

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：55401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04824

研究課題名（和文）空調制御のために熱画像からAIにより非接触でリアルタイムな代謝量推定を試みる研究

研究課題名（英文）Research attempting non-contact, real-time estimation of metabolic rate using AI from thermal images for air conditioning control

研究代表者

大和 義昭（Yamato, Yoshiaki）

呉工業高等専門学校・建築学分野・教授

研究者番号：20450140

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：空調制御に必要な温熱環境評価において測定がなおざりにされた人体側2要因の一つである代謝量を、AIにより熱画像カメラで撮影した画像中の人体の姿勢や動きの判別結果と姿勢・動き毎の代謝量測定データから非接触かつリアルタイムに推定するシステムの開発に取り組んだ。人物の姿勢判別を物体検知AIおよび骨格推定AIにより試みた。AIによる姿勢判別の際に不可欠な種々の姿勢をとった人物の画像データをより容易に収集可能とするため、ネット上の画像データや追加学習用のオープンデータセットの有効性についても検討し、知見を得た。また被験者実験より各種姿勢や動き毎の代謝当量を示し、心拍数と代謝当量の関係式を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

体感温度に影響する気温・湿度・気流・放射・代謝量・着衣量の温熱6要因のうち、これまでになおざりにされていた人体側2要因のひとつである代謝量のリアルタイム・非接触な推定方法を、特に様々な分野で導入され、導入された分野でより一層の技術革新を呼ぶ相乗効果を生み出しているAIを用いて試み、その可能性と課題を示した。得られた知見は、今後計画している着衣量のリアルタイム・非接触推定にも生かされ、これらは健康的で快適でありながらより省エネな空調制御技術の発展に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a system that uses AI to determine the posture and movement of the human body in thermal images, and to estimate metabolic rate in real time and non-contact. Attempt was made to determine the pose of person in thermal images, using object detection AI and pose estimation AI. In order to facilitate the collection of various images of person in different poses, which are essential for AI-based pose estimation, the effectiveness of online image data and additional open datasets for training was also considered, and useful datas were gained. Furthermore, the metabolic equivalent (METs) for various postures and movements based on experiments with human subjects were presented. Relationship between heart rate and the metabolic equivalent were also presented.

研究分野：建築環境工学

キーワード：代謝量 姿勢 物体検知AI 姿勢推定AI YOLO POSENET オープンデータセット

### 1. 研究開始当初の背景

エアコンの普及によって熱中症リスクを伴う夏の蒸し暑さが軽減されるなど快適性が向上したが、その一方で、空調用エネルギー消費量の増加が問題となり、また、いきすぎた冷房・暖房による健康への悪影響が懸念される状況もみられるようになった。

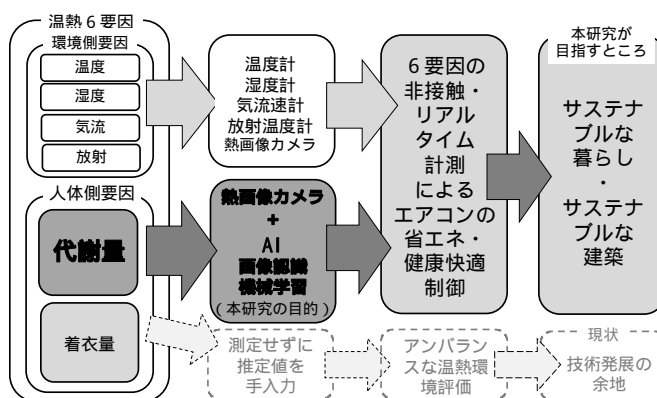
省エネや快適かつ健康的な温熱環境となるよう工夫を凝らした自動制御技術を搭載したエアコンが増え、赤外線熱画像カメラを搭載し気温や湿度に加え放射も測定・評価し、制御するものも増えてきた。また、熱画像カメラによって居住者の体表面温度を測定しその測定結果を制御に反映させるものも市販されるようになった。

