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

Title	サーモグラフィーカメラを用いたスマートホームセンシングシステム
Author(s)	洪，源
Citation	
Issue Date	2019-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/15934
Rights	
Description	Supervisor:丹　康雄，先端科学技術研究科，修士（情報科学）

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

修士論文

サーモグラフィーカメラを用いたスマートホームセンシングシステム

1610068　HONG Yuan

主指導教員　丹　康雄　教授
審査委員主査　丹　康雄　教授
審査委員　リム　勇仁　准教授
篠田　陽一　教授
知念　賢一　特任准教授

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
（情報科学）

平成 31 年 2 月

概　要

従来のスマートホームでは、目的ごとに個別にセンサーを設置してサービスを実現することが多い。さらに、単一のサービスを構築するために、複数種類かつ大量なセンサーが求められている。これによって、システムの構築コストや運用コストをあげる原因となっていて、スマートホームにおけるセンシングシステムが複雑化の一途とたどっている。

一方、我々人間は８割以上の情報が視覚から得ていることは、センサーとしてカメラが極めて高い可能性を秘めていることを示唆している。カメラによる取得した画像を分析・画像処理を行って、身分識別や、オブジェクト特徴識別などの高度なセンシングサービスが実現できると知られていた。カメラによる画像取得は極めて情報量の高いセンシングシステムであるが、可視光を用いたカメラではプライバシの問題がつきまとうが、解像度を適宜落としたサーモグラフィー画像については抵抗感が薄れることが期待される。また、可視光では測定できない輻射熱は、温熱環境の快適性に大きな影響を与えるのみならず、機器の異常動作の発見にも有用なものであるが、現状、ほとんど活用されていない状況にあった。デバイスとしてのサーモグラフィーカメラも従来は極めて高価で大掛かりなものであったが、近年極めて安価かつコンパクトに実装することができるようになっており、他のセンサー同様の実装も可能となりつつある。

本研究の目的はサーモグラフィーカメラを用いて、住宅内の様々な状況を感知する総合センシングシステムを構築すべく、単一のサーモグラフィデバイスを用いた複数の物理量の計測および抽出技術を開発することである。一つのデバイスによって、大量かつ有効的なデータを獲得と同時に、一種のデバイスを複数のデバイスに抽象し、サービスプラットフォームにＡＰＩを提供する。これがスマートホームシステムのシンプル化研究、またはセンサー活用研究に与える新たな研究方向でもある。

本研究においては、サーモグラフィーカメラの一つのデバイスを使用し、設備によって取得されたデータを多様化して、複数の異なるタイプの API データを形成する。それにより、従来のスマートホームシステムのサービスやアプリケーションに充実なデータサポートを提供するのも可能である。同時に、通常手段で計測困難な物理量（足跡、平均輻射熱）を入手することも可能になる。これらのデータを活用し、快適性サービス、または機械学習により人間行為分析の研究にも非常に有用であると考えられる。将来、スマートホームシステムにおけるサービスの開発に新たな可能性を与えた。

本研究の検証実験を通じ、サーモグラフィーカメラがスマートホームセンシングシステムにおける信頼性と性能を十分に証明されていた。このデバイスの精度は他の専門セ

ンサー（温度センサー等）よりやや劣っているが、その反応速度と感度、またデータサポートの膨大さは非常に優れている。そして、サーモグラフィーカメラから得られたその時点での情報だけでなく、時系列の情報や他の情報源からの情報とも合わせ、より高次な情報の取得を目指す。これにより、スマートホームにおけるセンシングシステムをよりローコストかつ高信頼化することが見込まれる。

目次

第 1 章 はじめに 1
1.1 研究背景 1
1.2 研究目的 1
1.3 本論文の構成 2
第 2 章 関連研究・技術 4
2.1 スマートホームにおけるセンシング技術 4
2.2 センサーの比較 5
2.3 センサーデータの活用 6
2.4 作用温度(OT)・平均放射温度(MRT) 7
2.4.1 作用温度(OT) 7
2.4.2 平均放射温度(MRT) 7
2.5 足跡検出 8
第 3 章 サーモグラフィーカメラ 10
3.1 サーモグラフィーカメラとは 10
3.2 サーモグラフィーカメラの特徴と強み 12
3.3 研究機材 12
3.4 サーモグラフィーカメラのデータ構造 14
第 4 章 提案するセンシングシステム 16
4.1 システム概要 16
4.2 システム全体図 16
4.3 API_SPI 18
4.4 有人環境管理 18
4.4.1 対人 Class 18
4.4.2 対人 API 19
4.5 無人環境管理 19
4.5.1 対環境 Class 19
4.5.2 対環境 API 20
第 5 章 実装 22

