JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	室内空調における空間認識手法と人の快適性の評価モデルに関する研究
Author(s)	小松，佑人
Citation	
Issue Date	2017-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/14248
Rights	
Description	Supervisor:小谷　一孔，情報科学研究科，博士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

室内空調における空間認識手法と人の快適性の評価モデルに関する研究

北陸先端科学技術大学院大学

小松 佑人

博士論文

室内空調における空間認識手法と人の快適性の評価モデルに関する研究

小松 佑人

主指導教員　小谷 一孔

北陸先端科学技術大学院大学

情報科学研究科

平成 29 年 3 月

Abstract

In the past, consumer electrical products have evolved in response to the needs of users, such as “entertainment”, “convenience” and “comfort”, and in response to changes in society and living environments. More recently, there have been demands for products with more advanced functions, friendlier user interfaces, and lower energy consumption.

Regarding the need for comfort, we discuss how this can be achieved by optimally controlling the temperature and humidity to obtain an environment that is close to nature. This drive towards comfortable air-conditioned living environments is aimed at the use of air-conditioning as a comprehensive environment control technology. Each company has been promoting the development of energy-saving technology to implement air conditioning that provides comfort by satisfying various criteria such as the changing seasons, the differences in environmental conditions between Hokkaido in the north and Okinawa in the south, and the increasingly airtight nature of residential buildings.

While the development of energy-saving technology is in progress, as the performance of air conditioning improves, each company will use temperature detection sensors (thermopiles) and infrared sensors (pyroelectric sensors) to gather information such as entry/exit of people to/from a room, their positions inside the room, their level of activity, and the number of people in the room, and provide energy-saving air conditioning by controlling parameters such as the speed and direction of air flow based on this information. Due to these sorts of advances in air conditioning, the need has arisen for technology that can estimate the layout of a room (i.e., the positions of the walls, floor, beams, doors, etc.) and fine-tune the airflow speed and direction of accordingly.

In this article, we consider methods in which one or more cameras are mounded on domestic air conditioners, and the images captured by these cameras are used to detect the room layout. The following three methods can be used for detecting the room layout:

- Using multiple cameras
- Using infrared sensors and/or ultrasound sensors
- Using a laser

One of the methods for detecting the room layout estimates the positions of objects by using the differences between pictures captured with multiple cameras. This method has had issues of high cost due to the need for multiple cameras, and the constraints imposed on the camera positioning and the size of the equipment housing. On the other hand, the cost issues can be solved by a method that uses infrared or ultrasound sensors, but since the number of pixels is small, there have been issues such as low resolution and short detection range. There is also a method that uses a laser, but the high cost and safety concerns have become issues.

Therefore, we worked on the research and development of a technique for room layout detection with a single camera to achieve both low cost and high precision. A room layout detection system using this technique detects the positions of objects and whether or not doors are open from images captured using a single camera. Also, since this technique was developed with a view to applying it to household appliances such as air conditioners, the processing of images captured using a single camera can be performed using little CPU processing power.

With this technique, the shape and size of rooms and whether doors are open or closed can be detected from a picture captured by a camera mounted on a domestic air conditioner, and the air flow direction and speed can be automatically controlled based on this information. This technique uses knowledge about the structure of a room given beforehand as a model to detect the interior structure of the building. For example, the air conditioner in a living room could automatically switch between single-room and double-room modes depending on whether or not the door between the living room and an adjoining room is open, or automatically adjust the blower swing orientation according to the size of the room.

An attempt to evaluate the thermal comfort was made by Dr. Fanger in 1973. Dr. Fanger proposed PMV (Predicted Mean Vote) that was based on heat exchange between environment and human. On the environment aspect, air temperature, mean radiant temperature, relative humidity and air velocity were included. On the human aspect, clothes and work were included.

The use of controlling supply air can allow changes in local heat exchange between environment and human. However, Dr. Fanger did not offer a method of estimating the local thermal sensation changes. In this study, we constructed the evaluation index of local thermal comfort based on the changes of human body temperature and air temperature. We also consider the basic model of thermal comfort based on the changes of room size and arrangement of furniture.

Keywords: PMV, Thermal comfort, Partition recognition, Layout recognition, Furniture detection

目次

1. 序論 1
1.1 研究の背景 1
1.2 従来技術 4
1.2.1 空間認識 4
1.2.2 快適性 5
1.2.3 現状の課題 10
1.3 本研究の目的 12
2. 空調制御 13
2.1 空調制御の歴史 13
2.2 快適性向上技術 16
3. 人の快適性 18
3.1 従来の快適性の評価モデルと課題 18
3.2 本研究の位置づけ 20
3.3 ６要素のうちの気流 21
3.4 PMV との関係 23
3.5 空調制御のニーズ調査 25
3.6 まとめ 26
4. 空間特性解析 27
4.1 部屋の形状特性 27
4.2 実環境での間取り検出結果 37
4.3 設置物の形状特性 42
4.4 実環境での家具検出結果 45
4.5 床材の形状特性 51
4.6 実環境での床材検出結果 53
4.7 まとめ 57
5. システムの構築と実証実験 58
5.1 実験室 58
5.2 足検出制御の概要，実験計画および評価 60
5.2.1 足検出制御の概要 61
5.2.2 実験計画 62
5.2.3 評価 63

5.3　評価モデルの創出 65
5.3.1　PMV における気流 66
5.3.2　PMV への部屋の構造検出技術の効果の組み込み 68
5.4　まとめ 74
6.　結論 75
7.　謝辞 77
8.　参考文献 78
9.　本研究に関する発表論文 84

1. 序論

1.1 研究の背景

空調設備は，人を取り巻く温熱環境を調整するための設備である．その主な目的は，暑さ，寒さといった熱的な不快につながる要因を除去することである．暑さ，寒さといった不快感には，様々な場面で遭遇する．

地球儀を眺めながら，空調設備を使うことでより快適な温熱環境を得られる地域を考えてみる．地軸の傾いた地球では，南半球であっても，北半球であっても，暑い夏と寒い冬はやってくる．北極や南極といった凍てついた地域で生活する場合には，空調設備があることで，より快適な生活を送れる．極地以外でも，寒さを感じやすい地域は多くある．緯度の高い地域や標高の高い地域は気温が低く，空調設備により快適性を向上させることができる．砂漠のように湿度の地域は比熱の大きな水が空気中に少なく，太陽光による熱を得られず雲による放射冷却の妨げのない夜間は低温になりやすい．逆に，赤道直下の地域は太陽からの豊富な熱量の供給により，一年中温暖であり，一年中空調設備を活用することができる．赤道直下以外でも，夜間の涼しさを蓄えられる水の少ない砂漠のような地域では，日中の気温は高くなりやすく，そのような地域で生活する際には空調設備は活躍する．その逆に，島国や半島などでの高い湿度は，日中の高い気温を水が貯えることで夜間の気温も高くなりやすいのに加え，人の体からの汗の蒸発による放熱を妨げ，暑さを感じやすくさせる．さらに，汗が蒸発しないことにより，着衣の通気性や透湿性が低下し，一層放熱が抑制され，暑さが増す．地域により空調設備に必要とされる機能は異なるものの，あらゆる地域で空調設備はより快適な温熱環境を創造することに貢献できる．

地球儀を拡大し，施設単位で空調設備の活用例を見てみる．住宅の壁にはルームエアコンが据え付けられており，オフィスの天井には空調設備の吹き出し口がのぞいている．人が日中や夜間の長い時間を過ごす住宅やオフィス以外にも，様々な場所で空調設備は用いられている．例えば，近所のスーパーや大型ショッピングモールなどの商業施設では，施設内に冷蔵庫や照明などの様々な発熱源を持つのに加え，平日と休日とで在室人数が大きく異なるという特徴に対応した空調設備が求められる．保育園や大学などの教育施設にも空調設備は導入されつつあるが，大きな窓からの大きな熱の流入・流出や，在室人数の多さによる熱負荷の大きさと換気による熱負荷の増大が特徴となる施設である．美術館や科学館といった文化施設にも空調設備は必要である．住宅やオフィスと比較して天井高の高い空間への空調となるのに加え，空調設備により美術品などを高温高湿による変質から保護する必要がある．食料品などの物流倉庫も，常温を維持するのか，冷蔵庫の役割を果たすのか，冷凍庫の仕様が必要なのかといった用途に応じた空調設備が設置されている．自動車や鉄道のような移動手段においても，人の使用は一時的であるが，その短い時間における快適性を高めるために空調が使用されている．

次に，空調設備の地理的な必要性に加え，時間的な必要性についても考えてみる．まず，壁にかかったカレンダーを眺めてみる．７月や８月のカレンダーには輝く太陽や大輪のひ

まわりが描かれることがあるように，夏は暑く，室内の熱の除去のために空調設備が活躍する．さらに，冷房時に空調設備の室内機にある冷えた熱交換機に室内の空気が触れることにより，室内の空気の持つ水が熱交換機に凝縮し，除湿される．室内の空気が除湿されることにより，汗の蒸発が促進され，人の体は冷やされる．つまり，冷房は室温の低下に加え，湿度を低下させることにより，涼しさを提供している．１２月や１月のカレンダーには雪だるまや雪合戦の様子が描かれることがあるように，冬は寒く，室温を高くするために空調設備が活躍する．空調設備による暖房は，加熱した熱交換器に室内の空気を触れさせ室内に吹き出すことで，室内を加熱し，人は温かさを感じる．しかし，室内へ温風を吹き出すことは，人に風を当てることにつながる．温かい風が当たるのならば温かさを感じるが，空調設備から吹き出された気流に引き込まれた周囲の室温の空気が人に触れると，温かくはないので寒さを感じる．熱交換器により加熱された空気が人に供給されないと，冬に室内で扇風機を回すのと同じ状態となってしまい，寒くなってしまう危険性がある．

次に時計に目を移す．冬の朝は寒い．冬は室温と外気温の差が大きく，暖房を停止する夜間に室内から屋外への熱の流出量が大きく，それに伴い室温は大きく低下する．さらに，断熱材となる布団の内部は体温により温められ，体温に近い布団の内部と外気温により冷やされた室温との差は大きい．布団から出ると，人の体温と室温との差が大きく，人の体からの放熱量が大きいため，強い寒さを感じる．そんなときには，空調設備が活躍する．室温を上昇させ，室温と体温の温度差を小さくし，体からの放熱量を減らし，寒さを減らしてくれる．冬であっても昼頃には太陽光による室内の加熱や外気温の上昇により，朝と比べれば室内で寒さを感じる程度は軽減される．一方，夏は明け方が過ごしやすく，外気温も高く日射による室内の加熱も大きい日中は暑さによる不快を感じやすい環境となる．この場合，空調設備は，室温より低い温度の冷媒で室内機の熱交換器を冷却する．冷却された熱交換器に室内の空気を触れさせることで，その空気の持つ熱を屋外へ持ち出す．熱が除去された空気を再び室内に戻すことで，室温は下がり，体からの放熱量を増やすことができる．

このように，様々な地域や施設，様々な季節や時間帯で空調設備が活用されている．

空調設備は，人を取り巻く温熱環境の快適性を向上させるために，具体的には人の使用する空間の温度と湿度，気流の３つの要素に対して直接関与している．空調設備の室内機の内部には，室外機との間と循環する冷媒により温められ，あるいは冷やされる熱交換器が収められている．空調設備は，室内の空気を室内機に取り込み，温められた熱交換器に触れさせ，再び室内に戻すことで，室温を調整する．冷房時には熱交換器を冷却することにより，室温を下げる．冷房時に冷えた熱交換器に結露させることにより除湿が可能であり，熱交換器に触れさせる室内の空気の量を調整することで室内の湿度を調整している．熱交換器により加熱や冷却された空気は，軸流ファンやプロペラファンにより室内へ押し出され，ルーバーにより吹き出し方向が決められる．

空調設備で調整できる要素のうち，従来は，その温度と湿度のみを空調設備自体が検出

しており，風向や風速は使用者の設定に任せていた．しかし，地域や施設，季節や時間帯が様々に異なる使用条件に対し，温度と湿度のみに基づく制御では十分とは言えない．美術館と住宅とでは天井の高さが大きく異なる．天井の高さが違うと，空調設備が設置されている位置から温めたい足元までの距離が異なり，人の足元を温めるために必要な吹き出し風速が異なる．住宅に限定しても，横の壁の近くに据え付けられている空調設備と，壁の中央に据え付けられている空調設備とでは，必要とされる水平方向の風向の範囲が異なる．すなわち，壁の中央に据え付けられている空調設備では，右から左まで幅の広い風向の範囲が使われる．他方，壁の近くに据え付けられている空調設備では，近いほうの壁に向けて吹き出して壁を温めたり冷やしたりしないように，風向の範囲は人のいる可能性のある範囲に限定されていることが望ましい．部屋と部屋との間を襖により間仕切っている場合，その間仕切りを開閉することで使用する部屋の広さを調整することができる．空調設備により冷暖房していた部屋と，空調されていなかった部屋との間の間仕切りが解放された場合，間仕切りの手前と奥とで空調の必要性が異なる．冷房時にはルーバーは水平方向に向けられることが多いが，暖房時には下向きとされることが多い．しかし床にはテーブルやソファなど吹き出される暖気にとっての障害物は多くある．人のいない方向に向けて暖気を吹き出せば，その周囲には暖気に引き込まれた室温による寒さを感じさせる危険性のある気流が生じる．すなわち，暖気は足に供給されなければ，寒さの一因となってしまう危険性がある．

本研究は，現在の空調設備が抱えるこれらの問題を解決するための方法を提案するものである．本研究では，空調設備に設置されたカメラで空間を撮影し，撮影結果を画像処理し，空間構造を検出する．そして，検出した空間構造に応じて風向や風速を制御することで，現状の問題点を解決できるのに加え空間構造の変化にも応じられる空調設備につなげる．

さらに，本研究の成果は，空調設備の機能を向上させることに留まらない．従来は，風向や風速の制御は，使用者自身が調整していた．ある風速，ある風向を試し，不都合があれば調整し，座る位置を変えたり襖をあけたりするなど変化があれば再び調整を繰り返す必要があった．本研究の成果は，空調設備自体により，空間構造を検出し，その結果に応じた制御を実行することを可能とする．手間がかかるのに加え十分に適切ではない風向や風速の設定を不要とすることにつながる．

1.2 従来技術

1.2.1　空間認識

これまでのセンシング技術は,「娯楽性」「利便性」「快適性」というニーズと，社会や生活環境の変化に応えて進化してきた．近年では，各機器の高機能化と使い勝手を向上させるユーザインタフェース，省エネルギ性が強く求められている．家電製品進化の過程には，大きく 2 つの流れがある．

(1) 情報，娯楽，生活の楽しみの提供からスタートしたラジオ，テレビ，オーディオの流れ…「娯楽性」

(2) 家事労働の省力化など，生活が便利になることを追求してきた洗濯機や冷蔵庫などの白物家電の流れ…「利便性」

さらに，白物家電による生活レベルの向上とともに，住環境をより快適にする空調機器の進化，さらに住宅設備機器としてオール電化機器が加わることで，現在では「快適性」が 3 番目の大きな流れとなっている [1]．以下，このような「娯楽性」,「利便性」,「快適性」というユーザのニーズに応えることで成長してきた家電製品の進化過程と現状，上記ニーズに対応する技術について述べる．

1 つ目のニーズの「娯楽性」について，家庭の中でのテレビを例として挙げる．家庭におけるテレビは，一家団らんの時代の象徴であり，放送というインフラを通して，国民に共通の娯楽を提供するものであった．

2 つ目のニーズの「利便性」とは，家電製品に対する普遍的なニーズの一つである．利便性の追求は家事の省力化とも置き換えられ，それは家事作業の「工程」,「時間」,「負担」を低減することを意味する．利便性を突き詰める一つの形が自動化である．洗濯機は一槽式，二槽式，全自動洗濯機と自動化が進み，乾燥機能が追加された．掃除機は，高い捕塵性能とともに，使い勝手に対するニーズが高い．掃除機も将来全自動のロボット掃除機が主流になる時代が来ると考えられるが，現在の技術ではまだ課題が多い．

3 つ目の「快適性」とは，温度，湿度を最適にコントロールし，さらに，自然に近い環境を実現することにある．こうした快適な空調住環境をめざすのが総合空調としてのエアコンである．四季の温度変化，北海道から沖縄までの環境条件の違い，住宅の高気密化などの諸条件を満足し，快適性を追求するエアコンを実現するため，各社は省エネルギ技術の開発を進めてきた．省エネルギ技術の開発が進む中，エアコンの高機能化に伴い，熱検出センサ(サーモパイル)や赤外線センサ(焦電センサ)を用いて，人の出入りや室内での居場所・活動量・在室人数などの情報を把握した上で，風向きや風量を制御することにより，節電運転を行うエアコンが各社から発売されている．このようなエアコンの高機能化に伴い，室内の構造，すなわち，壁面，床，梁，扉，家具などの位置を推定し，細やかに風向きや風量を制御する技術が求められるようになってきた．

間取りや家具を検出する主な方式として，以下 3 つの方式が考えられる．

・複数のカメラを用いる方法

・超音波センサを用いる方法
・レーザを用いる方法

複数のカメラを用いる方法は，撮影した画像間の差分を利用して，対象物の位置を推定する．この方法では，複数のカメラを必要とするために高価となることや，カメラ位置の制約や筐体の大きさの制約を受けるという課題がある．超音波センサを用いる方法は，コストの課題は解決されるが，センシングにより得られる情報量が少ないため，精度の低さや検出できる距離の短さが課題である．また，レーザを用いる方法は，コストや安全面に課題がある［2］.

1.2.2　快適性

（１）快適性の概要

空調設備は，特に室内の温熱環境の快適性を向上させるための機器である．もちろん，夏に活躍する帽子や日傘，ビーチパラソルやドライミスト，冬に活躍する焚き火やダウンジャケット，屋外ガスストーブやパラソルヒーターなど，屋外で過ごす際の熱的快適性を高める工夫は様々である．ただし，本研究では室内環境の熱的快適性を向上させることを主な目的とした空調設備を対象とする．

室内の温熱環境に対し，人は暑さや寒さを感じる．その暑さや寒さの大きさは，人の体にどれだけ多くの熱が入り，あるいは人の体からどれだけ多くの熱が失われたのかにより決まる．人は，暑さ寒さから逃れるために，無意識に行動を起こしている．寒い冬，暖房で温められた室内から，出勤のために外へ出るときには上着を羽織り，寒さを低減させようとする．そして暖房されたオフィスについたら，暑さを避けるために上着を脱ぐ．室内で寒さを感じるようになれば温かいコーヒーやひざ掛けで温かさを得る．夏には，汗をかくような暑さであれば薄着になり，放熱を増やそうとする．まだ暑ければ扇風機や空調設備を使用して一層の放熱の促進を図る．それでもまだ暑ければ風速を高くし，設定温度を下げる．このように，人は様々な手段で熱的な快適性を高めている．

（２）熱の移動経路

このように，熱的な快適性は，人と周辺環境との間の熱の授受により調節することができる．人と周辺環境との間に限らず，熱が移動する経路は，対流，放射，蒸発，伝導の４種類ある．

対流による熱の移動は，固体と流体の間での熱交換であり，皮膚表面と室内空気の間の対流による熱の移動量は以下の式にて表すことができる．

熱移動量(W)＝対流熱伝達率(W/m^{2}K)×温度差(K)×面積(m^2)×有効対流面積率(-)　(1)

- 対流熱伝達率は対象物の形状や温度，流体の速度により異なる．
- 固体と流体の間の温度差が大きいほど対流による熱の移動量は大きい．
- 固体と流体の接触する面積が大きいほど熱の移動量は大きい．
- 固体の表面積のうち，流体による熱の影響を受ける面積の割合が大きいほど，熱の

移動量は大きい．仰臥姿勢の人体の背面や，椅座時の人体の臀部，立位時の人体の代替と大腿の間など，空気の移動が小さい部分については対流による熱の移動が生じにくく，対流による熱の移動に無効であると考え，熱交換に寄与する面積から割り引かれる．

放射による熱の移動は，電磁波の形での熱の移動であり，放射による熱の移動量は固体や流体の表面の位置関係及び温度差により決まる．

熱移動量(W)＝放射熱伝達率(W/m^{2}K)×放射率(-)×形態係数(-)×温度差(K)×面積(m^2)×有効対流面積率(-)　　(2)

- 固体の表面積が大きいほど放射による熱の移動量が大きい．
- 距離が近く，面積が大きいほど熱の移動量が大きい．
- 表面が黒色艶消しであるほど熱の移動量が大きい．
- 表面温度が高く温度差が大きいほど熱の移動量が多きい．

蒸発による熱の移動は，状態変化に伴う熱の移動であり，人と周辺環境との間の熱の移動においては主に汗の蒸発による熱の移動である．水が 1kg 蒸発すると，気化熱により熱が失われる．逆に結露すると熱が加わる．

蒸発による熱の移動量(W)＝対流熱伝達率(W/m^{2}K)×湿度差(kg/kg')×濡れている面積(m^2)×物質移動係数(Kkg'/kg)　(3)

- 蒸発による熱の移動量は気流速度が大きく対流熱伝達率が多いほど大きい．
- 湿度差が大きいほど熱の移動量が大きい．
- 蒸発に寄与する面積が大きいほど蒸発による熱の移動量が大きい．

伝導による熱の移動は，立位の時の足の裏や椅座の時の臀部，仰臥位の時の背部など固体と固体とが直接接する部分での熱の移動であり，温度差や固体の熱の通しやすさにより決まる．伝導による熱の移動量は，以下の式にて表すことができる．

伝導による熱の移動量(W)＝熱伝導率(W/mK)/厚さ(m)×温度差(K)×面積(m^2)　(4)

すなわち，伝導による熱の移動量は以下の特徴がある．

- 熱が貫通する物体の物性（熱伝導率）が大きいほど熱の移動量は大きい．
- 熱が貫通する物体の厚さが薄いほど熱の移動量は大きい．
- 熱が貫通する物体の一方の表面温度と他方の表面温度の差が大きいほど，熱の移動量は大きい．
- 熱が貫通する物体の面積が大きいほど熱の移動量は大きい．

（３）熱的快適性に関する温熱６要素

人の熱的快適性は，以下の式のように，人と周辺環境との間の熱収支に基づいて考える．

代謝量＋機械仕事＝対流による熱移動＋放射による熱移動＋蒸発による熱移動＋伝導による熱移動＋呼気による対流熱移動＋呼気による蒸発熱移動＋蓄熱　　(5)

上の式で表すことのできる熱的な快適性は，主に６つの要素から成り立っている．室温，湿度，対流，放射，着衣量，代謝量がその６要素である．室温，湿度は天気予報などでも

見聞きする身近な要素である．室温が人の皮膚の温度より高ければ，人の体は温度差による放熱ができず，体の中で発生した熱が体に溜まり，暑さを感じるようになる．夏に感じる蒸し暑さは，高い室温に加え，高い湿度も一因となっている．湿度が低ければ，汗が蒸発して気化熱により皮膚は冷やされる．その一方で，湿度が高ければ，かいた汗は蒸発せずに水滴となり，体を冷やすことなく体を滴り落ちる．対流は気流による放熱への影響を指す．気流の速さが大きくなるほど気流と皮膚との間の熱の交換は促進される．団扇や扇風機は，人の周辺の気流速度を高めることにより，体からの放熱を増やし，涼しさを得ることに寄与する．気温が高くても，鍾乳洞に入るとひんやりと感じる．その一方で，気温が低くてもキャンプファイアの近くではジリジリトした暑さを感じる．さらに，地球は太陽の熱で温められている．発熱側と受熱側との間を，物体を介せずに熱が電磁波の形態で伝わることを放射あるいは輻射と呼ぶ．室温，湿度，対流，放射は環境側の要素である．それに対し，残りの２要素，着衣量と代謝量は人側の要素である．夏に暑ければ薄着となり，冬に寒ければ厚着をしてひざ掛けをする．このように衣類など人の身に着けるもので暑さ寒さへ対応することも，熱的快適性を向上させることのできる手段である．冬の駅伝の走者は，ランニングシャツに短パンで走っている．走者を応援する人たちは，ダウンジャケットを着て手袋をつけ，ニット帽をかぶっている．走者と沿道の人たちとは同じ温熱環境にいるものの，着衣による熱的快適性の調整の程度が大きく異なる．この差は，体内で発生させている熱量の差に起因する．体が安静にしているときには，内臓が大きな発熱源であるが，運動している人にとっては筋肉が主な発熱源となる．走者は下腿や大腿，腹部や背部の筋肉を活発に活動させることで発熱し，その熱を体の外に逃がすために薄着となっている．沿道で応援している人たちは，立ってはいるものの筋肉の活動量は走者に比べるとはるかに小さく，体からの放熱を抑制するために分厚い断熱材を身にまとっている．

これらについて，具体的に示すと以下のようになる．

対流による熱移動(W)＝人体の対流熱伝達率(W/m^{2}K)×着衣の熱効率(-)×（皮膚温―気温）(K)×皮膚表面積(m^2)×有効対流面積率(-)　(6)

