

画像処理式センサを用いた照明在不在制御の高度化

愛知学院大学 総合政策学部 講師

二神 拓也

1. 背景

低炭素社会を実現するために、オフィスで消費する電力量の削減が求められている。オフィスの中でも照明設備が消費する電力量は比較的多いため⁽¹⁾、省エネルギー化（以降、省エネ化と略す）を目的とする技術開発・実証実験が広く進められている。

人感センサと照明を連動させ、点灯時間を削減する在不在制御⁽²⁾が広く実用化されている。在不在制御では、人感センサが室内の人物を検知（在判定）した場合に照明を自動的に点灯する。消灯は、不在判定が一定時間以上連続した場合に実行される。この消灯までの時間間隔は消灯遅延時間と呼ばれ、在室時に誤って消灯する誤消灯を回避するために導入されている。消灯遅延時間を長く設定すれば、誤消灯を回避できるが、不在時に点灯する誤点灯が発生し、省エネ効果が低減する。そのため、消灯遅延時間を短縮しても、誤消灯が発生しない精度の高いセンシング技術が求められている。

現在、広く普及している単画素式の赤外線センサは、人物を検知する精度が低いため、12～15分の消灯遅延時間が設定される⁽²⁾⁽³⁾。そのため、誤点灯の時間が増大し、省エネ効果が低下する。より精度の高いセンシング技術として、近年、画像処理を応用したセンサが実用化されている。また、被写体のプライバシーに配慮し、温度画像を用いたセンサも開発されている。画像処理式のセンサは、赤外線センサと比べ、人物検知の精度を27%以上向上させ、実環境下で消灯遅延時間を2分以上削減させた⁽⁴⁾。本研究では、画像処理式センサのさらなる改善を実現し、在不在制御を高度化することを目的とする。

2. 画像処理式センサを用いた在不在制御

在不在制御のシステム構成を図1に示す。図2のフローチャートで、照明の点灯状態が制御される。在判定の場合は点灯、点灯維持する。不在判定の場合は、不在判定が連続した時間を考慮し、点灯状態を決定する。一般家庭を対象とした引用文献⁽⁵⁾において、誤消灯を回避するために、赤外線センサは10分以上の消灯遅延時間を要した。一方、画像処理式センサは、3分未満の消灯遅延時間を要し、在不在制御の省エネ効果を8.9%向上させた。

近年、機械学習を用いた人物検出が広く研究・開発されているが、実用化されている画像処理式センサは演算コストの低いフレーム間差分⁽⁶⁾を用いる⁽⁷⁾。フレーム間差分は、固定設置されたカメラ画像に写る人物の動作を図3の流れで検知する。まず、以下の式で現在と過去に撮影された画像の絶対差分値を求める。

$$\hat{x}_n^t = |x_n^t - x_n^{t-\Delta t}| \quad (1)$$

上式の x_n^t は時刻 t に撮影された現在画像の n 番目の画素値を示す。 Δt は現在と過去の時間間隔を調整する。次に、現在・過去の画像間で差分の大きい画素を以下の2クラス分類で求める。

