画像センサを用いた照明在不在制御の有効性評価*

二神 拓也[†]・早坂 昇[†]・尾上 孝雄[‡]

Evaluation for Energy Savings in Occupancy Lighting Control using Vision-based Motion Sensor*

Takuya FUTAGAMI[†], Noboru HAYASAKA[†] and Takao ONOYE[‡]

In this paper, we aim to evaluate an occupancy lighting control by using vision-based motion sensor compared with passive infrared (PIR) motion sensor. Our results showed that vision-based sensor improved detection accuracy by 21.7% and detected small movement of occupant more accurately than PIR sensor. We also confirmed that vision-based sensor enabled to reduce off-delay, which is introduced to prevent undesired switching off light, by 7.92 min (74.8%). As a result of simulation for occupancy lighting control with vision-based sensor and PIR sensor, vision-based sensor enabled to improve energy saving rate by 8.9%. Additionally, we discussed disadvantages of vision-based sensor confirmed in our experiment and considered solutions for them.

1. はじめに

近年, 低炭素社会実現に向けてエネルギー消費量の抑制が求められている. 消費エネルギーの内訳に着目すると, 民生部門において照明が占める割合は高く [1,2], 低炭素社会実現に向けて照明設備の省エネルギー化(以降, 省エネと呼称する)が必要不可欠である. 照明設備の利用者に過度な省エネを強いることは利便性の低下に繋がるため, 利用者が意識することなく省エネを実現できる照明自動制御技術の高度化が求められている.

照明自動制御には, 在室者を検知した(在判定した)人感センサに対応付けた照明のみを点灯する在不在制御が存在する [3–7].

在不在制御では, 在室者の快適性や安全性の確保に向けて誤って照明を消灯すること(誤消灯)の回避が求め

られており, 人感センサが一定時間連続して不在判定した場合に照明を消灯する. 消灯までの遅延時間を長く設定すると, 誤消灯の発生確率が低下するが, 在室者が存在しないにもかかわらず不要に照明を点灯する時間が増加し, 省エネ効果が低減する. 以上より, 消灯遅延時間を短く設定しても誤消灯が発生しない, 精度の高い在室者検知技術が求められている.

ここで在室者検知技術に着目すると, 照明設備の利用者が携帯する ID カード [8] や専用アプリケーションを導入したスマートフォン [9] を利用する手法が存在している. 上記の手法は精度の高い在室者検知を可能とし, 消灯遅延時間を短縮できるが [10], 照明設備の利用者は常に ID カードやスマートフォンを携帯する必要がある.

照明設備の利用者に携行品の制約を与えない, いずれの在室者も検知することが可能なセンシング技術として, 赤外線センサ [3–6] が存在する. 赤外線センサには在室者の細かな動作を見逃して不在判定する傾向が存在し, 消灯遅延時間は通常 12–15 min に設定される [5,11].

一方, 在室者の細かな動作を見逃すことなく, 正しく在判定できるセンシング技術として画像センサが期待されている [12–14]. 画像センサは, 可視光カメラで撮像した画像に対して画像処理や認識技術を駆使することで在室者を検知する. 在室者の細かな動作を見逃さないことに起因して, 誤消灯の発生を抑えたうえで消灯遅延時間を短縮できることが示唆されている [7].

* 原稿受付 2019 年 7 月 5 日

* 第 63 回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表 (2019 年 5 月)

[†] 大阪電気通信大学 情報通信工学部 情報工学科 Department of Engineering Informatics, Osaka Electro-Communication University; 18-8, Hatsucho, Neyagawa, Osaka 572-8530, JAPAN[‡] 大阪大学 大学院 情報科学研究科 Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University; 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, JAPAN**Key Words:** lighting control, occupancy sensor, vision-based sensor.

しかし画像センサを用いた在不在制御が有する可能性のある、消灯遅延時間の短縮効果やそれに起因した省エネ効果は先行研究で明らかになっていない。たとえば参考文献[15]では、赤外線センサと画像センサの在室者検知精度のみが比較されている。参考文献[7]では、画像センサが有する、点灯する照明の数を容易に低減できる利点を活かした在不在制御の省エネ効果を明らかにしているが、消灯遅延時間の短縮効果に起因した省エネ効果が明らかになっていない。

以上を踏まえて、本論文では画像センサを用いた在不在制御が有する可能性のある、消灯遅延時間の短縮効果や省エネ効果を実環境下において検証しつつ、実験を通じて画像センサの利点や課題を明らかにし、改良に向けた示唆を得ることを目的とする。

上記の目的を実現するために、実環境である一般住宅に赤外線センサと画像センサとを設置し、誤消灯が発生しない消灯遅延時間を求めたうえでそれぞれの人感センサによる在不在制御を評価する。

参考文献[5,6]では消灯遅延時間を設定するために、人感センサが連続して不在判定した時間（不在判定時間）のみを利用する手法が提案されている。不在判定時間のみを利用することで消灯遅延時間を自動で設定できるが、実際の在室状態が考慮されていないため誤消灯の回避に必要な消灯遅延時間を厳密に評価することができない。そこで本論文では人感センサの検知結果と実際の在室状態とを加味したうえで、誤消灯が発生しない消灯遅延時間を評価する。

