

〔論文〕

AI 検知と画像処理を用いた建物のエネルギー削減技術の検討

呉 濟元^{*1}・住吉 大輔^{*2}・春田 大河^{*3}・小田 まり子^{*4}・千田 陽介^{*4}
八坂 亮祐^{*5}・新井 康平^{*1}

Energy Reduction Techniques using AI and Image Processing for Building Energy

Jewon OH^{*1}, Daisuke SUMIYOSHI^{*2}, Taiga HARUTA^{*3}, Mariko ODA^{*4}, Yosuke SENTA^{*4}
Ryosuke YASAKA^{*5} and Kohei ARAI^{*1}

Abstract

Energy reduction techniques using object recognition, skeletal recognition, and image processing using AI technologies are explored in this study. Images collected from AI cameras were used to detect window open/close status, blind control, and work activities of occupants. Window open/close detection was more efficient for a larger color scale. Moreover, the coordinates of the color detection results could be used to determine if a window was open or closed compared to a closed window. Blind control was determined based on the analysis of window surface temperatures using image processing. Work movements of the occupants were detected using object and skeletal recognition. Object recognition was able to detect occupants and office automation equipment. Skeletal recognition was able to segregate work actions in real time based on the color coding.

Key Words : AI, Image processing, Color detection, Object Recognition, Skeleton Recognition, OpenCV

1. 緒 言

2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指して、国・地方が一体となり、地球温暖化対策を総合的、かつ計画的に進めていくことが重要である⁽¹⁾。建築分野においても、大幅なエネルギー消費量の削減のため、脱炭素移行に向けた先端技術の実証・社会実装が求められている⁽²⁾。また、地域社会の暮らしの中でも、人々が省エネに努める行動変容を促し、民生家庭部門における二酸化炭素排出量を削減することも重要である⁽³⁾。近年、行動科学の知見に基づく個人/世帯のエネルギー使用実態や属性情報等により行動変容を促す BI-Tech(Behavioral Insights×Technology)が注目されている⁽⁴⁾。BI-Techは、AI(Artificial Intelligence)、IT(Information Technology)、IoT(Internet of Things)など先端技術の融合を組み合わせたナッジ(nudge: 行動変容を促す取り組み)が社会に浸透している^(註1)。建築分野においては、特に既存の建築物に対して省エネ対策を工夫することが非常に重要である。

本研究の目的は、AIの応用技術である人の骨格認識⁽⁵⁾、物体認識⁽⁶⁾、各種センサー技術の利用により、室内のOA(Office Automation)機器、空調設備システムの稼働状態から活動環境の状況(室温、湿度等)、在室者行動をリアルタイムに把握し、活動状況に応じた、具体的省エネ行動を促進・提案し、「AI技術を活用したエネルギー使用状況可視化・省エネ行動提案システム」を開発することである。本システムは、初期コストのかかる専用エネルギー管理システム(例えば、BEMS(Building Energy Management System)、HEMS(Home Energy Management System))を設置せずとも、既存の建物や一般家庭において簡単に導入し、AIにより室内状況を把握することで、最適な温熱環境、省エネ行動分析を可能とすることを目指している。また、リアルタイムで得られる画像を分析することで室内空調稼働状況、在室人数検知、省エネ行動提案を受けた管理者や在室者が、自ら省エネ行動をすることによりエネルギー管理・制御を行い、行動変容を実現できるように実装する。そして、電力量のリアルタイム可視化と過去の電力使用量との比較、省エネ行動アドバイスにより、人々の省エネへの関心・意識を高め、習慣的な省エネ行動につなげ、行動変容の定着を図る。一方、本システムでは、導入時の課題となるプライバシーやセキュリティも考慮し、カメラから得られた動画画像情報を数値・テキストデータに変換した後、建物の管理者や在室者へのフィードバックに活用できる技術を検討し適用する。

^{*1} AI 応用研究所, ^{*2} 九州大学 人間環境学研究院, ^{*3} 電子情報システム工学専攻, ^{*4} 情報ネットワーク工学科, ^{*5} PC サポートセンター

AI 技術を活用した建築分野における既往研究として、李ら⁽⁷⁾の行った振動台実験の動画データを用いて構築したシステムの検証、層剛性の評価がある。高木ら⁽⁸⁾は監視カメラの映像から、顔認識などの個人を特定する情報を用いずに、空間内の歩行者数を推定する方法を提案し、重回帰モデルよりディープラーニングによる推定がより高精度であったことを報告した。幸田ら⁽⁹⁾はディープラーニングと画像処理の技術を組み合わせ、天井の画像データから損傷度の自動判定を行い、損傷度の判定値と実際の状況を比較、モデルの妥当性を検証した。岩本ら⁽¹⁰⁾は画像認識のセグメンテーションを用いて建物を 10 部位(床、壁、天井、柱、梁、窓、階段、扉、手摺、照明)に分類して検出を行った。入力画像を回転、反転、ノイズ処理、ぼかしなど、10 タイプの画像処理を行うことでモデル精度を向上させている。肥田ら⁽¹¹⁾および Lu ら⁽¹²⁾はディープラーニングを用いて被害の地理的分布を把握する手法を構築し、入力画像の無被害及び有被害建物の特徴部分を抽出または $\pm 5^\circ$ 回転させて学習データを増やし、モデルの正答率を向上させた。Ma ら⁽¹³⁾は Canny 法(エッジ検出)⁽¹⁴⁾を用いて建物の幾何学模様の特徴とそれに対応する空間環境に現れる視覚的複雑さを総合的に表現する方法を検討した。このように建築の様々な分野に AI 技術が活用されており、学習モデルを用いる際のデータの前処理が重要であることが分かった。本報では、先行研究⁽¹⁵⁾で行ってきた AI 技術を用いた建物のエネルギー削減技術の検討に踏まえ、カメラから得られた画像データを用いて窓の開閉状態検知、ブラインドの制御、在室者の作業様子について AI により検知した結果を報告する。