しかし、制御をする際の入力情報となる室内の温熱環境の評価については精度向上の余地がある。人間の温冷感覚は気温、湿度、気流、放射の環境側 4 要因と着衣量、代謝量の人体側 2 要因から成る「温熱 6 要因」の影響を受ける。省エネで快適・健康なエアコンの自動制御のためには、温熱 6 要因をできるだけ多く精度よくリアルタイムに測定・把握し制御に反映することが望ましいが、現時点では、最新のエアコンでも測定しているのは環境側要因のみである。その理由は、温熱 6 要因のうち、環境側要因は気温センサーや湿度センサーなどの測定計器によって瞬時に高精度に測定可能であるが、人体側要因である着衣量や代謝量はリアルタイムに測定できないためである。着衣量はサーマルマネキン、代謝量は呼気代謝分析装置と被験者を用いた実験室実験によって測定される。そのため着衣量や代謝量は、実際にその場で測定された値ではなくその代わりに、その部屋で代表的だと思われる居住者の服装や姿勢・運動状態での実験室実験で得られた値が“おそらく適当であろう”と手入力されているのが実情である。温熱環境評価に「環境側要因」の影響を反映させるための技術は著しく進化する一方で、「人体側要因」の影響を反映させるための技術は、その測定が実験室実験によることから、なおざりになっている非常にアンバランスな状況に陥っていると言える。「人体側要因」を「環境側要因」と同様にセンサーでリアルタイムで測定可能とすれば、エアコンにおける温熱環境評価の精度はさらに向上し、それによって快適・健康性と省エネ性がさらに向上する。「人体側要因」を何らかのセンサーで瞬時に測定可能とする技術のニーズは潜在的に高く、特に現在のエアコンに既に搭載されている熱画像カメラで測定可能とする技術であれば、早く普及できると考えられる。

ところで、近年の AI の発展は目覚ましく、画像認識や機械学習などの技術は様々な研究や商品・サービスに導入され、導入された分野でより一層の技術革新を呼ぶ相乗効果を生み出している。画像認識については、カメラの映像から人物を認識し、さらにはその人物の“姿勢”も認識可能となっている。また機械学習の進歩により人物の姿勢の変動を認識し、教師データに基づいた学習を通して身体の“動き”を認識することも可能となってきている。「人体側要因」のうちの代謝量は、椅子座安静状態は 1.0[met]、工場での立位重作業では 3.7[met]というように人体の“姿勢”や“動き”と強く関連することから、代謝量は熱画像カメラと AI および姿勢・動き毎の代謝量データからリアルタイム・非接触に推定可能であると考えられる。

### 2. 研究の目的

1 で述べた背景を鑑み、本研究は、AI により人体を熱画像カメラで撮影した画像データから姿勢や動きを判別し、その判別結果と姿勢・動き毎の代謝量測定データより、代謝量を非接触・かつリアルタイムに推定するために必要なシステムづくりとそのための基礎的なデータの収集を目的とした。



本研究の背景と目的

### 3. 研究の方法

姿勢や動きの判別については、まず追加学習させた物体検知 AI による姿勢判別に取り組んだ。物体検知 AI のうち、判別速度と判別精度が比較的良好とされインターネット上に参考技術情報が豊富に蓄積されている YOLO v5 に、室温を 24 に設定した実験室内で男性 7 名・女性 6 名の被験者に立位・椅座位・投足位の 3 姿勢をとらせて撮影した計 2970 枚の熱画像を追加学習させ、追加学習させた YOLO v5 に任意の姿勢をとった熱画像中の人体の姿勢を判別させた。

また、姿勢推定 AI である POSENET による姿勢判別にも取り組んだ。立位・椅座位・投足位の 3 姿勢をとらせた男女各 3 人の画像中での関節位置を POSENET に推定させ、両肩・腰・両膝・両足首の高さ方向の座標の相対的位置関係から姿勢を判別する可能性について検討した。

また、AI を用いた姿勢判別で必要となる各種姿勢の人物の画像データの収集を、多くの時間と手間を要する自前の写真撮影による方法ではなく、より容易に収集可能とする方法を検討す

