

オフィス執務者の位置情報を活用した照明・空調連携最適制御に関する研究 Research on the Optimal Lighting and Air Conditioning Coordination Control System Using Location Information of Office Workers

南澤 晃[†] 酢山 明弘[†] 川越 真[‡]
Akira Minamisawa Akihiro Suyama Makoto Kawagoe

1. はじめに

2050年のビルのカーボンニュートラルの実現に向け、特にビルにおける消費電力の割合が大きい照明・空調の省エネ化が求められている[1]。近年では、働き方改革の推進により、リモートワークやフレアドレスのように、個人の業務内容に合わせてワークスペースを選択するオフィスが増加している。このようなオフィスでは、居室内で執務者が不在となるエリアが発生することが多いため、執務者の位置情報に合わせて照明・空調を適切に制御することで、オフィス全体の省エネ化が期待できる。

オフィス執務者の位置情報を正確に取得する屋内測位技術には、主にウェアラブルセンサを用いた手法とカメラで取得した映像情報を用いた手法がある[2][3]。当社はカメラ付きLED照明を活用した画像解析ソリューションを提供しており、カメラ映像から執務者の位置や人数および作業内容を高精度で分析できる[4]。そこで、本研究では、映像情報から解析したオフィス執務者の位置情報を活用することで、各執務者の快適性を維持しながらオフィス全体の省エネ性を向上させる、照明・空調の制御システムの開発を目的とする。また、照明と空調はそれぞれ独立した制御となることが多いが、実際には照明が発する熱は、室内の空調環境に大きな影響を与える。そこで、本研究では照明と空調を同じシステムで最適化することによって、更なる省エネを図る。

本稿では、オフィス執務者の位置情報データを起点として、照明・空調を制御する連携制御システムを提案し、人・照明の位置と発する熱を考慮して、照明・空調の消費電力量が最小になる制御設定値を数理最適化問題として導出するアルゴリズムを検討する。また、シミュレーション環境を用いて、オフィスの在席率に対する提案手法の有効性を評価する。

2. 照明・空調連携最適制御

本章では、照明・空調連携最適制御システムの概要と、照明・空調の制御手法について説明する。

2.1 照明・空調連携最適制御システム

照明・空調の制御対象となるオフィス空間、および照明・空調連携最適制御システムの構成図を図1に示す。

制御対象となる居室には、複数のカメラ、照明、および空調室外機と接続された空調室内機が存在し、外部からの指示により、照明の調光率と空調室内機の設定温度を機器ごとに個別に設定することができる。

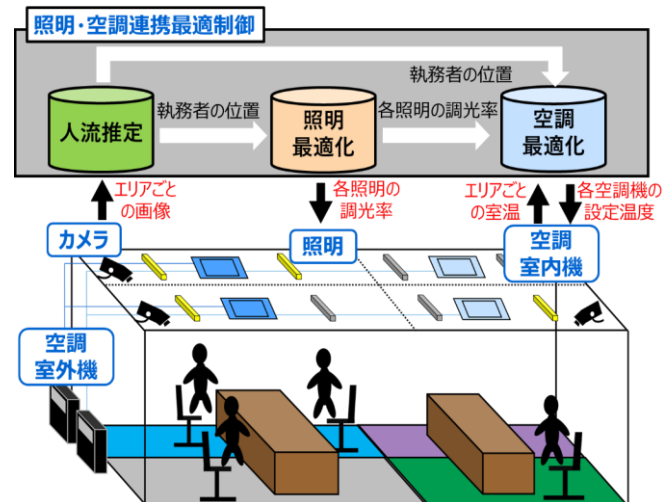


図1 照明・空調連携最適制御システム

照明・空調連携最適制御システムは、人流推定モジュールと照明最適化モジュール、および空調最適化モジュールから構成される。居室には複数の仮想的なエリアに分割され、各エリアに存在するカメラで取得した映像情報を人流推定モジュールで解析することにより、執務者の位置と人数を推定することができる。照明最適化モジュールは、執務者の位置情報を入力として、各照明の調光率を算出する。空調最適化モジュールは、執務者の位置情報と各照明の調光率、および空調室内機の吸い込み温度から取得した各エリアの室温を入力として、各空調の設定温度を算出する。