放射による熱移動(W)＝人体の放射熱伝達率(W/m^{2}K)×着衣の熱効率(-)×（皮膚温―放射温度）(K)×皮膚表面積(m^2)×有効放射面積率(-)　　(7)

蒸発による熱移動(W)＝対流熱伝達率(W/m^{2}K)×ルイスの係数(K/kPa)×着衣の透湿効率(-)×（皮膚の飽和水蒸気圧―周辺環境の水蒸気圧）(kPa)×皮膚表面積(m^2)×濡れ面積率(-) (8)

伝導による熱移動(W)＝接触部分による熱移動(W)＋着衣を通した熱移動(W)＝実測値(W/m^2)×接触面積(m^2)＋（(1/着衣の熱抵抗(clo)）×（皮膚温―着衣の表面温度）(K)）×着衣に覆われた体表面積(m^2)(9)

（４）温熱指標

温熱環境の６要素は，それぞれ個別の評価指標として用いることも可能であるが，一つの指標としてまとまっていると，温熱環境の総合評価指標として便利である．以下に，室

内の温熱環境を評価する代表的な指標を挙げる．

気温は，最も身近な温熱環境指標と言える．気温は，体からの熱の移動において，対流による熱伝達量に大きく影響する要因である．気温と体温を比較して，気温が高ければ体からの放熱は増え，逆に気温の方が高ければ気温から体に熱が流入する．そのため，気温が高いほど熱的な不快感につながる．

不快指数は，高温多湿の日本では長く使用されてきた暑熱環境の不快さを表す指標である．温度と湿度に基づいて算出することができる．

作用温度は，人と周辺環境の間での主な熱の移動経路である対流と放射に着目した指標である．対流と放射による周辺環境と人との間の熱交換量が同じであれば，その熱量の比率によらず同じ作用温度であるとしている［3］．

SET*（New Standard Effective Temperature 新標準有効温度）は，人体と周辺環境との間の熱収支に基づく体感温度である．人体の熱的な構造をシェルとコアの二層に分けたモデルにより，皮膚温を推定することにより熱収支を算出する［4］［5］［6］．

PMV（Predicted Mean Vote 予想平均温冷感申告）は，熱的中立な状態をゼロとして，暖かい側の申告を正，寒い側の申告を負とした温冷感を予想する指標である．人体の熱収支から温冷感覚を推定することができる指標で，ISO7730 で規格化されている［7］．

（５）人の取り組み

周辺の温熱環境と人体の間での熱収支が平衡でなくなり，放熱あるいは蓄熱が優位となった場合，熱的な不快感が生じる．人体は，熱的な平衡を保つため，さまざまな自律した機構を持っている．熱的に平衡に近い場合は，末梢部位の血流量が調整される．熱的に平衡に近い場合，手や足の皮膚表面温度は３２度程度である．周辺の気温がやや低い場合には，手や足に供給される血流量は減少し皮膚温は低くなり，周辺環境との間の温度差を小さくする．それにより，放熱量を低減している．血流量の調節だけでは熱平衡を維持できない場合，人体は震えにより代謝量を増大させる．震えることで筋肉を動かして発熱し，放熱との釣り合いを保とうとする．ただし，震えによる産熱は，体が貯えた糖や脂質といったエネルギを消費する．そのため，血流量の調節が震えに先立ち生じ，エネルギの消費を抑制する．その他，寒さを感じたら着衣量を増やすことで放熱の抑制を図ったり，体を丸めて縮こまることで放熱面積を縮小させたり，暖房をつけるなどの行動を起こすことによる熱平衡の維持が図られる．

一方，周辺の気温がやや高い場合には，手や足の血流量が増え皮膚温は高くなる．皮膚温を高くすることで，周辺の空気との間の温度差を得ようとし，放熱量を増大させようとする．周辺の気温がより高く，皮膚温と周辺の気温の温度差が小さい場合や周辺の気温の方が高い場合，皮膚からの温度差による放熱が期待できない．そんな暑熱環境では，人の体は，汗をかき気化熱で体を冷やすことを試みる．ただし，発汗は体の中の水分を消費するため，暑熱環境への対応は，まず血流量調節が行われる．その他，暑さを感じたら着衣量を減らす，扇風機をつけて対流や蒸発による放熱の増加を促す，空調設備を使用して室

温を下げるなどの行為による体温調節も併せて行われる．

（６）空調設備の取り組み

空調設備は，熱的快適性を高めることのできる設備である．冷房を使用することで，室内の空気の温度を下げることができる．室温が下がることで，皮膚温と周辺空気の温度差が大きくなり，皮膚表面からの放熱量が増える．また，暖房を使用することで，室内の温度を上げることができる．室温が上がることで，皮膚温と周辺空気の温度差が小さくなり，皮膚表面からの放熱量を少なくすることができる．

（７）建物としての取り組み

建物は，室内と室外の温熱環境の境界としての役割を持っている．住宅においては，壁には断熱材が充てんされ，屋外の高温多湿な空気と日射が室内に流入することを防いでいる．一方，窓は眺望を得るために高い透明度を持っている．そのため，夏の日射を室内に通しやすく，室内を暑熱環境にする方向に寄与する．また，冬季の低温の外気に対しても壁の断熱材は室内の熱が屋外へ流出することを防ぐのに役立つ．その一方で，窓は熱の流出を防ぐ能力が低く，暖房などにより室内に供給された熱が屋外に流出する主な経路となる．また，低温により冷やされた窓では，室内の高温な空気においては飽和しない水蒸気が露点となり結露する．

室内の熱的快適性を高めるために，主に電力を消費して室内の温度を調節するのが空調設備であるのに対し，そのエネルギの屋外への流出を防ぐ断熱材となるのが建物である．建物の断熱性能を高めることは，室内の熱的快適性を高めることに加え，熱的快適性の維持に必要なエネルギ量を削減することにつながる．近年，建物に関する省エネルギ性能が様々な形で評価・規定され，熱的快適性や省エネルギ性に対する建物の役割が増している．

（８）地域としての取り組み

室内の熱的快適性は，建物の断熱性能に加え，屋外の気温にも影響を受ける．アスファルトで舗装された道路は，夏季には日射により加熱され，外気温を高める一因となっている．街路樹はアスファルトへ到達する日射量を低減させることができるのに加え，葉や土からの水蒸気の蒸発による気化熱によりそれらの表面は冷やされ，その表面に触れた空気が冷やされる効果もある．その様な外気温を下げる街路樹の効果が着目され，都市部での街路樹や公開空地の緑化が進められている．

また，都市単位では，ドイツの風の計画の取り組みが知られている．森は保水量が多く，日射による温度上昇は遅く，夜間の放射冷却による気温低下にも時間がかかる．市街地の表面はアスファルトやコンクリートのような放射率の高い物質で多くの範囲をおおわれているのに加え，保水量が低く，日中の温度上昇は早く夜間の気温の低下も早い．このような森と都市部の温度差により，朝は森から市街地へ，夜間は市街地から森へ気流が生じる．風の道はその気流を促進させるための都市計画の考え方で，軒高の低い建物や道路により市街地から森へ風が通り抜けやすくしている．また，軒高の高い建物は市街地の中央に建て，市街地の外周付近には軒高の高い建物を建てないことで，森の風が市街地の中央付近

にまで届きやすくする工夫も取り入れられている．

1.2.3　現状の課題

熱的快適性は，主に６種類の要素により構成されることは上記のとおりである．しかし，現状の空調設備が関与できているのは，６要素のうちの室温の１要素のみである．

室温は，室内機の内部の熱交換器の温度および熱交換器を通過する室内空気の流量により調整されている[8-17]．制御の目標とする温度は，リモコンにより設定されるユーザの希望の室温である．室内機の吸い込み口に設置されたセンサにより室温を検出し，その室温が設定室温に近づくように熱交換器の温度および風量が制御される．

６要素のうち，気流については，現状の空調設備は積極的には調節していない[18-35]．冷房においては，基本的に人に気流を当てないように制御されている．これは，冷たい風が人に直接あたり寒さを感じさせることを避けることを意図している．また，暖房においては，温かい風が顔に当たる不快感を避けることと，空調設備から吹き出された気流に巻き込まれた周囲の低い温度の気流が人に当たって寒さを感じさせることを避けることを意図している．そのため，現状の空調設備は，人に気流が当たらないように制御されている．

湿度については，消極的に調節するモード，積極的に調節するモードおよび成り行きとなるモードの３種類がある[36-43]．消極的に調節するモードが，室温を設定する冷房である．冷房時には，室内機の内部の冷えた熱交換器に室内の空気を接触させ，その空気と熱交換器との間で熱交換させることにより，取り込んだ室内の空気の温度を下げて，再び室内に供給している．室内機に取り込んだ空気がその露点以下の低温の熱交換器に触れると，結露する．結露することにより，室内機に取り込まれた空気は除湿される．除湿された空気が室内に供給されることにより室内の湿度は低くなる．これが冷房における消極的な湿度への関与である．その一方で，積極的に湿度を調節するモードもある．そのモードは除湿モードであり，高い効率で室内機に取り込んだ空気から除湿するために，熱交換器との接触効率（バイパスファクタ）の向上と熱交換器の温度の低下を行っている．熱交換器との間での接触が増えることにより，室温は低下する．冷房であれば，室温を維持するために室内機への取り込み風量を減らすが，除湿モードでは除湿を優先して室温が低下しても除湿を継続する．そのため，除湿モード時には室温は低めで推移する．湿度については成り行きとなるモードが暖房である．空調設備は水道とは連結されていない．そのため，室内を直接加湿することができない．さらに，暖房は室温を高くするものの絶対湿度には関与しないため，相対湿度は低下する．暖房を使用すると乾燥するのは，そのためである．暖房時の乾燥を防ぐために，別な機構を搭載し，室外機で屋外の空気を結露させ，その水を室内に運搬し，室内へ水蒸気として供給する方法もある．なお，灯油を用いるストーブやファンヒーターでは，燃焼した灯油と同じ量の水が生成され室内に供給されるため，空調設備による暖房よりは相対湿度の低下を抑制することができる．放射については，積極的に関与する空調設備は見られない[44-51]．以上の環境側の４要素に対し，人側の着衣量

と代謝量については，空調設備は積極的な関与はできない[52-60]．消極的な関与としては，焦電型センサやサーモパイル，CCD カメラなどにより人の動きの大きさを検出し，代謝量に換算し，室温や風速，風向の制御に反映する方法が実用化されている．着衣量に関しては，室内の実際の様子とは無関係に，日時の設定に基づき，あらかじめ設定した着衣量を選択し，熱的快適性を算出するのに用いている程度である．

上記のとおり，現状の空調設備は，室内の熱的快適性に関わる 6 要素のうち，積極的に関与しているのは室温のみであり，他の 5 つの要素については消極的にしか関与していない，あるいはまったく関与していないという課題がある．その一方で，気流については，扇風機や団扇，窓の開放など空調設備以外の方法で従来から活用されてきた［61］．

我々は，コストと精度の要求を両立させるために，カメラ 1 台で空間特性を解析する技術の研究開発に取り組んだ［62］［63］．開発した技術は，画像 1 枚から，扉の開閉や対象物の位置等の建物の構造を検出し，建物内の間取りと家具を検出する．開発した間取りと家具を検出する技術の特長を以下に示す．

（1）カメラで撮影した画像から，扉の開閉や部屋の形状及び家具を検出し，風向きと風量を自動制御する．例えば，リビングと隣室が二間続きの場合においては，扉を閉じていると一間を空調，開いていると二間に合わせた空調を自動で行うほか，吹き出す風のスイングの向きを部屋の大きさに合わせて自動制御する．

（2）人の位置や周辺温度だけでなく，家具の位置や形状，部屋の間取りを検知し，「気流の通り道」を認識する．気流を制御するために，制御と空調と空間特性解析のループがあり，制御に空間特性解析の結果を与えるフィードバック処理となっている(図 1)．

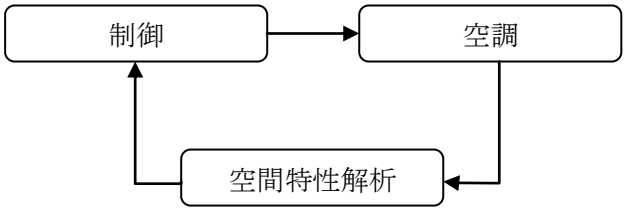


図 1　空間特性解析結果に基づくフィードバック処理

本稿では，空調制御のニーズ調査結果を 3 章にて述べる．また，ニーズ調査結果を踏まえて研究開発した画像認識技術のうち，空間特性を解析する技術を取り上げ，その詳細を 4 章にて述べる．また，空間特性解析技術を空調制御に適用した場合の効果を確認するため，室温測定実験を行った結果を 5 章に示す．

1.3 本研究の目的

人体の熱負荷と人間の温冷感を結びつけた温熱環境評価指数 PMV (Predicted Mean Vote) では，人体の熱的快適感に影響する要素のうち，室温，平均放射温度，相対湿度，気流の４つの物理的要素と２つの人間側の要素である在室者の着衣量と作業量の関係性について述べている．気流制御により，人体周辺の気温と気流が局所的に変化するが，PMV は人間の局所の温冷感の変化を推定できないことが課題である．

本研究では，局所的な室温および気流を示す方法として，体温の上下するスピードと室温との関係から，新たな快適性の指標を構築する．さらに，部屋の大きさと家具の配置に基づき，快適性評価のための基本モデルを導き出す．

2. 空調制御

2.1 空調制御の歴史

空調設備として，寒い日には暖を取り，暑い日には涼をとる技術を人が手に入れたのは，この１００年程度の間である．しかし，他の技術と同様に，時間の経過とともに空調設備に関する技術の発展は加速してきている．ここでは，空調設備の発展の過程について述べる［64］.

（１）暖をとる方法

恐竜などの爬虫類が食物連鎖の頂点にいたころ，哺乳類は種類も数も少なかった．その時代の人の祖先はネズミのような小動物であったことが知られている．現在にもその様な小動物は数多くいるが，自ら熱源を生み出し，暖を取ることはできない．その様な小動物が寒さを感じると，体毛が逆立つ．逆立った体毛が抵抗となり，体表面付近の空気の動きは遅くなる．空気の流動が少ないと，対流熱伝達率は低くなる．対流熱伝達率が低くなると，対流による熱の移動量が減少する．対流による熱の移動量が減少すると，体の表面からの放熱量が減少し寒さを感じにくくなる．現在の人の体表面は，皮膚が露出しており，一部しか体毛で覆われていない．それにもかかわらず，人の体は寒さを感じると体毛を逆立てようとする．いわゆる鳥肌である．

人は昔から火を使い，暖を取ってきた．その方法の名残は今もある．海外には，ラクダの糞を乾燥させて燃料とする遊牧民がいる．日本でも囲炉裏は火を直接使った採暖方法であり，開放式のストーブや暖炉も火を直接使い，暖を取る方法である．これらの方法は，放射により人体を直接温めることには有効である．しかし，温まる部分は熱源に近い一部であり，熱源から陰になる部分は温まらない．熱源は高温ではあるが小さく，部屋を十分に暖めるには至らない．さらに，室内でものを燃焼するため，汚れやにおいを防ぐために定期的に換気が必要であり，換気によりまた室温は低下する．このように，囲炉裏などは祭壇には有効であるものの多くの欠点を併せ持っていた．西暦１～４世紀のローマでは，温められた空気を床下に送る暖房が考案されていた．この床暖房は，室内側の床の表面温度が上昇するまえに床自体が温まる必要がある．そのため温かさを感じるまでには時間がかかるが，暖房停止後も床が蓄熱しただけ温かさが持続する．また，末梢部位であり体表面で最も低温となりやすい足を直接加温することは，高い快適性を得ることに寄与する．しかし，この暖房方式は，ローマ時代の終わりとともに忘れ去られてしまったようである．ヨーロッパでは１３世紀ごろから１９世紀ごろまでは，石炭を利用した暖炉が多く使用されていた．石炭を室内で燃やし煙突を介して排気するため，煙突の内部にはすすがたまる．その汚れた煙突を掃除するのが煙突掃除夫である．煙突掃除夫の仕事は，煙突の中を通り抜けながら掃除をする過酷な作業であった．その煙突掃除夫がモデルとなっているのが，ミュージカルではメリーポピンズ，音楽ではチムチムチェリー，アニメではロミオの青い空などであり，日本でも知られている．ロシアの農村では，ペチカと呼ばれるレンガ造りの天井まで届くようなかまどのようなものが暖房に使用されていた．アメリカでは，石積

みの暖炉を家の中央に配置し，なるべく多くの熱を室内に供給できるように工夫されていた．日本では，１８７７年に温風の暖房が設置されたのが，大きな節目となっている．それ以降，欧米の暖房設備が数多く輸入され，主に公共施設に導入されていった．

温風暖房機は比較的古くから使用されていた．１３世紀にはドイツで，地階のストーブで温めた外気を１階や２階の各室の床の開口部から浮力で送風する温風暖房が用いられていた．１９世紀には，温風に加え，蒸気や温水，送風装置を用いた暖房が導入されるようになった．１９５０年代から，住宅で石油やガスを用いた温風暖房が用いられるようになった．

蒸気暖房方式は１９世紀に入って欧州で使用され始めた．配管を用いて蒸気を供給し，その温度で室内を加熱する方法であり，暖房器具が高温になることや配管内が高圧になることがあった．

（２）涼をとる方法

象は，体に泥を塗り，体表面の清掃に併せて直達日射の抑制や，泥の中の水分の蒸発による気化熱で体を冷やす．ウサギの薄く広い耳には多くの血管が走り，放熱量の増大に貢献している．犬は舌を潤し，呼気による蒸発の促進で体からの放熱を促す．アフリカのシロアリは，土で大きなアリ塚を作り，地中の水分の蒸発によるアリ塚の冷却や，水の比熱の大きさを利用した蓄熱，多くの穴を利用した換気など，空調機能を備えた巣を作る．このように，動物たちは生理的な機能や，身の周りにあるものを工夫して使うことで，涼を得ている．

人も，生理機能を活用した方法で涼をとっている．暑いときには薄着になり，体からの放熱を妨げる抵抗となる着衣量を減らす．夏には，かいた汗を吸収し蒸発させ気化熱による冷却を促進する素材が好まれる．対流や蒸発による放熱を促進させるために，通風を得られるよう窓を開けたり団扇や扇風機をしようしたりする．

比較的夏の気候が穏やかな欧州では，８世紀にバグダッドの２重壁に遠方から取り寄せた氷雪を詰め込んだことや，レオナルド・ダビンチがパトロンの妻の寝室に水力の送風機を設置したなどの記録が残っているが，あまり冷房は必要とされていなかった．

冷房装置が生み出されたのはアメリカである．キャリアが印刷工場に露点制御装置を構築したのが初めてである．キャリアは，高い湿度により紙が吸湿することによる変色を低減するために，室内空気を除湿する設備を構築した．キャリアが構築した設備は，低温の水蒸気を発生させた箱内に室内空気を通し，設備内の水蒸気の表面に結露させることで除湿するものであった．その後，不要な湿度を除去するために，キャリアは冷却コイルを用いる方法を考案した．また，キャリアは，湿り空気の特性を示す空気線図を作成し，その後の温熱環境設計を飛躍的に促進させるのに貢献した．

２０世紀に入って，キャリアにより遠心冷凍機が生み出された．１９２２年に遠心冷凍機や凝縮器，冷却機の設計を行い，製菓工場や製陶工場，劇場などで使用され始めた．その後，冷媒の安全性や，性能の向上，環境影響の低減を目的に，フロン，代替フロン，自

然系冷媒など冷媒は様々に移り変わってきたものの，空調設備の基本的な構成は変わっていない．すなわち，圧縮機により冷媒を加熱加圧し，放熱器により周辺空気などへ熱を供給し，蒸発器により低圧化し，凝縮器による周辺空気などから熱を吸収する．このサイクルを回すことにより，冷房を得ている．

２０世紀後半には，そのサイクルを両方向に回すことができるようになった．すなわち，従来室内には凝縮器があり，低温冷媒で冷やされた熱交換器に室内空気が触れることによる冷房がなされ，屋外には放熱器があり屋外空気に熱を供給していた．そのサイクルを反転させることで，高温の冷媒を室内熱交換機に供給して室内を加熱し，蒸発器により低圧化して凝縮器により屋外から熱を吸収するという暖房が可能となった．この仕組みがヒートポンプである．

（３）近年の空調設備

特許に基づいて，空調設備による快適性を向上させるために近年着目されている技術が糸井川により調査されている［65］．空調設備で室内の快適性を向上させる技術に関する特許を，温熱環境の６要素に分けて調査した結果，室温や気流に関する出願が多数を占めたものの，近年は放射や代謝量に関する出願が増加していた．

空調設備においては，放射はサーモパイルを用いて検出することができる．また，代謝量は焦電型センサを用いて検出することができる．デバイスの小型化や廉価化が進んだ結果，このように空調設備への搭載が可能となってきたと考える．

空調設備が室内の放射環境を測定することにより，従来温度や湿度のみで測られることの多かった温熱環境を，より体感に近い形で把握することができるようになった．サーモパイルにより，室内の床や壁，天井などの温度を測定する．また，テレビや床暖房，ストーブや日射，夕食の鍋や３２度程度の表面温度を持っている人，パソコンやプリンター，冷蔵庫やアイロンなど，室内に存在する熱源を把握することができ，人の置かれた温熱環境をより詳細に把握することができるようになった．日射にある場所に人がいることが分かれば，強い暖房を続けることが暑さによる不快を与えることになりかねないと判断して暖房を弱めるという制御を設計することができる．また，室内の放射環境を高い分解能で検出することで，サーモパイルを人検出センサとして使用することもできる．３２度程度の温度の熱源をその大きさと温度に基づいて人と認識することができる．ただし，サーモパイルによる人検出では，冷房を使用し始めるときなど室温が高く壁温度も高い夏には，壁や床の温度と人の温度の差が小さく，検出できないあるいは誤検出をする可能性は高い．

焦電型センサを用いると，人の動きの大きさを検出することができる．人の動きの大きさは，人の代謝量・発熱量と直結する．そのため，温熱６要素のうち人側の要素である代謝量が分かることは，人にとっての快適な温熱環境を空調設備で実現するのに有益である．焦電型センサは，動いている熱源を検出することのできるセンサであり，住宅の屋外に設置された人感センサ付きライトなどでも使用されている身近なセンサである．焦電型センサは，動いている熱源を検出するため，動いていない熱源を検出することはできない．ま

た，焦電型センサも熱源と背景の温度差が小さいとセンサの出力が小さくなり，夏と冬とでは焦電型センサの出力の大きさが異なる．淹れたてのホットコーヒーを持った手の動きには大きく反応するが，室温まで冷めたコーヒーを持った手の動きにはあまり反応しない．走り回る猫の動きには反応するが，ソファで読書している人には反応しない．その様な特徴を持つ焦電型センサであるが，周辺温度に基づいて出力結果を制御に反映する閾値を変更するなど制御上の工夫により空調設備に活用されている．

室内の状況を直接検出してしまうことのできるのが CCD カメラである．デジタルカメラやデジタルビデオ，携帯電話やスマートフォンに搭載されたカメラなどでみかける人検出機能を用いることで，高い精度で人を検出することができる．また，撮影時間間隔と人の移動距離に基づき，人の運動量を推定することもできる．高い解像度で撮影することができれば，個人認証につながる．デジタルカメラに代表される CCD カメラについては，人を検出する技術が良く知られている．しかし，空調する空間の全貌を画像として把握することができるため，人以外の要素を検出することもでき，非常に幅広い用途に応用できるセンサである．

アメリカでは，別の視点からの開発が進められている．センサとしては情報量の少ない焦電型センサが主流なようであるが，その活用方法に特徴がある．住宅の居間に設置された，リモコンや室温センサなどを搭載したコントローラが，焦電型センサを併せ持っている．そのコントローラは，日付や曜日，時刻毎に，エアコンの on/off，温度や風向などの設定などエアコンの運転に関する情報に加え，人の活動の多さやその位置を記憶する．そして，その記憶に応じて，エアコンの on/off や，快適性の高い制御を学習し，自動で運転する．そのような，学習して自動で快適な温熱環境を作り出す空調設備が，主に家庭用として開発されてきた．さらに，近年，オフィスビルの空調にも同様な技術が導入されてきている．オフィスの各自のＰＣには，温熱環境に対する満足度などを選択するソフトウェアが搭載され，座席情報とリンクしている．その温熱環境に対する心理反応と位置情報の集積に基づき，なるべく多くの人が快適と感じられる温熱環境になるよう，各室内機の設定を制御している．

2.2 快適性向上技術

快適性に関する既往の研究は，ヨーロッパやアメリカを中心に進められてきた．温熱環境に対する生理学的なアプローチや温冷感覚などの心理的なアプローチなどがとられてきた．