2. 建物のエネルギー削減システム

本研究では、久留米工業大学 100 号館 AI 応用研究所を対象として、カメラや温湿度等の計測機器を設置して室内温湿度、照度などのデータと在室者の行動、OA 機器の稼働状態を撮影した。他にもサーモグラフィックカメラを用いて窓や壁などの熱損失のデータも収集した。Fig.1 にエネルギー削減システムの概念図を、Table.1 に収集したデータの一覧を示す^(注2)。温湿度や照明は 10 分間隔でデータを蓄積し、在室者の行動、物体、窓の開閉状況の検知に関しては瞬間の動きや OA 機器の稼働状態を把握するため 10 秒間隔で撮影を行った。得られたデータを用いて建物のエネルギー削減をサポートするシステムを構築し、その実現性を検討した。

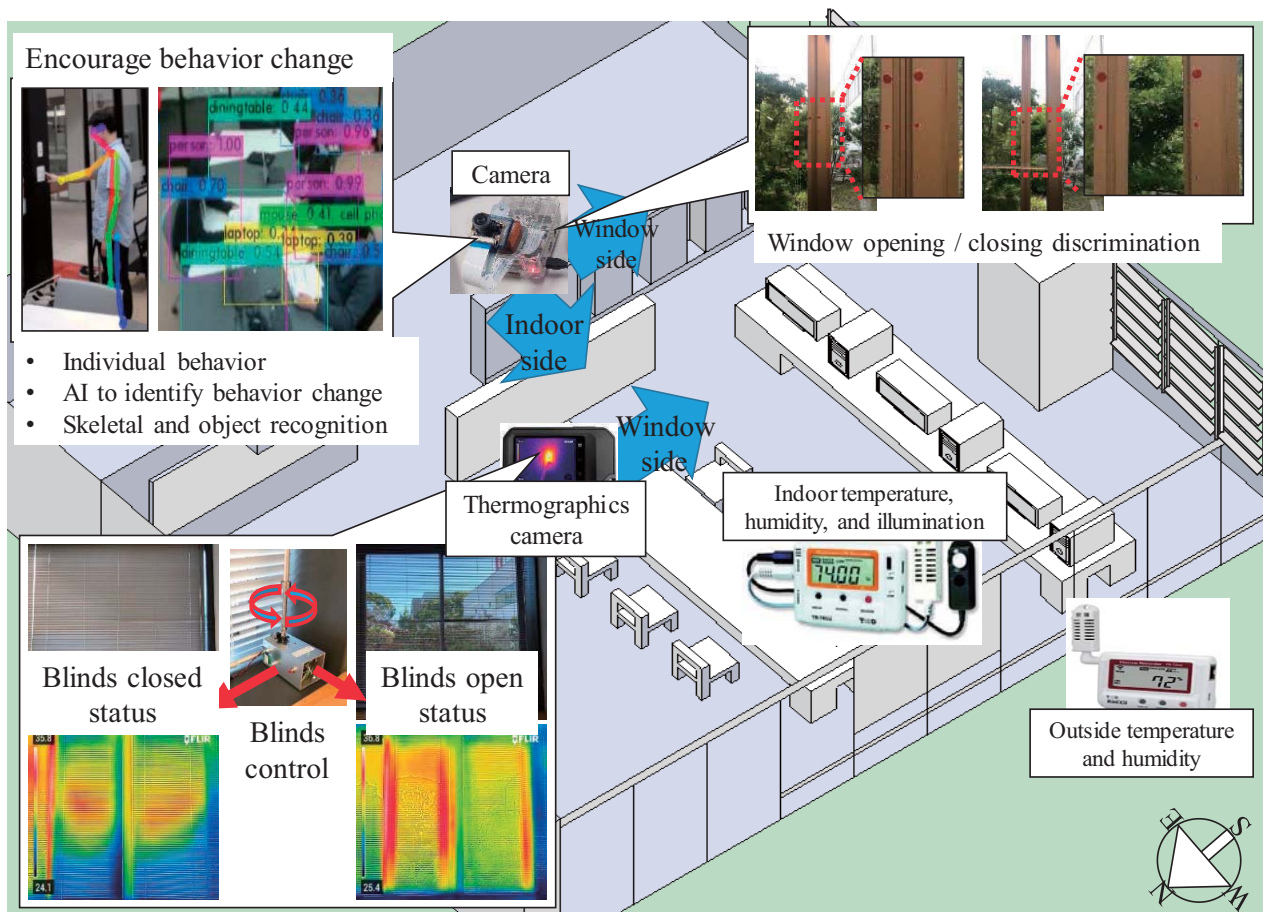


Fig 1. Diagram of building energy-saving system in this study

Table 1. Data used in this study

Contents	Analysis	Equipments
Temperature & Humidity	Temperature and humidity analysis Comfort analysis	Measuring equipment (10 minutes intervals)
Illuminance	Brightness Analysis	
Behavior	Work in progress detection Energy-saving behavior detection	Camera (10 seconds intervals)
Equipment	Equipment detection Operational detection	
Window	Open / Close detection	
Blind	Blind control	
Thermal visualization	Thermal detection Heat loss analysis	Thermographic camera (30 minutes intervals)