また先行研究では住宅における画像センサの在室者検知精度が評価されていないため、今後の画像センサの改良に繋がる知見を得ることを目的に在室者検知結果を注意深く観察する。

参考文献[7]において、画像センサ自体の定格消費電力が高いことに起因して、センシングに要する消費電力量を加味した場合に画像センサによる照明制御が省エネ効果を得られない可能性が示唆されている。しかし参考文献[7]では赤外線センサ自体の消費電力量を加味する際に、実験環境下で使用した赤外線センサのみの定格消費電力が考慮されており、他の赤外線センサを用いた在不在制御との比較が行われていない。そこで本論文では、センシングに要する消費電力量を加味して画像センサによる在不在制御の省エネ効果を評価する際に、現在利用可能な赤外線センサの定格消費電力を踏まえたうえで比較対象を設定する。

本論文の構成を以下に示す。2.章で関連技術を説明し、3.章で画像センサの導入効果を確認するための実験を行う。そして4.章で実験結果を考察し、5.章で本論文をまとめる。

2. 関連技術

2.1 在不在制御

在不在制御は、人感センサが在室者を検知した（在判定した）場合に照明を点灯する自動制御手法でオフィスや住宅に導入されている。たとえば、人感センサとして2.2節に示す赤外線センサが広く使用されており、近年では2.3節に示す可視光カメラを利用した画像センサの普及が進んでいる。

在不在制御では、在室者が存在するにもかかわらず誤って照明を消灯することを回避するために、不在判定が一定時間以上連続した場合にのみ照明を消灯する。実際の在室状態と、消灯遅延時間を2, 5 minに設定した在不在制御における照明の点灯状態とを例示した(Fig. 1)。消灯遅延時間を2 minにした場合の照明の点灯状態を示すFig. 1(b)では、照明をより細かく消灯できている。一方、消灯遅延時間を5 minにした場合の照明の点灯状態を示すFig. 1(c)では、不在が5 min以上連続しない限り照明を消灯できないため、消灯遅延時間を2 minに設定した場合と比較して照明の点灯時間が長く、省エネ効果が劣る。ここで参考文献[16]に着目すると、消灯時間を20 minから5 minまで減少させることで省エネ効果が最大13%増加する事例が確認されており、さらなる省エネ効果を得るために消灯遅延時間を短縮できる技術が求められている。

消灯遅延時間の設定方法に着目すると、参考文献[5, 6]ではFig. 2(1)の上側に細矢印に示す、人感センサが連続して不在判定した時間（不在判定時間）のみを利用している。消灯遅延時間の設定に不在判定時間のみを用いることで、在室状況に合わせて消灯遅延時間を自動で設定できる。しかし、Fig. 2(2)に示す実際の在室状態が加味されていないため、誤消灯の発生しない消灯遅延時間を厳密に求めることができない。そこで本論文では、Fig. 2(1)の下側に太矢印で示す存在者が存在するにもかかわらず誤って不在判定した時間（誤不在判定時間）を長期にわたって観察し、発生した誤不在判定時間の最大値を求めることで誤消灯の発生を抑えられる消灯遅延時間を評価する。

2.2 赤外線センサ

赤外線センサは、フレネルレンズによって広げられた視野内において人体が発する赤外線の変化を検知することで在室者を検知する。

参考文献[7,13,14,17]において赤外線センサは在室者の細かな動作に対して、正しく在判定できないことが指摘されている。たとえば、複数の赤外線センサに対して検知精度を調査した参考文献[18]において、在室者の腕の動作をロボットアームで模擬した結果、正しく在判定できた割合の中央値は35%であった。

在室者の細かな動作を見逃す傾向が存在する赤外線センサを在不在制御に利用する場合、誤消灯の発生頻度を

Fig. 1 Relationship between occupancy state and lighting state under occupancy control

Fig. 2 Example of off-delay analysis

低減するために消灯遅延時間を比較的長めに設定する必要がある。たとえば先行研究を参照すると、導入先によって異なるが消灯遅延時間は5～30 minに設定されており、通常12～15 min程度に設定されることが多い[5,11]。

近年では、スマートフォンやパソコン操作などの細かな動作が長時間行われるオフィスや住宅の増加が予想され、在室者の細かな動作を正しく在判定し、誤消灯の発生を抑えたうえで消灯遅延時間を短縮できる人感センサの実用化が求められている[14]。

2.3 画像センサ

画像センサは、可視光カメラで撮像した画像に対して画像処理や画像認識技術を駆使することで在室者を検知する。たとえば、ニューラルネットワークによる背景差分方式[19]を応用することで在室者検知の高精度化を期待できるが、実用化されている画像センサは機械学習を必要としない、計算コストの低いフレーム間差分方式[20]を用いている[7,13]。

フレーム間差分方式による在室者検知では、Fig. 3のように過去に撮像した画像と現在取得した画像との差分を基に在室者を検知する。たとえば、過去画像との差分が大きい領域の占める割合が一定値以上の場合に在判定する手法が提案されている[12]。

参考文献[7,13,17]において、赤外線センサと比較して在室者の細かな動作を正しく在判定できる可能性を有した画像センサを在不在制御に用いることで、誤消灯の発生を回避したうえで消灯遅延時間を短縮できることが示唆されている。しかし実環境下において、赤外線セン