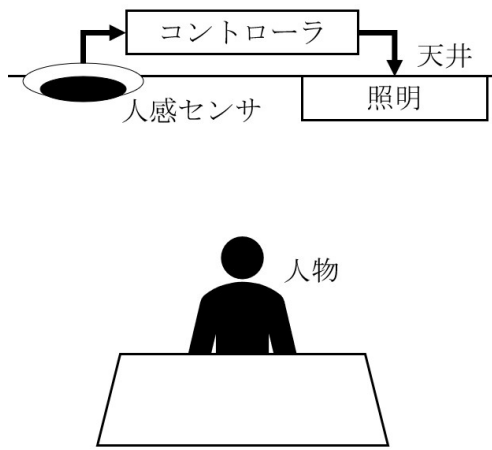


図 1. 在不在制御のシステム構成

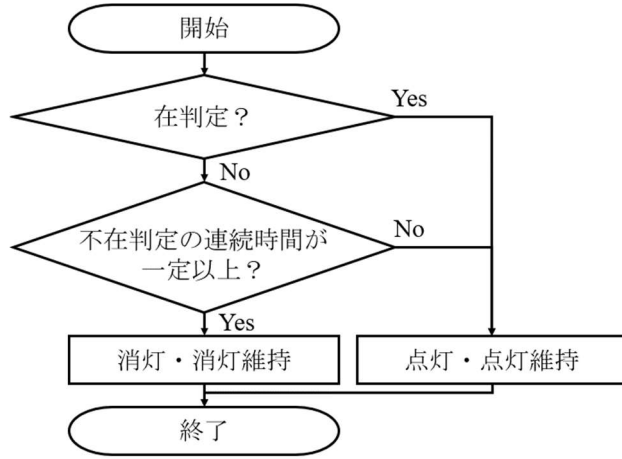


図 2. 在不在制御の処理フローチャート

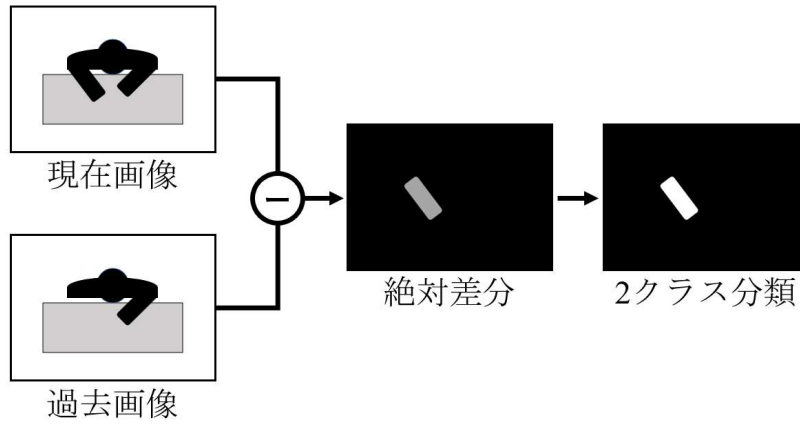


図 3. フレーム間差分

$$\tilde{x}_n^t = \begin{cases} 0, & \dot{x}_n^t < \dot{x}_{TH} \\ 1, & \dot{x}_n^t \geq \dot{x}_{TH} \end{cases} \quad (2)$$

\dot{x}_{TH} は、2クラス分類の閾値を表す。次に、差分が生じた画素の割合に着目し、以下の式で在室状態を判定する。

$$y^t = \begin{cases} \text{不在}, & \frac{1}{N} \sum_n \tilde{x}_n^t < \tilde{x}_{TH} \\ \text{在}, & \frac{1}{N} \sum_n \tilde{x}_n^t \geq \tilde{x}_{TH} \end{cases} \quad (3)$$

上式の \tilde{x}_{TH} は、在判定に要する差分画素割合の最小値を表す。

先行研究では、在不在制御の省エネ効果を最大化するために、 \dot{x}_{TH} 、 \tilde{x}_{TH} を最適化している。しかし、著者の知る限り、在不在制御向けに Δt を最適化した研究はなく、画像処理式センサの省エネ効果を十分に引き出せていない可能性がある。そこで、本研究では、 Δt を最適化し、その効果を検証する。

3. 実験

実環境下で収集したデータを利用し、赤外線センサ、温度画像式センサを用いた在不在制御を再現した。なお、赤外線センサは PerkinElmer 社製の LHI778 を使用し、温度画像は FLIR 社製の Lepton 1.5 で撮影した。これらの詳細な仕様は引用文献⁽⁸⁾⁽⁹⁾に記載されている。プライベートオフィスで収集された 52.47 時間分のデータを使用し、以下の点灯時間削減率を評価した。