3. 色検出を用いた窓の開閉検知

季節によっては空調設備を稼働せずに窓を開けること(自然換気の導入)により室内の快適な熱環境を保つことができる。また、外気条件や室内の温湿度などの情報と比べ、リアルタイムで窓の開閉を制御もできる⁽¹⁶⁾。他にもリアルタイムで窓を撮影した画像をCNN(Convolutional Neural Network)⁽¹⁷⁾モデルを用いて窓の角度検知を行い、開閉状態を判別可能である⁽¹⁸⁾。本研究では、画像処理の色検出手法を用いて窓の開閉状態検知を行う。Fig.2に窓のサッシにステッカーを貼り付けた様子を示す。ステッカーは赤色を用い、丸・四角の2種類を用意した。ステッカーは0.5 cm から 2 cm までのサイズが異なる3種類の大きさのものを印刷して用い、どの程度のサイズが検知しやすいか試みた。撮影カメラの性能は4K(3840px×2160px 画素の高画質)カメラを用いて撮影を行った。撮影は三脚を用いて窓から3 m 離れた場所に高さ 1.6 m に設置して行った。本研究で作成したモデルは窓のサッシに貼り付けた色付きのステッカーを色検出によりステッカー間の距離を算出することで窓の開閉状態を検知した。既往研究のような機械学習モデルを構築せずに画像処理を用いることで簡単に窓の開閉状態を検知する手法を考案した。

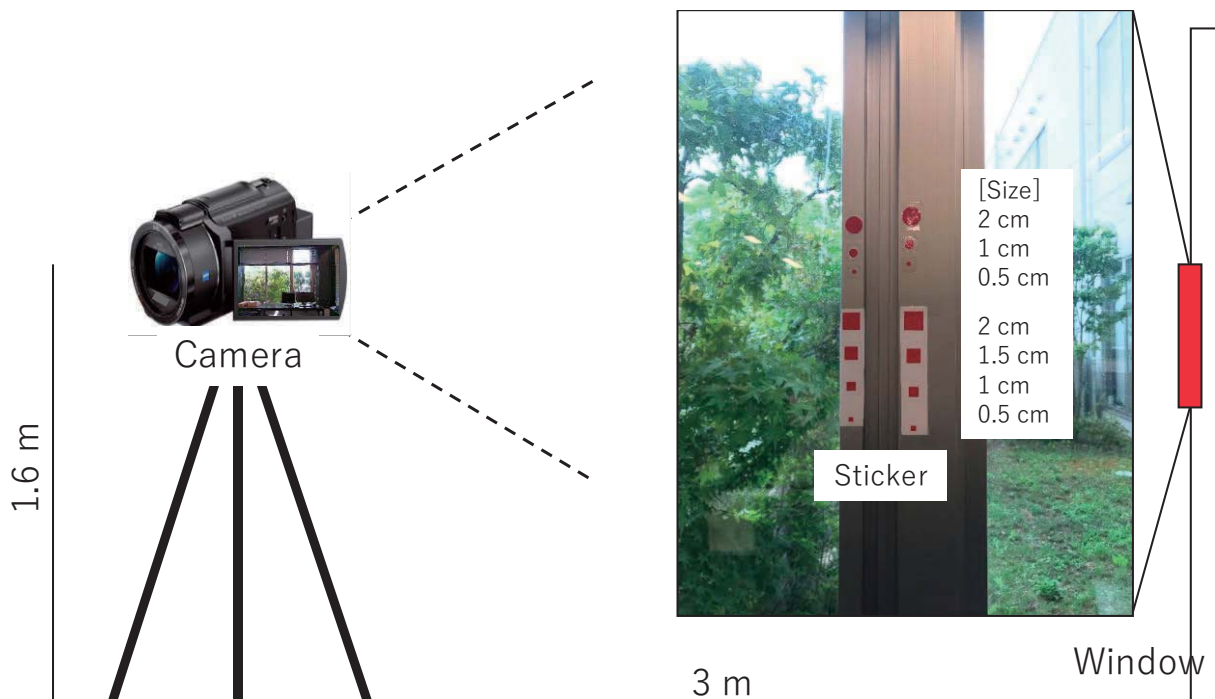


Fig 2. Experiments for detecting open/close status of the windows

色検知には OpenCV⁽¹⁹⁾の HSV⁽²⁰⁾ (注3)モデルを用いた。これにより窓の開閉状態を検知した。また、ステッカーのサイズ、模様による検知精度について検討した。以下に窓の開閉検知の手順を示す。

- ① 入力画像の中で、ステッカーを貼っている部分を抽出し、その領域を切り取る。
- ② ①の画像を用い、最適しきい値により色を検出する。
- ③ 検出した色とそれ以外の部分を黒色に変換した画像を出力して色を見分ける。
- ④ ③画像を用いて色の中央座標を取得し、座標に基づき、ステッカー間のピクセルを数える。
- ⑤ ステッカー間の長さを求める際には1ピクセルあたりの長さを算出し、窓の開閉状態を検知する。1ピクセルあたりの長さは以下の式(1)～式(4)により求められる。

$$dots = \sqrt{(w^2 \times l^2)} \quad (1)$$

$$dpi = dots \div inch \quad (2)$$

$$px = 25.4 \text{ mm} \div dpi \quad (3)$$

$$L_t = px_t \times px \times cv \quad (4)$$

ここで、 $dots$ は入力画像の対角線の画素数[dots]、 w は入力画像の横の画素数[dots]、 l は入力画像の縦の画素数[dots]、 dpi は入力画像の解像度[dots/inch]、 $inch$ は入力画像の対角線の長さ[inch]、 px は入力画像の1ピクセルあたりの長さ[mm/pixel] (1 inch=約 25.4 mm)、 L_t はステッカー間の全長さ[mm]、 px_t は色付きのピクセル数の合計[pixel]、 cv は撮影距離における補正係数[mm]である。