Fig. 3 Occupant detection by vision-based sensor

Fig. 4 Experimental room

サと画像センサのそれぞれに対して誤消灯が発生しない消灯遅延時間を求めたうえで、画像センサを用いた在不在制御の省エネ効果を明らかにした先行研究は存在しない。画像センサを用いた照明自動制御技術を普及させるには、導入コストに見合った省エネ効果が得られる必要がある。省エネ効果を明らかにすることは普及に向けて重要である。

参考文献[7]では、画像センサ自体の消費電力が比較的大きいことが指摘されている。そのため本論文では、人感センサ自体の消費電力量を加味して省エネ効果を評価する。

3. 実験

画像センサを用いた在不在制御が有する可能性のある、消灯遅延時間の短縮効果や省エネ効果を明らかにするために実証実験を行う。

3.1 実験条件

3.1.1 評価環境

本実証実験では、Fig. 4に示す2名の20代社会人が居住する住宅におけるリビングルームの天井に人感センサを設置して赤外線センサと画像センサによる在不在制御を評価する。

赤外線センサは参考文献[21]で使用されている画角120度のSainSmart製HC-SR501を使用した。そしてリビングルーム内における実際の在室状態を表す正解データを作成するために、参考文献[22]で使用されている

Table 1 Experimental schedule

Date	Start	End	Experimental time [h]
1/6/2019	08:00	22:30	13.00
1/12/2019	13:00	18:00	5.00
1/14/2019	18:00	23:15	5.25
1/19/2019	08:00	23:00	14.50
1/20/2019	12:30	22:15	9.50
1/26/2019	13:00	19:30	6.50
1/27/2019	09:00	21:30	12.00
2/2/2019	10:00	20:45	10.75

OmniVision 製のカメラモジュール OV5647 に画角 130 度のレンズを用いて 320×240 ピクセルの監視画像を撮像した。赤外線センサの在室者検知結果と監視画像はいずれも 100 ms 周期で実験データとして保存される。

画像センサによる在室者検知は保存した監視画像を利用し、実用化済みの画像センサが使用しているフレーム間差分方式を用いる。フレーム間差分方式では画像の輝度信号を利用して Sarker らの手法 [12] と同様に在室者を検知する。赤外線センサと画像センサのパラメータは実験的に最適値を求める。

実験データは 2019/1/6～2019/2/2 の期間を対象に収集した。被験者が長時間在室する休日を中心に、Table 1 に示すスケジュールで実験を行った。被験者の都合上、一部の実験データを除外して 4 列目に示す合計 76.50 h 分の実験データを解析対象とした。

Table 1 に示す実験データにリビングルームにおける普段の行動をすべて網羅していることを被験者に確認済みである。リビングルーム内で観察された被験者の挙動を Table 2 に例示する。本実験環境下で観察された被験者の挙動は、一般的な住宅のリビングルーム内に存在する在室者の挙動から逸脱しないことを関係者間で確認済みである。

3.1.2 評価項目

赤外線センサと画像センサを用いた在不在制御に対する評価項目 **A.～D.** を以下に列挙する。

A. 在室者検知精度

在室状態の監視画像から人手で作成した正解データを参照して、それぞれの人感センサの在室者検知精度を評価する。

被験者は、リビングルーム内に在室者が存在する際に自動で照明を点灯する在不在制御の導入を希望していた。そのため赤外線センサや画像センサの検知範囲にリビングルームと接するベッドルーム、キッチンを含むが、在室者がリビングルームに存在する状態を在と定義した。それぞれの人感センサの検知範囲はおおむね等しく、検知範囲内にわずかに含まれるリビングルーム以外の領域はすべて部屋間の移動のために使用されていた。したがって、検知範囲内にわずかに含まれるリビ

Table 2 Example of subject's behavior on 1/6/2019

Time	Subject A	Subject B
08:00-08:59	Eating, TV	Eating, TV
09:00-09:59	Eating, SP ¹ , Tablet, TV	Eating, PC, TV
10:00-10:59	SP, Tablet, TB ²	PC
11:00-11:59	PC, SP, Tea	-
12:00-12:59	PC, SP, Tea	Eating, PC, TV
13:00-13:59	Eating, SP, TB, TV	Eating, PC, TB, TV
14:00-14:59	SP	PC, SP
15:00-15:59	PC, SP	PC, Reading, SP
16:00-16:59	PC, SP	PC, SP
17:00-17:59	PC, SP	PC, SP
18:00-18:59	Eating, PC, SP, TV	Eating, PC, SP, TV
19:00-19:59	Eating, TV	Eating, PC, SP, TV
20:00-20:59	Beauty, SP, TV	Beauty, PC, SP, TV
21:00-21:59	Eating, TV	PC
22:00-22:30	TB, TV	PC, TV

¹ Smartphone

² Teeth brushing

ングルーム以外の領域が在室者検知精度に与える影響は小さい。

なお、赤外線センサと画像センサによる在室者検知結果はそれぞれの監視画像に対して得られるため、以下に示す Precision, Recall, F-measure を用いて在室者検知精度を評価する。