執務者の位置情報を活用した照明・空調最適制御では、執務者が存在するエリアのみの快適性を満たすように最適化を行うため、人が居ないエリアの照明を消灯したり空調を弱めたりすることで、消費電力を削減できる。このため、居室内に存在する執務者の人数が少なく、在室者が特定のエリアに集中している場合において、特に大きな省エネ効果が得られることが期待できる。また、照明・空調連携最適制御は、照明と空調を同じシステムで最適化するため、室内で熱源となる照明の発熱量を考慮して、最適な空調設定温度を導出することができる。

カメラ画像からオフィス執務者の位置情報を解析する技術については、既に多くの研究が進められていることから、本稿では、人流推定モジュールで推定した執務者の位置情報を入力情報とした、照明調光率および空調設定温度の最適化手法を示す。

2.2 照明最適制御アルゴリズム

執務者の位置情報を入力とした照明最適化モジュールは、作業面照度基準以上の視環境を居室内の各執務者に提供し、

[†] 東芝インフラシステムズ株式会社

Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation

[‡] 東芝ライテック株式会社

Toshiba Lighting & Technology Corporation

かつ、対象空間の照明消費電力の合計が最小となる調光率を算出することが求められる。

ここで、照明器具の消費電力特性が調光率に対して線形性を有する場合、照明の消費電力 P_L [kW]を式(1)、執務者の快適条件を示す制約式は式(2)で示すことができる。ただし、それぞれの照明器具間に一定の距離が存在し、執務者の作業面照度は、執務者の最近傍に位置する照明との距離と調光率のみで求められるものとする。

$$P_L = Lx \cdot P_L^{\max} \quad (1)$$

$$f_{Lx,d} \geq L_c \quad (2)$$

ここに、

Lx : 照明の調光率[-]

P_L^{\max} : 照明の定格消費電力[kW]

d : 照明と執務者の距離[m]

$f_{Lx,d}$: 照明の調光率 Lx 、照明と執務者の距離 d における執務者の作業面照度[lx]

L_c : 作業面の照度基準[lx]

である。

上記の式から P_L が最小となる条件を求めることで、各照明の最適な調光率を算出できる。

また、後述の評価では、設定可能な調光率として消灯(調光率 0%)と点灯(調光率 100%)の 2 段階にて評価を行う。この場合、各執務者の最近傍の照明のみを点灯するにより、最小電力で必要な作業面照度が確保できる。

2.3 空調最適制御アルゴリズム

空調最適化モジュールは、執務者周辺の室温を任意の快適温度範囲内として、かつ、対象空間の空調消費電力の合計が最小となるような各空調機の設定温度を算出する。ただし、空調は設定温度を制御してから実際に室温が変化するまでに一定の時間を有するため、制御を行ってから t_n 分経過後に快適条件を満たすものとする。

快適性および省エネ性を両立した空調制御方法として、室内の快適性を制約条件として、消費電力を目的関数に設定した数理最適化手法により、空調機の最適な設定温度を導出することができる[5]。本稿では、 t_n 分後に在室者が存在するエリアのみの快適性を維持することを制約条件として、空調環境の消費電力計算モデルを線形計画問題として定式化した。また、照明・空調連携最適制御では、執務者の位置情報と 2.2 節に示した照明制御により得られた各照明の調光率を入力情報とする。そのため、空調環境をエリアごとに分割することで、エリアごとに異なる熱負荷を詳細にモデル化することができる。

2.3.1 空調消費電力モデルの定式化

最小化する目的関数は時刻 t ($t = 1, 2, \dots, t_n$)における全ての空調機消費電力の合計を P_t [kW]とすると、式(3)のように定式化できる。

$$f = \sum_{t=0}^{t_n} P_t \quad (3)$$

空調機の消費電力は外気温度や空調機の動作によって変化するが、ここでは各室外機にかかる空調負荷に対する消費電力特性を簡易的にモデル化する。例えば、室外機にかかる要求能力に対する消費電力が比例関係にある場合、空調の消費電力に関する制約条件は、式(4)、式(5)で表すことができる。

$$P_t = \sum_{r=1}^{R_n} (Q_{t,r} \cdot P_z + P_o) \quad (4)$$

$$Q_{t,r} = \sum_{i=1}^{A_n} Q_{v,t,i} \cdot Z_{r,i} \quad (5)$$

ここに、

P_t : 時刻 t の空調消費電力の合計[kW]