Fig.3に丸模様を用いて赤色を検出した結果を示す。色検出はサイズによって検知結果の見やすさが異なる。窓の開閉状態の判別は窓が閉まっている時のステッカー間の長さを算出できれば、開いている状況も判別できる。本研究で用いた画像では、窓が閉まっている状態の長さが 25.74 mm であった。この長さを基準として窓の開閉状態を検知した。次に窓が開いている画像では、96.28 mm であった。実際の測定結果では、窓が閉まっている状態が約 30 mm、窓が開いている状態が約 100 mm で精度良く検出できた。

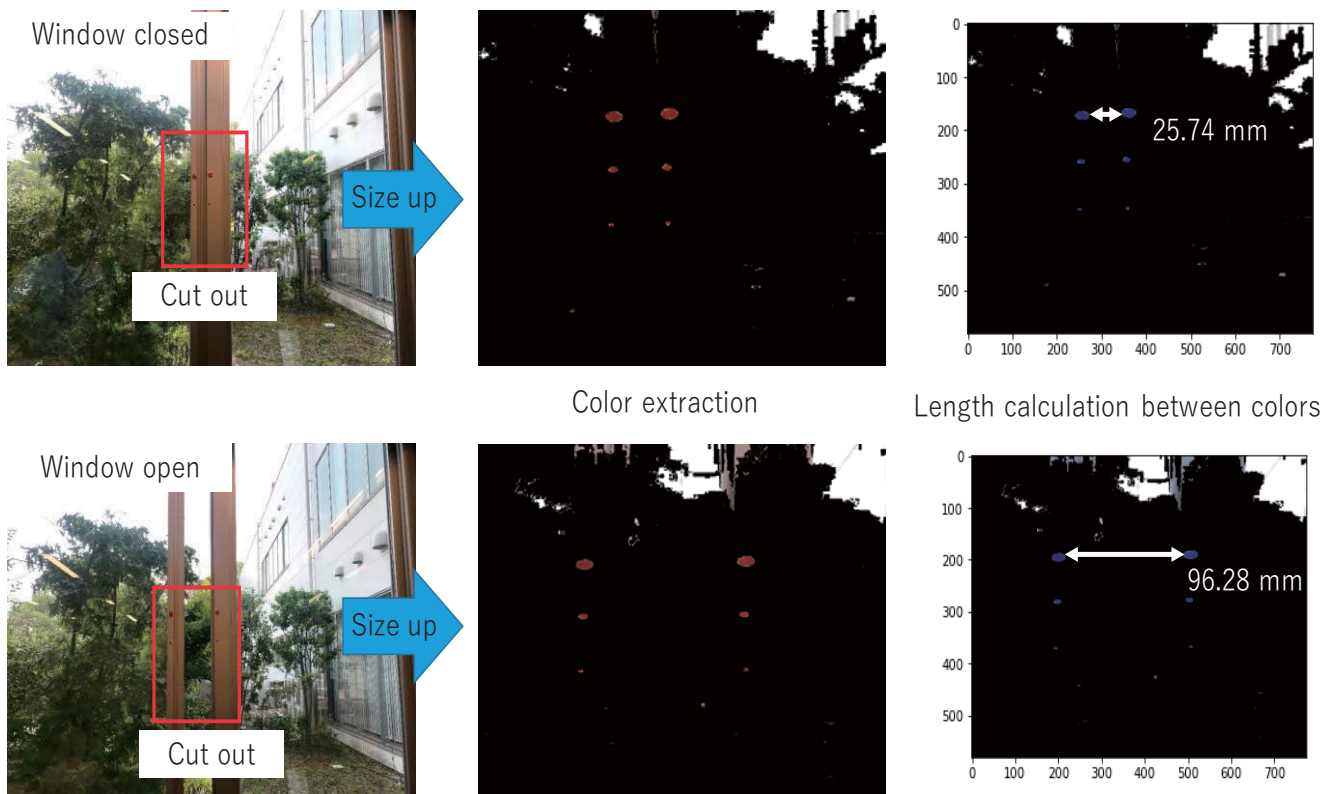


Fig 3. Window opening/closing discrimination using color detection

4. 画像処理を用いたブラインド制御

ブラインド制御はサーモグラフィックカメラから得られた画像を処理することによって行った。Fig.4 にブラインドを開閉した場合のサーモグラフィック画像を示す。ブラインドの開閉状態によってブラインドの表面温度分布が異なり、開いたブラインドでは高温の赤色がばらついている(Fig.4(A))。閉めたブラインドでは昼の時間帯に撮影を行ったため、日射が直接室内に入り、ブラインドの裏側に日射が当たるため中央部の表面温度が高くなったと考えられる(Fig.4(A))。そこで、色検出を用いて赤色を検出すれば、室内の照度、温度と外気条件と合わせてブラインド制御ができると考えた。なお、色検出には HSV モデルを用いた。