Precision 在判定した監視画像数に対して実際に在室者が存在した画像数の割合

Recall 実際に在室者が存在した監視画像数に対して在判定した画像数の割合

F-measure Precision と Recall の調和平均

B. 誤不在判定時間

それぞれの人感センサで誤消灯が発生しない消灯遅延時間を求めるために、2.1 節で述べた誤不在判定時間を評価する。

収集した実験データには被験者の普段の行動がすべて網羅されているため、誤不在判定時間の最大値を消灯遅延時間として設定することで誤消灯の回避を期待できる。そこで本実験においては誤不在判定時間の最大値を消灯遅延時間とする。

C. 照明の点灯時間と省エネ効果

B. で求めた消灯遅延時間をそれぞれの人感センサに設定し、実験データを用いて在不在制御を再現することで照明の点灯時間を評価する。またリビングルーム内に実際に在室者が存在した時間の総和（在時間）を求め、照明の点灯時間と比較することで、在室者が存在しないにもかかわらず照明を不要に点灯した時間も評価する。

画像センサを用いた在不在制御によって得られる省エネ効果 (ESR: Energy Saving Ratio) は、赤外線センサ、画像センサによる点灯時間 (t_P [h], t_V [h]) を用いて以下の式で求められる。

Table 3 Minimum and maximum power consumption of current motion sensors and light

Parameter	Min[W]	Max[W]
p_P	DL-YS003 0.013	NDG1871 2.0
p_V	MS2908A 1.0	TSBHS01, HVC-F 4.0
l	CL6D-FEIII 21.3	CS-F06DS 46.0

$$ESR = \frac{t_P - t_V}{t_P} \quad (1)$$

D. 人感センサ自体の消費電力量を含めた省エネ効果

C. では、照明の点灯時間のみに基づいて画像センサを用いた在不在制御の省エネ効果を評価しており、人感センサ自体が消費する電力量を考慮していない。

そこで本論文では、照明と人感センサ自体が消費する電力量を算出して合算値を求めたうえで、画像センサによる在不在制御の省エネ効果を評価する。実験中に照明と人感センサが消費する電力量の合算値は、人感センサと照明の定格消費電力 ($p[W]$, $l[W]$), 照明の点灯時間 ($t[h]$), そして実験時間 ($T[h]$) を用いて以下の式で求めることができる。

$$E(p, l, t, T) = pT + lt \quad (2)$$

画像センサによる照明制御が省エネ面において有効であるためには、以下を満たす必要がある。

$$E(p_P, l, t_P, T) - E(p_V, l, t_V, T) > 0 \quad (3)$$

ここで、 $p_P[W]$, $p_V[W]$ はそれぞれ赤外線センサと画像センサ自体の定格消費電力を示す。

参考文献 [7] では、実験で使用された赤外線センサの定格消費電力と照明の定格消費電力のみを使用し、(3) 式に基づいて画像センサによる在不在制御の有効性を議論している。一方、本論文では現行の赤外線センサ、画像センサ、照明の定格消費電力を参照して画像センサによる照明制御の省エネ効果を評価する。Table 3 に天井設置可能な赤外線センサと画像センサの定格消費電力の最小値 (p_P^{min} , p_V^{min}) と最大値 (p_P^{max} , p_V^{max}) を示す。そして Fig. 4 のリビングルームで照明として使用されているアイリスオーヤマ製 CL6D-5.0 と同等な、6 畳向け LED 照明の定格消費電力の最小値と最大値 (l^{min} , l^{max}) を示す。Table 3 を得るために 7 社の赤外線センサ、4 社の画像センサ、15 社の照明を、現行品を条件に調査した。表中には最小値や最大値をとる型式を記載している。

3.2 実験結果

本節では、3.1.2 節で述べた評価項目 A.~D. に対する評価結果を示す。

3.2.1 誤不在判定時間

Fig. 5 に、実験期間中においてそれぞれの人感センサで発生した誤不在判定時間のヒストグラムを示す。なお、Fig. 5 では発生頻度が高い 1 min 以下の誤不在判定時間は省略した。Fig. 5 を見る限り、赤外線センサと比較して画像センサで発生する誤不在判定時間は全体的に短い傾向がある。実験期間中に発生した誤不在判定時間の最大値は、赤外線センサと画像センサにおいてそれぞれ 10.58 min, 2.66 min で、画像センサは赤外線センサに対して誤不在時間の最大値を 7.92 min (74.8%) 短縮した。

ここで赤外線センサにおいて比較的長い誤不在時間が発生した時間帯に着目すると、在室者はタブレット、スマートフォン、パソコンの操作、テレビ鑑賞、食事、筆記作業などの細かい動作を行っており、それらを赤外線センサが見逃し、在判定できなかったことに起因して誤不在判定時間が増大することがわかった。一方、画像センサは在室者の細かな動作を見逃す割合が低く、誤不在判定時間を短縮できた。

以降では 3.1.1 節で述べた通り、赤外線センサと画像センサを用いた在不在制御における消灯遅延時間の設定値として上記で求めた誤不在判定時間の最大値を用いる。誤不在判定時間の最大値を消灯遅延時間とすることで、少なくとも実験期間中に消灯遅延時間不足に起因して、在室者の快適性を損う可能性の高い誤消灯が発生することを回避できる。さらに、収集した実験データには被験者の普段の行動がすべて網羅されているため、上記の値は実験期間外においても本リビングルームにおいて誤消灯を回避するために必要な設定値である可能性が高い。