R_n : 空調機の系統数

$Q_{t,r}$: 時刻 t に室外機 r に要求する冷暖房能力[kW]

P_z : 室外機の要求能力に対する消費電力の比例係数

P_o : 室外機の待機電力[kW]

A_n : 対象空間のエリア数

$Q_{v,t,i}$: 時刻 t に空調機からエリア i に流入する熱流量[kW]

$Z_{r,i}$: エリア i に室外機 r に接続された空調機が存在する場合 1、設置されていない場合 0 となる入力情報

である。

2.3.2 室内負荷モデルの定式化

各空調機の設定温度に対して、 t_n 分後に在室者が存在するエリアが快適条件を満たす必要がある。このとき、時刻 t における、エリア i ($i = 1, 2, \dots, A_n$)の熱流入量をモデル化することで、制約条件を定式化する。空調機の運転モードを冷房運転としたときの、各エリアの空調負荷とエリア間の熱移動、および発生する照明・人体・OA 電力による室内熱負荷を式(6)~(10)のように示す。

$$Q_{v,t,i} = (Ta_{t,i} - Ts_i + T_b) \cdot c_v \cdot F_i \cdot \sum_{r=1}^{R_n} Z_{r,i} \quad (6)$$

$$Q_{a,t,i} \leq \sum_{j=1}^{A_n} (\lambda \cdot K_{i,j} \cdot (Ta_{t,j} - Ta_{t,i})) \quad (7)$$

$$Q_{p,i} = P_u \cdot Ps_i \quad (8)$$

$$Q_{l,i} = P_L^{\max} \cdot N_{l,i} \cdot Lx_i \quad (9)$$

$$Q_{oa,i} = P_{oa} \cdot Ps_i \quad (10)$$

ここに、

$Ta_{t,i}$: 時刻 t におけるエリア i の室温[°C]

Ts_i : エリア i に設置されている空調機の設定温度[°C]

T_b : 空調吹出温度を導出するためのパラメータ項[°C]

$Q_{a,t,i}$: 時刻 t に隣接エリアからエリア i に流入する熱流量の合計[kW]

$Q_{p,i}$: エリア i に流入する人体負荷による熱流量[kW]

$Q_{l,i}$: エリア i に流入する照明負荷による熱流量[kW]

$Q_{oa,i}$: エリア i に流入する OA 負荷による熱流量[kW]

c_v : 空気の容積比熱[kJ/(K·m³)]

F_i : エリア i に設置されている空調機の風量[m³/s]

λ : 単位面積あたりの熱移動係数[kW/(K·m²)]

$K_{i,j}$: エリア i とエリア j が接する面積[m²]

P_u : 1 人あたりの発熱量[kW/人]

Ps_i : エリア i の在人数[人]

$N_{l,i}$: エリア i に存在する照明台数[台]

Lx_i : エリア i に設置されている照明の平均調光率[-]

P_{oa} : 1 人あたりの OA 負荷[kW/人]

である。

上記の熱流入による、現在時刻から t_n 分経過するまでの各エリアの温度変化をモデル化する。このとき、時刻 t_n における在室者が存在するエリアの快適条件は、式(11)~(15)の制約式で与えることができる。

$$Ta_{t+1,i} = T_i \quad (11)$$

$$dT_{t,i} = \frac{(-Q_{v,t,i} + Q_{a,t,i} + Q_{p,i} + Q_{l,i} + Q_{oa,i}) \cdot dt}{C \cdot V_i} \quad (12)$$

$$Ta_{t+1,i} = Ta_{t,i} + dT_{t,i} \quad (13)$$

$$Ta_{t_n,i} \leq T_c^{\text{high}} + z_i \cdot B \quad (14)$$

$$Ta_{t_n,i} \geq T_c^{\text{low}} - z_i \cdot B \quad (15)$$

ここに、

- T_i : 現時刻のエリア*i*の室温[°C]
- $dT_{t,i}$: 時刻*t*におけるエリア*i*の室温変化量[°C]
- dt : 1時刻あたりの時間幅[s]
- C : 対象空間の単位体積当たりの熱容量[kW/(K·m³)]
- V_i : エリア*i*の体積[m³]
- t_n : 快適温度範囲に到達するまでの時間制約[min]
- T_c^{high} : 快適温度範囲の上限[°C]
- T_c^{low} : 快適温度範囲の下限[°C]
- z_i : エリア*i*に在室者がいる場合 0、いない場合 1 となる入力情報
- B : 大きな正の係数