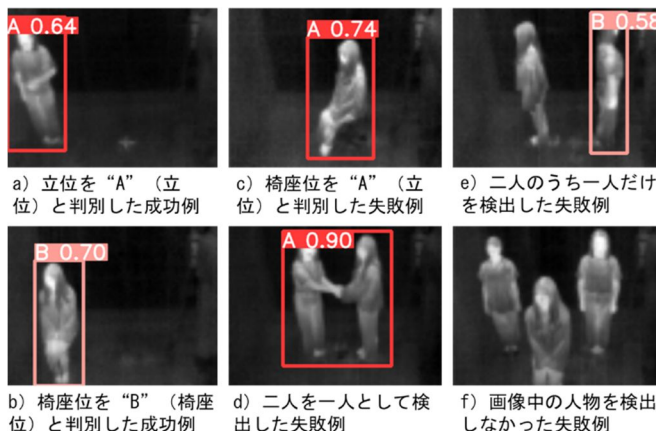
るため、インターネットからの画像検索、写真共有サイトからの検索、デッサン用ポーズリファレンスサイトでの 3DCG データ作成の 3 つの方法により収集し、それぞれの収集方法による画像中の人物の関節位置の判別精度を比較検討した。

また、収集した膨大な数の画像を物体検知 AI に追加学習させる際に不可欠でありながら膨大な手間と時間を要するアノテーション作業を不要とする可能性を検討するため、に Web 上に多数公開されていて 2020 年より検索・利用が容易に可能になったアノテーション済みの学習データセットであるオープンデータセットの一つで、エクササイズや理学療法で人体の姿勢の分析や、スマートホームシステムでの居住者の起居を分析、公共機関での人流や利用者の行動の検知などを目的とした物体検知 AI での活用を念頭において、Eating, Moving, Running, Sitting, Sleeping, Standing の状態の人の画像および画像毎のアノテーションデータから成る "Human\_Pose\_Detection Dataset" により追加学習させた YOLO による姿勢判別精度も検討した。

また、姿勢や動き毎の代謝量のデータの蓄積を目的として、男女各 4 名の被験者と呼吸代謝分析装置を用いて、立位、椅座位、投足位の 3 姿勢および時速 3km, 5km, 7km の歩行・走行運動の計 6 条件で代謝当量を測定した。また、スマートウォッチの普及が進んで現状を鑑みて心拍も測定し、心拍と代謝当量との関係も検討した。

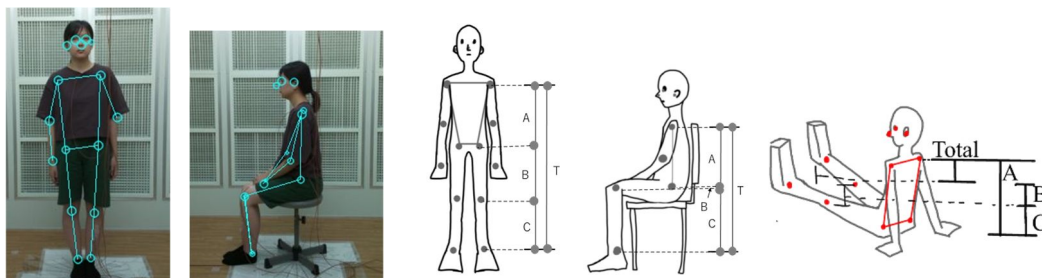
#### 4. 研究成果

追加学習させた YOLO v5 による熱画像中の人物の姿勢判別研究の結果は、姿勢を誤って判別した例が多く、また、画像中の人物を検出できなかった例や複数人をまとめて一人として誤って検出した例なども見られた。総じて、本研究で構築したモデルの姿勢判別精度は高いとは言えなかった。追加学習に必要な数千枚や数万枚とされる画像数に対して本研究の画像数が 2970 枚と少なかったこと、追加学習に利用した画像が暗所での利用やプライバシーへの配慮を考慮して採用したグレースケール化した熱画像であり普通画像よりも色情報が少ないことにより判別が難しいと考えられたこと、判別精度の検討に利用した画像中の人物の姿勢が任意の姿勢で多様であるのに対して追加学習させた画像中の人物が予め規定したパリエーションの乏しかったことなどが原因として考えられ、新たな研究課題が見出された結果であった。