3.2.2 在室者検知精度

Table 4 にそれぞれの人感センサによる在室者検知精度の平均値を示す。なお、消灯遅延時間を導入した場合の評価結果を示した Table 4 (b) では、画像センサが不在判定した場合においても消灯遅延時間以内であれば在判定したものと見なして精度を算出した。

消灯遅延時間を導入前のそれぞれの人感センサによる在室者検知精度を示した Table 4 (a) に着目すると、すべての評価指標において画像センサは赤外線センサを上回る結果を得た。とくに総合的な評価指標である F-measure は平均 21.7% 高く、画像センサの在室者検知精度面における有効性を確認できた。しかし消灯遅延時間を導入する前の Recall はいずれの人感センサにおいても平均 50% 以下で、在不在制御に人感センサを適用する場合、誤消灯の回避に向けて消灯遅延時間の導入が必要になる。

つぎに、前節で求めた消灯遅延時間を導入した後の在室者検知精度を示した Table 4 (b) に着目すると、消灯遅延時間の導入前と同様に画像センサはすべての評価指標において赤外線センサを上回る結果を得た。消灯遅延時間を導入した後には人感センサ間で性能差が小さく

Fig. 5 Histogram of duration for undetecting occupants

Table 4 Summary of performance in occupancy detection

(a) Sensing performance without off-delay

Index	PIR sensor	Vision-based sensor
Precision [%]	88.8	96.3
Recall [%]	28.1	48.4
F-measure [%]	42.7	64.4

(b) Sensing performance with off-delay

Index	PIR sensor	Vision-based sensor
Precision [%]	66.9	73.7
Recall [%]	100.0	100.0
F-measure [%]	80.2	84.8

Table 5 Measured occupied duration, occupied rate, lighting time, and energy saving ratio

Date	OD [h]	OR [%]	t_P [h]	t_V [h]	ESR [%]
1/6	9.36	72.0	11.71	10.92	6.7
1/12	4.45	88.9	4.88	4.79	1.8
1/14	2.46	46.9	4.57	3.94	13.8
1/19	6.40	44.1	9.77	8.43	13.7
1/20	6.74	70.9	9.05	8.74	3.4
1/26	1.45	22.3	1.94	1.72	11.3
1/27	5.93	49.4	11.05	10.42	5.7
2/2	3.63	33.8	7.27	5.90	18.9
Total	40.42	52.8	60.22	54.85	8.9

なったものの、画像センサのF-measureは赤外線センサと比較して平均4.6%高く、画像センサは消灯遅延時間の導入前と同様に赤外線センサに対して在室者検知精度面で有効性を維持していた。消灯遅延時間の導入後には、いずれの人感センサもRecallが平均100.0%を示しており、在室者が存在するにもかかわらず、誤って不在判定した時間が存在しなかった。適切な消灯遅延時間を求めて使用することで、いずれの人感センサを利用した場合においても誤消灯を回避できた。

3.2.3 照明の点灯時間と省エネ効果

Table 5に各日程の在時間 (OD: Occupied Duration), 実験時間中に在室者が存在した時間の割合 (OR: Occupied Rate), それぞれの人感センサを用いた在不在制御の点灯時間 (t_P , t_V), (1)式に基づいて算出した省エネ効果 (ESR) をまとめる。なお以降、実験時間中に在室者が存在した時間の割合を在率と呼称する。Table 5を見る限り、画像センサを用いた在不在制御は赤外線センサを用いた在不在制御に対して、全実験期間を通じて8.9%の省エネ効果を得られることがわかった。

Fig. 6に在室者が在と不在を繰り返した2019/1/19の

10:30~11:00における実際の在室状態と、それぞれの人感センサを用いた在不在制御における照明の点灯状態を示す。画像センサを用いた在不在制御は消灯遅延時間の短縮効果に起因して照明の点灯時間を低減できていることがわかる。Fig. 6のような傾向は異なる日程、時間帯においても確認されており、画像センサが有する消灯遅延時間の短縮効果に起因した省エネ効果は広く得られると考えられる。

Table 5における各日程の省エネ効果は1.8%から18.9%まで変動しており、画像センサを用いた在不在制御は在室状況によって省エネ効果が上下することがわかった。たとえば在率が著しく高い部屋は、照明を消灯できる機会が少なく、省エネ効果を高めることが難しい。Table 5で省エネ効果が平均値を下回る日程を確認すると、1/27を除いてすべての日程で在率が70%を超えており、照明を消灯できる機会が少なかった。1/27の在率は49.4%で照明を消灯できる機会が比較的多く存在したが、扇風機によって乾燥されている洗濯物を画像センサのみが在室者として誤検知し、照明を不要に点灯することで省エネ効果が低減した。

一方、省エネ効果が平均値を上回る日程は在率が22.3%~46.9%で、在室者が断続的にリビングルームを利用する場面が散見され、照明を消灯できる機会が多く存在した。画像センサを用いた在不在制御を導入するコストに見合った省エネ効果を得るためにも在室状況や部屋の用途を事前に調査する必要がある。