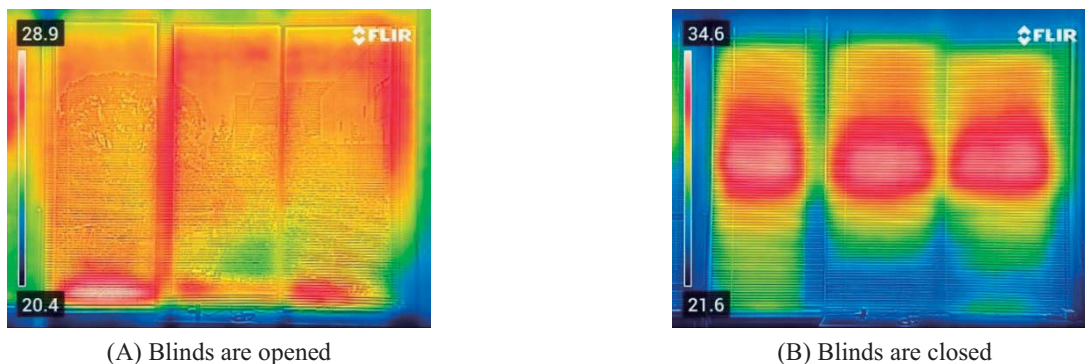
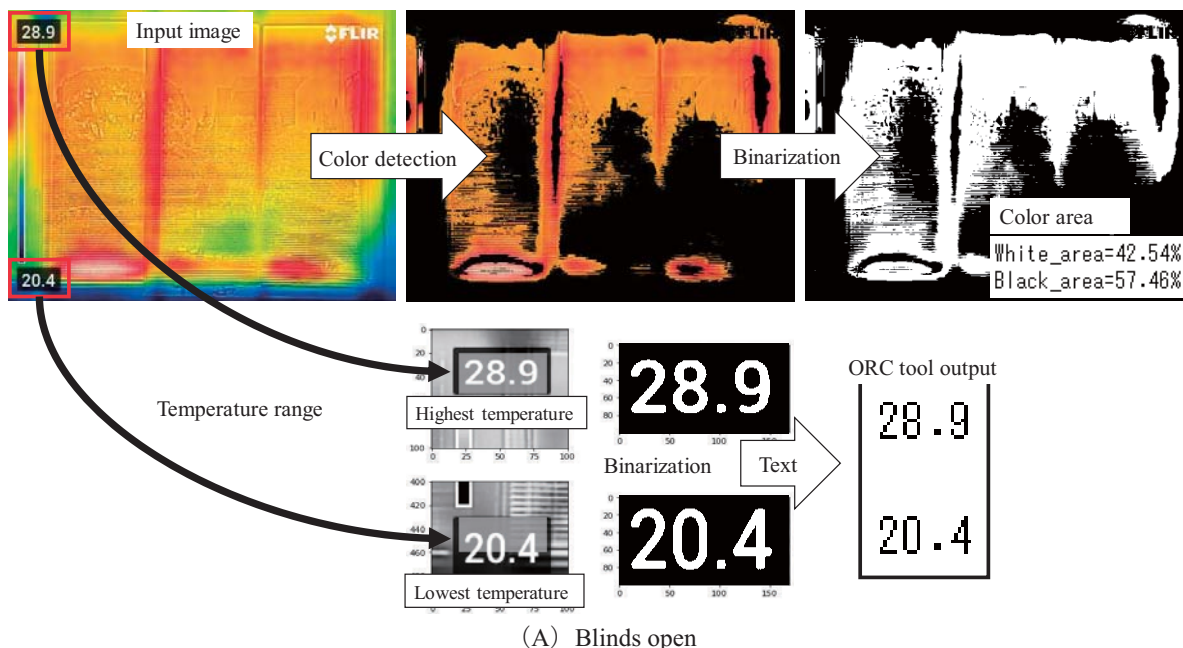


Fig.4 Temperature distribution of blinds opening and closing (October 21, 2021, 12:00 pm.)

Fig.5 に HSV モデルを用いてブラインドの温度分布を検出した結果を示す。本研究で用いた入力画像は昼 12 時の日射量が多い時間帯に撮影した 480px×640px 画像を利用した。ブラインドの開閉画像を HSV モデルにより赤色系を検出した。また、色を検出した画像は Threshold 法⁽²¹⁾ ^(註4)により二値化させ、赤色を白色に、それ以外を黒色に変更し、白色と黒色の割合を求めて入力画像中の赤色の分布(表面積)を分析した。ブラインドを開けた画像では、白色が 42.54%、黒色が 57.46%の割合を示した。ブラインドを閉めた画像も同様に赤色を検出し、割合を求めた結果、白色が 14.47%、黒色が 85.53%の割合となった。

Fig.5 に示したように入力画像に温度範囲が表示している領域を切り出し、Tesseract-OCR⁽²²⁾(以下、OCR ツール)による文字・数値をテキスト(*.CSV)保存した。OCR は、画像中に表示されている文字・数値の情報を抽出してテキストデータへ変換する技術である。しかし、切り出した画像をそのまま利用すると認識率が低下した。そのため、切り出した画像を二値化して認識を向上させた。HSV モデルを用いて検知した結果に基づき、在室者へフィードバックし、窓の開閉やブラインドの角度制御を行う。