熱帯地域で生まれ育った人たちの発汗能力が北極圏で生まれ育った人たちの発汗能力と比較して高く，生まれ育った地域によって温熱環境に対する人体の反応が異なることが知られている．外気温は一日の中では昼過ぎに最も高く夜明け前に最も低くなるが，深部体温も夜明け前に最も低く朝から昼にかけて上昇し，夕方から夜にかけてまた低くなるという変動を繰り返している．平均的に，女性は筋肉量が少なく皮下脂肪が多いが，男性は筋

肉量が多く皮下脂肪が少ない．筋肉は産熱の源であり，皮下脂肪は断熱材の役割を果たす．若年者は体重に占める筋肉量が多いが，高齢者は筋肉量が減る．血流量調節などの体温調節反応も乳児は未発達であり，高齢者も能力が低くなる．体の表面積は体からの放熱量を推定する際の目安となる．体表面積は，身長と体重から概算することができるが，これは手足の長さや太さの違いにより，算出式が異なる．

心理的には，高齢者ほど暑熱・寒冷環境を許容する方向へ変化する．このことが，空調設備を備えた室内での高齢者の熱中症が多発している一因となっている．

このように，様々な生理的あるいは心理的な個人差はあるものの，人体と周辺環境の間の熱収支が熱的な快適性の基本であることも分かってきた．

3. 人の快適性

3.1 従来の快適性の評価モデルと課題

ISO7730 に採用されており本研究のモデルの基礎とする PMV と，ASHRAE の規準に採用されている SET*を例に，従来の快適性評価モデルの課題を検討する．

PMV は以下の式にて算出することができる[7]．

$$\boldsymbol{PMV = f(M) \cdot L} \quad \textbf{(10)}$$

係数:$f(M)$は以下の式で算出することができる．

$$\boldsymbol{f(M) = 0.303e^{-0.036M} + 0.028} \quad \textbf{(11)}$$

熱収支:Lは以下の式で算出することができる．

$$\boldsymbol{L}\text{:熱収支}[\mathbf{W/m^2}] = (\boldsymbol{M - W}) - (\boldsymbol{C + R + Ed + Es}) - (\boldsymbol{C' + E'}) \quad \textbf{(12)}$$

$$\boldsymbol{C}\text{:対流熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{fcl \cdot hc(tcl - ta)} \quad \textbf{(13)}$$

$$\boldsymbol{R}\text{:放射熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{3.96 \cdot 10^{-8} fcl[(tcl + 273)^4 - (tr + 273)^4]} \quad \textbf{(14)}$$

$$\boldsymbol{Ed}\text{:不感蒸せつ量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{3.05 \cdot 10^{-4}(5733 - 6.99(M - W) - pa)} \quad \textbf{(15)}$$

$$\boldsymbol{Es}\text{:発汗による蒸発熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{0.42((M - W) - 58.15)} \quad \textbf{(16)}$$

$$\boldsymbol{C'}\text{:呼吸による顕熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{1.4M \cdot 10^{-3}(34 - ta)} \quad \textbf{(17)}$$

$$\boldsymbol{E'}\text{:呼吸による潜熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{1.7 \cdot 10^{-5} M(5867 - pa)} \quad \textbf{(18)}$$

各記号は以下を意味する．

M：代謝量（W/m^2）
W：外部仕事（W/m^2）
pa：水蒸気圧（Pa）
ta：室温（℃）
fcl：着衣面積率（-）
tcl：着衣表面温度（℃）
tr：平均放射温度（℃）
hc：対流熱伝達率（W/m^{2}K）

PMV =0 は最も快適であるレベルを表しており，統計的に居住者の 95%の満足が得られる．また，PMV=-0.5～+0.5 の範囲では居住者の 90%が快適と感じる．このように，大多数の人が快適と感じる温熱条件を示した指標が PMV である．

また，SET*は，PMV と比較して算出が複雑であるが，基本的な構成要素は等しい．SET*の算出方法の概要を以下に示す．

SET*は，人体を２層の球に模擬した２ノードモデルを人体熱移動のモデルとしている[66][67]．算出のフローは以下の図 2 となる．

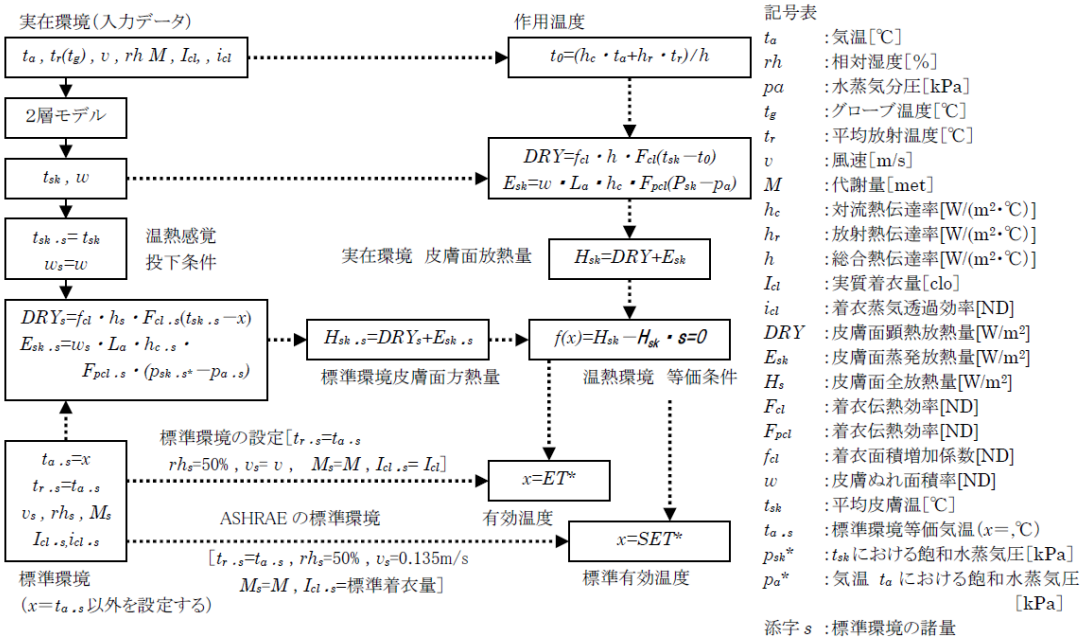


図 2　SET*の算出フロー

なお，PMV は，不感蒸泄は加味しているものの，発汗の影響を含んでいない．そのため，PMV を発汗が伴うような暑熱環境の評価に用いることは不適切である．

PMV と SET*は，算出方法が公開されており，様々な問題点を含んでいることが検証されているが，その算出の簡便さから多用されている．これらの指標が含む問題点として，例えば以下がある．

1. 局所的な放射や気流，上下温度差など，不均一な環境を想定していない．
2. 人体の生理反応の経時変化を想定していない．
3. 人体の心理反応の経時変化を想定していない．

本研究では，上記の問題点のうち，「1. 局所的な放射や気流，上下温度差など，不均一な環境を想定していない．」を解決することを目的とする．特に，従来の快適性評価指標では適切に評価することのできない，空調された気流が直接人体に当たる暖房時の快適性を評価する方法を検討し，その妥当性を評価する．

3.2 本研究の位置づけ

温熱快適性を主に左右する６要素にもとづいて，既往の研究をまとめた．本研究は，上記の研究に基づき，より高い快適性を実現することを目的としている．

室温や湿度については，エアコンの吸い込み空気に基づいているため，在室者のいる場所の温湿度についてはわからない．

気流については，気流を吹き出すために回転しているファンの回転数はエアコン自体が把握できるが，吹き出し口に取り付けられた風向板を経由して吹き出される空気が人の周囲の温熱環境にどのように届けられているかについては，考慮されてきていない．室内に家具がある場合には，暖気の供給の妨げになるかもしれない．人が座っていると，人の顔を検出した位置から足が遠く離れているかもしれない．壁の近くに設置されていたら，壁ばかり冷やしたり温めたりして十分に暖房できていないかもしれない．このような課題に対しては，既往の研究では答えを得られていない．

放射については，既往の研究で，人の周囲の温熱環境としてとらえることができている．ただし，研究成果は高精度を求めるあまり実用性が低い場合が多々ある．

着衣量や代謝量については，多様性に富んでおり，検出が難しい分野ではある．しかし，CCD カメラは検出結果の汎用性が高く，この課題を解決するための有効なツールとなり得る．

3.3 ６要素のうちの気流

本研究は，温熱環境の熱的快適性を決める６要素のうち，気流に着目する．

従来の空調設備の気流の検出技術は未発達な分野である．空調した空気を室内に供給するためにファンを回転させる．その空気は風向板により方向を定められる．空調設備が把握できているのは，ファンの回転数と風向板の方向のみであり，気流そのものについては検出できていない．

冷房で，冷風が壁に当たり続けることは，壁内の結露を促進させ，壁の劣化を早めることになる．壁の劣化を早める一方で，風向板が壁を冷房している間は室内に空調空気が供給されないため室内の温熱環境は改善しない．室内の温熱環境をより早く，より快適にするためには，改善に効果のある方向に向けて空調空気を供給することが必要である．日本の住宅では，居間やダイニング，客間などが襖などの可動間仕切りで仕切られており，間仕切りの開閉により二間続きの部屋として使うことや間仕切りを閉めてそれぞれ別の空間として使うことができるなど，可変な間仕切りが採用されることが多い．可変な間仕切りで仕切られたそれぞれの部屋に空調設備を設置することもできるが，間仕切りの変化に応じて空調設備が疎の風向を自動で最適化することができれば，一台の空調設備で二間を空調することが可能となる．特に，可動間仕切りで仕切られた一方の部屋が空調設備により快適な温熱環境となっており，他方の部屋が日射や高温な外気により暑熱な環境となっており，その二間の間の間仕切りが解放された場合は，間仕切りの奥の暑熱な部屋を集中して空調することができれば，二間の熱的快適性を一台の空調設備で短時間に実現することが可能となる．

暖房で，暖気が顔に当たるのは不快である．その一方で，暖気が足に当たると心地よい．人の臓器や脳などの活動を維持するためには，それらの部位の細胞の活動を維持することが必要であり，そのためには３７度程度の体温を維持することが必要である．その一方で，手や足は，放熱に有利な形状をしているのに加えて室内空気に対して露出している．そのため，低温環境に暴露されると，放熱しやすい手や足などの末梢部位への血流の供給が減少し，手足の筋肉の動きは鈍くなり，手足の指は冷たくなる．臓器や脳の活動の維持のために切り離された冷たく不快な末梢部位を加温することは，大きな快適感の向上につながる．また，低い室温の部屋に空調設備により暖気を供給すると，暖かい空気は大きな温度差により生じる大きな浮力により天井付近へ上昇する．空調設備から吹き出された暖気の正面に足元を気流が通り抜けられないソファなどの家具があると，吹き出された暖気の風速は急激に低下し，広く室内に広がる前に浮力により上昇してしまう．また，冬季は，暖かいと感じる室温はおよそ２０℃以上であるのに対し，外気は氷点下となることも珍しくない．すなわち，冬季の空調時の室内外の温度差は，２０℃以上となることも多い．壁際に据え付けられた空調設備が，暖房時にスイング機能で壁を温めると，壁と屋外との温度差はさらに大きくなり，さらに大きな熱量が屋外へ流出してしまう．スイング範囲が室内を暖房するのに適切であれば，屋外へ熱を不必要に流出させることなく，室温を上昇させ

られる可能性がある．可変間仕切りで仕切られた二間の暖房については，冷房時よりも暖房時の方が効果を感じられる可能性がある．空調されていない部屋の室温が外気温と暖房された部屋の室温の平均であると仮定すると，暖房された部屋との温度差は約１０度にもなる．その１０度差を埋めるために，奥の部屋を集中して空調することができれば，二間続きの両方の部屋の熱的快適性を短時間で実現することができる．

現時点では，空調設備は気流を十分には活用できていない．しかし，上記のとおり，空調設備が気流を活用することができれば，室内の様々な場面で高い熱的快適性を実現することが可能となる．

本研究では，局所的な室温および気流を示す方法として，体温の上下するスピードと室温との関係から，新たな快適性の指標を構築した．さらに，部屋の大きさと家具の配置に基づき，快適性評価のための基本モデルを導き出す．人体の熱負荷と人間の温冷感を結びつけた温熱環境評価指数 PMV（Predicted Mean Vote）では，人体の熱的快適感に影響する要素のうち，室温，平均放射温度，相対湿度，気流の４つの物理的要素と２つの人間側の要素である在室者の着衣量と作業量の関係性について述べている．気流制御により，人体周辺の気温と気流が局所的に変化するが，PMV は人間の局所の温冷感の変化を推定できないことが課題である．

熱的快適性を主に支配する６つの要素のうち現状の空調設備が１要素にしか関与できていないという課題を解決するため，部屋の間取り，間仕切り，室内の家具の位置やサイズ，人の足の位置を検出する技術を開発し，部屋の構造に応じた気流制御を行うことで，空調設備でその効果を検証することで，より高い熱的快適性を実現する．

3.4 PMV との関係

PMV は人体と周辺環境との間の熱収支に基づいて熱的快適性を推定する指標であり，その算出過程に気流の要素も含まれる．

（１）熱的快適性の表し方

PMV では，熱的快適性を以下の７段階にて表している(表 1)．PMV は，0 を熱的に中立な状態とする値で表される．

表 1　熱的快適性の表し方

＋３	暑い（Hot）
＋２	暖かい（Warm）
＋１	やや暖かい（Slightly warm）
０	どちらでもない（Neutral）
－１	やや涼しい（Slightly cool）
－２	涼しい（Cool）
－３	寒い（Cold）

（２）PMV の算出方法

PMV は以下の式で算出することができる．

$$\boldsymbol{PMV = f(M) \cdot L} \quad \textbf{(19)}$$

係数:$f(M)$は以下の式で算出することができる．

$$\boldsymbol{f(M) = 0.303e^{-0.036M} + 0.028} \quad \textbf{(20)}$$

熱収支:Lは以下の式で算出することができる．

$$\boldsymbol{L}\text{:熱収支}[\mathbf{W/m^2}] = (\boldsymbol{M - W}) - (\boldsymbol{C + R + Ed + Es}) - (\boldsymbol{C' + E'}) \quad \textbf{(21)}$$

$$\boldsymbol{C}\text{:対流熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{fcl \cdot hc(tcl - ta)} \quad \textbf{(22)}$$

$$\boldsymbol{R}\text{:放射熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{3.96 \cdot 10^{-8} fcl[(tcl + 273)^4 - (tr + 273)^4]} \quad \textbf{(23)}$$

$$\boldsymbol{Ed}\text{:不感蒸せつ量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{3.05 \cdot 10^{-4}(5733 - 6.99(M - W) - pa)} \quad \textbf{(24)}$$

$$\boldsymbol{Es}\text{:発汗による蒸発熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{0.42((M - W) - 58.15)} \quad \textbf{(25)}$$

$$\boldsymbol{C'}\text{:呼吸による顕熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{1.4M \cdot 10^{-3}(34 - ta)} \quad \textbf{(26)}$$

$$\boldsymbol{E'}\text{:呼吸による潜熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{1.7 \cdot 10^{-5} M(5867 - pa)} \quad \textbf{(27)}$$

各記号は以下を意味する．

M：代謝量（W/m²）

W：外部仕事（W/m²）

pa：水蒸気圧（Pa）

ta：室温（℃）

fcl：着衣面積率（-）
tcl：着衣表面温度（℃）
tr：平均放射温度（℃）
hc：対流熱伝達率（W/m^{2}K）

また，tcl，hc，fcl は，以下にて算出することができる．

$$tcl=35.7-0.028(M-W)-Icl(R+C) \quad (28)$$

$$hc=2.38|tcl-ta|^{0.25} \quad if(2.38|tcl-ta|^{0.25}>12.1\sqrt{(var)}) \quad (29)$$

$$hc=12.1\sqrt{(var)} \quad if(2.38|tcl-ta|^{0.25}<12.1\sqrt{(var)}) \quad (30)$$

$$fcl=1.0+1.290Icl \quad if(Icl<0.078) \quad (31)$$

$$fcl=1.05+0.645Icl \quad if(Icl\geqq 0.078) \quad (32)$$

各記号は以下を意味する．
Icl：着衣の熱抵抗（m^{2}K/W）
var：気流速度（m/s）

（３）本研究での PMV の扱い

本研究では PMV を用いて，気流制御を用いた場合の熱的快適性を表現するモデルを構築する．

PMV の算出において，本研究では気流の影響に着目する．PMV は係数と熱収支の大きく二つの要素で成り立っている．

本研究では気流による係数への影響と，熱収支への影響の両面を含めることとする．

PMV の係数は，温冷感覚の被験者実験により算出した値である．係数の算出に当たっては，代謝条件ごとに一定の温熱環境に対する温冷感覚を測定し，温冷感覚への代謝量の影響を定量化している．本研究では，PMV の係数として代謝量に加え，局所気流の影響を加味した係数を提案する．

PMV の熱収支は，気温，湿度，放射，気流，着衣量，代謝量の温熱 6 要素を加味した人体表面と周辺環境との間の熱交換量を示す．気流制御により，人体周辺の気温と気流が局所的に変化する．本研究では，局所的な室温および気流を平均化して示す方法を示し，PMV へ適用する．

3.5 空調制御のニーズ調査

地球温暖化への懸念や電気料金の値上げを背景に，より省エネルギ性の高い製品へのニーズが高まっている．空調機器の省エネルギ指数は，APF(Annual Performance Factor：通年エネルギ消費効率[6])値で示される．基本の要素技術である圧縮機，熱交換器，送風機，モータを駆動するインバータ回路などに毎年改良が加えられ，より高い APF 値の空調機器が開発されている．一方，空調制御の不満点について，515 人を対象に調査したところ，「電気料金が高い」という不満とともに，暖房時には「足元が暖まらない」「部屋全体が暖まらない」，冷房時には「部屋全体が涼しくならない」という不満も多い(図 3)．

「部屋全体が暖まらない，涼しくならない」という不満については，部屋の扉の開閉状況や部屋の形状及び大きさ等を検出できないため，エアコンから最も遠い部分への出力を強くするなど，部屋の間取りに従った空気の調節ができなかったことに原因がある．この課題を解決するために，可視光カメラとサーモパイルを搭載し，部屋全体を暖めたり涼しくするために，扉の開閉や部屋の形状を検出する間取り検出技術を研究開発した．本技術は，室内の構造，すなわち，壁面，床，梁の位置と，扉の開閉などの変化を推定する技術であり，扉の開閉や位置を検出できるようになるため，例えば部屋が二間続きでも，エアコン 1 台で部屋の奥に風を強く送り，室温の温度ムラをなくすことが可能になる．

また,「足元が暖まらない」という不満については，リビングルームは他の部屋と異なり，ソファやダイニングテーブルが設置されており，ソファやダイニングテーブルが気流を遮って足元に暖気が届かなかったことに原因がある．この課題を解決するために，家具があっても気流が通る道を見つけ，人の居場所に気流を届けることが重要であると考え，その手段の検討を進めた．このなかで家具の位置や形状の検出には，家具の絵柄の影響を受けにくい「近赤外線画像」を活用することが有効であると考え，近赤外線画像を用いて気流の通り抜ける家具か，気流の通り抜けない家具かを判別する技術を研究開発した．家具の位置や形状を検知し，気流が通る道を認識することにより，暖房時には足もとに向けて暖気を吹き出すなどのきめ細かい風向制御が可能になる．空間特性解析技術について，4 章にて述べる．

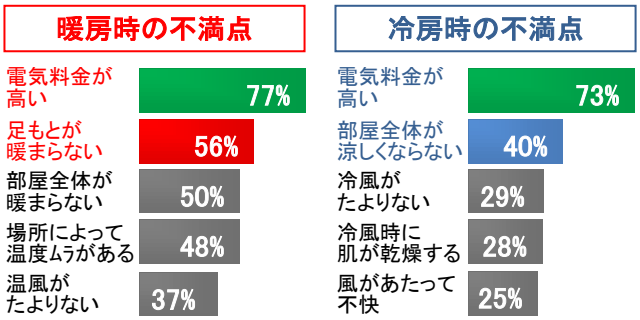


図 3　空調制御の不満点 (2014 年 5 月日立調べ)

3.6 まとめ

本研究の目的は，空間内の構造や人間の位置に基づいた快適性評価のための基本モデルを与えることである．

人体の熱負荷と人間の温冷感を結びつけた温熱環境評価指数 PMV (Predicted Mean Vote) では，人体の熱的快適感に影響する要素のうち，室温，平均放射温度，相対湿度，気流の４つの物理的要素と２つの人間側の要素である在室者の着衣量と作業量の関係性について述べている．気流制御により，人体周辺の気温と気流が局所的に変化するが，PMV は人間の局所の温冷感の変化を推定できないことが課題である．

本研究では，局所的な室温および気流を示す方法として，体温の上下するスピードと室温との関係から，新たな快適性の指標を構築した．さらに，部屋の大きさと家具の配置に基づき，快適性評価のための基本モデルを導き出す．

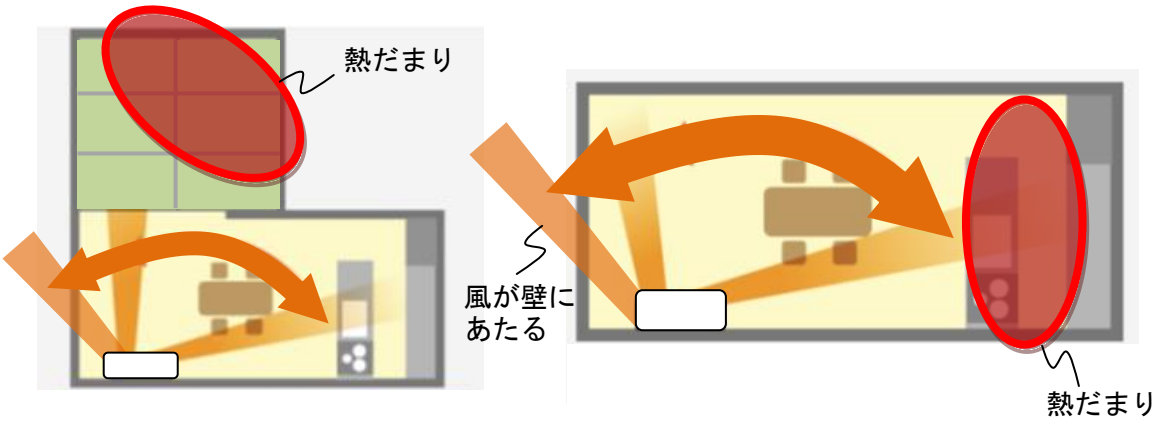
4.　空間特性解析

4.1 部屋の形状特性

従来は，部屋の扉の開閉状況や部屋の形状及び大きさ等を検出できないため，部屋の間取りに従った空気の調節ができなかった[68]．この課題を解決するために，室内の構造を推定する間取り検出技術を研究開発した［62]．本技術は，室内の構造，すなわち，壁面，床，梁の位置と，扉の開閉などの変化を推定する技術であり，扉の開閉や位置を検出できるようになるため，例えば部屋が二間続きでも，部屋の奥に風を強く送ることが可能になる．

本研究では，室内全体の空気を一定の温度に調節するために，エアコンが設置される位置から扉やコーナーを含む室内の風景を撮影した画像から間取りを検出する技術を研究開発した．本技術によって，部屋の扉やコーナーを検出することにより，風向きを左右にスイングさせた場合に，部屋の右奥と左奥のコーナーの間に制御した上で，部屋の奥や隣室まで風を強く送ることが可能になる．

まず初めに，部屋の扉の開閉や部屋のコーナーを把握できないため，エアコンの風向きや風量制御において，扉が開いていても風を強められず，熱だまりが発生するなどの課題を図 4 に示す．



【扉を開けて二間の場合】　　【扉を閉めて一間の場合】

図 4 熱だまりの発生例

図 4 に示すように，エアコンの風向きや風量制御に関して，風向きを左右にスイングさせた場合に風が壁にあたり，部屋全体の温度を均一に保てない課題がある．例えば，扉を開けて二間の場合は風量が弱く隣の部屋まで風が届かないため熱だまりが発生する．一方，扉を閉めて一間の場合は，風量が弱く部屋の奥まで風が届かないため熱だまりが発生する．

そこで，上記の課題を解決するために，室内の構造を推定する空間検知技術を開発した．空間検知技術とは，室内の構造，すなわち，壁面，床，梁，扉などの動きと位置を推定す

る技術である．本技術を用いることにより，扉の開閉や位置を検出できるため，部屋が二間続きでもエアコン 1 台で部屋の奥に風を強く送ることが可能になる．

・部屋の形状特性を解析する際の課題

これまでの空間を検知するための技術は，複数のカメラで撮影した画像間の差分を利用して，カメラと対象物の位置を推定する方式が主流であった．この方式では，複数のカメラを必要とするために，高価となるという課題があった．また，カメラ位置の制約や筐体の大きさの制約を受けるという問題があった．一方，コストの課題を解決するために，サーモパイル(温度センサ)を用いる方法があるが，画素数が少ないため精度の低さが課題となっていた(表 2)．このため，本研究では，コストと精度を両立させる，カメラ 1 台での空間検知技術の開発に取り組んだ．