また、全実験時間中の在時間の総和は40.42 hで、画像センサを用いた在不在制御の点灯時間の総和は54.85 hであった。以上より画像センサを用いた在不在制御において、在室者が存在しないにもかかわらず照明を不要に点灯した時間が点灯時間の26.3%を占めていることがわかった。照明を不要に点灯した時間は、画像センサが

Fig. 6 Occupancy sensing results from 10:30 a.m. to 11:00 a.m. on 1/19/2019

誤って在判定したことや2.66 minに設定した消灯遅延時間に起因しており、さらなる省エネ効果を得るためにも、より精度の高い人感センサの開発が今後も求められる。

3.2.4 人感センサ自体の消費電力量を含めた省エネ効果

実験期間中に照明と人感センサが消費した電力量の合算値を求めたうえで、画像センサを用いた在不在制御の省エネ効果を評価する。前節の結果より、全実験時間中 ($T = 76.50$) における、赤外線センサと画像センサによる在不在制御の点灯時間は、それぞれ 60.22 h, 54.85 h であった。そして Table 3 より $p_p^{min} = 0.013$ である。

(3) 式に上記の値を代入し、画像センサによる在不在制御が省エネ効果を発揮するための条件式を導出する。

$$E(p_p = 0.013, l, t_p = 60.22, T = 76.50) - E(p_v, l, t_v = 54.85, T = 76.50) > 0 \quad (4)$$

Fig. 7に(4)式の境界条件を黒色実線で示す。 p_v と l で構成される平面空間は二つの領域A, Bに分割される。領域Aは(4)式を満たす領域で、領域Bは(4)式を満たさない領域である。

Fig. 7に点線矩形で示す、現行の画像センサや照明がとる定格消費電力の範囲内 ($[p_v^{min}, p_v^{max}]$, $[l^{min}, l^{max}]$) に着目する。点線矩形内には、上述した領域Bが含まれているため画像センサを用いた在不在制御が省エネ効果を発揮するためには、任意の画像センサを用いるのではなく、照明に合わせて定格消費電力が低い画像センサを選定する必要がある。たとえば、本実験環境下で用いた照明 ($l = 33.0$) を使用した際に、赤外線センサを用いた在不在制御に対して画像センサを用いた在不在制御が省エネであるためには $p_v < 2.42$ を満たす必要がある。

上記の結果より、導入コストに見合った省エネ効果を得るためにも、在室者検知精度に加えて、照明や画像センサ自体の消費電力を考慮する必要がある。なお本節では、現行の赤外線センサや画像センサの定格消費電力を参照して、省エネ効果を発揮するために必要な画像センサ自体の定格消費電力を求めたが、参考文献[7]と同様

Fig. 7 Visualization of formula (4)

にそれぞれの赤外線センサや画像センサが本実験下と同等の検知精度を得られる前提に基づいている点に留意する必要がある。

4. 考察

本章では、実験で確認された画像センサの利点と課題を、それぞれ4.1節と4.2節で考察する。そして赤外線センサと画像センサに共通して確認された課題を4.3節で述べる。

4.1 画像センサの利点

前章における赤外線センサと画像センサの比較実験を通じて、画像センサは在室者検知精度を21%以上向上できることを確認した。ほかにも、在室者の細かい動作を検知できることに起因して、誤不在時間を74%以上短縮した。そして画像センサを用いた在不在制御は、誤消灯の発生を抑えたうえで8.9%の省エネ効果を発揮した。

ほかにも画像センサは赤外線センサと異なり、検知範囲を任意に区切ったエリア単位で在室者を監視できるため、設置台数を抑えつつ、在室者直上の照明のみを点灯できる利点を有している[7]。

4.2 画像センサの課題

画像センサは、在室者が不在の場合でも自動で動作する物体を在室者として誤検知する課題があり、この課題

Fig. 8 Examples of misdetection by vision-based sensor

によって在不在制御における省エネ効果が低下する。たとえば参考文献 [23] において、首振り扇風機やPCのスクリーンセーバーを誤検知することが示唆されている。本実験においても、首振り扇風機によって乾燥されている洗濯物やディスプレイが自動オフされたタブレット端末を誤検知した (Fig. 8)。一方、赤外線センサの在室者検知結果に着目したところ、Fig. 8に起因した誤検知は確認されなかった。以上より、上記の誤検知は画像センサ特有の課題であると考えられる。

たとえば近年では、機械学習を利用した物体識別技術や人物検出技術が研究されており、学習データの整理に要するコストや処理時間に関する課題があるものの、それらを応用することで Fig. 8 に示す誤検知を回避できる可能性がある。

ほかにも 3.2.4 節で述べたように画像センサ自体の消費電力が高い課題があるため、低消費電力化を実現可能な回路設計技術の導入を検討する必要がある。

4.3 共通課題

本実験環境下では、Fig. 4 の中央に位置する椅子に在室者が座った際に、赤外線センサと画像センサに対して在室者の下半身がテーブルで隠れるオクルージョンが発生して上半身の動作のみで在室者が検知された。オクルージョンが発生しているため着座時に下半身が動作する頻度を確認できないが、上半身に加えて下半身の動作を捉えることができれば、スマートフォンやタブレット操作などの細かな動作が高頻度で発生する着座時の誤不在判定を低減できる可能性がある。その他のセンシング精度低下が懸念されるオクルージョンは未確認だが、赤外線センサや画像センサを設置する際には設置位置や什器配置を工夫してオクルージョンを回避すべきである。