(A) Blinds open

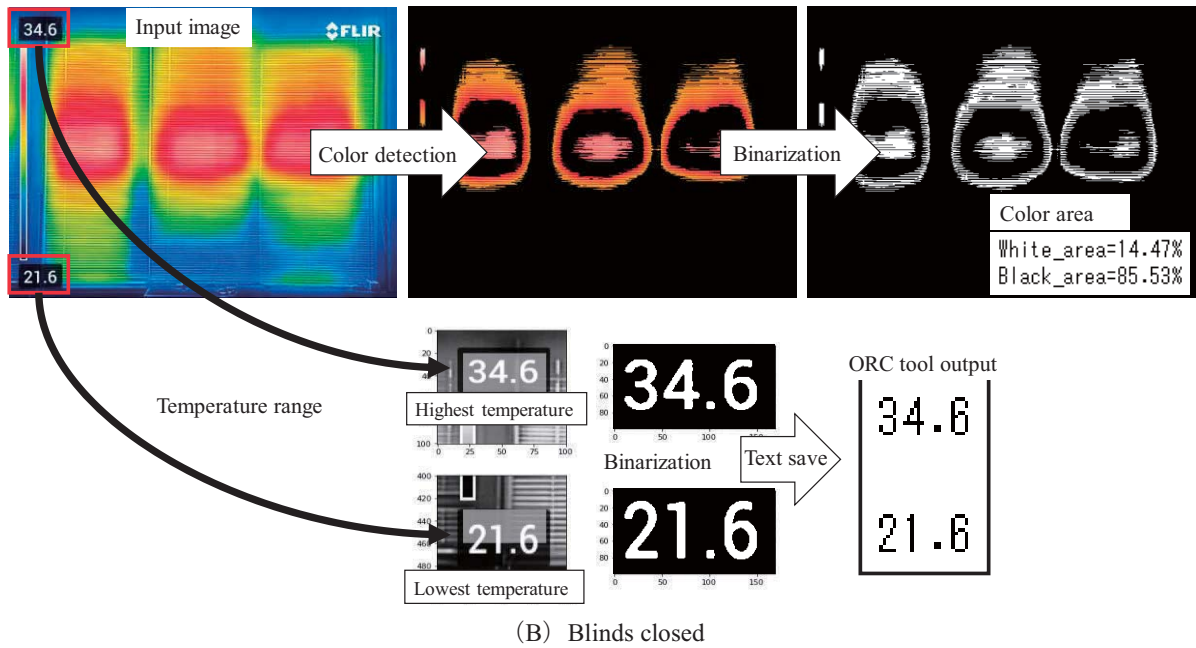


Fig.5 Detecting temperature on the blinds using image processing for blind control

5. AI 技術を用いた在室者の活動検知

カメラ画像を用いた在室者の窓の開閉作業、ブラインド制御動作を物体認識と骨格認識を通して検討を行った。窓の開閉作業やブラインド制御を行う時には腕・肩が上下左右に動くことが予想される。また、検知した結果の座標を取得すれば、リアルタイムで在室者の行動分析ができる。室内を撮影した画像を用いて物体認識による在室者の頭部を検知し、在室人数を把握した事例、Raspberry Pi を用いてリアルタイムで在室者検知や空調設備の運転制御、服を着る・脱ぐ動作を骨格認識により行った既往研究がある⁽²³⁻²⁵⁾。

本研究では、在室者が窓の開閉作業、ブラインド制御動作を物体認識と骨格認識によって検知した。Fig.6 に物体認識を用いて室内の物体を検出した結果を示す。物体認識は在室者を 70%の確率で人として検知できた。他にも椅子やモニターなど OA 機器も検知している。

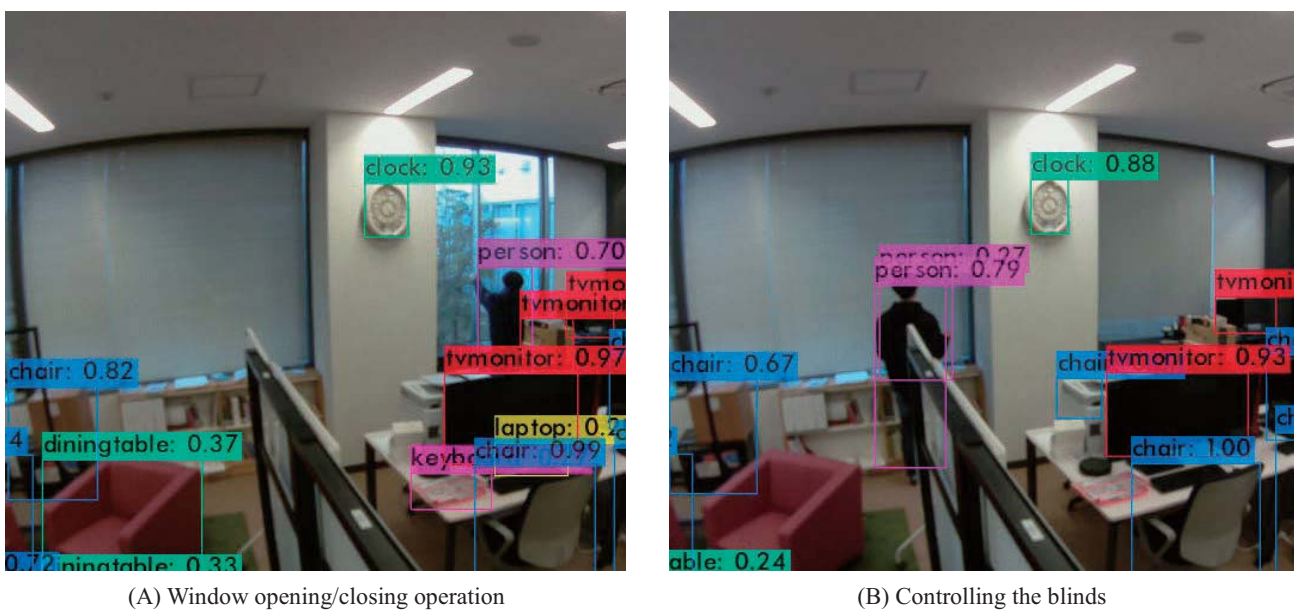
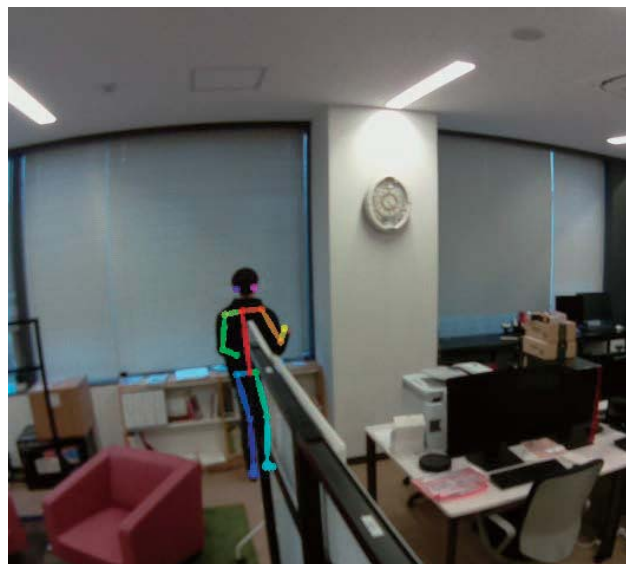