5.1 開発環境 22
5.2 対人 API 22
5.2.1 人間識別 API　API_HumanMark 22
5.2.2 足跡検知 API　API_FootPrint 25
5.3 対環境 API 25
5.3.1 異常温度感知 API　API_AbnormalAlarm 25
5.3.2 平均放射温度 API　API_MeanRadiantTemperature 27
5.3.3 生データ出力 API　API_RAW 28
第 6 章 実験・評価 29
6.1 実験方法 29
6.1.1 対人 API 29
6.1.2 対環境 API 30
6.2 実験結果 32
6.2.1 対人 API 実験 32
6.2.2 対環境 API 実験 34
6.3 考察・評価 36
第 7 章 まとめ 38
第 8 章 今後の課題 39
謝辞 40
参考文献 41

図目次

図 2-1　異なる環境の体感温度 [4] 8
図 2-2　サーモグラフィーカメラに映った足跡の様子(靴下着用、床:カーペット) 9
図 2-3　サーモグラフィーカメラに映った足跡の様子（ゴム製スリッパ着用、床：カーペット） 9
図 3-1　サーモグラフィーカメラ扱う波長帯 [8] 11
図 3-2　Flir Lepton 3.5 の様子 14
図 3-3　サーモグラフィーカメラからのデータ処理ツール 15
図 4-1　提案するセンシングシステムの全体図 17
図 5-1　API_HumanMark 人間識別 API 動作の流れ 24
図 6-1　人間識別 API のデバイス配置 29
図 6-2　足跡検知 API のデバイス配置 30
図 6-3　炎をシミュレートする電気ヒーター 30
図 6-4　異常発熱家電をシミュレートする熱湯を積んだ水筒 31
図 6-5　異常の低温をシミュレートする製氷皿 31
図 6-6　実験結果　人間識別 API 動作確認 I（Body、Head 識別成功） 32
図 6-7　実験結果　人間識別 API 動作確認 II（Body 成功 Head 失敗） 32
図 6-8　実験結果　足跡検知 API 動作確認 I 33
図 6-9　実験結果　足跡検知 API 動作確認 II 33
図 6-10　異常温度検知する時の様子（高温） 34
図 6-11　異常温度検知する時の様子（低温） 34
図 6-12　異常温度検知する時の様子（発火） 35
図 6-13 異常温度検知する時の様子（複数目標） 35
図 6-14　環境の平均輻射温度を計測様子 36

表目次

表 1　スマートホームにおける検知サービスの特徴 4
表 2　各種センサーの比較 6
表 3　Flir Lepron 3.5 仕様書 [9] 13
表 4　対人 Class の設計 18
表 5　対環境 Class の設計 20
表 6　対人 API　 API_HumanMark　人間検知 23
表 7　対人 API　API_FootPrint　足跡検知 25
表 8　対環境 API　API_AbnormalAlarm　異常温度検知 26
表 9　対環境 API　API_MeanRadintTemperrture　平均放射温度計測 27
表 10　対環境 API　API_RAW　生データ出力 28
表 11　距離別の実験結果 37

第1章 はじめに

本章では、本研究の研究背景、研究目的、及び本論文の構成を述べる。

1.1 研究背景

従来のスマートホームでは、目的ごとに個別にセンサーを設置してサービスを実現することが多い。さらに、単一のサービスを構築するために、複数種類かつ大量なセンサーが求められている。これによって、システムの構築コストや運用コストをあげる原因となっていて、スマートホームにおけるセンシングシステムが複雑化の一途とたどっている。