また 3.2.1 節では、誤消灯が発生しない最短の消灯遅延時間を正解データに基づいて求めたが、実運用下で正解データを作成するのは困難である。そこで通常、省エネ効果は低減するが、誤消灯を回避できる十分に長い消灯遅延時間を設定することで実運用される。消灯遅延時間を短縮可能な画像センサの省エネ効果を実運用下で得

るためにも、在室者のセンシング結果のみを利用して、誤消灯を回避可能な最短の消灯遅延時間を自動推定する手法 [5,6] の導入が必要である。

本実験で得られた在室者のセンシング結果に Nagy らの手法 [5] を適用することで、赤外線センサと画像センサに対して誤消灯の発生しない最短の消灯遅延時間を推定した結果、それぞれ 3.04 min と 4.18 min が得られた。3.2.1 節で示したように、画像センサは赤外線センサと比較して消灯遅延時間を短縮可能な利点を有するが、自動推定結果からはその利点を得ることができなかった。また誤消灯を回避するためには赤外線センサに 10.58 min 以上の消灯遅延時間を設定する必要があるが、自動推定された消灯遅延時間は 3.04 min で誤消灯を回避できなかった。以上の結果から、本実験環境下において Nagy らの手法の有効性を確認できなかった。しかし Nagy らの手法はオフィスに導入された赤外線センサ向けに開発されているため、本実験のように住宅のリビングルームに設置された人感センサに応用する際には、パラメータを見直す必要があると考えられる。

5. おわりに

本論文では、画像センサを用いた照明の在不在制御の利点や課題を明らかにすることを目的に、一般住宅において 8 日間の実験データ収集を行って赤外線センサを利用した在不在制御と比較した。

実験結果より、画像センサは赤外線センサと比較して在室者検知精度が 21% 以上高く、人感センサが誤って不在判定し続ける時間（誤不在判定時間）を短縮できることがわかった。実験期間中に発生した誤不在判定時間の最大値は赤外線センサで 10.58 min、画像センサで 2.66 min だった。画像センサはスマートフォンやパソコン操作などで在室者の細かな動作を見逃す割合が低かったため、赤外線センサと比較して誤不在判定時間を短縮できた。

それぞれの人感センサに誤消灯が発生しない消灯遅延時間を設定し、実験データを基に在不在制御を再現することで照明の点灯時間を評価した結果、画像センサを用いた在不在制御は赤外線センサを用いた在不在制御に対して 8.9% の省エネ効果を有することがわかった。しかし画像センサを用いた在不在制御において、在室者が存在しないにもかかわらず不要に照明を点灯した時間が点灯時間の 26.3% を占めており、さらなるセンシング技術の向上が必要だと考えられる。

以上ではおもに画像センサ導入による利点を述べたが、画像センサには自動で動作する物体（たとえば、首振り扇風機）を誤って在判定する課題が存在するため、誤検知の発生頻度低減に向けて機械学習を用いた物体識別技術の導入を検討する必要がある。ほかにも画像センサ自体の定格消費電力が比較的高い課題があり、人感センサ自体の消費電力量を加味して省エネ効果を評価した場合に、画像センサによる在不在制御が省エネ効果を発揮で

きない可能性がある。定格消費電力が33 Wの照明を用いた本実験環境下において、画像センサを用いた在不在制御が省エネ効果を発揮するためには、画像センサ自体の定格消費電力を2.42 W以下に抑える必要があることが人感センサの現行品に関する調査結果を通じて明らかになった。さらに、画像センサに対して誤消灯が発生しない最短の消灯遅延時間を自動推定する手法も今後の課題として挙げられる。

本論文において画像センサを用いた在不在制御が有する省エネ効果を確認できたのは、実験環境下において在室者が細かな動作を行っていたことに起因している。細かな動作が発生しない導入先、たとえば部屋間の移動目的で使用される廊下においては、動きが大きい歩行動作が主であり、画像センサの省エネ効果は低下する可能性がある。

また画像センサによる在不在制御は照明を効率的に消灯することで省エネ効果を向上させるため、在室者が断続的に存在する部屋に導入するのが望ましい。在室者が存在する割合が極端に高い、もしくは低い導入先、たとえば座席移動の少ないオフィスや利用頻度の少ない会議室において、画像センサの省エネ効果は低下する可能性がある。