表 2　撮像系のベンチマーク

撮像系の種類	サーモパイル	ステレオカメラ	単眼カメラ
コスト	安い	高い	安い
精度	低い	高い	低い ⇒ 高い(今回)
カメラの位置	高さ固定	カメラ左右位置固定	高さ固定

本技術を用いた空間検知システムは,カメラ 1 台を用いて撮影した画像から,扉の開閉(間仕切り)や対象物の位置(間取り)を検出する．また，本技術はエアコンなどの組込み機器への適用を想定して開発したため，カメラ 1 台を用いて撮影した画像を処理するための CPU が低処理量という条件下で動作することが可能である．開発した空間検知技術の特長を以下に示す．

(1) カメラ 1 台を用いて撮影した画像から空間を検知

従来は人の頭部の大きさを用いて空間を検出していたが，人がいないと空間を検出できなかった．本技術では，扉の開閉(間仕切り)や対象物の位置(間取り)等の建物の構造を検出し，建物内の空間を検知する．カメラで撮影した画像 1 枚から扉の開閉や対象物の位置を検出することにより，カメラ 1 台でも空間検知を実現できるようになった．

(2) 撮影したカメラ画像から高速に空間を検知

組込み機器への適用を想定して開発したため，カメラ画像から高速に空間を検知できる．カメラ画像を処理するための CPU が低処理量という条件下で動作することが可能である．

次節では，扉の開閉を判別する間仕切り検出技術，および対象物の位置を判別する間取り検出技術について説明する．

・間仕切り検出技術

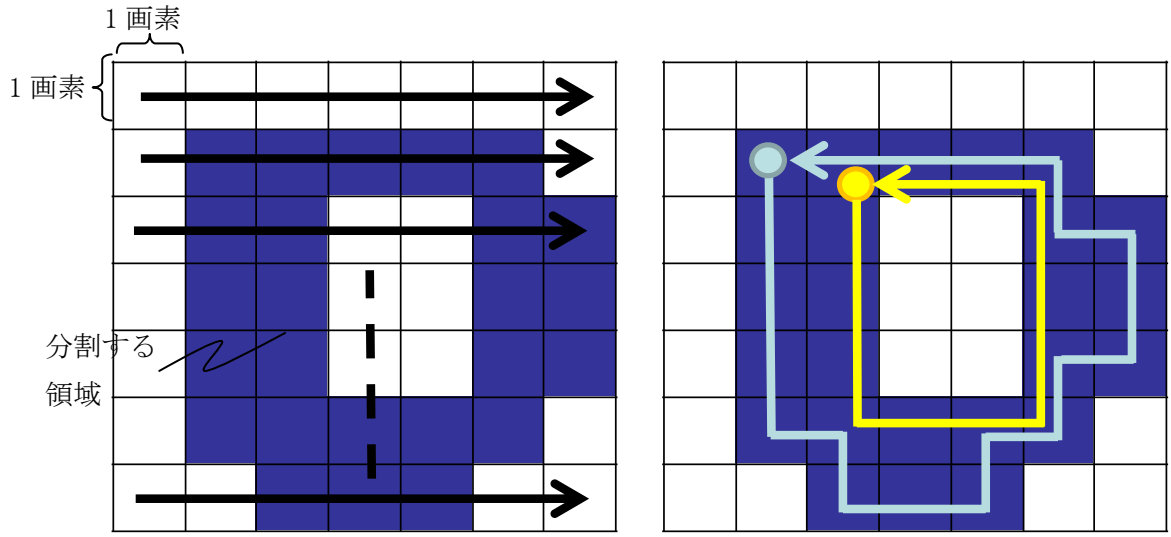
従来の家庭用エアコンは，部屋の間仕切りに関する正確な情報を保持していなかった．このため，従来のエアコンは，部屋の間仕切りが開いた状態に変化しても，この間仕切りの変化に従って風向及び出力の強弱を制御できなかった．この結果，開いた間仕切り付近に温度等を調節できない箇所（エアコンが冷房運転時には，熱だまり）が発生するために，室内全体の空気を所望の温度に調節することができなかった．

そこで，扉の開閉をカメラで撮影した画像から検出する技術を開発した．本技術によって，部屋の扉の開閉を検出することにより，部屋が二間続きでもエアコン 1 台での空調が可能となる．図 5 に間仕切り検出技術の適用例を示す．扉を閉めて一間の場合は，風向きを左右にスイングさせた場合に風が壁にあたらなくなる．一方，扉を開けて二間の場合は，風向きを左右にスイングさせた場合に風が壁にあたらなくなり，部屋全体の温度を均一に保つと共に，部屋の奥まで風量を強く制御することができる．

図 5 間仕切り検出技術の適用例

間仕切りを検出するためには，扉の位置を把握する必要がある．そのために，撮影した画像を元に複数の扉の候補を抽出し，その中から正しい扉を絞り込むことにした．扉の複数候補の中から絞り込むことにより，高速に扉を検出することができる．まず初めに，複数の扉の候補を検出するため，カメラで撮影した画像に写っている全ての物体を領域ごとに分割する．領域分割は，一般的に画像左側から全ての画素を確認し，同じ領域であるか判別する(図 6 左)．本開発では，家庭用エアコンへの組込みを想定しているため，高速に処理する必要があった．そこで，領域の外側と内側の輪郭を追跡することで，全ての画素

を確認することなく一部の画素の確認のみで領域を分割することが可能な方法を用いた(図 6 右)．上記の領域分割方法を用いることにより，高速に領域を分割できる．一方，輪郭線を追跡した場合，面積の小さな領域の分割が難しいことが想定されるが，扉や家具等の判別においては許容されるものと判断した．



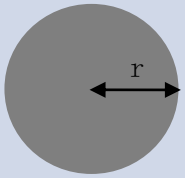
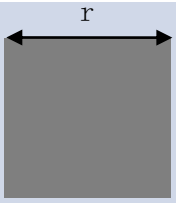
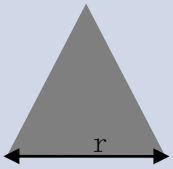
ラスタスキャン方法　　輪郭線追跡方法

図 6 領域分割方法

次に，分割した領域ごとに扉の四角形らしさと大きさ用いて， 扉の候補を絞り込むことにした．四角形らしさ(e)は，次式で与えられる．次式の周囲長は上記の輪郭線追跡で求めたものである．四角形らしさの算出例を表 3 四角形らしさの算出例に示す．e が大きいほど円形に近く，小さいほど複雑な形状になる．扉の形状は正方形に近いため，正方形の四角形らしさに近い領域を扉とすることにした．また，上記の条件のみでは，テレビの ON/OFF 等を誤検出してしまうため，扉の面積が小さい場合は，扉以外であるという条件を加えた．

$$e = \frac{4\pi \times \text{面積}}{(\text{周囲長})^2} \quad \textbf{(33)}$$

表 3 四角形らしさの算出例

	円	正方形	正三角形
画像			
四角形らしさ (e)	1.0	$\frac{\pi}{4} \fallingdotseq 0.79$	$\frac{\pi\sqrt{3}}{9} \fallingdotseq 0.60$

間仕切り検出技術の処理順を図 7 に示す．まず初めに，俯角 45 度で設置されたカメラを用いて部屋の様子を撮影する．組込み機器向けのカメラとプロセッサという，性能の限られたデバイスであるため，画像サイズは 320×240[pixel]とした．一定の時間間隔をおいて撮影した複数枚の画像に対して，扉の開閉の動きを判断するため，差分値を算出する．次に，上記にて算出した差分値に対して，領域分割処理にて扉の候補を検出する．次に，扉の候補の中から扉の四角形らしさと大きさ用いて， 扉の候補を絞り込む．検出した扉に対して，複雑度(扉の領域全体の絵柄の複雑さ)を算出し，扉の開閉を判別する．最後に，扉の面積から中心座標を算出し，処理を終了する．

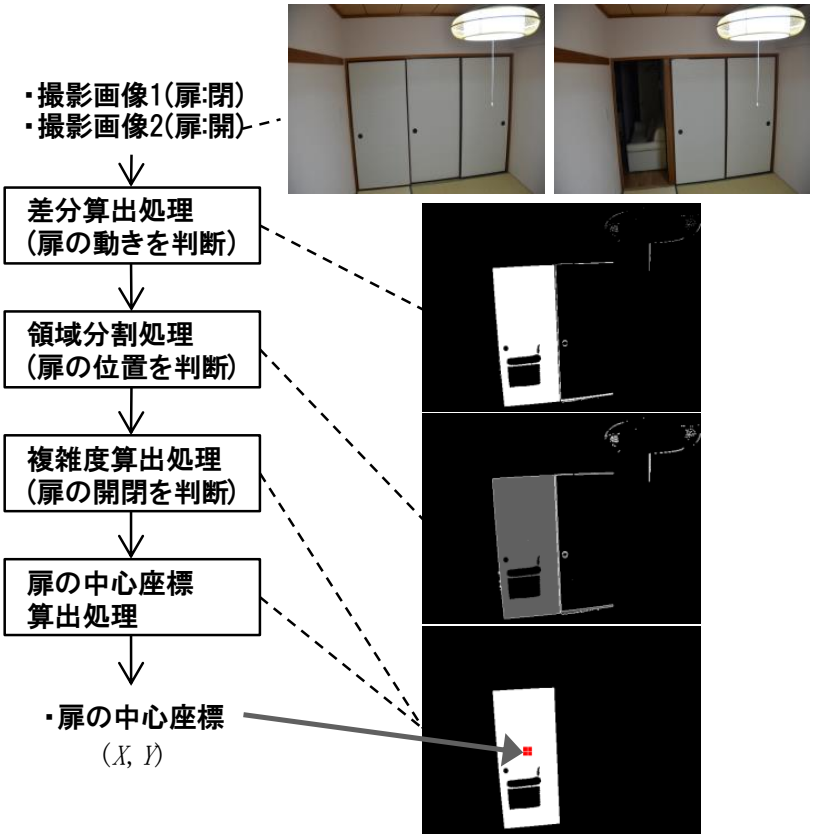


図 7 間仕切り検出技術の処理順

間仕切り検出技術の特長は以下の 2 点である(図 8).

①扉検出の誤検出低減

－ 扉検出処理において，扉の四角形らしさと大きさ用いて， 扉の候補を絞り込む.

②扉開閉判別の誤判別低減

－ 扉の領域全体の絵柄の複雑度を用いて，扉の開閉を判別する．複雑度は図 8 に示すように，エッジ画像を生成した上で，扉の領域の絵柄の複雑さを算出し，絵柄が複雑である場合は扉が開いていると判別し，絵柄が平坦である場合は扉が閉まっていると判別する.

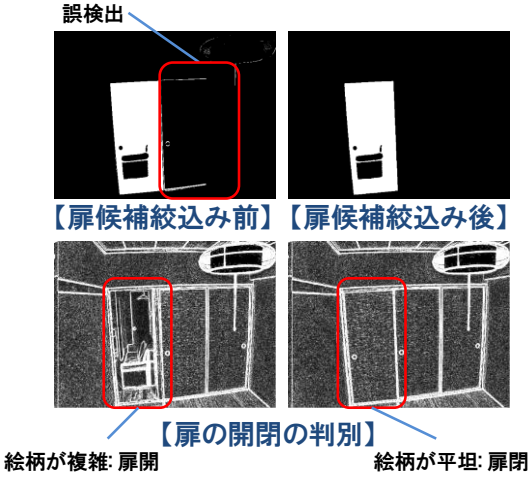


図 8　間仕切り検出技術の特長

・間取り検出技術

従来の家庭用エアコンは，部屋の形状及び大きさ等を示す間取りに関する正確な情報を保持していなかった．このため，例えば，室内においてエアコンから最も遠い部分への出力を強くするなど，部屋の間取りに従った空気の調節ができなかった．この結果，室内において，温度等を調節できない箇所が発生し，室内全体の空気を所望の温度に調節することができなかった.

そこで，室内全体の空気を所望の温度に調節するため，部屋のコーナーをカメラで撮影した画像から検出する技術を開発した．本技術によって，部屋のコーナーを検出することにより，風向きをコーナー内に絞った上で，部屋の奥に風を強く送ることが可能になる．図 9 に間取り検出技術の適用例を示す.

風向きを左右にスイングさせた場合に風が壁にあたらなくなり，部屋全体の温度を均一に保つ．一方，部屋の奥まで風量を強く制御する.

図 9 間取り検出技術の適用例

建物の構造を検知するためには，建物内の梁を正確に検出する必要があるが，本技術では，あらかじめモデルとして与えた部屋の構造知識を用いて，数多くの梁の候補の中から正確に梁を検出し，梁の交点から建物内の構造を検知する．上記の部屋の構造知識とは，直線同士の交点の角度や位置，直線の強度のことを言う．これらの構造知識を用いて，梁の絞込みを行うことにより，部屋のコーナーを検出する．

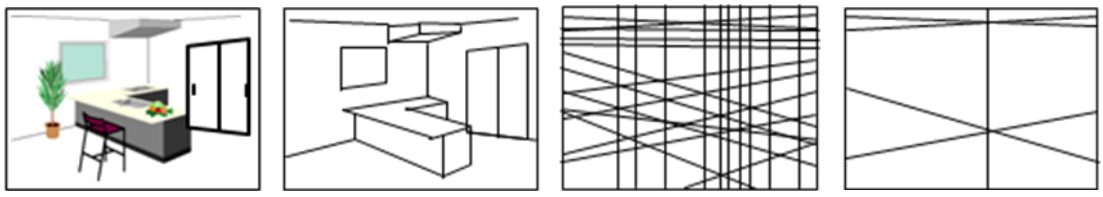


図 10 直線の絞込み

間取り検出技術の処理順を図 12 に示す．まず初めに，梁の候補を見つけるため，エッジを検出する．次に，上記にて検出したエッジ画像に対して，直線検出処理にて梁の候補の絞込みを行う．次に，あらかじめモデルとして与えた部屋の構造知識を用いて，数多くの梁の候補の中から正しく梁を見つけ，梁の交点から建物内の構造を検知し，処理を終了する．直線検出処理(Hough 変換[69])を以下に示す．

Hough 変換は，1962 年に P.V.C.Hough が傾き a，切片 b によってパラメータ表現された直線

$$y=ax+b \qquad (34)$$

を，(a,b)パラメータ空間上で抽出する方式を特許として提案したことにはじまる．そのアルゴリズムは，「投票による証拠情報の統合」と「多数決原理」という 2 つの概念に基づいており，個々の情報に誤りや欠落が存在しても全体として安定な処理を行うことができる．この概念に基づく同様な枠組みのパターン検出・照合法は総称として Hough 変換と呼ばれ，画像認識・理解の重要な手法として定着している．Hough 変換の原理は以下のとおりである．画像中に直線

$$y=a_0x+b_0 \quad (35)$$

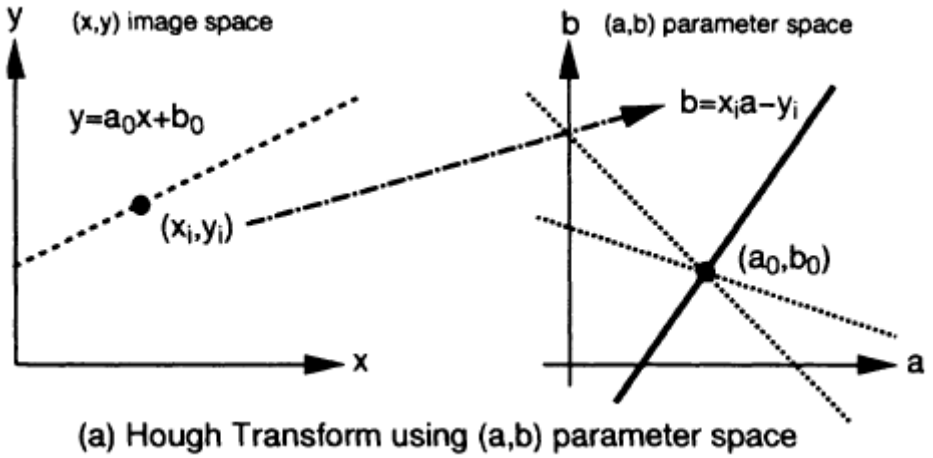
が存在しているとする．その直線上のある 1 点(x_i, y_i)を例にとると，その点を通る直線は前式にかぎらず，一般にパラメータ(a, b)を用いて

$$y_i=ax_i+b \quad (36)$$

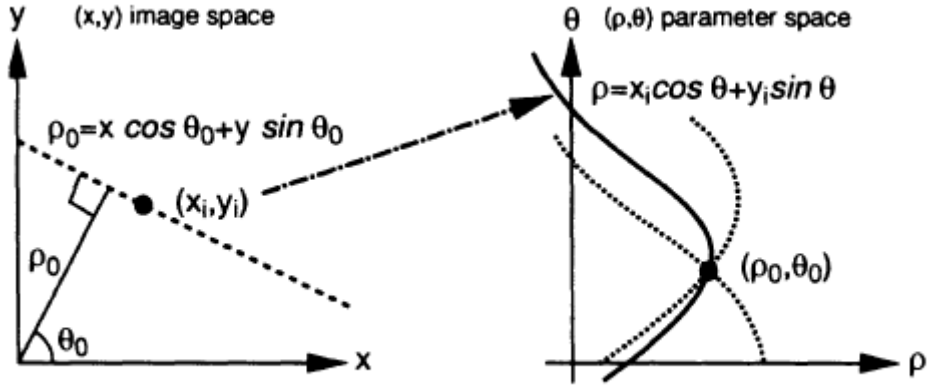
と表わすことができる．前式を a，b に関する方程式とみなすと，

$$b=x_ia-y_i \quad (37)$$

と変形することができる．この軌跡を(a, b)パラメータ空間に描くと図 11(a)のようになる．直線上のほかの点に対しても同様の処理を行うと，それぞれ前式に従った軌跡が描かれることになるが，いずれの軌跡も(a_0, b_0)を通過することは明らかである．そこで，このように多くの軌跡が交わる点が示すパラメータ値(この場合は(a_0, b_0))を，画像中に存在する直線を表わすパラメータとして抽出することができる．これが Hough 変換の基本原理である．Hough 変換を実際に計算機上で実現するためには，以下のような処理を行う．



(a) Hough Transform using (a,b) parameter space



(b) Hough Transform using (ρ,θ) parameter space

図 11 Hough 変換の基本原理

1. (a, b)パラメータ空間を表わす配列を用意する
   (各要素の初期値 0)
2. 画像中のすべての点(特徴点)に対して，(a) 前式により軌跡を求める(b) この軌跡が通過するパラメータ配列の各要素に対し，その値を 1 増やす[投票]
3. パラメータ配列中で大きな極大値をもつ要素を探し，その要素が示すパラメータ値を求める[多数決]

このように，投票と多数決によって Hough 変換が実現される．その後，Duda and Hart は，(a, b)表現では直線の種類によってパラメータに無限値が発生することを指摘した．すなわち，すべての直線に対応するためには無限の大きさのパラメータ空間が必要となることから実用性に欠けることを示唆し，代わりに直線の垂角 θ と原点からの符号つき距離 ρ による(ρ , θ)表現

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \quad 0 \leqq \theta < \pi \qquad (38)$$

を用いることを提案した．（ρ，θ）表現を用いると，画像が有限であるためρ も有限となることからパラメータ空間は有限となる．このため，通常の Hough 変換では前式が用いられる．この場合，画像中の 1 点に対する軌跡は正弦曲線となる(以上， 図 11(b)参照)．直線のパラメータ表現に関する研究は古くから行われており，その方式は処理効率や精度に大きな影響をもつ.

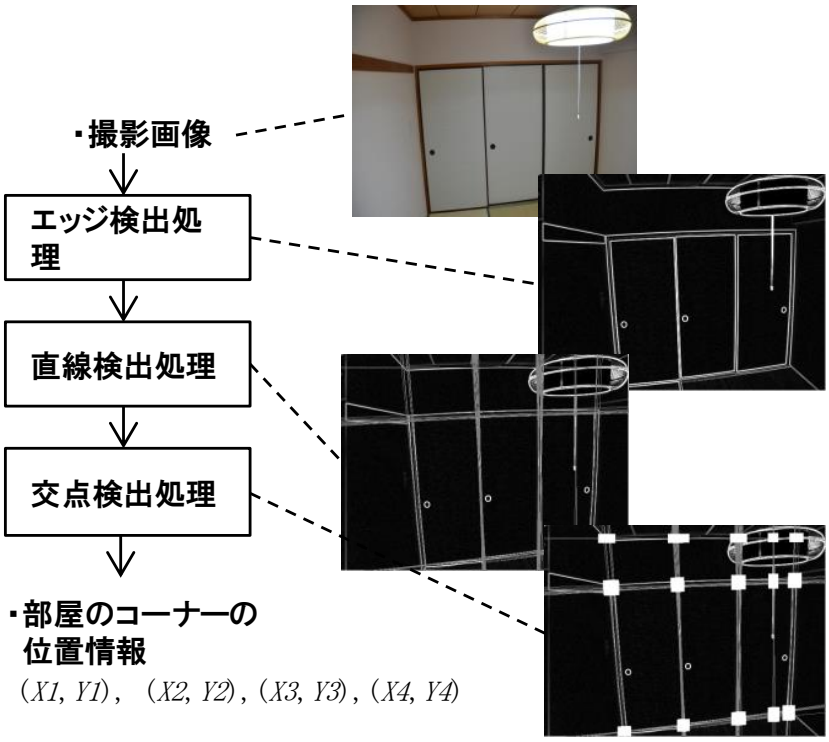


図 12 間取り検出技術の処理順

4.2 実環境での間取り検出結果

間取り検出技術について，評価実験を行った．実験には，可視光カメラ(図 13)にて実際に撮影したデータセットを用いた．可視光カメラは，回転することによって，撮影範囲を広げることができる．本データセットは，俯角 45 度で設置されたカメラを用いて部屋の様子を撮影した画像で構成される．評価用画像の撮影条件を以下に示す．

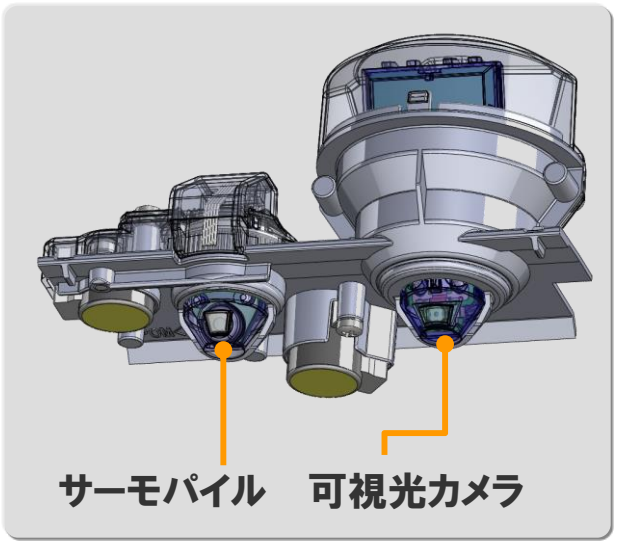


図 13 カメラの構成

[評価画像]

・画像サイズ：320×240[pixel]

・評価画像数：290 枚

・撮影シーン：扉の開/閉，テレビの ON/OFF，カーテンの開/閉，ハンガーを掛ける/掛けない，人が居る/居ない，照明の ON/OFF

本データセットは評価用のものであり，これに対して間取り検出技術の精度評価を行うことで，充分な性能を得られているか評価する．特に，窓から外光を取り入れた際の照明変動時には，部屋の一部に陰が発生して検出精度の劣化が懸念される．実験では，データセット 290 枚の画像に対して間取り検出処理を実行し，検出結果を手動で付与した正解情報と比較することで検出精度を算出した．間取り検出技術の処理結果と誤検出しやすい画像の一例を図 14 に示す．扉や背景が複雑な絵柄である場合，誤検出することがある．

間取り検出技術の評価の結果を，表 4 に示す．カメラ画像に対して正検出率が 73.7%，誤検出率が 8.4%の精度であることを確認した．また，処理時間は 7 秒であることを確認した．

