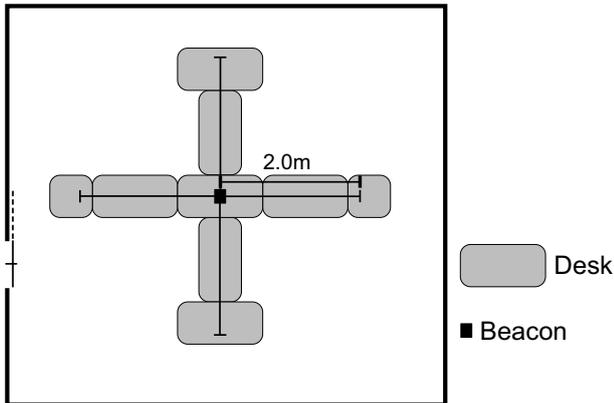


Fig. 3. RSSI measurement experiment environment.

スマートフォンは iPhone 4S を使用し、ビーコンからの距離を 0.1 m ごとに変化させ、最大 2.0m までのスマートフォンでの RSSI を計測した。ビーコンは Aplix 社の MyBeacon 汎用型 MB004 Ac を 2 台使用し、インジケータランプが上に向くように机の上に設置した。計測はビーコン 1 台ずつそれぞれ 4 方向で、各地点につきそれぞれ 5 回ずつ行った。

5.3 RSSI 計測結果および RSSI 閾値の検討

RSSI 計測実験の計測結果を Fig. 4 に示す。

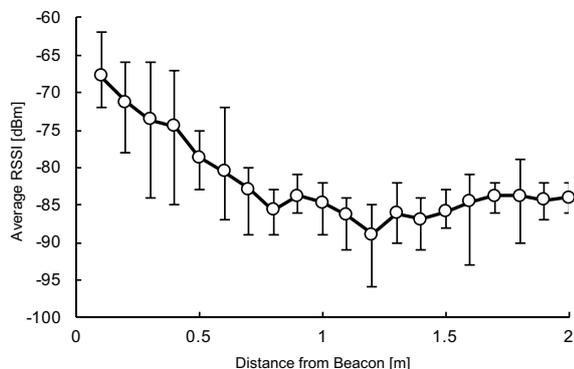


Fig. 4. Result of RSSI measurement.

Fig. 4 のように、平均 RSSI は距離が 0.7 m まではなだらかに減少するが、それより遠い場合ではあまり

変化しないことがわかった。本システムではビーコンは机の上に設置し、机の所定の場所にスマートフォンを置くことを想定している。そのため、その際のビーコンとスマートフォンとの距離はおよそ 0.2 m 以内となるため、システムでの RSSI の閾値は -80 dBm とした。

6. システム動作検証実験

6.1 概要

ビーコン型知的照明システムを実際に構築し、システムの動作実験を行った。検証事項は、目標照度実現性および執務者の在離席、座席移動の検知である。本実験では外光の影響がないオフィスを想定し、知的照明システムの制御はシミュレーション型かつ照度センサを用いない制御を用いて動作実験を行った。スマートフォンは iPhone 4S を 3 台を使用し、ビーコンは 5 章で用いたビーコンと同じ、Aplix 社の MyBeacon 汎用型 MB004 Ac を各席に設置した。また、執務者が在席する机には、知的照明システムが正常に動作し、目標照度を満たすかの確認のため、照度センサを設置した。この照度センサは目標照度実現性の確認のみに用い、知的照明システムの制御には用いない。本実験は RSSI 計測実験と同じく、同志社大学香知館知的オフィス環境創造システム実験室で行った。システム動作実験を行った環境を図 5 に示す。

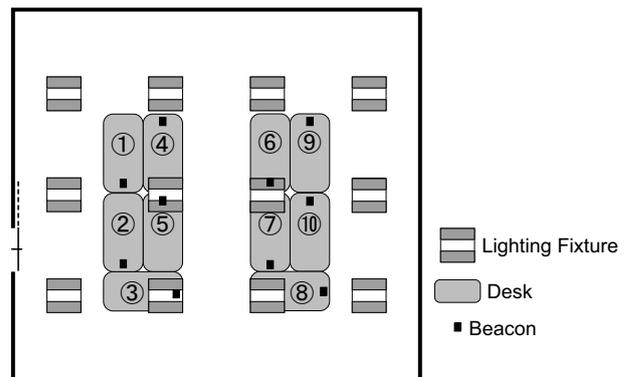


Fig. 5. System operation experiment environment.

本実験での執務者の在離席の流れを以下に示す。

- (1) 執務者 A (目標照度 300 lx) が座席 1 に着席

- (2) 執務者 B (目標照度 500 lx) が座席 5 に着席
- (3) 執務者 B が座席 6 に移動
- (4) 執務者 C (目標照度 700 lx) が座席 8 に着席
- (5) 執務者 A が離席
- (6) 執務者 B が離席
- (7) 執務者 C が離席

6.2 実験結果

各座席での照度履歴を Fig. 6, 実験開始から 800 秒経過後の各照明の点灯パターンを Fig. 7 に示す。

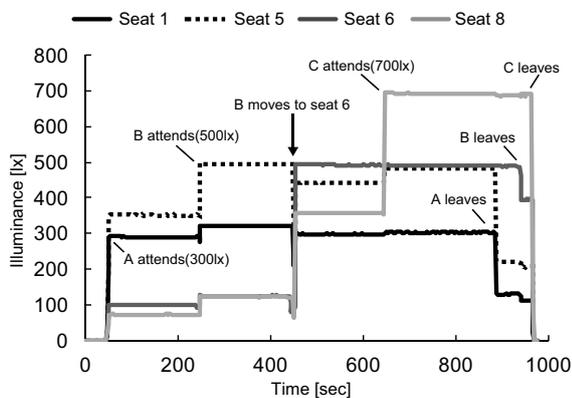


Fig. 6. History of illuminance at each seat.