である。

また、空調機の最大冷暖房能力および設定温度の制御範囲に関する制約条件として式(16)~(20)を与える。

$$Q_{v,t,i} \leq Q_i^{max} \cdot \sum_{r=1}^{R_n} Z_{r,i} \quad (16)$$

$$T_{s,i} \leq T_s^{high} \cdot \sum_{r=1}^{R_n} Z_{r,i} \quad (17)$$

$$T_{s,i} \geq T_s^{low} \cdot \sum_{r=1}^{R_n} Z_{r,i} \quad (18)$$

$$T_{s,i} \leq T_{s,i}^{before} + dT_s \quad (19)$$

$$T_{s,i} \geq T_{s,i}^{before} - dT_s \quad (20)$$

ここに、

- Q_i^{max} : エリア*i*に設置された空調機の冷房能力[kW]
- T_s^{high} : 設定温度の最大値[°C]
- T_s^{low} : 設定温度の最小値[°C]
- $T_{s,i}^{before}$: エリア*i*の空調機の前回の設定温度[°C]
- dT_s : 設定温度の変化量の上限値[°C]

である。

各エリアの面積や熱特性に関するパラメータをあらかじめ与えて、執務者の位置情報と各照明の調光率、および現在時刻の各エリアの室温を入力し、線形計画問題を求解することで、各空調機の設定温度を算出することができる。

3. シミュレーション評価

建物の温湿度や照度および機器の消費電力量の変化を算出する、エネルギー消費シミュレータ[6]を用いて、制御アルゴリズムによる省エネ効果を評価する。シミュレータは 2.3 節で示した熱負荷計算モデルに含まれる、人体・照明・OA 電力負荷に加え、室外からの熱流入や躯体からの貫流熱等を考慮して、各エリアの熱流入を計算することで、室温の推移や機器の消費電力に関する挙動を模擬することができる。

3.1 評価環境

図 2 に示すような、オフィスビルの 1 フロアの空間を対象に、室内の各エリアの温度遷移及び機器の消費電力に関する、シミュレーション評価を実施する。対象空間は、1 つのエリアが 5 m×6 m の 24 の仮想的なエリアに分割してシミュレーションを行う。対象空間には、照明器具が 64 台、空調室内機が 12 台、空調室外機が 1 台存在し、12 台の空調室内機は同一の空調室外機に接続されている。居室には、合計 75 席の座席が存在し、各座席が存在するエリアと座席の最近傍の照明の番号が、あらかじめ紐づけられている。シミュレーションは、冷房運転を行う夏季の 8 時から 20 時の時間を対象として、8 月の代表日の外気条件を用いて実行した。