画像センサを用いた在不在制御の導入に見合った省エネ効果を得るためにも、在室者の挙動や在室者が存在する割合を事前に調査する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たって、貴重な一般住宅における実画像データ収集に御助力頂いた関係者各位にこの場をお借りして深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] U. S. Energy Information Administration: 2012 Commercial Buildings Energy Consumption Survey: Energy Usage Summary; <https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2012/energyusage/>.
- [2] 省エネルギーセンター：オフィスビルのエネルギー消費量の特徴：<http://www.eccj.or.jp/office-bldg/01.html>.
- [3] Z. Nagy, F. Y. Yong, M. Frei and A. Schlueter: Occupant centered lighting control for comfort and energy efficient building operation; *Energy and Buildings*, Vol. 94, No. 1, pp. 100–108 (2015)
- [4] L. L. Fernandes, E. S. Lee, D. L. DiBartolomeo and A. McNeil: Monitored lighting energy savings from dimmable lighting controls in The New York Times Headquarters Building; *Energy and Buildings*, Vol. 68, pp. 498–514 (2014)
- [5] 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)
- [6] V. Garg and N. K. Bansal: Smart occupancy sensors to reduce energy consumption; *Energy and Buildings*, Vol. 32, No. 1, pp. 81–87 (2000)
- [7] 二神, 矢野, 黄, 榎原: 画像センサによる照明個別制御の有効性検証；電気学会論文誌 C, Vol. 138, No. 11, pp. 1362–1374 (2018)
- [8] F. Manzoor, D. Linton and M. Loughlin: Occupancy monitoring using passive RFID technology for efficient building lighting control; *Proceeding of the Fourth International EURASIP Workshop RFID Technology* (2012)
- [9] F. Kaku, M. Miki, T. Hiroyasu, M. Yoshimi, S. Tanaka, T. Nishida, N. Kida, M. Akita, J. Tanisawa and T. Nishimoto: Construction of intelligent lighting system providing desired illuminance distributions in actual office environment; *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing* (2010)
- [10] M. A. ul Haq, M. Y. Hassan, H. Abdullah, H. A. Rahman, M. P. Abdullah, F. Hussin and D. M. Said: A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 33, pp. 268–279 (2014)
- [11] 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)
- [12] A. Sarkar, M. Fairchild and C. Salvaggio: Integrated daylight harvesting and occupancy detection using digital imaging; *Sensors, Cameras and Systems for Industrial/Scientific Applications IX*, Vol. 6816 (2008)
- [13] 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)
- [14] 渡邊：照明制御製造者が考える照明設備、制御手法；電気設備学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 12–15 (2018)
- [15] Y. Benezeth, H. Laurent, B. Emile and C. Rosenberger: Towards a sensor for detecting human presence and activity; *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 2, pp. 305–314 (2011)
- [16] B. V. Neida, D. Manicria and A. Tweed: An analysis of the energy and cost savings potential of occupancy sensors for commercial lighting systems; *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol. 30, No. 2, pp. 111–125 (2001)
- [17] J. Takahashi, S. Nishikado, H. Yamamoto, Y. Morimoto, M. Nagata and T. Enohara: Development of motion sensor with image sensing devices; *Proceeding of the 6th Lighting Conference of China, Japan and Korea*, pp.289–290 (2013)
- [18] National Lighting Product Information Program

(NLPPIP): *Occupancy sensors: Motion sensors for lighting control*, Lighting Research Center (1998)

- [19] M. Babae, D. T. Dinh and G. Rigoll: A deep convolutional neural network for video sequence background subtraction; *Pattern Recognition*, Vol. 76, pp. 635–649 (2018)
- [20] R. B. Hatwar, S. D. Kamble, N. V. Thakur and S. Kakde: A review on moving object detection and tracking methods in video; *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 118, No. 16, pp. 511–526 (2018)
- [21] J. Alvarez, A. Acero, S. Gutierrez, P. M. Rodrigo and A. Lay-Ekuakille: A low cost presence detection system for smart homes; *Proceeding of 2018 International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE)*, pp. 1–6 (2018)
- [22] A. R. Mead and K. M. Mosalam: Ubiquitous luminance sensing using the Raspberry Pi and camera module system; *Lighting Research Technology*, Vol. 49, No. 7, pp. 904–921 (2017)
- [23] 東芝インフラシステムズ株式会社: SMART EYE SENSOR MULTI (TSBHS01): http://www.toshiba.co.jp/sis/imagesensor/index_j.htm

著者略歴

ふた がみ たく や
二 神 拓 也 (正会員)

2015 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻博士前期課程修了。同年 4 月株式会社東芝研究員，2017 年 12 月大阪電気通信大学客員研究員，2018 年 10 月東芝インフラシステムズ株式会社研究員となり現在に至る。照明制御技術および画像認識技術の研究に従事。計測自動制御学会，電子情報通信学会，電気学会の会員。

はや さか のほる
早 坂 昇

2004 年 3 月北海道大学大学院工学研究科修士課程修了，2007 年 3 月同大学院情報科学研究科博士課程修了。2010 年 6 月大阪大学大学院基礎工学研究科助教，2013 年 4 月大阪電気通信大学情報通信工学部情報工学科講師，2018 年 4 月同大学准教授となり現在に至る。音声を中心とする信号処理の研究に従事。IEEE，日本音響学会，電子情報通信学会の会員。

おの え たか お
尾 上 孝 雄

1993 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了。同年大阪大学助手，同講師，京都大学助教授，大阪大学助教授を経て，2003 年 10 月大阪大学大学院情報科学研究科教授となり現在に至る。組込み向けメディア処理システムの設計と実装に関する研究に従事。工学博士，IEEE，電子情報通信学会，情報処理学会，映像情報メディア学会の会員。