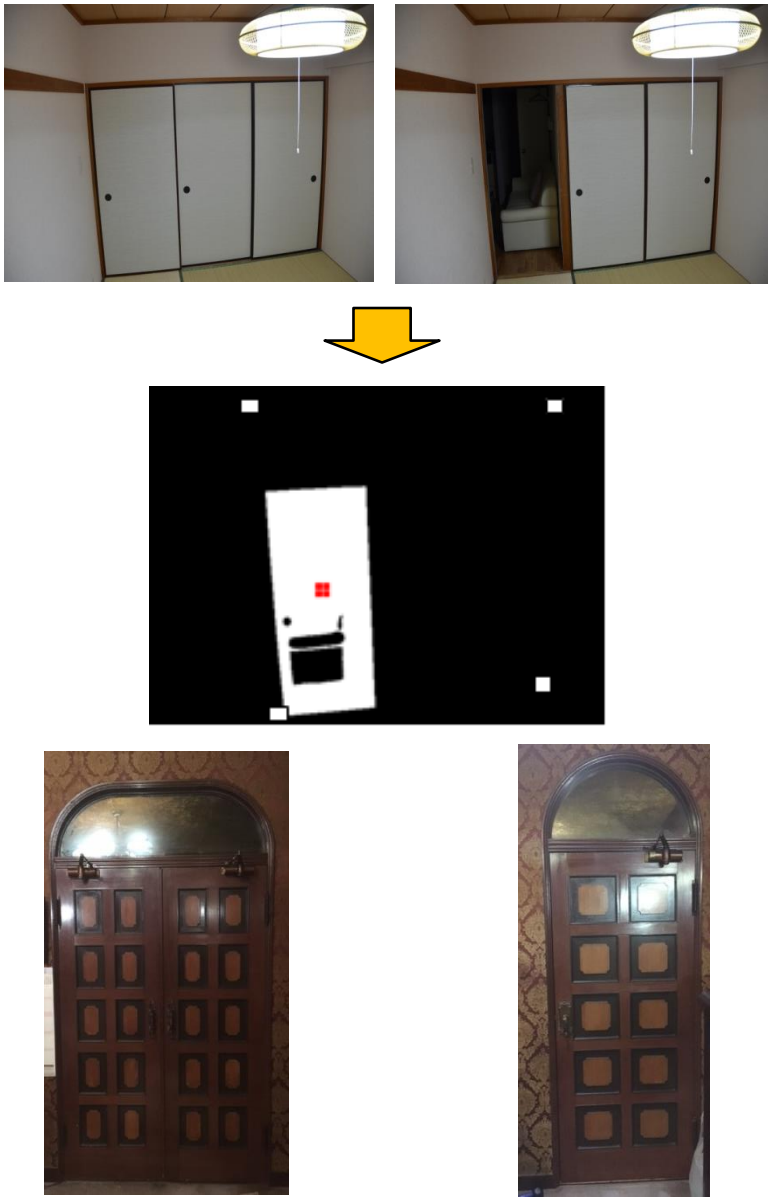


図 14 間取り検出技術の処理結果(上)と誤検出しやすい画像例(下)

表 4 評価実験結果

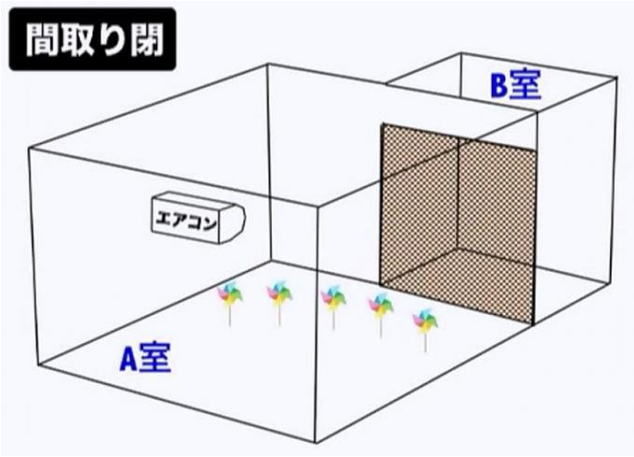
正検出率	誤検出率
73.7%	8.4%

※正検出率: 扉の開閉の検出回数と真値との差の絶対値を真値で割った値

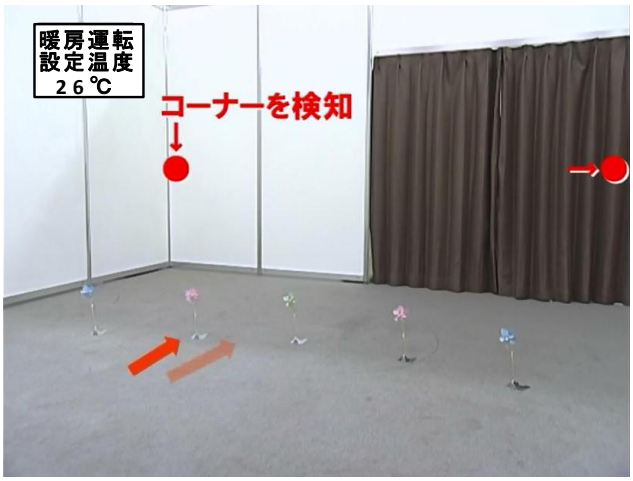
間取り検出技術の空調制御の効果を確認するため，室温測定実験を行った．本実験に用いた部屋の構造を図 15 に示す．A 室と B 室の間に設置している扉を閉めた状態から，開け

た状態にした上で，B 室の室温を測定する．B 室の室温を測定する際に，間取り検出技術機能を ON した場合と OFF した場合で比較することにより，本技術の効果を確認する．

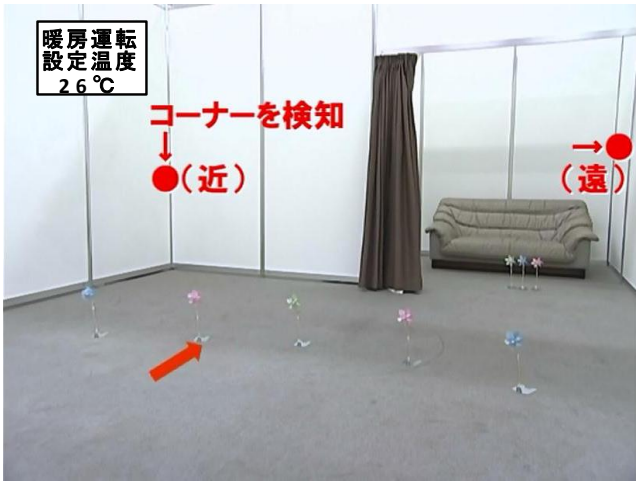
図 16 は，サーモグラフィを用いて，B 室の室温を測定した結果の画像である．間取り検出技術機能を OFF している場合，扉を開いてから 3 分後の B 室の温度は 0.8℃のみの上昇であるのに対し，間取り検出技術機能を ON にした場合は 3.8℃上昇し，ほぼ設定温度に制御できていることを確認した．



【A室とB室の構造】



【扉を閉めて一間の場合】



【扉を開けて二間の場合】

図 15　室温測定のための部屋の構造

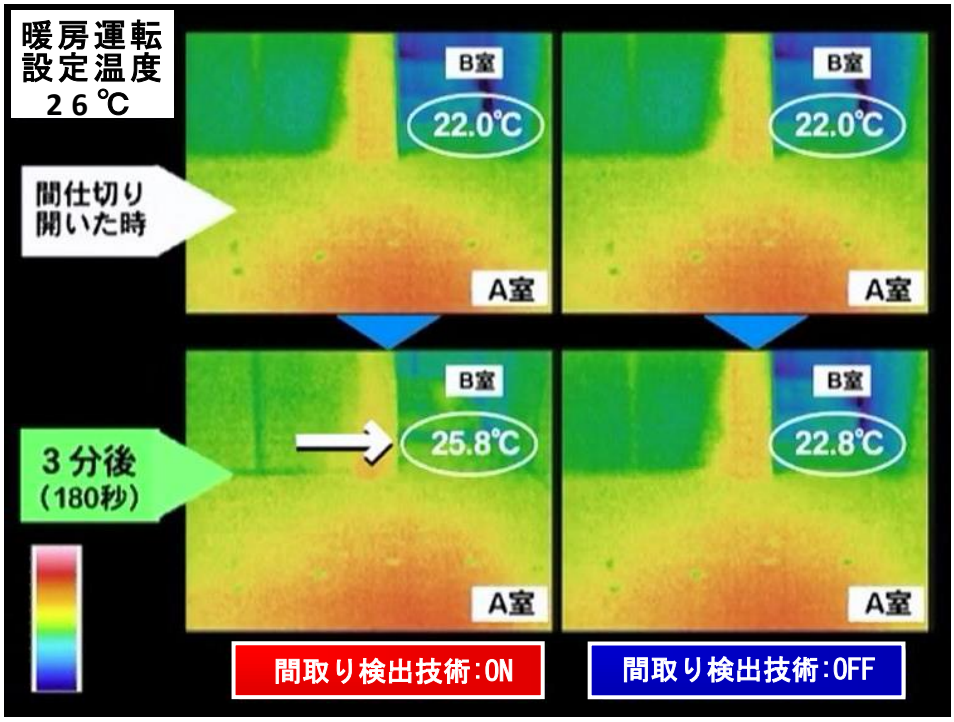


図 16 室温測定結果

・考察

今回の評価実験では，エアコン搭載のカメラ画像に対して正検出率が 73.7%，誤検出率が 8.4%の精度であることを確認した．今回，家庭用エアコンに本技術を適用する際，最も重要な点は誤検出を減らすことであるため，誤検出率を 10%以下と定めた．一方，誤検出率を下げると正検出率が下がり，誤検出率を上げると正検出率が上がる傾向がある．今回，誤検出を減らすことを優先したため，事業部と相談の上，正検出率は 70%以上と定めた．(中研)では上記の目標値を定めた上で開発を進め，誤検出率が 8.4%と低い状況で目標を達成できた．

4.3 設置物の形状特性

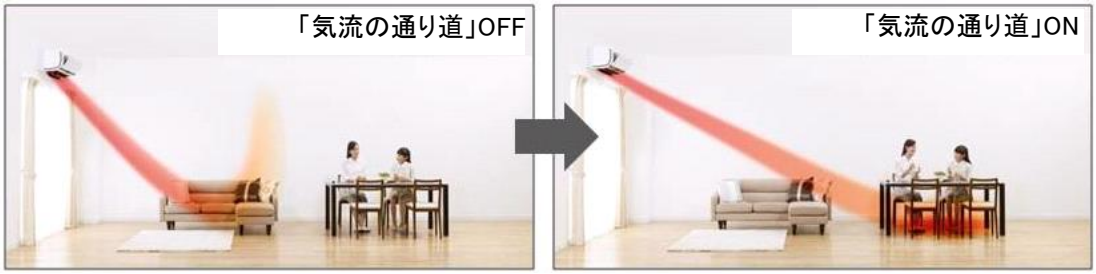
家庭において，ルームエアコンの使用頻度が高く，大型機種が設置されているリビングルームの形態は「LDK(Living, Dining, Kitchen)」が主流となっており，家族が集まる場所で時間帯により様々な生活シーンが展開されているのが特徴となっている．また，リビングルームには他の部屋とは異なりソファやダイニングテーブルが設置されており，「ソファやダイニングテーブルが気流を遮って足元に暖気が届かない」，「温度ムラができて部屋全体が涼しくならない」という声が聞かれた．

・カメラを用いた組込み機器向け画像認識技術

カメラを用いた組込み機器向けの画像認識技術として，在室者の人数や活動量，位置に加えて，距離や間取りも見る「可視光カメラ」と，在室者の周囲の温度を見る「サーモパイル」により，人や部屋の状況をより細かく見ることで快適な空調を実現し，リビングルームのさまざまな生活シーンにきめ細かく対応できる[7]．

さらにリビングルーム特有の前述の課題に着目し，家具があっても気流が通る道を見つけ，人の居場所に気流を届けることが重要であると考え，その手段の検討を進めた(図 17)．このなかで家具の位置や形状の検出には近赤外線画像を活用することが有効であると考え，本技術により快適性の向上を図るよう開発を進めた(図 18)．近赤外線画像は，可視光画像と異なり，外部光源による外乱（反射光等）の影響を受けにくいことから，家具のテクスチャ（柄等）や，形状検知に不要なデータが混入しないため，オブジェクト抽出に適している．

【暖房時】



【冷房時】

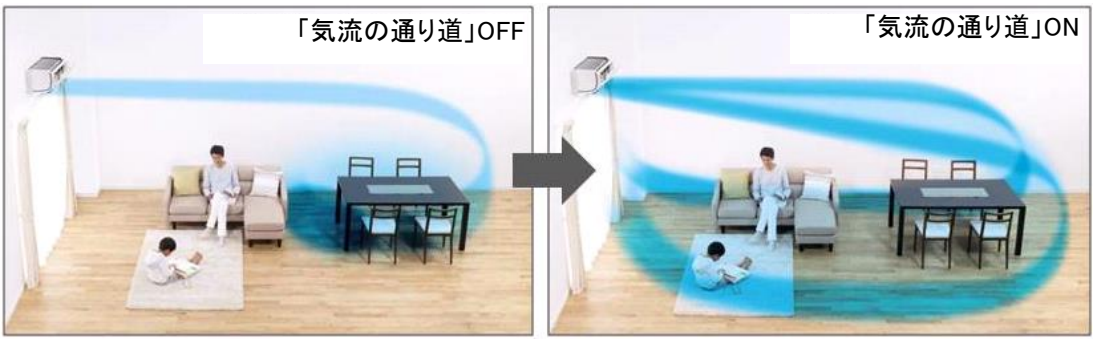


図 17 家具による気流の遮り

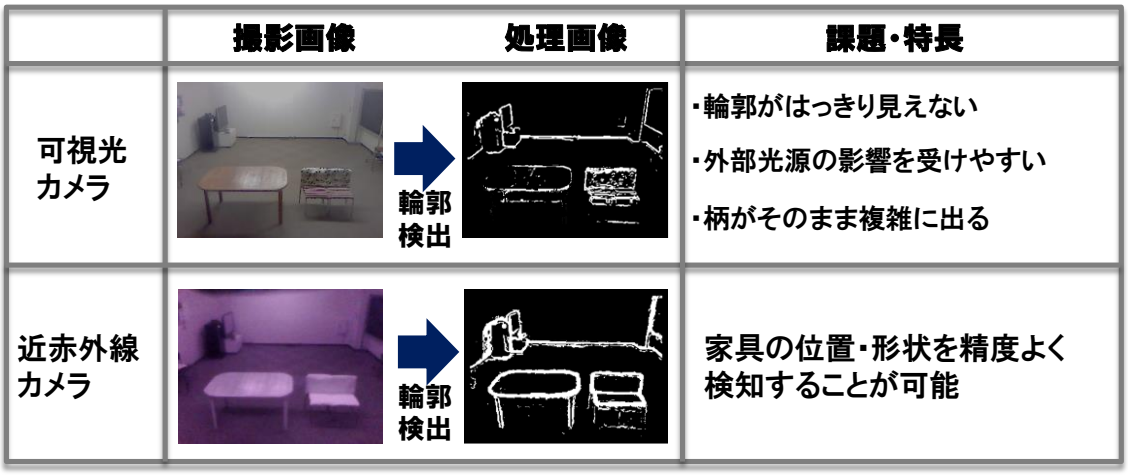


図 18 近赤外線画像の特長

取得した近赤外線画像にノイズ除去，エッジ検出，領域分割[70]などの処理を行い，家具の候補を検出する．家具の候補の中から家具の特徴（形や大きさなど）を用いて，家具の候補を絞り込む．さらに，家具の脚の長さ・開口面積を算出し，気流の通り抜ける家具か，気流の通り抜けない家具かを判別する（図 19）．

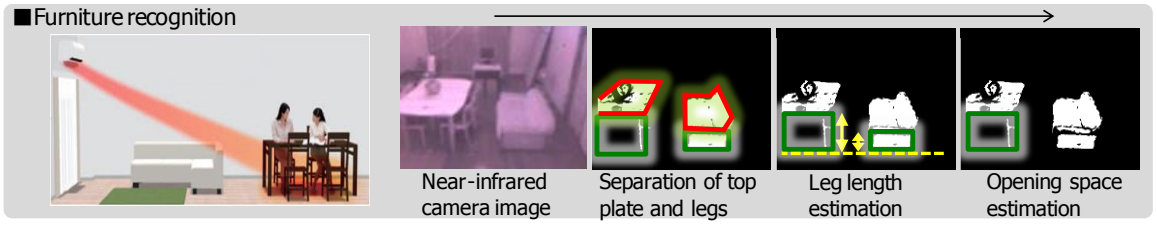


図 19 家具検知の処理の流れ

さらに，足元の温度や状態（スリッパや厚手の靴下など履いている状態）によらずに足元を検出できるようにするため，可視光画像を用いた足元検出技術を開発した（図 20，図 21（左））．足元検出技術は，取得した可視光画像に頭部検出処理を行い，頭部の位置から体の輪郭をなぞることによって，複数の足元の候補を検出する．足元の候補の中から足の特徴（頭部からの距離など）を用いて，足元の候補を絞り込み，最終的に足元を検出する．

以上の情報をもとに，暖房運転時においては，足元へ気流を届けるための「気流の通り道」を図 21（右）に示すように特定する．また，冷房運転時には気流が家具に遮られずに循環する「気流の通り道」を特定する（図 22）．

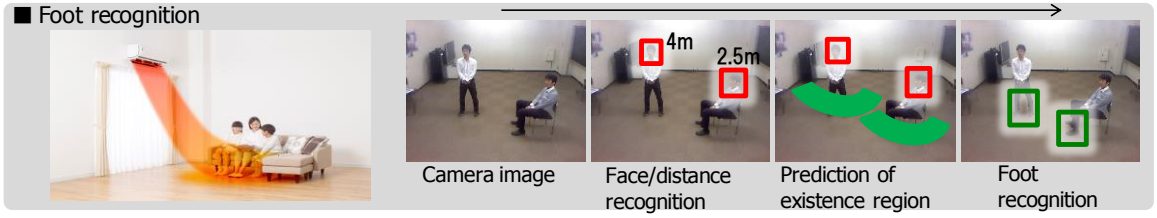


図 20 足元検知の処理の流れ

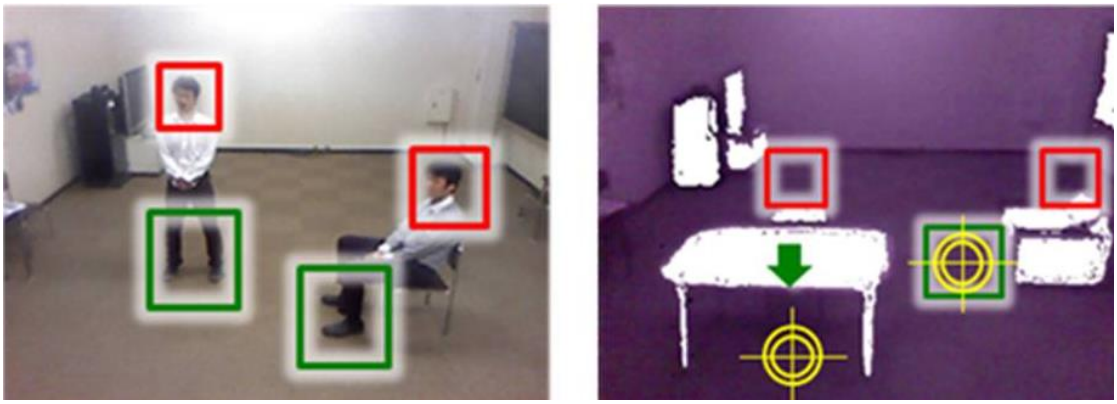


図 21　人の足元の検知（左）と暖房時の「気流の通り道」検知（右）

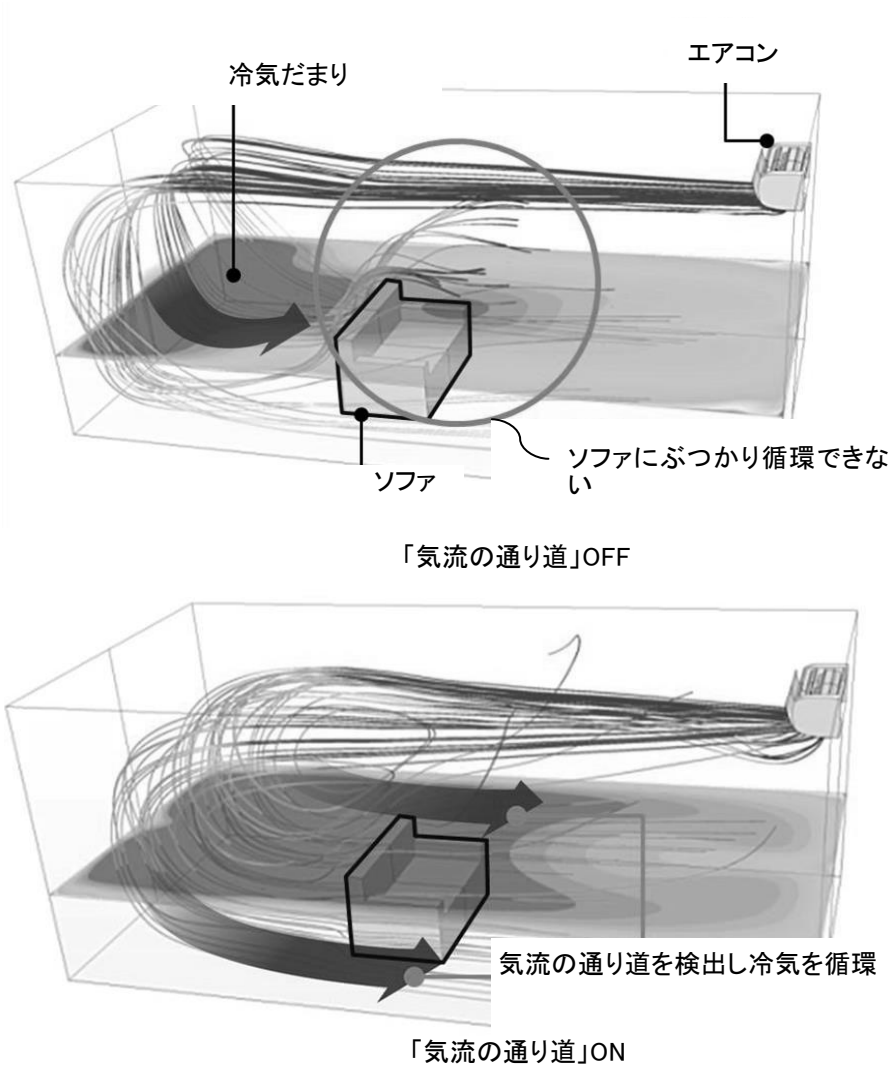


図 22 冷房運転時の「気流の通り道」

4.4 実環境での家具検出結果

前節で述べた「家具検知技術」について，評価実験を実施した．まず，近赤外線カメラと可視光カメラを用いた気流の通り道の認識結果について示す．次に，実験方法に基づき精度評価した結果を示す．

・近赤外線カメラと可視光カメラ

室内機中央部にカメラ部を設け，中央の「可視光カメラ」の前に，近赤外線画像を取得するときのみ，近赤外線波長を透過するフィルターをシャッタ方式にて「可視光カメラ」の前に移動させ，「近赤外線カメラ」として機能させる．さらに近赤外線 LED を照明として発光させて近赤外線画像を取得する(図 23)．

図 23 「近赤外線カメラと可視光カメラ」の構成

上記の近赤外線カメラと可視光カメラを用いた気流の通り道の評価実験を行った．家具の形状や位置を検出した後に，家具の形状から気流の通り抜ける家具か，気流の通り抜けない家具かを判別できることを確認した．また，頭部の位置を基準に足元を検出できることを確認した(図 24)．次節では，気流の通り道へ気流を届けるために必要な気流制御フラップの効果を確認するための評価実験結果を示す．

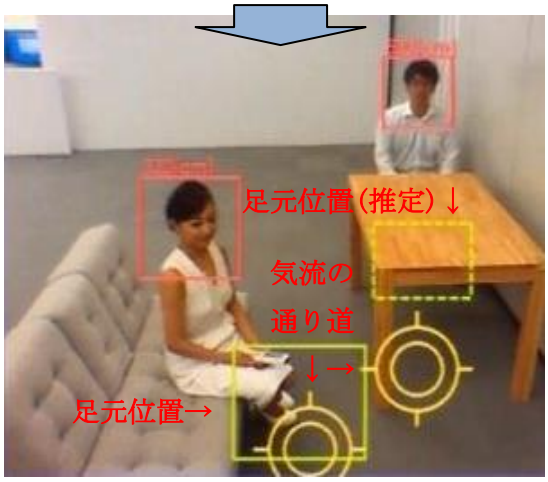
実験環境	評価結果
 暖房運転中に気流の通り道機能 ON	 近赤外線画像を取得(ものカメラ) 家具の位置と「気流が通るかどうか」の形状を検知  「気流の通り道」を認識(画像カメラ)