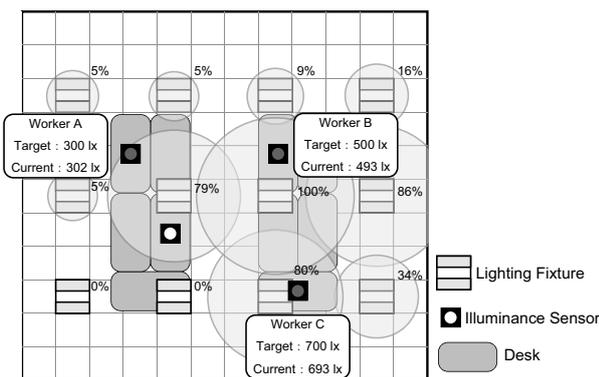


Fig. 7. Lighting pattern at 800 second.

Fig. 6, Fig. 7 から, ビーコン型知的照明システムは各執務者の在席・離席を検知し, 目標照度を満たすように照明を調光制御していることが確認できる. 各執務者の在席・離席を検知すると高速に目標照度を実

現しており, その後も照度が目標照度を維持するように動作している. 実験開始から 250 秒後には執務者 A に加えて執務者 B も在席するが, 執務者 A の要求する目標照度を満たしながら執務者 B の目標照度を実現していることが確認できた. また, その 200 秒後に執務者 B は座席 6 へ移動するが, 執務者 A の要求する目標照度を満たしながら座席 6 に執務者 B の要求する目標照度を提供した. その後の執務者 C の在席においても, 各執務者それぞれの目標照度を満たすようにシステムが動作していることが確認できた. また, 執務者 A, B, C それぞれの離席も正常に検知し, 照明の減光または消灯が正しく行われ, 離席となった座席における照度が低くなっていることがわかる.

本実験の結果から, ビーコンとスマートフォンを用いて執務者の在席・離席状態, 座席移動を検知可能であり, ビーコン型知的照明システムは有用であるといえる.

7. むすび

本論文では, 現在の知的照明システムにビーコンを用いた在離席検知システムを組み込むことで, 執務者の在離席操作を自動化するビーコン型知的照明システムについて述べた. そして, 実際のオフィスを想定しシステムの動作の検証を行った. 検証の結果, ビーコン型知的照明システムが正常に動作することが確認できた. 現在は机にビーコンを置いて実験を行っているが, 今後は様々なビーコン設置方法を検討し実験を行うとともに, 実オフィスに導入を想定し, 長時間の使用においても, ビーコン電波の干渉による座席の誤検知がないか検証することが重要であると考えられる.

参考文献

- 1) 西原直枝, 田辺新一, “中程度の高湿環境下における知的生産性に関する被験者実験”, 日本建築学会環境系論集, 33-39(2003).
- 2) P.R.Boyce, N.H.Eklund and S.N.Simpson, “Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, and Illuminance”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 131-142 (2000).

- 3) 資源エネルギー庁, “オフィスの節電計画行動フォーマット”, <http://www.meti.go.jp/setsuden/20110513taisaku/07.pdf>.
- 4) 一般財団法人省エネルギーセンター, “オフィスのエネルギー消費の特徴”, http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html.
- 5) 三木光範, “知的照明システムと知的オフィスコンソーシアム”, 人工知能学会, **22**[3], 399-410(2007).
- 6) 橋口稔, 行成功志, 藤野慶太, 田中康一郎, “ibeacon を用いたスマートフォン向けキャンパスマップの試作”, 情報処理学会第 77 回全国大会, **2015**[1], 899-901(2015).
- 7) 古舘達也, 堀川三好, 菅原光政, “歩行者を対象とした屋内即位手法の提案”, 情報処理学会第 77 回全国大会, **2015**[1], 313-315(2015).
- 8) M.Miki, T.Hiroyasu and K.Imazato, “Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness”, *Proc. IEEE CIS*, **1**, 520-525 (2004).
- 9) T.Hiroyasu, M.Yoshikata, S.Tanaka and M.Miki, “An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces”, *Proc IEEE Int Conf. Syst. Man Cybern*, 941-947 (2009).
- 10) 鹿倉智明, 森川宏之, 中村芳樹, “オフィス環境における明るさの変動知覚に関する研究”, 照明学会誌, **85**[5], 346-351(2001).
- 11) S.Matsushita, S.Kuwajima, M.Miki, H.Ikegami and H.Aida, “Reducing the Number of Times Lighting Control is Required to Reach Illuminance Convergence in the Intelligent Lighting System”, The 2014 International Conference on Artificial Intelligence(ICAI2014), 535-541(2014).