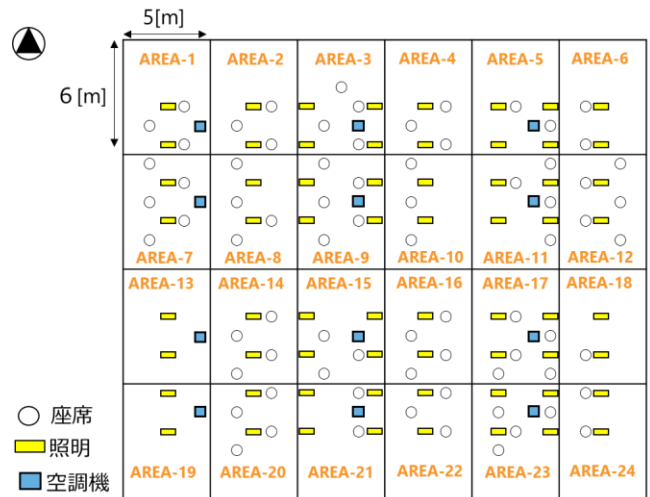


図 2 シミュレーション対象のレイアウト

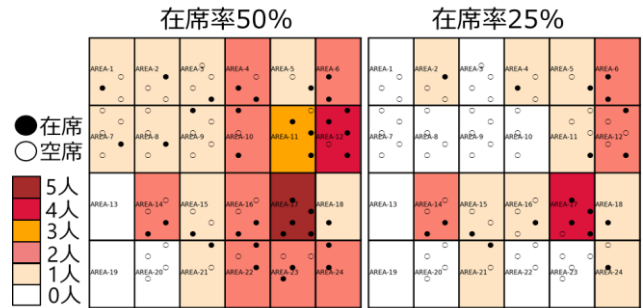


図 3 各座席率における執務者の位置

3.2 シミュレーション条件

シミュレーションおよび照明・空調制御アルゴリズムの入力条件となる各執務者の位置について、在席率 100%、50%、25%の 3 条件を設定した。ここで、在席率は、対象フロアの全座席数に対する、執務者の合計人数と定めた。すなわち、在席率 100%の評価条件では、75 人の執務者が対象空間のすべての座席位置に存在するものとした。また、執務者はシミュレーションを実行する間、常に自身の座席位置に存在するものとした。在席率 50%、25%における執務者の位置を図 3 に示す。在席率 25%の執務者の位置は、対象オフィスの出社実績データから、19 人の執務者が出社した際の座席位置を設定した。また、在席率 50%の執務者位置は、在席率 25%における執務者位置と同程度のばらつきとなるように、38 人の執務者を仮想的に配置した。

シミュレーション評価では、各在席率において、全ての照明を点灯し、空調機の設定温度を 25°C とした場合をベースラインとして、各在席率に対する以下の 4 つの制御条件の省エネ効果を比較する。ただし、在席率 100%では最適制御なしの場合のみでシミュレーションを実施した。空調制御による設定温度の制御は 30 分に一回として、設定温度は 24~26°C の範囲で 0.1°C 刻みで設定するものとした。また、空調機の風量は一定にした。照明の快適範囲は、PC などのディスプレイを使用した作業を想定し、執務者が存在する座席位置の作業面照度 300 lx 以上、空調の快適範囲

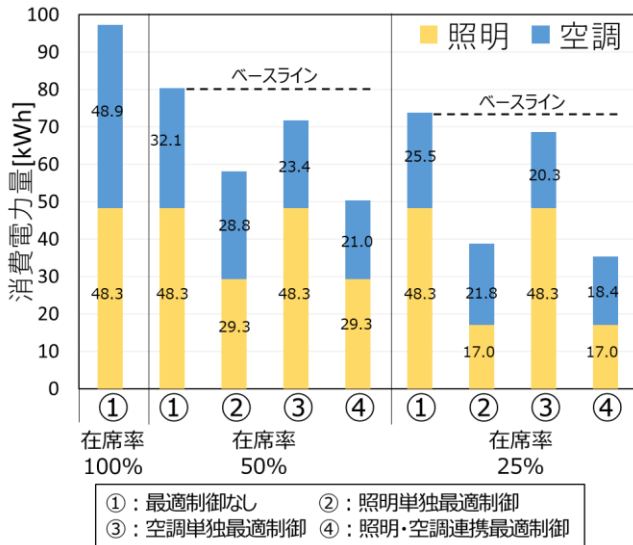


図4 各シミュレーション条件の消費電力量

は、執務者が1人以上存在するエリアの室温 26°C以下と定めた。

- ① 最適制御なし：全照明点灯、空調設定温度 25°C一定
- ② 照明単独最適制御：執務者の最近傍の照明のみ点灯
- ③ 空調単独最適制御：空調のみ最適制御
- ④ 照明・空調連携最適制御

3.3 シミュレーション結果

シミュレーション評価の結果、いずれの評価条件においても、執務者の座席位置の作業面照度は 300 lx 以上、執務者が存在するエリアの温度は 26°C以下となることを確認した。各シミュレーション条件における、一日の消費電力量を図4に示す。各在席率において、最も省エネ効果が得られた制御手法は④照明・空調連携最適制御となり、ベースラインに対して④照明・空調連携最適制御は、在席率 50%では 37%、在席率 25%では 52%の省エネ効果が得られた。