一方、我々人間は８割以上の情報を視覚から得ているといわれていることは、センサーとしてカメラが極めて高い可能性を秘めていることを示唆している。カメラによる取得した画像を分析・画像処理を行って、身分識別や、オブジェクト特徴識別などの高度なセンシングサービスが実現できると知られていた。カメラによる画像取得は極めて情報量の高いセンシングシステムが、可視光を用いたカメラではプライバシの問題がつきまとうが、解像度を適宜落としたサーモグラフィー画像については抵抗感が薄れることが期待される。

また、可視光では測定できない輻射熱は、温熱環境の快適性に大きな影響を与えるのみならず、機器の異常動作の発見にも有用なものであるが、現状、ほとんど活用されていない状況にあった。デバイスとしてのサーモグラフィーカメラも従来は極めて高価で大掛かりなものであったが、近年極めて安価かつコンパクトに実装することができるようになっており、他のセンサー同様の実装も可能となりつつある。

1.2 研究目的

本研究の目的はサーモグラフィーカメラを用いて、住宅内の様々な状況をセンシングする総合センシングシステムを構築すべく、単一のサーモグラフィデバイスを用いた複

数の物理量の計測および抽出技術を開発することである。一つのデバイスによって、大量かつ有効的なデータを獲得と同時に、一種のデバイスを複数のデバイスに抽象し、サービスプラットフォームにＡＰＩを提供する。

カメラから得られたその時点での情報だけでなく、時系列の情報や他の情報源からの情報とも合わせ、より高次な情報の取得を目指す。これにより、スマートホームにおけるセンシングシステムをよりローコストかつ高信頼化することが見込まれる。

1.3 本論文の構成

本論文は以下の構成となっている。

- 第１章
  - 研究の背景と目的、本論文の構成を述べる。
- 第２章
  - 現在スマートホームにおけるセンシング技術と各種センサーの特徴・比較について述べる。また研究に関連する他の技術と研究について記述する。
- 第３章
  - 本研究の主軸とするデバイスサーモグラフィーカメラについて説明する。また研究で扱っているデバイスの仕様とデータ処理ツールを述べる。
- 第４章
  - 本研究で提案するセンシングシステムについて記述する。
- 第５章
  - サーモグラフィーカメラを用いたセンシングシステムの実装について述べる。

- 第 6 章
  - サーモグラフィーカメラを用いたセンシングシステムの実験・評価について述べる。
- 第 7 章
  - 本研究におけるまとめを述べる
- 第 8 章
  - 今後の課題について述べる

第2章 関連研究・技術

本章では、現在スマートホームにおけるセンシング技術と各種センサーの特徴・比較について述べる。また研究に関連する他の技術と研究について記述する。

2.1 スマートホームにおけるセンシング技術

現在のスマートホームにおいては、様々なセンシング技術とサービスが存在している。スマートホームのように様々なサービスが存在しうる環境下では、それぞれの要求の違いにより、結局はサービスごとのセンサー増設が求められてしまっていた。

表 2-1 では、スマートホームにおける、一般的であるいくつのセンシングサービスの構成デバイスと特徴である。

サービス	デバイス/技術	強み	弱み
位置、人間識別	RFID、Bluetooth、IMES	障害物に強い、測定速度速い、目標区別可能	電波障害に弱い、タグ必要
	可視光線カメラ	情報量が大きい、反応速度速い	照明光に影響される
	人感センサー、レーダーセンサー	ローコスト	精度低い
温度検知	温度センサー	精度が高い	反応速度が遅い、大量なセンサーが必要
体感温度・快適性	温度センサー、湿度センサー、風速センサー	精度が高い	輻射熱からの影響計測できない
防火	炎センサー、煙センサー、熱感知器	ローコスト	炎が生成してから警告、事前抑制できない

表 1　スマートホームにおける検知サービスの特徴

スマートホームにおける様々なサービスを実現するため、高性能的かつ高精度的な検知システムが必要となる。検知システムから提供された正確なデータによって、より高次元なサービスや機能の開発及び実施を達成することができる。

スマートホームにおけるセンシングシステムは、検知ターゲットにより 2 種類に分けられ、人体（生体）をターゲットにする検知システムと環境（非生体）をターゲットにする感知システムである。

人体（生体）ターゲットに対する検知は主に、ターゲットの温度・画像・音声などの情報を検出することである。それらの情報を上層レイヤーに提供し、位置検知・ターゲット識別及び高度な機械学習・人間行動分析などのサービスが実現できる。