図 24 気流の通り道の認識結果

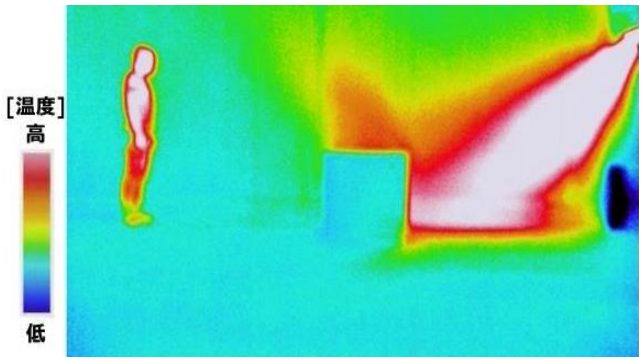
・「気流の通り道」の暖房運転時の効果

前節で述べた「近赤外線カメラと可視光カメラ」と「気流制御フラップ」を組み合わせた「気流の通り道」の暖房運転時の効果について確認する．

気流の通り抜けない家具がある場合の従来技術の気流制御結果について，図 25 に示す．家具の前の風車は回るが，家具に温風があたるため，足元まで温風の届いていないことが分かる．

【実験環境】

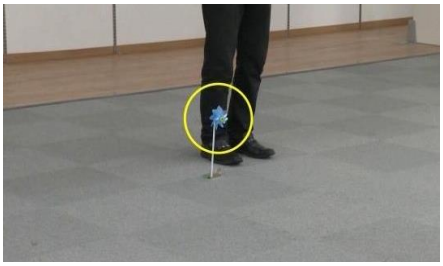
人とエアコンとの間に家具を置く



赤外線サーモグラフィ

【従来技術】

家具の前の風車が回る



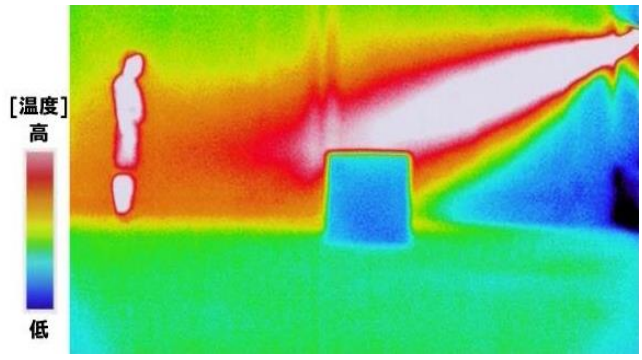
足元に温風が届かず，風車は回っていない

図 25 気流の通り抜けない家具がある場合(従来技術)

次に，気流の通り抜けない家具がある場合の新製品の気流制御結果について，図 26 に示す．家具の前の風車は回らず，温風が家具を通り越して足元に届いているため，家具の上と足元の風車が回っていることが分かる．

【実験環境】

人とエアコンとの間に家具を置く



赤外線サーモグラフィ

【本研究】

気流の通り抜けない家具を検出し，上向きに風向を調整

家具の前の風車は回っていない

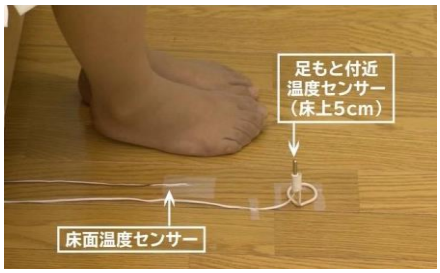
家具の上と足元の風車が回っている

図 26 気流の通り抜けない家具がある場合(本研究)

・床暖房運転時の効果

「気流の通り道」の床暖房運転時の効果について確認する．床暖房設定前後の気流制御結果について，図 27 に示す．暖房運転時の足元付近の温度が床暖房設定前後で 10.6 度上昇することを確認した．

足元付近の床面



足元付近と床面温度を測定

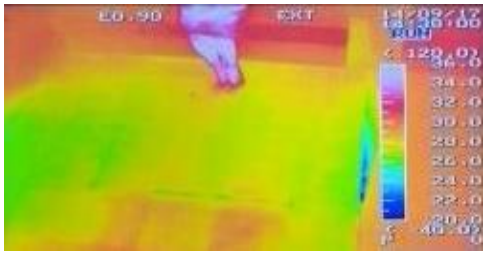
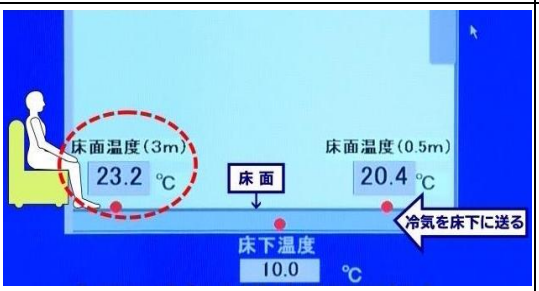
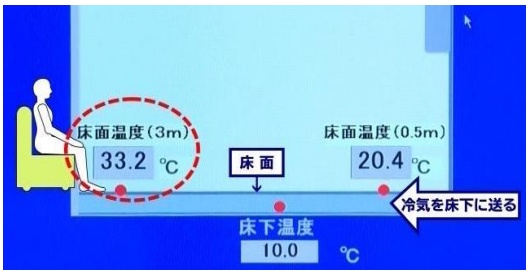
	床暖房設定前	床暖房設定後（11 分後）
足元付近温度		
足元付近床面温度	 	 
	床下に冷気を送り暖房運転中．人のいる床面温度は 23.2℃．	床面温度は 33℃以上

図 27 気流の通り抜ける家具がある場合

・考察

今回の評価実験では，あらかじめモデルとして与えた家具の構造知識を用いて，数多くの家具の候補の中から正確に家具を検出し，家具の形状から気流の通り抜ける家具か，気流の通り抜けない家具かを判別し，足元まで風を届けることを確認した．また，暖房運転時の足元付近の温度が 10.6 度上昇することを確認した．

4.5 床材の形状特性

「電気料金が高い」という不満とともに，暖房時には「フローリングが冷えていて足元が暖まらない」という不満も多い．これらのニーズや不満に対して，屋内で靴を脱ぐという日本の生活習慣と床の表面温度が同じでも床の種類によって「接触温冷感」が異なることに着目し，暖房時は床の種類の違いによる，ひんやり感をなくして足もとを暖かくするための手段の検討を進めた．

暖房時，床の種類によってどのような影響があるか，足が感じる「暖かさ・冷たさ」（接触温冷感）について調査したところ，足が接触した物の熱移動量が多いと，接触した足の温度が一気に下がるためひんやり感じることが分かった(図 28)．そのため，床の種類を判別することにより，フローリングに適した温風を送り，足もとから快適にすることができる．

このなかで床の種類の判別には近赤外線画像を活用することが有効であると考え，本技術により快適性の向上を図るよう研究を進めた．

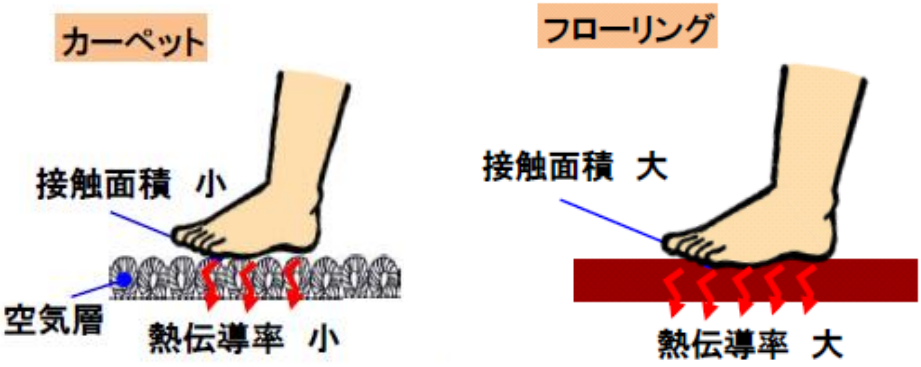


図 28 足が感じる暖かさと冷たさ

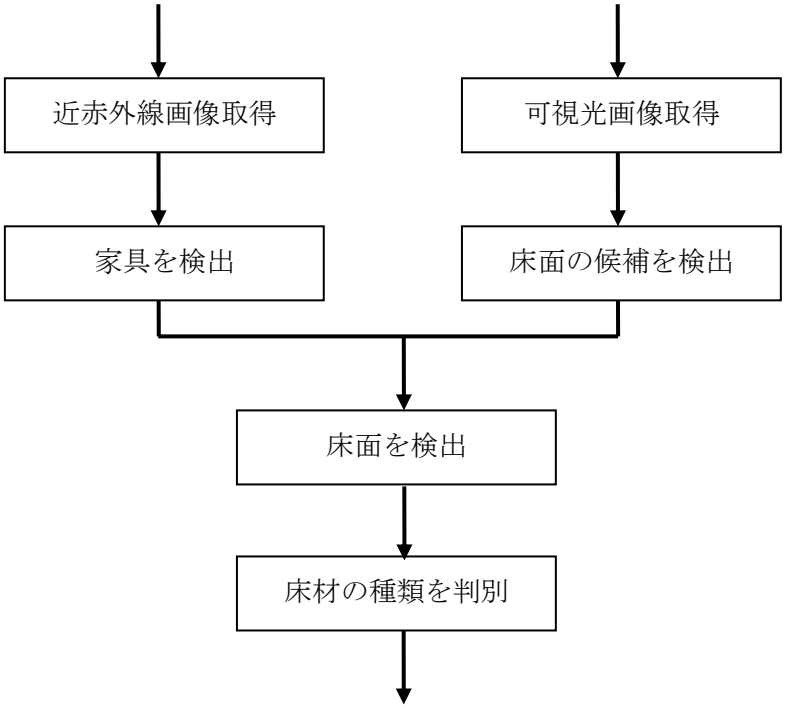


図 29 床材の種類を判別

取得した可視光画像から，4.1 節の部屋の形状特性を用いて，床面の範囲を検出する．一方で，取得した近赤外線画像から，4.3 節の設置物の形状特性を用いて床面と家具を切り分ける．上記 2 つの処理結果を用いて，床面の範囲から家具を除く処理を行い，床面のエリアを検出する．上記にて検出した床面のエリアに対し，近赤外線照射前後の輝度差を検出することにより，床の種類を判別する(図 29)．

4.6　実環境での床材検出結果

取得した可視光画像から，床面の候補を検出する．一方で，取得した近赤外線画像から，床面と家具を切り分ける．上記 2 つの処理結果を用いて，床面の範囲から家具を取り除く処理を行い，床面のエリアを検出することができた(図 30)．一方で，上記にて検出した床面のエリアに対し，近赤外線照射前後の輝度差を検出することにより，フローリングとカーペットの種類を判別することができた(図 31)．ここでは，カーペットとフローリングを判別する例を示したが,照明条件や配置の異なる 20 パターンの実験環境にて,カーペット，フローリング，畳を判別可能であることを確認した．

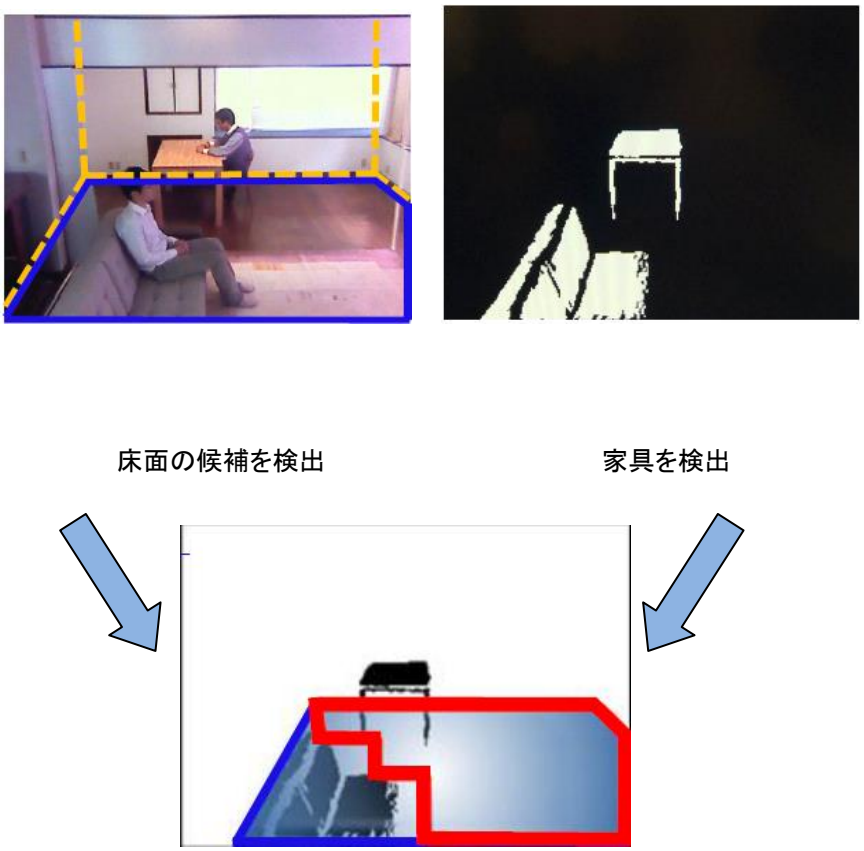


図 30 床面エリアの検出

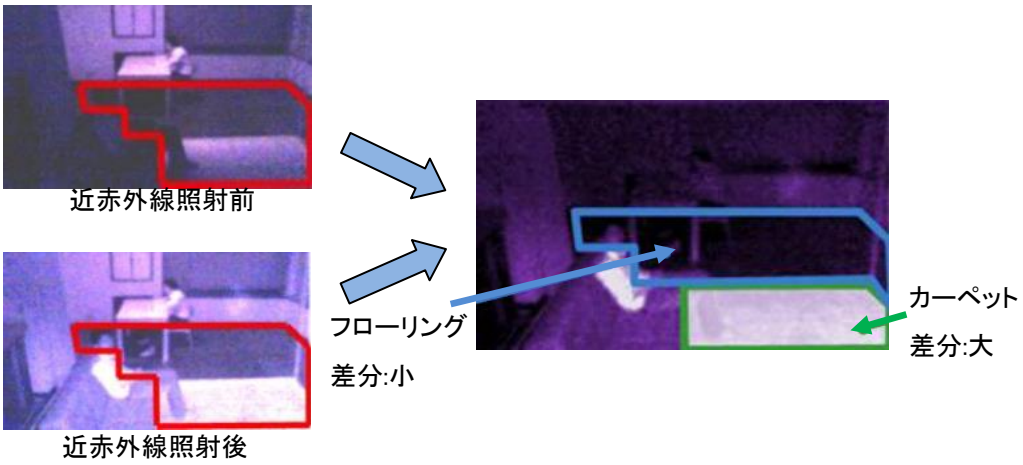


図 31 床の種類を判別

・床材判別結果を用いた気流制御実験

床材判別結果を用いた気流制御の効果を確認するため評価実験を行った．床材判別機能の設定前後の気流制御結果について，図 32 に示す．暖房運転時にフローリングの足元付近の温度が床材判別機能設定前後で 2.9 度上昇することを確認した．冷たさを感じやすいフローリングでの温度上昇効果に加え，冷たさを感じにくいカーペット面での温度が低下することを確認した．

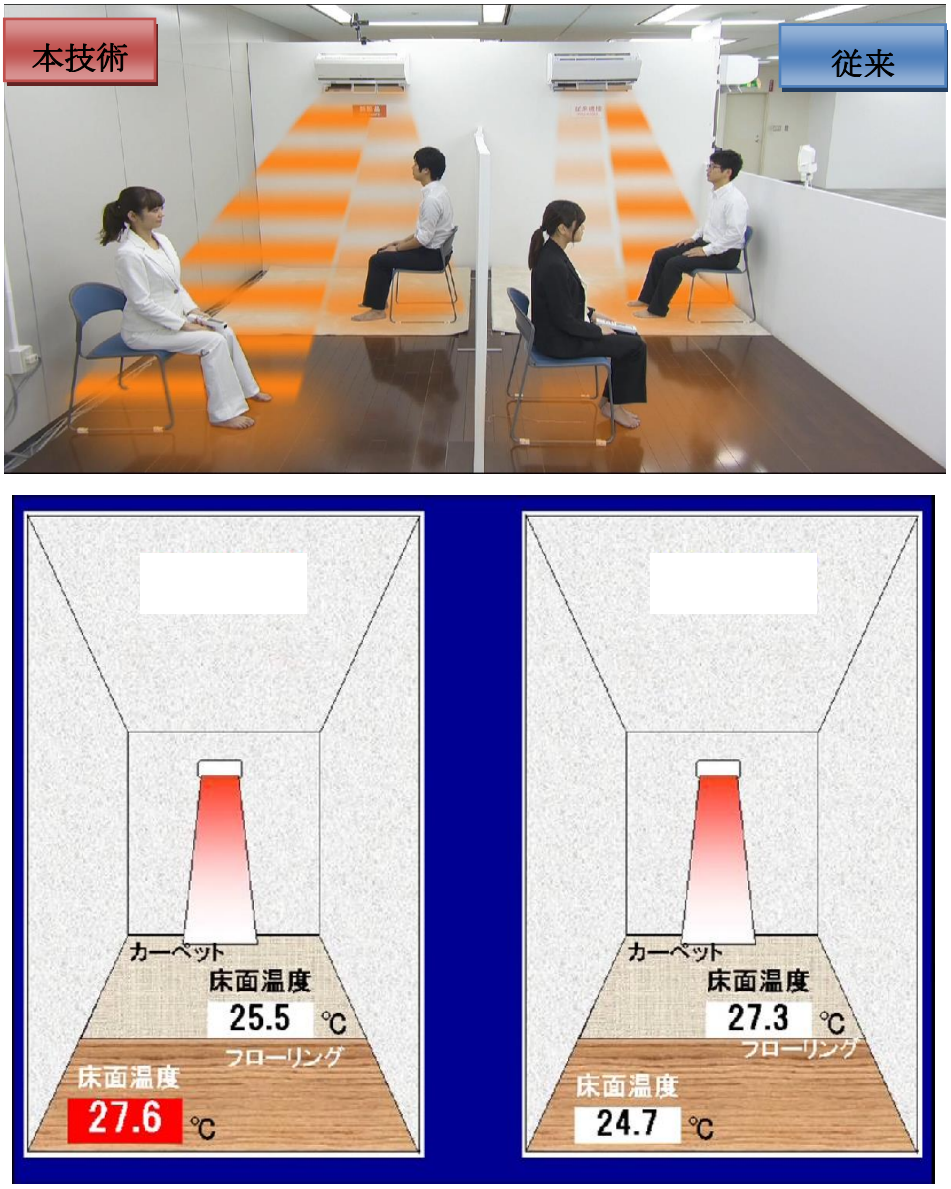


図 32 暖房時の気流制御(上:実験環境,下:床温度測定結果)

・考察

今回の評価実験では，床面を検出するために，あらかじめモデルとして与えた家具の構造知識を用いて家具の形状や位置を検出した上で，床面の候補の範囲から家具を切り分けて床面領域を検出した．さらに，床面に対する近赤外線照射前後の輝度差を検出することにより，床材の種類を判別した．

4.7　まとめ

省エネと快適性向上の両立をめざす技術として，画像認識技術を用いた間取り検出技術および家具検出技術について述べた．間取り検出技術により，可視光カメラで撮影した画像から，扉の開閉や部屋の形状及び大きさを検出し，部屋の状況に合わせて風向きと風量を自動制御することが可能となった．また，家具検出技術により，家具の位置や形状，部屋の間取りを検知し，気流が通る道を認識することにより，暖房時には足もとに向けて暖気を吹き出し，冷房時には冷風を循環させて部屋全体を涼しくするなどのきめ細かい風向制御が可能となった．このようなきめ細かい風向制御により，熱だまりの発生を防ぎ，快適性を保ったまま，省エネ性能を向上させることが可能となった．

5. システムの構築と実証実験

5.1 実験室

本研究では，宇都宮大学陽東キャンパス内の人工気候室（以下，実験室）を用いて実験を行う(図 33)．実験室は宇都宮大学陽東キャンパス１０号館の２階に設置されている．横 4.8m，奥行 3.7m，高さ 2.4m であり，壁，床，天井は厚さ 100mm の断熱材が設置されている．

実験室内には部屋の構造検出技術を搭載した空調設備に加え，実験開始時の室温を一定に維持するための空調設備を別に設けている．

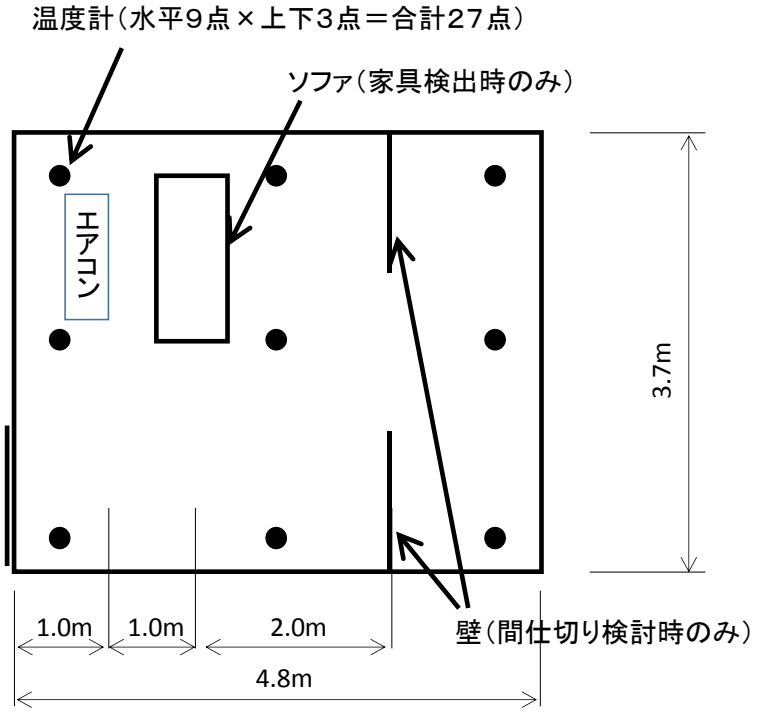


図 33　実験室平面図

実験室内では，部屋の構造検出技術を搭載した空調設備を，床上 2000mm に吹き出し口が来るように設置した．一般の住宅では窓の高さが 1800mm 程度であり，その上に設置されるカーテンレールの上限が 1900mm 程度である．空調設備の上下ルーバーが上下にスイングしてもカーテンレールに接触しないために，一般に空調設備が設置される高さは床上 2000mm 程度である．本研究では，その高さに基づいて空調設備を設置している．間取り検出制御では，エアコンから見た正面の壁の両端部を検出する．実験室内は壁，床，天井に室内環境制御用の放射パネルが設置されているが，金属面が露出しており一般の家庭とは大きく異なる表面であり誤検出の恐れがあるのに加え，放射パネルを本実験では使用しない．そこで，床には乳白色のゴム板を敷き，エアコン正面の壁には茶色の布で，エアコン側面の壁にはピンクの断熱材で放射パネルを隠した．天井はカメラの画角に含まれないため，加工をしなかった．間仕切り制御を検討する際には，実験室内に壁を仮設し，エアコンの据え付けられた間仕切りの手前側の部屋と，エアコンの据え付けられていない間仕切りの奥

の部屋を構築した．家具検出制御を検討する際には，実験室内に足元を気流が通り抜けられないソファを設置した．

環境側の要素で測定するのは，室温，湿度，気流速度，放射温度である．

室温は床上 300mm，1100mm，1800mm のそれぞれの高さで９点測定する．床上 300mm は，椅子に座った時の人の足の位置や床に座った時の人の体の位置，床に寝転がった時の人の顔の位置の近くを想定している．床上 1100mm は，椅子に座った時に人の体や顔の高さを想定している．床上 1800mm は，床に立った時の顔の位置や人の生活領域の上限高さを想定している．すなわち，室温としては，室内で合計２７点を測定する．また，吹き出し温度および人の供給される気流の温度を各１点測定する．室温の測定にはφ0.3mm の熱電対を用い，データロガー（江藤電機製 Thermodac-F）に３０秒間隔で測定する．

湿度は，人に供給される気流の相対湿度を１点測定する．湿度の測定には湿度計（testo 450）を用い，PC（DELL）に３０秒間隔で保存する．

気流速度は，人に供給される気流の速度を１点測定する．気流速度の測定には風速計（testo 450）を用い，PC に３０秒間隔で保存する．

放射温度は，実験開始時の壁や床，天井の温度が一定であることを把握する手段として，１点を測定する．熱電対を挿入したグローブ温度計を用い，データロガー（江藤電機製 Thermodac-F）に３０秒間隔で測定する．

人側の要素である着衣量と代謝量については，本研究の対象とはしない．

各実験の開始時には，室温とグローブ温度が同一の温度であることを確認し，壁や床，天井や室内の備品の蓄熱による負荷が生じない状態であることを確認した．また，各実験の開始に先立ち，各実験の開始時の室温で１０時間程度空調設備を運転し，各実験の開始時の室温を安定させた．