次に個別の消費電力に関して結果を述べる。

照明電力は、単独、連携によらず、照明を最適制御することで、消費電力が削減される。

一方、空調電力は、③空調単独最適制御をした場合だけでなく、②照明単独最適制御をした場合でも、消費電力が削減される。これは、照明が室内熱負荷の1つであり、執務者がいないエリアの照明を消灯することで室内負荷が軽減されるためである。また、④照明・空調連携最適制御をすることで、③空調単独最適制御した場合より空調電力が削減されることを確認した。

制御結果の一例として、在席率 50%における、時刻 12時の室内温度分布と各空調機の設定温度を図5に示す。図3に示したように、東側のエリアは西側のエリアに比べて執務者が多く、室内負荷が大きくなる。このため、設定温度を 25°Cに固定した図5(a)では、東側のエリアほど室内温度が高くなっている。一方で、図5(b)の照明・空調連携最適制御によって得られた空調設定温度は、在室者が少ない西側のエリアでは高い値、在室者が多い東側のエリアでは低い値となった。このため、照明・空調連携最適制御は、執務者の位置情報を活用し、執務者が少ないエリアの空調

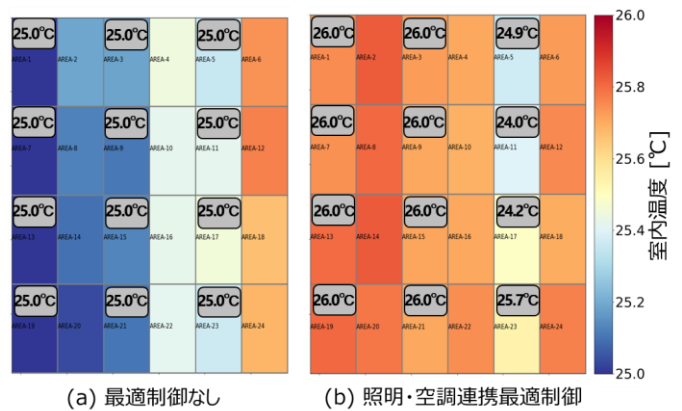


図5 室内温度分布と設定温度の例

を弱めることで消費電力を削減していることが確認できた。また、室内熱負荷が大きいエリアに対しては、空調を強めることで、執務者が存在するエリアの快適性が維持されることが分かった。

4. おわりに

本研究では、オフィス執務者の位置情報を起点として、照明・空調を制御する連携最適制御システムを提案し、人・照明の位置と発する熱を考慮して、執務者の快適性と省エネ性を両立させる照明・空調の最適化アルゴリズムを構築した。

シミュレーション評価により、照明・空調連携最適制御の省エネ効果を検証した結果、制御アルゴリズムによって、執務者が不在となるエリア周辺の照明を消灯し、空調を弱めるような、設定値が算出されることを確認した。制御アルゴリズムによる省エネ効果は、在席率が少ないほど大きくなり、在席率 25%の条件では、最適制御をおこなわない場合と比較して、52%の省エネ効果が得られることを確認した。

今後は、熱負荷計算方法の更なる検討を進めるとともに、居室内における執務者のばらつき度合いに対する省エネ性の評価を実施する。また、本稿では作業面照度基準値を固定値として与えているが、実際には作業内容によって必要な照度は異なる。更なる省エネ効果を実現するため、カメラ映像から特定した執務者の作業内容に合わせて、調光率を求める照明制御アルゴリズムの検討を進める。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁, “エネルギー白書 2022” (2022).
- [2] Mai A. Al-Ammar, et. al, “Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms”, International Conference on Cyberworlds (2014).
- [3] 山地 雄士, 柴田 智行, “教師データの誤差に頑健な群集密度推定の学習手法”, 第26回画像センシングシンポジウム, (2020).
- [4] 東芝ライテック(株), “クラウド AI 画像解析サービス ViewLED Solution” (2022).
https://www.tlt.co.jp/tlt/products/viewled/viewled_solution/viewled_solution.htm
- [5] 太田 圭太, 浮穴 朋興, 三浦 健次郎, “進化型多目的最適化による空調制御”, 進化計算学会論文誌, Vol.6, No.2 (2015).
- [6] 金川 桂子, 酢山 明弘, “多店舗展開企業の省エネに貢献する店舗向けエネルギー消費シミュレーター”, 東芝レビュー, Vol.75, No.4 (2020).