環境（非生体）ターゲットに対する検知は主に、室内環境の温度・湿度・気圧・照明などの情報を検知することでる。その情報に基づいて、環境の異常な部分を発見するや環境の安全性を確保することが可能になる。更に人体に対する検知部分を合わせて、快適性サービスも実現可能になる。

2.2 センサーの比較

スマートホームにおけるすべてのセンシング技術を支えるために、多くの種類のセンサーがヒト用となる。科学の発展に伴い、センサーの性能もサイズも進化している。表 2-2 は現在、スマートホームにおけるセンシング技術でよく使われるセンサーの種類と特徴の比較である。表 2-2 の比較によると、各種類のセンサーは独自の長所と短所があることが明らかになった。

特に、本研究で使用されているサーモグラフィーカメラは過去には主に軍事物資・医療設備として、一般人は入手するのが困難である。更に、このデバイスは非常に高価であり、最低でも数百万もする価格は見ただけでしりこみする。スマートホームシステムの研究においても、現実的ではない。しかし、近年サーモグラフィーカメラ業界がめざましい勢いで発展していて、民間用の製品も続々と開発された。軍用・医療用製品より性能と精度がやや低いが、極めて安価かつコンパクト的な外形は、他のセンサーと同様にスマートホームで応用できるようになった。そして、サーモグラフィーカメラの温度・画像の両面性はセンサーとして巨大的な潜在力を持っている。

センサー分類	例	情報量	反応速度	価格	電波障害の影響	照明の影響	タグの必要性
半導体	温度センサー、湿度センサー	単一	遅い	低い	x	x	x
MEMS	加速度センサー	複数	速い	普通	x	x	x
無線	RFID、Bluetooth	単一	速い	高い	o	x	o
可視光線カメラ		大量	速い	普通	x	o	x
サーモグラフィーカメラ		大量	速い	高い	x	x	x

表 2　各種センサーの比較

2.3 センサーデータの活用

スマートホーム技術の発展に伴い、システムが提供するサービス・機能はますます増えていく。しかし、スマートホームにおけるセンシングシステムが複雑化の一途とたどっている。同時に、莫大なセンサーデータはセンサーネットワークの効率を低下させるだけではなく、データ処理時のシステムオーバーベッドも増加させる。

現在、この課題に関する多くの研究が行わっている。代表的な研究は、日立の「センサーデータ活用ソリューション」 [1]は不良のセンサーデータの発生に対応する研究である。このような研究の着目点ほとんどは、冗長データまたは不良・エラーデータの除去である。しかし、これは物理的な構造の複雑化を根本的に解決するものではない。本研究は他の着目点から出発し、一つのセンサーのセンサーデータを複数種類の API に加工して、単一のセンサーを他の伝統的な複数種類のセンサーと抽象化する。現存する他のセンサーに依存するサービスに対しても、同じセンサーAPI を提供できるとともに、他の新たな機能も実現する事ができる。これにより、物理構造の複雑化をある程度

軽減することできると考えられる。

2.4 作用温度(OT)・平均放射温度(MRT)

作用温度と平均放射温度は快適性を評価する重要な物理量である。ここは上記の二つの物理量について説明する。

2.4.1 作用温度(OT)

作用温度（英：Operative temperature、略称：OT） [2]とは、人体が感じた外界からの温度である。すなわち体感温度のことである。体感温度は単なる空気温度のことではなく、体感温度に影響する要素は主に気温・湿度・風速・平均放射温度と着服量である。影響される要素が多いため、すべての状況と影響要因を考えるのは難しい、これまでの研究では、絶対的な計算方法はない。しかし、通常の室内環境（湿度 40－50%、風速 0）では、作用温度は以下の簡単の式で計算する。

体感温度　＝　（気温＋平均放射温度 MRT）／2

2.4.2 平均放射温度(MRT)

平均放射温度（英：Mean radiant temperature、略称：MRT） [3]とは、周囲の全方位からの放射熱の平均値である。MRT は体感温度を影響する重要な物理量である。図 2-1 が示すように、MRT の値と気温の差が大きくなければ大きいほど、体感温度に与える影響は大きくなる。