Fig.6 Indoor detection using object recognition

Fig.7 に骨格認識を用いた作業動作の検知結果を示す。骨格認識は左腕を緑色、右腕をオレンジ色により出力しており、どの腕が動いているかが分析できる。入力画像では、窓の開閉作業する時に在室者の左腕が上がっている様子が検知できた(Fig.7(A))。一方、ブラインドを制御する時には大きな腕の動きが検知されなかった(Fig.7(B))。ブラインドのルーバー角の制御の際は腕の動きが小さいため検知が困難であると分かった。このように予想した結果が得られなかった場合は、他の画像を用いて再検知を行うか、カメラの角度や設置場所を変更する工夫が必要である。



(A) Window opening/closing operation



(B) Controlling the blinds

Fig.7 Work motion detection using skeletal recognition

6. 結 語

本研究では、室内の画像を用いて画像処理、物体認識、骨格認識による窓の開閉状態、ブラインド制御、在室者の作業の検知を試みた。得られた知見を以下に示す。

- 窓に貼り付けたステッカーはサイズによって色の検出結果が異なり、大きいほど窓の開閉状態の判別し易いことが分かった。また、色検出によりステッカーの座標を取得し、窓が閉まっている状態と比較して窓の開閉状態を検知できた。
- 画像処理により、ブラインド制御に応じた窓側の表面温度を分析し、制御タイミングを計測した。また、OCR ツールを利用して画像のテキストを抽出し、現状の窓側の温度分布を分析できた。
- OCR ツールは画像を二値化させることでテキストの抽出精度が向上した。
- 物体認識により室内の在室者や OA 機器が検知できた。また、骨格認識により在室者の作業を検知し、窓の開閉作業やブラインド制御の動作を検知できた。
- 骨格認識した結果に基づき、出力される左右の腕の色と動きにより、リアルタイムで作業の動作を判別できた。

謝 辞

本研究は、2021 年度久留米工業大学学長裁量経費のご支援と、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業の結果遂行できたものです。ここに記して謝意を表します。

注 釈

- (1) BI-Tech は行動経済学の手法のひとつとして、個人個人に合った(パーソナライズした)フィードバックメッセージの発信による行動変容を促すものであり、経済産業省の第6次エネルギー基本計画(案)にも『ナッジ等の行動科学と先端技術の融合の社会実装に向け、行動情報のデジタル化と集約・解析を行う。』と記載されている。

(2) 本研究で用いた各計測機器の仕様を以下に示す。

注表 1 計測機器の仕様	
おんどとり (TR-72nw)	温度・湿度：2ch 記録容量：8,000 件×2ch 温度：0～55 °C 湿度：10～95% RH
照度・おんどとり (TR-74Ui)	照度：0～130 klx 紫外線：0～30 mW/cm ² 温度：0～55 °C 湿度：10～95% RH
サーモグラフィックカメラ (FLIR Ignite)	温度範囲：-20 °C～400 °C 測定視野角：52° × 42° 赤外線センサー画素数：160×120 画素
Raspberry Pi 4B	CPU：Cortex OS：Linux RAM：8 GB 容量：128 GB
Raspberry Pi のカメラ	高広角：160 度 解像度：2592×1944 画素
4K カメラ	解像度：4K 60FPS 画素：4800 万画素 容量：128 GB

(3) HSV 色空間モデルは、色相(Hue)、彩度(Saturation Chroma)、明度(Value Brightness)の3成分からなる色空間を検出するモデルである。色相は色の種類である赤、青、黄色の0～360の範囲、彩度は色の鮮やかさの0～100%の範囲、明度は色の明るさを0～100%の範囲のパラメータ調整で色を検出する。