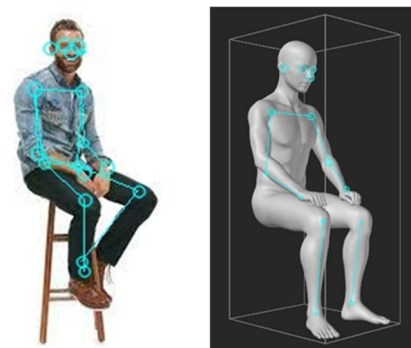
追加学習させた YOLO により姿勢判別させた結果の例

姿勢推定 AI である POSENET による姿勢判別研究では、肩から足首の高さ方向の差を T、肩から腰の高さ方向の差を A、腰から膝の高さ方向の差を B、膝から足首腰から膝の高さ方向の差を C として、立位、椅座位、投足位での A/T, B/T および C/T のばらつきを 6 名の被験者を用いた測定結果から検討した。立位では、A/T, B/T および C/T に方位角や被験者の違いによる差はほとんど見られなかった。椅座位では、方位角の違いによる A/T, B/T および C/T の差がわずかに見られた。背後からの画像では被験者の違いによる差もわずかに見られた。これらの差は、より高い位置から撮影した画像でより大きくなる傾向が見られた。投足位では A/T, B/T および C/T に被験者や撮影方位角の違いによる差が最も大きくなった。特に A/T と B/T は方位角や被験者の違いによる差が大きかった。これらの差は、より高い位置から撮影した画像でより大きくなった。正面からの画像では、A/T, B/T および C/T の値からは立位と椅子座の判別は難しいことが示唆された。FL+1100mm と比べて FL+1800mm の画像による方が、より高い精度で姿勢判別ができる可能性があることが示されたが、高い位置から撮影した画像で A/T と B/T の方位角や被験者の違いによる差が大きかったことから、A/T, B/T および C/T の値のみからは姿勢判別は難しいと考えられる結果となった。



POSENET で関節を判別した結果の例 (左 2 枚) と 4 関節部位の位置関係からの姿勢判別方法の説明図

追加学習用画像データの収集方法および収集方法による姿勢判別精度の検討研究では、検索サイトで任意の姿勢を検索ワードにして画像検索する方法には、実際の空間での実態に近い同じ姿勢でも様々な違いを含む画像も検索できることや、ブラウザのオプション機能により検索結果の画像から選択したものを一括してダウンロード可能である利点があることが見出された。画像共有サイトから API により任意の姿勢条件・枚数の画像を検索・ダウンロードする方法では、一度に大量の画像をダウンロードできる一方で、適当なワードで検索する工夫が必要であり、ダウンロード後の画像の選択作業が必要となる問題点が明らかになった。得られた画像中の人物での判別精度については、立位や椅座位では、全身が写っている画像であれば一定以上の精度で姿勢判定可能である一方で、臥位では立位や椅座位と比較して、推定の精度が低い傾向がみられた。また、3DCG 作られた人体モデルでの推定精度は、実際の人物の画像と比較して低い傾向がみられたが、姿勢間で推定精度の差は、実際の人物が写った画像と比べて、小さい可能性がある結果となった。



インターネットから収集した画像(左)および  
デザイン用ポーズリファレンスサイトで作成し  
た 3DCG 画像(右)中の人体の関節を POSENET  
により判別させた例