5.2 足検出制御の概要，実験計画および評価

足検出技術を用いた空調設備の足検出制御による室内の熱的快適性への影響を評価する．

足検出制御は，人の足の位置を検出し，人の足を効率的に暖めるのに効果的な方向で風向を制御するものである．

以下では，足検出制御の概要と，その効果を検証するための実験の計画および，その効果の検証結果を述べる．

5.2.1　足検出制御の概要

足検出制御では，検出した人の足の方向に吹き出し気流の風向を制御する．足検出制御の概要の説明に先立ち，現状の空調設備の課題を述べる．

人の足を検出することのできない現状の空調設備では，暖房運転時に人の位置とは無関係な風向制御がなされている．人の位置とは無関係な風向制御であるため，人の快適感の向上に寄与しない方向へ吹き出し空気が向けられる時間は長く，その一方で人の快適感の向上に寄与する時間が短いなどの不都合が生じている．

足検出制御では，空調設備が据え付けられた部屋にいる人の足の位置を検出する．そして，その検出結果に応じ，足を狙うよう風向を制御する．これにより，足検出制御で検出かのうな範囲内であれた，部屋のどこにいても暖気が足元に供給され，足元の温かさを得ることが可能となる．

5.2.2　実験計画

実験では，足検出制御により供給される足付近の気流の状態の変化に着目する．足検出制御により風向が足に向けられる．そのため，足付近では，風速および室温が局所的に変化する．そこで，環境条件として，被験者の足元の風速および温度を測定する．

健康な青年男子5名を被験者とし，着衣量0.8clo程度の長袖長ズボンを着用し，代謝量0.9MET程度の椅座安静状態とする．温冷感および快適感を5分間隔で評価する．気流に対して横向き（左右），正面，後ろ向きの４方向を足検出制御有りの条件，全幅スイングによる暖房を足検出制御無しの条件とする．設定室温は22℃とし，30分間の安静時間の後に20分間実験条件に暴露する．暖房運転を維持するため，実験室には22℃の設定室温での暖房運転時に加えられる熱量を除去するだけの負荷を発生させている．

温冷感の定義はISO7730-2005に従い，以下とする．

＋３　暑い（Hot）
＋２　暖かい（Warm）
＋１　やや暖かい（Slightly Warm）
　０　暑くも寒くもない（Neutral）
－１　やや涼しい（Slightly Cool）
－２　涼しい（Cool）
－３　寒い（Cold）

快適感は日本建築学会の同基準に従い，以下とする．

＋３　非常に快適
＋２　快適
＋１　やや快適
　０　快適でも不快でもない
－１　やや不快
－２　不快
－３　非常に不快

5.2.3　評価

図 34 に，足検出制御の有無と，快適感，温冷感を示す．快適感および温冷感は，全ての被験者の向きの平均値とした．その結果，快適感と温冷感のいずれも足検出制御使用時の方がより快適でより暖かい評価となった．

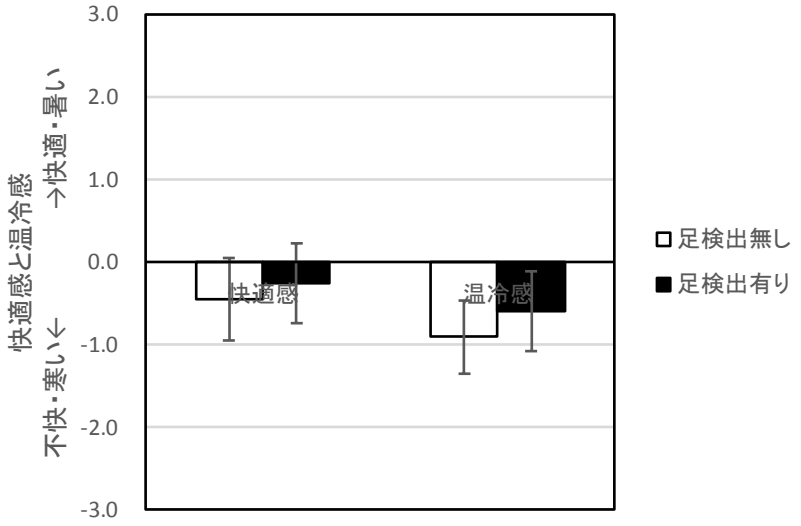


図 34　温冷感申告の比較（暖房）

図 35 に，足検出制御使用時の高さ方向の風速分布を示す．床上 50㎜ では約 0.8m/s 程度の風速が得られており，膝より上の領域ではほぼ 0.1m/s 以下の無風状態であった．

図 36 に，足検出制御使用時の足付近の温度と風速を示す．22℃の室温に対し，約 26℃の吹き出し気流が供給されていたことが示された．

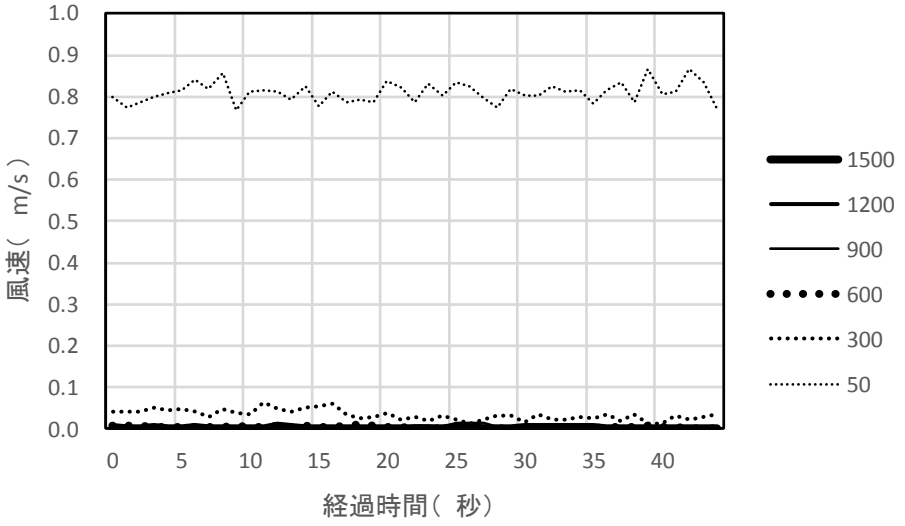


図 35　足検出による高さ方向の温度分布

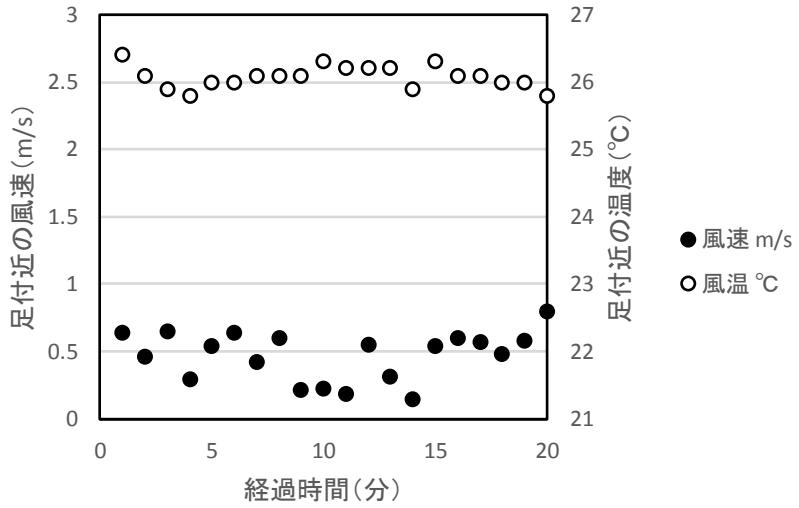


図 36　足検出による足付近の環境

5.3 評価モデルの創出

部屋の構造検出技術による熱的快適性への評価のモデルを構築する．熱的快適性の評価モデルとして，温熱指標として ISO にも示されている PMV に基づいたモデルを創出する．

PMV は，二つの要素を用いて算出される．一つ目の要素が人体と温熱環境との間の熱収支である．熱収支は温熱６要素に基づいて算出する．二つ目の要素は熱収支に対する温冷感覚の係数である．この係数は，活動量や着衣量の異なる多くのサンプルに基づいて算出されている．

PMV を構成する上記の２要素のうち，熱収支に対する温冷感覚の係数は，人の心理反応に関する要素であり，気流があることで温かさや涼しさを積極的に感じる可能性がある．また，熱収支については，部屋の構造検出技術による気流制御により変動する．そこで，部屋の構造検出技術の熱的快適性への評価は，PMV の温冷感覚の係数および熱収支に部屋の構造検出技術による気流の効果を組み込むことにより行う．

5.3.1　PMV における気流

PMV の算出式を以下に再掲する.

$$PMV = f(M) \cdot L \quad (39)$$

係数:$f(M)$は以下の式で算出することができる.

$$f(M) = 0.303\mathrm{e}^{-0.036M} + 0.028 \quad (40)$$

熱収支:Lは以下の式で算出することができる.

$$L:\text{熱収支}[\mathrm{W/m^2}] = (M - W) - (C + R + Ed + Es) - (C' + E') \quad (41)$$

$$C:\text{対流熱損失量}[\mathrm{W/m^2}] = fcl \cdot hc(tcl - ta) \quad (42)$$

$$R:\text{放射熱損失量}[\mathrm{W/m^2}] = 3.96 \cdot 10^{-8} fcl[(tcl + 273)^4 - (tr + 273)^4] \quad (43)$$

$$Ed:\text{不感蒸せつ量}[\mathrm{W/m^2}] = 3.05 \cdot 10^{-4}(5733 - 6.99(M - W) - pa) \quad (44)$$

$$Es:\text{発汗による蒸発熱損失量}[\mathrm{W/m^2}] = 0.42((M - W) - 58.15) \quad (45)$$

$$C':\text{呼吸による顕熱損失量}[\mathrm{W/m^2}] = 1.4M \cdot 10^{-3}(34 - ta) \quad (46)$$

$$E':\text{呼吸による潜熱損失量}[\mathrm{W/m^2}] = 1.7 \cdot 10^{-5} M(5867 - pa) \quad (47)$$

各記号は以下を意味する.

M：代謝量（$\mathrm{W/m^2}$）

W：外部仕事（$\mathrm{W/m^2}$）

pa：水蒸気圧（Pa）

ta：室温（℃）

fcl：着衣面積率（-）

tcl：着衣表面温度（℃）

tr：平均放射温度（℃）

hc：対流熱伝達率（$\mathrm{W/m^2K}$）

また，tcl，hc，fcl は，以下にて算出することができる.

$$tcl = 35.7 - 0.028(M - W) - Icl(R + C) \quad (48)$$

$$hc = 2.38|tcl - ta|^{0.25} \quad \text{if}(2.38|tcl - ta|^{0.25} > 12.1\sqrt{(var)}) \quad (49)$$

$$hc = 12.1\sqrt{(var)} \quad \text{if}(2.38|tcl - ta|^{0.25} < 12.1\sqrt{(var)}) \quad (50)$$

$$fcl = 1.0 + 1.290Icl \quad \text{if}(Icl < 0.078) \quad (51)$$

$$fcl = 1.05 + 0.645Icl \quad \text{if}(Icl \geqq 0.078) \quad (52)$$

各記号は以下を意味する.

Icl：着衣の熱抵抗（$\mathrm{m^2K/W}$）

var：気流速度（m/s）

PMV の熱収支は，熱の各移動経路（対流，放射，蒸発，伝導）による人と周囲の温熱環境との間の熱の出入りの収支に係数を掛けたものである．この中で，*hc* は，対流（≒気流）による熱の移動に関する係数であり，対流熱伝達率と呼ばれている．対流熱伝達率 *hc* は，風速または温度差によって変化する．「風速」は，早いほど対流による熱の移動量は大きくなる．「温度差」は，物体と流体の表面温度との差が大きいほど，物体表面に発生する気流が大きくなる．温かい空気は上昇し，冷たい空気は下降し，物体表面と流体との温度差が大きいほどそのときの空気の流れは速くなる．すなわち，温度差から求める *hc*（$hc=2.38|tcl-ta|^{0.25}$）は，暖かい／冷たい物体表面の表面を流れる流体の風速に基づき算出されたのが *hc* である．「温度差→気流→対流熱伝達率 *hc*」というプロセスのうち，予め「気流→対流熱伝達率 *hc*」の部分を算出し，「温度差→対流熱伝達率 *hc*」というプロセスに圧縮してある式が，$hc=2.38|tcl-ta|^{0.25}$ である．

5.3.2　PMV への部屋の構造検出技術の効果の組み込み

人の周囲の気流に影響する技術は，室温にも影響する可能性はある．また，PMV においては，気流は人体周囲の平均気流とされている．一方，部屋の構造検出技術は人の周囲の気流を制御することにより快適性を高めるものであり，人体の周囲の室温と気流に不均一を生じさせるものである．そこで，部屋の構造検出技術の評価を PMV に基づきモデル化するにあたり，不均一室温および不均一気流を平均化する方法を定める．

全身の皮膚温の平均値は，人体の各部位の表面積に応じた重み付けをして算出される[71]．例えば，Hardy らは，体表面を 12 部位あるいは 7 部位に分け，各部位の表面積に応じた重み付けをして平均皮膚温を算出している[72]．Hardy らの皮膚温の算出方法を参考に，本研究では，足検出制御使用時の結果に基づき，体表面のうち足検出制御による室温および気流の影響を受ける部位と，影響を受けない部位を以下のようにまとめる(表 5)．

表 5　人体の各部位と室温，気流の影響および体表面積に占める割合

部位	室温，気流の影響の有無	体表面積に占める割合
頭	×	0.07
胸	×	0.0875
腹	×	0.0875
上背	×	0.0875
下背	×	0.0875
前腕	×	0.14
手	×	0.05
大腿表	×	0.095
大腿裏	×	0.095
下腿表	○	0.065
下腿裏	○	0.065
足	○	0.07

表に示す割合に従い，以下の式にて室温および気流速度の平均値を算出する．

$$Rf = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 = 0.065 + 0.065 + 0.07 = 0.20 \quad (53)$$

$$Rnf = 1 - Rf = 1 - 0.20 = 0.80 \quad (54)$$

ここで，各記号は以下とする．

Rf：足検出制御の影響を受ける割合

R1：大腿表の表面積の割合

R2：大腿裏の表面積の割合

R3：下腿表の表面積の割合

R4：下腿裏の表面積の割合

R5：足の表面積の割合

Rnf：足検出制御の影響を受けない割合

上記の足検出制御の影響を受ける割合，足検出制御の影響を受けない割合に基づき平均室温および平均風速を以下の通り定める．

$$Tf\text{-}ave = Tave \times Rnf + Tf \times Rf = 0.80 \times Tave + 0.20 \times Tf \quad (55)$$

$$Vf\text{-}ave = Vave \times Rnf + Vf \times Rf = 0.80 \times Vave + 0.20 \times Vf \quad (56)$$

ここで，各記号は以下を意味する．

Tf-ave：足検出制御の影響を加味した人の周囲の室温

Tave：部屋全体の平均室温

Tf：足付近の温度

Vf-ave：足検出制御の影響を加味した人の周囲の気流速度

Vave：部屋全体の平均気流速度

Vf：足付近の気流速度

さらに，温冷感は，温度受容器の反応により喚起される．その温度受容器の数は，人体の各部位により密度が異なる．そこで，本研究では，足検出制御の影響を受ける部位への暖房効果の割増係数を，温度受容器のうち温度の上昇を検出する温点の数に基づいて設定することでPMVに足検出制御の影響を加味することとする．

まず，部屋の足検出制御を加味しない場合の温冷感と PMV を比較し，本研究における実験条件でPMVを算出することの妥当性を確認する．

図 37 に，足検出制御を加味しない場合の温冷感とPMVを示す．図より，温冷感とPMVの差はPMV0.03以下であり差はないということがわかった．すなわち，温冷感を PMV の算出結果と同等に扱うことができることを確認した．

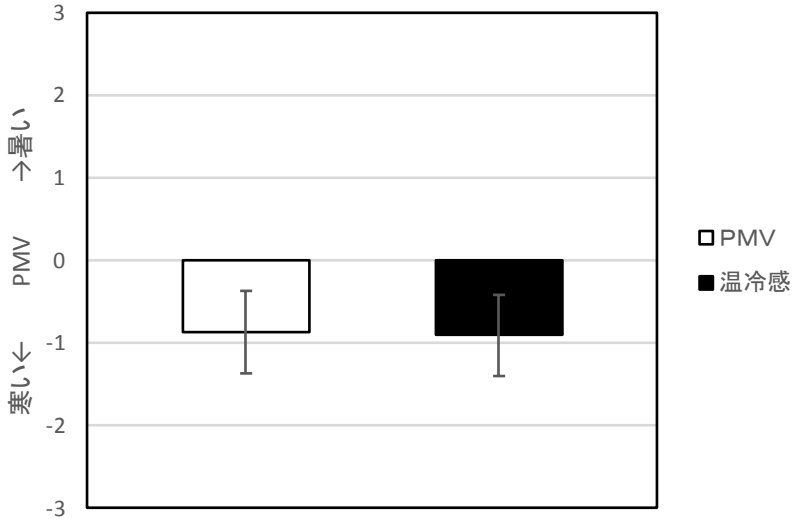


図 37　連続スイング暖房時の PMV と温冷感の比較

次に，以下の式にて足検出制御の効果を PMV に反映する．

PMV の算出式を以下に再掲する．

$$\boldsymbol{PMV = f(M) \cdot L} \quad \textbf{(57)}$$

係数:$f(M)$は以下の式で算出することができる．

$$\boldsymbol{f(M) = 0.303e^{-0.036M} + 0.028} \quad \textbf{(58)}$$

熱収支:Lは以下の式で算出することができる．

$$\boldsymbol{L}\text{:熱収支}[\mathbf{W/m^2}] = (\boldsymbol{M - W}) - (\boldsymbol{C + R + Ed + Es}) - (\boldsymbol{C' + E'}) \quad \textbf{(59)}$$

$$\boldsymbol{C}\text{:対流熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{fcl \cdot hc(tcl - ta)} \quad \textbf{(60)}$$

$$\boldsymbol{R}\text{:放射熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{3.96 \cdot 10^{-8} fcl[(tcl + 273)^4 - (tr + 273)^4]} \quad \textbf{(61)}$$

$$\boldsymbol{Ed}\text{:不感蒸せつ量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{3.05 \cdot 10^{-4}(5733 - 6.99(M - W) - pa)} \quad \textbf{(62)}$$

$$\boldsymbol{Es}\text{:発汗による蒸発熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{0.42((M - W) - 58.15)} \quad \textbf{(63)}$$

$$\boldsymbol{C'}\text{:呼吸による顕熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{1.4M \cdot 10^{-3}(34 - ta)} \quad \textbf{(64)}$$

$$\boldsymbol{E'}\text{:呼吸による潜熱損失量}[\mathbf{W/m^2}] = \boldsymbol{1.7 \cdot 10^{-5} M(5867 - pa)} \quad \textbf{(65)}$$

各記号は以下を意味する．

M：代謝量（W/m^2）

W：外部仕事（W/m^2）

pa：水蒸気圧（Pa）

ta：室温（℃）

fcl：着衣面積率（-）

tcl：着衣表面温度（℃）

tr：平均放射温度（℃）

hc：対流熱伝達率（W/m^{2}K）

ここで，熱収支においては，表 2 の人体の各部位と室温，気流の影響および体表面積に占める割合に示す通り，足付近の室温と風速を加味することで PMV に反映させている．

その一方で，局所的に空調されることによる心理的な効果については，空調される部位によりその効果の大きさが異なる．温冷感は，温度の上昇を検出する温点と温度の低下を検出する冷点により生み出される．本研究においては，温度の上昇による熱的快適性の向上の大きさを検討するため，温点に着目する[73]．表 6 に，人体の各部位の単位面積当たりの温点の数と全温点に占める各部位の温点の割合を示す．

表 6 人体の各部位と温点の数（1cm^{2}あたり），および体表面積に占める割合

部位	単位面積当たりの温点の数	全温点に占める温点の割合
頭	8.75	9.1
胸	9.6	12.5
腹	10.25	13.4
上背	7.8	10.2
下背	5.75	7.5
前腕	6.75	14.1
手	5.2	3.9
大腿表	4.85	6.9
大腿裏	4.85	6.9
下腿表	5.1	4.9
下腿裏	5.1	4.9
足	5.6	5.8

PMV の算出式を以下のように補正する．

$$\boldsymbol{PMV = f(M) \cdot L + Pts \cdot Rts} \quad \textbf{(66)}$$

各記号は以下を意味する．

Pts：全温点に占める効果のある部位の温点の割合に基づいた係数

Rts：足検出制御を使用しないときと，すべての部位に効果を得られた時の，PMV の差分

$$\boldsymbol{Pts = Ptsf / Ptsa = 0.157} \quad \textbf{(67)}$$

$$\boldsymbol{Ptsf:}\ \text{効果のある部位の温点数} = 4.9+4.9+5.8 \quad (68)$$

$$\boldsymbol{Ptsa:}\ \text{全身の温点数} = 9.1+12.5+13.4+10.2+7.5+14.1+3.9+6.9+6.9+4.9+4.9+5.8 \quad (69)$$

$$\boldsymbol{Rts = PMVc - PMVr} = 0.15-(-0.82) = 0.97 \quad (70)$$

すなわち，Pts×Rts は以下となる．

$$\boldsymbol{Pts \times Rts = 0.157 \times 0.97 = 0.152} \quad \textbf{(71)}$$

次に，足検出制御使用時の PMV と，温冷感を比較し，足検出制御を加味した PMV の妥当性を検証する．図 38 に，足検出制御の使用を加味して算出した PMV と，その時の温冷感を示す．両者の値の差は 0.07 程度であり，ほぼ同等の値となったことを確認した．すなわち，PMV の係数に，足検出制御の効果を加味することで，足検出制御使用時の温冷感を予測することが可能であることが示された．

足検出使用時の PMV は，係数×熱収支+Pts×Rts で求める．Pts は足検出時に温められる部分の割合，Rts は全身が暖められた時の効果である．そのため，0.157 と算出されている Pts は，全身のうち足検出時に温められる部分の割合は 15.7%であることを示している．部屋がおよそ 23℃の環境で足検出を使用したときの足付近の温度がおよそ 26℃であるため，

全身のうち 15.7%は 23℃の PMV から 26℃の PMV に改善される．足検出時の PMV は，「23℃の室内にいるが，足だけは 23℃の快適性と 26℃の快適性の差分を足された快適性を得られている」という考え方である．すなわち，「23℃の室内にいるが」が「係数×熱収支」であり，室温 23℃における PMV を算出する過程である．「足だけは」の部分が「Pts」であり，23℃に暴露された全身のうち足検出の効果を得られる割合を算出する過程である．「23℃の快適性と 26℃の快適性の差分」が「Rts」であり，全身が 23℃から 26℃に改善された場合の PMV の変化量である．最後の「を足された快適性を得られている」が「+Pts×Rts」の部分である．全身が 26℃に暴露されると Rts の快適性を加えられるが，全身のうち Pts の割合しかその効果を得られない，ということを示している．

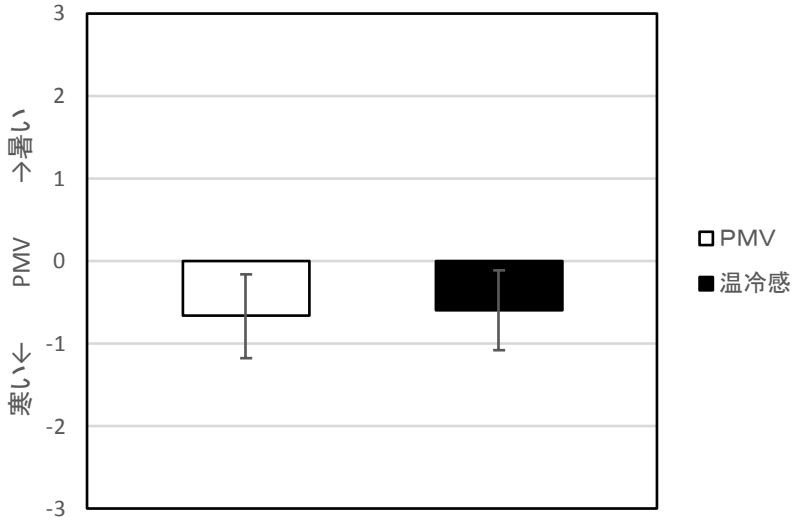


図 38　足検出制御を加味した PMV と足検出制御使用時の温冷感

一方で，均一な温熱環境を想定した従来の PMV，足検出制御を加味した PMV，温冷感を図 39 に示す．従来の PMV では，温度むらが生じる暖房時（PMV が-3～-2 程度）の快適性評価において，温熱環境の影響を過大に評価していた．従来の算出方法での PMV に基づく制御を行った場合，温度むらを生じさせる暖房時において，足元が温かくなっているのにも関わらず，まだ十分に暖められていないと判断し過剰に暖房してしまうことに繋がる．室内が十分に暖められ（PMV が-1～0 程度），温度むらがなくなれば，従来の算出方法による PMV の使用も妥当となる．