$$\text{点灯時間削減率} = \frac{d_E - d}{d_E} \quad (7)$$

上式の d_E , d は、それぞれ常時点灯方式、在不在制御の点灯時間を表す。

まず、赤外線センサの点灯時間削減率は 57.63% を示した。次に、 Δt を変更し、温度画像式センサの点灯時間削減率を図 4 のように求めた。 $\Delta t = 1$ で点灯時間削減率が最小値の 59.53% を示し、 $\Delta t = 13$ で最大値の 60.49% を示した。そのため、温度画像式センサは、赤外線センサと比べ、点灯時間削減率を 1.90%~2.86% 増加させた。 Δt の最適化は、点灯時間削減率を最大 0.96% 向上させた。この改善効果は、温度画像式センサが増加させた点灯時間削減率全体の 33.57% に相当する。これらの結果から、 Δt を最適化する重要性が示唆された。なお、本実験では 8 Hz のフレームレートでデータを収集しているため、 $\Delta t = 1, 13$ のフレーム間差分では、それぞれ 0.125, 1.625 秒前の過去画像が使用された。

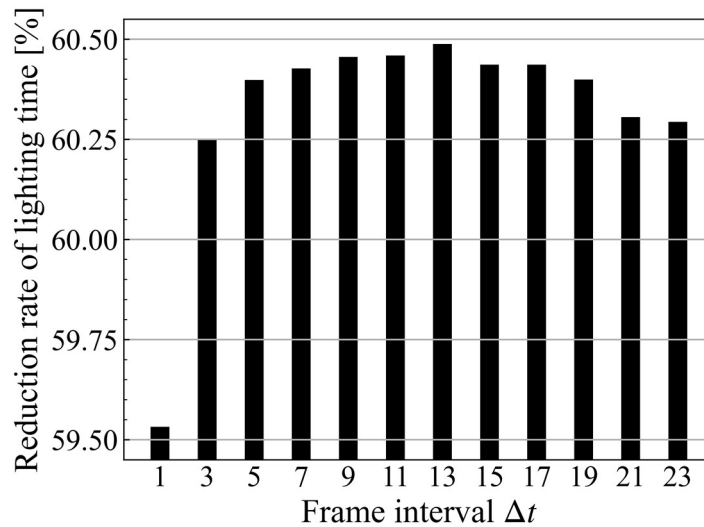


図 4. 点灯時間削減率

4. まとめ

本研究では、照明在不在制御の省エネ効果を最大限引き出すために、温度画像式センサに関する性能検証を進めた。温度画像式センサは、赤外線センサと比べ、点灯時間削減率を 1.90%~2.86% 増加させた。その内の最大 0.96% (改善効果全体の 33.57% に相当) は、 Δt の最適化がもたらした。在不在制御の先行研究では、 Δt の最適値について検証が進められていないものの、その重要性を示唆する実験結果が得られた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(公財)天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) K. Sun, Q. Zhao, and J. Zou: "A review of building occupancy measurement systems", *Energy and Buildings*, Vol.216, p.109965 (2020)
- 2) C. de Bakker, M. Aries, H. Kort and A. Rosemann: "Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review", *Building and Environment*, Vol.112, pp.308-321 (2017)
- 3) Z. Nagy, M. Hazas, M. Frei, D. Rossi, and A. Schlueter: "Illuminating adaptive comfort: dynamic lighting for the active occupant", *Proceedings of 8th Windsor Conference: Counting the Cost of Comfort in a Changing World* (2014)
- 4) N. Hayasaka, Y. Nakajima, and T. Futagami: "Experimental evaluation of occupancy lighting control using thermal-based sensor", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol.17, No.6 pp. 856-864 (2022)
- 5) 二神, 早坂, 尾上: 「画像センサを用いた照明在不在制御の有効性評価」, *システム制御情報学会論文誌*, Vol.33, No.4 pp. 139-148 (2020)
- 6) N. Singla: "Motion detection based on frame difference method", *International Journal of Information & Computation Technology*, Vol.4, No.15, pp.1559-1565 (2014)
- 7) 上田: 「製造者から見た照明制御の現状と展望」, *電気設備学会誌*, Vol.38, No.1 pp. 16-19 (2018)
- 8) PerkinElmer Inc: LHI778 datasheet, <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/14901/PERKINELMER/LHI778/605/1/LHI778.html>
- 9) FLIR Inc: FLIR lepton engineering datasheet, <https://www.flir.jp/developer/lepton-integration/lepton-tech-docs/?pn=Lepton&vn=500-0763-01>