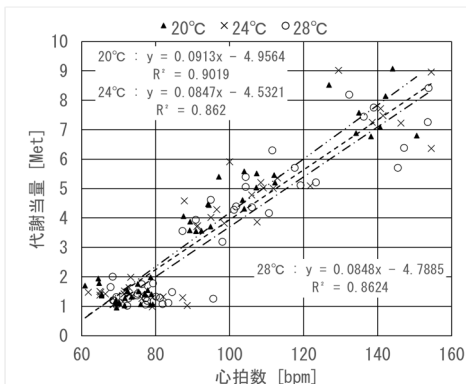
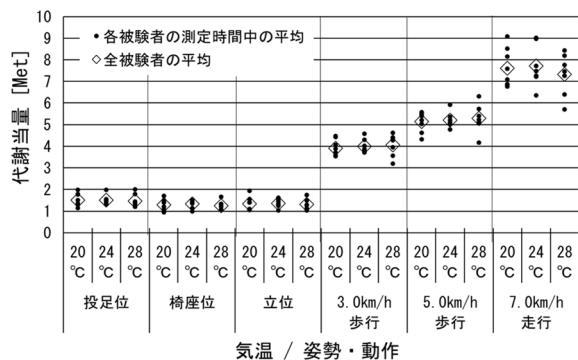
オープンデータセットにより追加学習させた YOLO による姿勢判別精度を検討した結果、普通画像については立位の人体は、複数人が映った画像であっても、一定以上の精度で正しく姿勢判別ができた。しかし、椅座位の人体については、腰や膝が曲がっている状態が分かりやすい横向きである場合には 5 割程度の判別精度であったが、正面や背面を向けた人物の姿勢判別精度は低く、Standing や Moving と間違っ て判別された。グレースケール化した熱画像については、正しく姿勢を判別した例はなく、多くの画像で人物の検知もなされない結果となった。椅座位の人体、特にカメラに対して正面や背面を向けた人物の姿勢判別精度が低かった原因の一つに、学習の過程で過学習を起こしていたことの影響があると考えられた。本研究で用いたオープンデータセットは、判別したいクラス (Eating, Moving, Running, Sitting, Sleeping, Standing)

の数に対してデータ数の少なかつたことが考えられる。グレースケール化した熱画像では正しく姿勢を判別できず、多くの画像で人物の検知もされなかった原因の一つに、オープンデータセットがカラー画像であったことが考えられる。暗所での判別やプライバシーへの配慮から熱画像中の物体検知に対する需要は少ないと考えられることから、熱画像のデータセットで追加学習した物体検知 AI での姿勢判別精度の検討という新たな研究課題が見出された。



カラー画像とグレースケール化した熱画像での判別結果の例

姿勢や動き毎の代謝当量の測定研究では、平座位、椅座位、立位で代謝当量は 1.3Met 程度であって、姿勢による差があまりないことが示された。また、運動強度が高くなるほど代謝当量の個人差が大きくなること、心拍と代謝当量に高い相関関係があること、一方で代謝当量への気温の影響がほとんどないことを示した。



姿勢・動き毎の代謝当量測定結果(左)と温度条件毎の代謝当量と心拍数の関係(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大和 義昭, 木村 竜士, 宋 城基
2. 発表標題 インターネットから収集した画像の姿勢判別AI用データへの利用可能性に関する研究
3. 学会等名 第46回人間-生活環境系シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大和 義昭, 木村 竜士, 宋 城基
2. 発表標題 骨格検知モデルによる代謝量推定のための姿勢別の身体部位座標のデータベース構築の試み
3. 学会等名 第62回日本生気象学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大和 義昭, 木村 竜士, 宋 城基
2. 発表標題 代謝量推定のための骨格推定AIを利用した姿勢判別の試み
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究報告会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林 竜輔, 大和 義昭, 宋 城基, 木村 竜士
2. 発表標題 低解像度熱画像からの代謝量推定に関する研究 ~姿勢判別用学習モデルの構築~
3. 学会等名 第44回人間-生活環境系シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大和 義昭, 木村 竜士, 宋 城基
2. 発表標題 インターネットから収集した画像の姿勢判別AI用データへの利用可能性に関する研究
3. 学会等名 第46回人間-生活環境系シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大和 義昭, 木村 竜士, 宋 城基
2. 発表標題 代謝量推定のための骨格推定AIを利用した姿勢判別の試み
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究報告集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大和 義昭, 木村 竜士, 宋 城基
2. 発表標題 骨格検知モデルによる代謝量推定のための姿勢別の身体部位座標のデータベース構築の試み
3. 学会等名 第62回日本生気象学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宋 城基  (SONG Sung-Ki)  (70422813)	広島工業大学・環境学部・教授    (35403)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	木村 竜士  (Kimura Ryushi)  (90571810)	高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・准教授     (56401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関