温度むらのある温熱環境を想定した足検出制御を加味した PMV では，温度むらが生じている条件下（PMV が-3～-2 程度）での温熱環境と人との間の熱収支は温冷感をより適切に評価できるようになったと言える．この PMV に基づく制御により，足元に暖気が供給され温かく感じている場合には，その温冷感を適切に推定することができ，「顔まで暑い暖房」

を回避することができる．なお，温度むらが無い温熱環境における PMV（理想状態）は，温冷感と熱収支が対応するように設計されている．

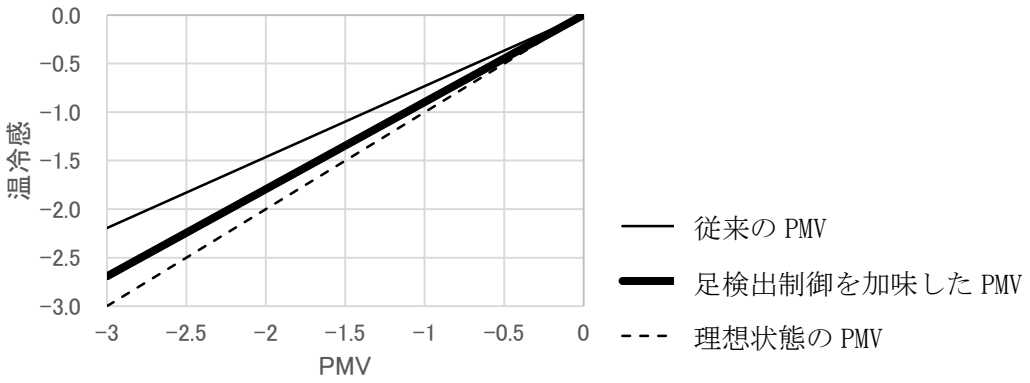


図 39　足検出制御適用前後の PMV と足検出制御使用時の温冷感

5.4 まとめ

部屋の構造検出技術による熱的快適性への評価のモデルを構築した．熱的快適性の評価モデルとして，温熱指標として ISO にも示されている PMV に基づいたモデルを創出した．PMV は，二つの要素を用いて算出される．一つ目の要素が人体と温熱環境との間の熱収支である．熱収支は温熱６要素に基づいて算出する．二つ目の要素は熱収支に対する温冷感覚の係数である．PMV を構成する上記の２要素のうち，熱収支に対する温冷感覚の係数は，人の心理反応に関する要素であり，気流があることで温かさや涼しさを積極的に感じる可能性がある．また，熱収支については，部屋の構造検出技術による気流制御により変動する．そこで，部屋の構造検出技術の熱的快適性への評価は，PMV の温冷感覚の係数および熱収支に部屋の構造検出技術による気流の効果を組み込むことにより行う．本研究では，足検出制御の影響を受ける部位への暖房効果の割増係数を，温度受容器のうち温度の上昇を検出する温点の数に基づいて設定することで PMV に足検出制御の影響を加味することとした．まず，部屋の足検出制御を加味しない場合の温冷感と PMV を比較し，本研究における実験条件で PMV を算出することの妥当性を確認した．足検出制御使用時の PMV と，温冷感を比較し，足検出制御を加味した PMV の妥当性を検証した．PMV の係数に，足検出制御の効果を加味することで，足検出制御使用時の温冷感を予測することが可能であることが示された．

6. 結論

6.1 まとめ

本研究では，体温の上下するスピードと室温との関係から，新たな快適性の指標を構築した．さらに，部屋の大きさと家具の配置，春夏秋冬の季節の変化に基づき，快適性評価のための基本モデルを構築した．人の快適性に関するニーズを把握するために，人の部位ごとの温度の情報を用いる．環境の変化を把握するために，部屋における人やオブジェクトの数，位置の情報を用いる．部屋における人やオブジェクトの数，位置の情報を得るため，可視光カメラと近赤外線カメラで撮影した画像を用いて室内の構造を推定する間取り検出手法と家具検出手法を用いる．この技術は，室内の構造，すなわち，壁面，床，梁，扉，家具などの位置を推定するものである．

第 2 章および第 3 章では，人体の熱負荷と人間の温冷感を結びつけた温熱環境評価指数 PMV (Predicted Mean Vote) について，人体の熱的快適感に影響する要素のうち，室温，平均放射温度，相対湿度，気流の４つの物理的要素と２つの人間側の要素である在室者の着衣量と作業量の関係性について述べた．気流制御により，人体周辺の気温と気流が局所的に変化するが，PMV は人間の局所の温冷感の変化を推定できないことが課題である．
本研究では，局所的な室温および気流を示す方法として，体温の上下するスピードと室温との関係から，新たな快適性の指標を構築した．さらに，部屋の大きさと家具の配置の変化に基づき，快適性評価のための基本モデルを構築した．

第 4 章では，省エネと快適性向上の両立をめざす技術として，画像認識技術を用いた空間特性解析技術について述べた．間取り検出技術により，可視光カメラで撮影した画像から，扉の開閉や部屋の形状及び大きさを検出し，部屋の状況に合わせて風向きと風量を自動制御することが可能となった．また，家具検出技術により，家具の位置や形状，部屋の間取りを検知し，気流が通る道を認識することにより，暖房時には足もとに向けて暖気を吹き出し，冷房時には冷風を循環させて部屋全体を涼しくするなどのきめ細かい風向制御が可能となった．このようなきめ細かい風向制御により，熱だまりの発生を防ぎ，快適性を保ったまま，省エネ性能を向上させることが可能となった．

第 5 章では，部屋の空間特性解析技術による熱的快適性への評価のモデルを構築した．熱的快適性の評価モデルとして，温熱指標として ISO にも示されている PMV に基づいたモデルを創出した．PMV は，二つの要素を用いて算出される．一つ目の要素が人体と温熱環境との間の熱収支である．熱収支は温熱６要素に基づいて算出する．二つ目の要素は熱収支に対する温冷感覚の係数である．PMV を構成する上記の２要素のうち，熱収支に対する温冷感覚の係数は，人の心理反応に関する要素であり，気流があることで温かさや涼しさを積極的に感じる可能性がある．また，熱収支については，部屋の構造検出技術による気流制

御により変動する．そこで，部屋の構造検出技術の熱的快適性への評価は，PMV の温冷感覚の係数および熱収支に部屋の構造検出技術による気流の効果を組み込むことにより行う．本研究では，足検出制御の影響を受ける部位への暖房効果の割増係数を，温度受容器のうち温度の上昇を検出する温点の数に基づいて設定することで PMV に足検出制御の影響を加味することとした．まず，部屋の足検出制御を加味しない場合の温冷感と PMV を比較し，本研究における実験条件で PMV を算出することの妥当性を確認した．足検出制御使用時の PMV と，温冷感を比較し，足検出制御を加味した PMV の妥当性を検証した．PMV の係数に，足検出制御の効果を加味することで，足検出制御使用時の温冷感を予測することが可能であることが示された．

6.2 今後の展望

本研究では，気流速度と室温との関係から，新たな快適性の指標を導き出した．さらに，部屋の大きさと家具の配置，足元の位置に基づき，快適性評価のための基本モデルを導き出した．人のニーズと環境の変化との関係から快適性評価のための基本モデルを用いることにより，家庭やオフィスでの生産性向上が期待できると考えている．例えば，家庭やオフィスのように，人が生活する環境には，窓からの日射による室温の変化や照明による照度の変化，道路沿いであれば振動や音が快適性に影響するものと考えている．このように快適性に影響する情報を快適性評価のための基本モデルに加えることにより，快適性が向上した環境で生活や仕事を効率的に進めることができ，業務時間の縮減などが期待できる．一方で，人それぞれ体感温度の異なることが課題である．部屋に長時間在室した場合，暑い，寒いなどの不快さを感じる人が多いことに加え，複数人が在室する場合が多く，それぞれの在室時間や体感温度が異なると考えている．今後は，在室者一人ひとりを識別することにより，各々の在室時間を計測し，在室時間の変化により生じる，暑い，寒いといった不快さを感じる前に体感温度の変化を予測したい．

7. 謝辞

本研究を行うにあたり，終始ご指導を賜った小谷一孔 教授に深謝いたします.

本研究を執筆するにあたり，草稿の段階から貴重なご助言及びご指導を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 党建武 教授，吉高淳夫 准教授，田中宏和 准教授，池田心准教授，帝京大学大学院 理工学研究科 荒井正之 教授に心より感謝いたします.

副テーマに関しご指導を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 上原隆平 教授に感謝いたします.

本研究に際して快適性の評価モデルについて貴重なご助言及びご指導を賜りました，宇都宮大学 工学研究科 地球環境デザイン学専攻 糸井川高穂 助教に心より感謝いたします.

学会発表にあたり助成いただいた Society of Instrument and Control Engineers (SICE)，情報処理学会(IPSJ)に深く感謝いたします.

また，社会人として研究を行う機会を与えていただいた同僚，諸先輩方に御礼申し上げます.

8. 参考文献

[1] 大塚厚：″「もっと快適に」生活の場に合わせた空調の進化″, 日立評論 92(10), 646-649, (2010)..

[2] 山本憲昭：″エアコンの省エネ要素技術開発″, パナソニック技法, Vol.56, No.2, (2010).

[3] Gagge A.P：A new physiological variable associated with sensible and insensible perspiration, American journal of physiology, No.120, pp.277-287, 1937.

[4] Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., and Nishi Y. ：An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Transactions 76, pp.247-262, 1971.

[5] Gagge A.P., Nishi Y. and Nevins R.G. ：The rule of clothing in meeting FEA energy conservation guidelines, ASHRAE Transactions 82, pp.234-247, 1977.

[6] Gagge A.P., Fobelets A.P., and Berglund L.G. ：A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions 91-B, pp.709-731, 1986.

[7] Fanger P.O. ：Thermal comfort, McGraw Hill Book Company, 1972.

[8] 倉渕隆、飯野由香利、川瀬智文：温暖地域における冷房機器のある小学校普通教室の空気・温熱環境と温熱環境評価、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、第 641 号、pp.893-899、2009 年 7 月.

[9] 深澤たまき、須永修通、松田克己、千葉陽輔、尾崎充男：住宅内の日常生活における温熱快適範囲に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 75 巻、第 647 号、pp.67-72、2010 年 1 月.

[10] 中村卓司、長野克則、金田一清香：水蓄熱と組み合わせた躯体蓄熱空調システムのエネルギー評価に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 75 巻、第 649 号、pp.289-295、2010 年 3 月.

[11] 篠原愛美、田辺新一、鍵屋慎一、松前和則：サーマルマネキンの投下温度を用いた暖房の快適性評価と室内投入熱量、日本建築学会環境系論文集、第 79 巻、第 706 号、pp.1029-1035、2014 年 12 月.

[12] 勝野二郎、リジャル H.B.、宿谷昌則：夏季のリビングにおける居住者の快適温度と熱的適応に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 80 巻、第 707 号、pp.13-20、2015 年 1 月.

[13] 大堀彩、原田昌幸、久野覚：冬季に屋外から入室する場合に快適な温熱環境に関する

研究、日本建築学会環境系論文集、第 571 号、pp.33-40、2003 年 9 月.

[14] 中谷岳史、松原斎樹、藏澄美仁：関西地域の住宅における熱的快適性に関する実態調査―夏期の中立温度と許容範囲―、日本建築学会環境系論文集、第 597 号、pp.51-56、2005 年 11 月.

[15] 姜燕、龍有二、香川治美：高齢者福祉施設における温熱環境と利用者の心理反応に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 73 巻、第 624 号、pp.191-197、2008 年 2 月.

[16] 羽田正沖、西原直枝、中村駿介、内田智志、田辺新一：夏季室温緩和設定オフィスにおける温熱環境実測及び執務者アンケート調査による知的生産性に関する評価、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、第 637 号、pp.389-396、2009 年 3 月.

[17] Sanjay Kumar, Manoj Kumar Singh, Vivian Loftness, Jyotirmay Mathur and Sanjay Mathur: Thermal comfort assessment and characteristics of occupant’s behavior in naturally ventilated buildings in composite climate of India, Energy for Sustainable Development.

[18] 高娟淑、久野覚、原田昌幸、中山和美、飯村龍：住宅における夏季の通風と冬季の日射が室内温熱環境評価に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、第 638 号、pp.427-433、2009 年 4 月.

[19] 倉渕隆、清水裕幸、蛭田厚大、岩本靜男、加治屋亮一、酒井孝司、飯野由香利、小笠原岳、遠藤智行、長井達夫：換気負荷のある居室での床暖房時や温風暖房時における温熱・気流環境と温熱環境評価および室内投入熱量の空間分布、日本建築学会環境系論文集、第 76 巻、第 661 号、pp.317-324、2011 年 3 月.

[20] 長澤康弘、近藤靖史：システム天井用吹き出し口気流性状に影響を与える要因の整理と非構造格子系 CFD 解析による検討―空調用吹き出し口の CFD モデリングのための吹き出し気流データの整備とその適用（その１）―、日本建築学会環境系論文集、第 77 巻、第 672 号、pp.56-64、2012 年 2 月.

[21] 羽原宏美、西澤繁毅、細井昭憲、三浦尚志、澤地孝男：通風利用が室内温湿度環境及び熱処理構造に与える影響、日本建築学会環境系論文集、第 77 巻、第 673 号、pp.135-142、2012 年 3 月.

[22] 細井昭憲、成田樹昭、須永修通：自然通風の温熱快適性に基づく制御方法と省エネルギー効果―自然通風に関する実測研究　その２―、日本建築学会環境系論文集、第 577 号、pp.7-12、2004 年 3 月.

[23] 秋元孝之、松田順平、西原直枝、田辺新一：個人制御による秘湯温タスク空調が熱的快適性・知的生産性に与える影響、日本建築学会環境系論文集、第 582 号、pp.75-82、2004 年 8 月.

[24] 梁禎訓、加藤信介、林立也、村上周三：実験及び数値サーマルマネキンを用いた室内環境における人体各部位の対流熱伝達率の測定、日本建築学会環境系論文集、第 584 号、pp.33-40、2004 年 10 月.

[25] リスティアニ　ヌルル　フーダ、松原奈穂美、本間宏：対流熱伝達量の後頭部とくるぶしにおける差に関する実験的研究、日本建築学会環境系論文集、第 574 号、pp.21-28、2003 年 12 月.

[26] 李晟在、田辺新一、野部達夫：等温気流型ユニットを用いたタスク空調の熱的快適性、日本建築学会環境系論文集、第 575 号、pp.75-82、2004 年 1 月.

[27] 鈴木健次、堀越哲美：天井吸い込み時の室内気流が人体の生理心理反応に与える影響に関する実験的研究、日本建築学会環境系論文集、第 572 号、pp.81-87、2003 年 10 月.

[28] 秋元孝之、李晟在、田辺新一：オフィス空間における非等温気流タスク空調方式の有効性、日本建築学会環境系論文集、第 596 号、pp.67-74、2005 年 10 月.

[29] 朱晟偉、加藤信介、楊霊：スポット気流における椅子座位人体の姿勢調整による温熱適応効果の考察、日本建築学会環境系論文集、第 614 号、pp.25-31、2007 年 4 月.

[30] 渡邊慎一、堀越哲美、石井仁、宇野勇治、兼子朋也、冨田明美：サーマルマネキンを用いた風速と風向が人体対流熱伝達率に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集、第 73 巻、第 629 号、pp.887-893、2008 年 7 月.

[31] 渡邊慎一、堀越哲美、兼子朋也、宇野勇治、石井仁、冨田明美：サーマルマネキンを用いた風速と風向が着衣熱抵抗に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 621 号、pp.23-28、2007 年 11 月.

[32] Kana Horikiri, Yufeng Yao, Jun Yao: Numerical optimization of thermal comfort improvement for indoor environment with occupants and furniture, Energy and Buildings, No.88, pp.303-315, 2015.

[33] Kana Horikiri, Yufeng Yao, Jun Yao: Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment, Building and Environment, No.77, pp.135-147, 2014.

[34] Mohd Sabri Mustapa, Sheikh Ahmad Zaki, Hom Bahadur Rijal: Thermal comfort and occupant adaptive behavior in Japanese university buildings with free running and cooling mode offices during summer, Building and Environment, No.105, pp.332-342, 2016.

[35] Yingxin Zhu, Maohui Luo, Qin Ouyang, Li Huang and Bin Cao: Dynamic characteristics and comfort assessment of airflows in indoor environments A review, Building and Environment, No.99, pp.5-14, 2015.

[36] 武田仁、鈴木宏和：日射遮蔽物とガラス中空層におけるミスト散水の熱的評価―光触媒外付けタテ型ブラインドの部位実験及び実証実験等による検証―、日本建築学会環境系論文集、第 76 巻、第 667 号、pp. 775-783、2011 年 9 月.

[37] 堤仁美、田辺新一、秋元孝之、鈴木孝佳：湿度環境とホルムアルデヒドが熱的快適性・知的生産性に与える影響に関する被験者実験、日本建築学会環境系論文集、第 572 号、pp. 31-37、2003 年 10 月.

[38] 青木哲、須藤千春、水谷章夫、大澤徹夫：室内温湿度から見た冷房の効果に関する研究―一般住宅とアトピー性皮膚温炎者宅の比較―、日本建築学会環境系論文集、第 605 号、pp. 55-62、2006 年 7 月.

[39] 堤仁美、田辺新一、針ヶ谷純吉、井口泰男、中村元：蒸暑環境から冷房空間への入室時において湿度が快適性・知的生産性に及ぼす影響に関する被験者実験、日本建築学会環境系論文集、第 609 号、pp. 15-21、2006 年 11 月.

[40] 尾崎明仁、小笹（香川）治美、辻丸達憲：暖房時の室内過乾燥に影響する要因解析と温湿度予想、日本建築学会環境系論文集、第 617 号、pp. 9-16、2007 年 7 月.

[41] 南百合子、大岡隆三、沢崎愼祐、佐古井智紀、都築和代：２ノードモデルにおける発汗モデルの改良と暑熱環境安全性評価への適用、日本建築学会環境系論文集、第 73 巻、第 623 号、pp. 107-114、2008 年 1 月.

[42] 三浦克弘、相楽典康：躯体蓄熱冷房における室内湿度の上昇と改善手法の効果、日本建築学会環境系論文集、第 73 巻、第 634 号、pp. 1423-1433、2008 年 12 月.

[43] 青木哲、須藤千春、水谷章夫、大澤徹夫：冬季の室内温湿度変動から見た温熱性能・環境―一般住宅とアトピー性皮膚温患者宅の比較―、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、第 637 号、pp. 305-314、2009 年 3 月.

[44] 中澤和弘、鉾井修一、高田暁：着衣―人体間における熱・水分・空気移動解析のための基礎的検討、日本建築学会環境系論文集、第 580 号、pp. 23-29、2004 年 5 月.

[45] 宮本征一、冨田明美、堀越哲美：着衣のゆとりが人体の有効放射面積と形態係数に及ぼす影響に関する研究―４．青年男子の椅子座位姿勢の実測及び性別・姿勢間の検討―、日本建築学会環境系論文集、第 569 号、pp. 15-20、2003 年 7 月.

[46] 仲松亮、堤純一郎、新川亮樹、安井文男、斎藤基之、石井昭夫：亜熱帯沖縄における温熱感覚調整要素としての着衣量の実態調査、日本建築学会環境系論文集、第 570 号、pp. 21-27、2003 年 8 月.

[47] 大和義昭、松原斎樹、藏澄美仁：京都市及び近辺地域の住宅における居住者の着衣の実態に関する調査研究、日本建築学会環境系論文集、第 595 号、pp. 25-31、2005 年 9 月.

[48] 宮本征一：オフィス空間におけるスーツ着用時の温熱的快適域に関する研究―その１

冬季の低湿度条件における温冷感お性差について―、日本建築学会環境系論文集、第620号、pp.31-36、2007年10月.

[49] 宮本征一：オフィス空間におけるスーツ着用時の温熱的快適域に関する研究―その２夏季の中程度高温環境下における温冷感の男女の性差について―、日本建築学会環境系論文集、第73巻、第628号、pp.715-720、2008年6月.

[50] 大熊涼子、石野久彌、中村哲士：冬季20℃室温における着衣と熱的快適性に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第73巻、第625号、pp.307-312、2008年3月.

[51] Wenfang Song, Faming Wang, Fanru Wei: Hybrid cooling clothing to improve thermal comfort of office workers in a hot indoor environment, Building and Environment, pp.92-101, 2016.

[52] 小川徳雄、伊藤路子、宮側敏明、朝山正巳：温熱性発汗発現の部位差について、日本生気象学会雑誌、16(1)、pp.22-29、1979年.

[53] 丸山康子、田村照子：不均一温熱刺激に対する皮膚温・温冷感反応、日本生気象学会雑誌、26(3)、pp.143-154、1989年.

[54] 西村和久、平田耕造、白水智子、竹森利和：体脂肪率の違いは末梢部皮膚温に影響するか?、日本生気象学会雑誌、30(4)、pp.187-196、1993年.

[55] 山本顕子、田村照子:体温調節の月経周期変動、日本生気象学会雑誌、35(1)、pp.45-52、1998年.

[56] 梅宮典子、中村泰人、岡村圭子：同一設定温度下の2月と9月における代謝量測定値について、日本生気象学会雑誌、35(3)、p.16、1999年.

[57] 藏澄美仁、山本志津恵、松原斎樹：姿勢の違いと日本人青年女性の安静時代謝量、日本生気象学会雑誌、36(1)、pp.21-29、1999年.

[58] 西原直枝、長谷部ヤエ：局所冷刺激に対する人体反応特性の部位差、日本生気象学会雑誌、39(4)、pp.107-120、2003年.

[59] 森郁恵、鉾井修一、高田暁：高温環境における局所冷却の整理応答―人体熱モデルによる解析と被験者実験―、日本生気象学会雑誌、41(1)、pp.19-30、2004年.

[60] 田中英登、梅田奈々：高齢者における夏季の冷房使用状況と冷房使用時の生理的反応と温熱的快適性に及ぼす気流の影響、日本生気象学会雑誌、51(4)、pp.141-150、2015年.

[61] 小野瀬翔、岡本智行、小貫健太、糸井川高穂、山本裕紹：角パイプアレイ(SPA)を用いた遠赤外線収束による局所暖房の可能性、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、14p-2E-5、2015年.

[62] 小松佑人：〝家庭用エアコン向け間取り検出技術〟, 情報処理学会第76 回全国大会, 2014年.

[63] 小松佑人：″家庭用エアコン向け家具検出技術″, 情報処理学会第 77 回全国大会, 2015 年.

[64] 社団法人空気調和・衛生工学会：快適な温熱環境のメカニズム、丸善株式会社、1997 年.

[65] 糸井川高穂：特許に基づく空調機器の技術動向 ： 快適性を向上させる技術、日本建築学会関東支部研究報告集、85、Ⅱ、pp.165-168、2015 年.

[66] ISO 7730:2005(E); Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

[67] 平成 ２４年度ヒートアイランド現象に対する適応策及び震災後におけるヒートアイランド対策検討調査業務報告書, 一般社団法人環境情報科学センター, 2013 年 3 月.

[68] 大塚 厚： ″2011 年度 PAM エアコン「イオンミスト ステンレス・クリーン 白くまくん」(S シリーズ)の開発″, 日立評論 93(10), 646-649, 2011 年.

[69] 森本正志、輿水大和、Hough 変換の諸課題と新しいパターン、計測と制御 第 35 巻 第 11 号 1996 年 11 月.

[70] 田村 秀行： ″ SPIDER －ポータブルな画像処理 サブルーチン・パッケージ″, CVIM32, 1-8, 1979 年.

[71] Ken Parsons :Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, Third Edition, CRC Press, 2014.

[72] HARDY, J. D.; DUBOIS, E. F.: The technic of measuring radiation and convection, Journal of Nutrition, Vol.15, pp.461-475, 1938.

[73] Zotterman Y: Thermal sensation, Handbook of Physiology, vol.1, Neurophysiology, Washington,D.C., American Physiological Society, pp.431-458, 1959.

9. 本研究に関する発表論文

9.1 論文（査読付）

・小松佑人 他, “組込み機器向け空間認識技術”, デジタルプラクティス論文誌, 情報処理学会, 2017(採録)

9.2 国際会議（査読付）

・Yuto Komatsu, “Area detection technology for Air Conditioner”, The 34th Chinese Control Conference and SICE Annual Conference 2015 (CCC&SICE2015), 2015/7

9.3 国内学会

・小松佑人 他, “家庭用エアコン向け間取り検出技術”, 第 76 回全国大会情報処理学会, 2014/3

・小松佑人 他, “家庭用エアコン向け家具検出技術”, 第 77 回全国大会情報処理学会, 2015/3

・小松佑人 他, “家庭用エアコン向け部屋認識技術”, 第 78 回全国大会情報処理学会, 2016/3

9.4 受賞

・情報処理学会 大会奨励賞 2015/3

・情報処理学会 大会優秀賞 2016/3

・日本冷凍空調学会 技術賞 2017/5(予定)