(4) Threshold 法は、下記の第1引数～第4引数を用いて入力画像の輪郭を検出し、二値化処理を行った。

第1引数は、グレースケール画像を入力画像とする。

第2引数は、しきい値で、画素値を識別するために使われる。

第3引数は、最大値で、しきい値以上の値を持つ画素に対して割り当てられる値である。

第4引数は、Threshold type を設定するものである。

以下に Threshold type を示す。

- ・ THRESH_BINARY：ピクセル値が threshold より大きければ maxval(255 白色)、あるいは 0(黒)
- ・ THRESH_BINARY_INV：ピクセル値が threshold より大きい場合は 0、もしくは maxval
- ・ THRESH_TRUNC：ピクセル値が threshold より大きい場合はしきい値、あるいはピクセル値のまま割り当て
- ・ THRESH_TOZERO：ピクセル値が threshold より大きければピクセル値そのまま、小さければ 0 割り当て
- ・ THRESH_TOZERO_INV：ピクセル値が threshold より大きければ 0、小さければピクセル値そのまま

文 献

- (1) 環境省, 2050年カーボンニュートラルの実現に向けて, https://www.env.go.jp/earth/2050carbon_neutral.html (参照 2022. 10)
- (2) 国土交通白書 2022, 住まい・建築物の脱炭素化に向けた取組みの課題と方向性, <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/html/n1211000.html> (参照 2022. 10)
- (3) 内閣官房, 国・地方脱炭素実現会議, <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/index.html> (参照 2022. 10)
- (4) 環境省, 「行動インサイト」×「AI/IoT 等先端技術」(BI-Tech)を活用した行動変容の促進について, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/nudge/BI-Tech.pdf> (参照 2022. 10).
- (5) YOLO v3, <https://pjreddie.com/darknet/yolo/> (参照 2022. 10)
- (6) Openpose, <https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose> (参照 2022. 10)
- (7) 李 尚元, 肥田 剛典, 楠 浩一, 糸井 達哉, 1台のカメラ画像を用いた建物のシステム同定手法に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.129-130, 2021. 9

- (8) 高木 尚哉, 瀧澤 重志, カメラ映像を用いた地下街歩行者の分布推定方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.127-128, 2014. 9
- (9) 幸田 雄太, 王 璞瑾, 川口 健一, 画像処理と深層学習による天応による天井落下の損傷度判定を目指した基礎的研究 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.1037-1038, 2019. 9
- (10) 岩本 祐来, 志手 一哉, 深層学習を用いた建物部位の検出に関する研究—セマンティックセグメンテーションによる認識—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.231-232, 2020. 9
- (11) 肥田 剛典, 八百山 太郎, 高田 毅士, ディープラーニングによる地震時建物被害判定と被害の地理的分布推定手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.417-418, 2022. 8
- (12) Youcun Lu, Lin Duanmu, Zhiqiang (John) Zhai, Zongshan Wang, Application and improvement of Canny edge-detection algorithm for exterior wall hollowing detection using infrared thermal images, *Energy and Buildings*, 274, 2022. 8
- (13) Lan Ma, Hua Zhang, Mingzhen Lu, Building's fractal dimension trend and its application in visual complexity map, *Budling and Environment Volume 178*, pp.1-10, 2020. 4
- (14) Canny 法, http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_canny/py_canny.html?highlight=canny (参照 : 2022.10)
- (15) 呉 濟元, 住吉 大輔, 小田 まり子, 新井 康平, 千田 陽介, 八坂 亮祐, AI を用いた空調用エネルギー削減技術の検討 (AI の画像認識技術を用いた在室者の行動検知と空調設備システムの性能検討), 久留米工業大学研究報告 (44), pp.187-195, 2022. 3
- (16) 尾崎 明仁, 李 明香, 真方 翔, 自動開閉窓の最適制御方法および室内快適性に関する研究 (第1報) 自動開閉窓システムの概要と制御方法の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (高知), pp.57-60, 2017. 9
- (17) Convolutional neural network, https://en.wikipedia.org/wiki/Convolutional_neural_network (参照 : 2022.10)
- (18) Cheng Sun, Xumiao Guo, Tianyu Zhao, Yunsong Han, Real-time detection method of window opening behavior using deep learning-based image recognition in severe cold regions, *Energy & Buildings* 268, pp.1-11, 2022. 5
- (19) OpenCV, <https://opencv.org/> (参照 : 2022.10)
- (20) HSV(色空間の変換)モデル, http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_colors_paces/py_colorsaces.html?highlight=hsv (参照 : 2022.10)
- (21) Threshold 法, http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_thresholding/py_thres_holding.html (参照 : 2022.10)
- (22) Tesseract-OCR, <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract> (参照 : 2022.10)
- (23) Jianhong Zou, Qianchuan Zhao, Wen Yang, Fulin Wang, Occupancy detection in the office by analyzing surveillance videos and its application to building energy conservation, *Energy and Buildings* 152, pp. 385–398, 2017. 7
- (24) Muhammad Aftab, Chien Chen, Chi-Kin Chau, Talal Rahwan, Automatic HVAC control with real-time occupancy recognition and simulation-guided model predictive control in low-cost embedded system, *Energy and Buildings* 154, pp.141-156, 2017. 7
- (25) Wenjun Duan, Yu Wang, Junqing Li, Yuanjie Zheng, Chenguang Ning, Peiyong Duan, Real-time surveillance-video-based personalized thermal comfort recognition, *Energy & Buildings* 244, pp.1-13, 2021. 4