従来、MRT を計測するために、大量な温度センサーを環境に設置する必要がある。それにしても、全方位を確保することが難しい。しかし、本研究の主軸とするデバイスサーモグラフィーカメラは容易に広い範囲の温度データを取得する事ができる。本研究では、サーモグラフィーカメラにより取得した環境温度データの平均値を平均放射温度と近似して、研究を行う。

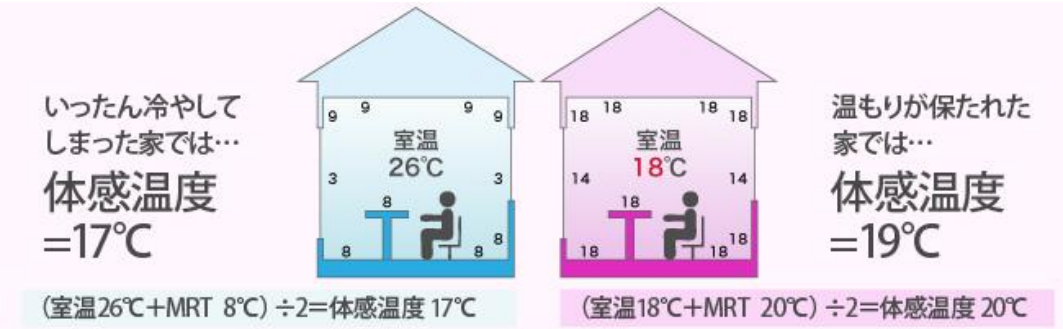

図 2-1　異なる環境の体感温度 [4]

2.5 足跡検出

現在、スマートホームシステム分野の研究では、人間の動作軌跡の検出を通じて、AI の機械的学習が行われ、人間の行動分析と予測サービス [5]が続々と開発されている。これらの研究はいずれも位置情報検知技術が必要となる。特に人間の識別 [6]と人間の位置検出技術 [7]の使用が必要である。

一方で、サーモグラフィーカメラが、非常に細かい温度差を識別し、それを画像の形で出力することができるので、このデバイスはある程度で人間の足跡を検出することができる。図 2-2 と 2-3 は同じ環境で、実験者が靴下着用とゴム製スリッパ着用場合、サーモグラフィーカメラから取得した画像である。画像の中では、足跡をはっきり区別することができる。画像処理と画像分析の技術を利用すれば、足跡検知も可能になると考えられる。足跡の情報を活用すると、足跡の幅・ステップサイズなどの特徴から人間の情報（身長・年齢）を推定することもできると考えられる。そして、人間行動分析などのサービスにも情報を提供することが可能である。

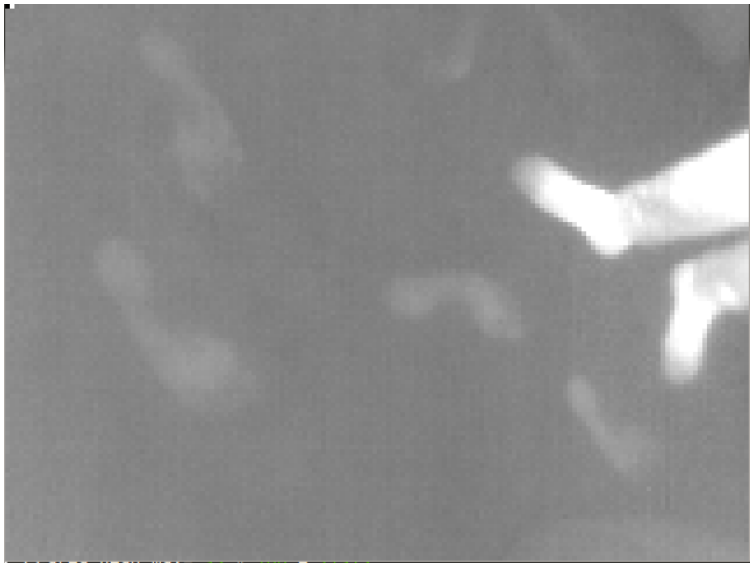

図 2-2　サーモグラフィーカメラに映った足跡の様子（靴下着用、床：カーペット）

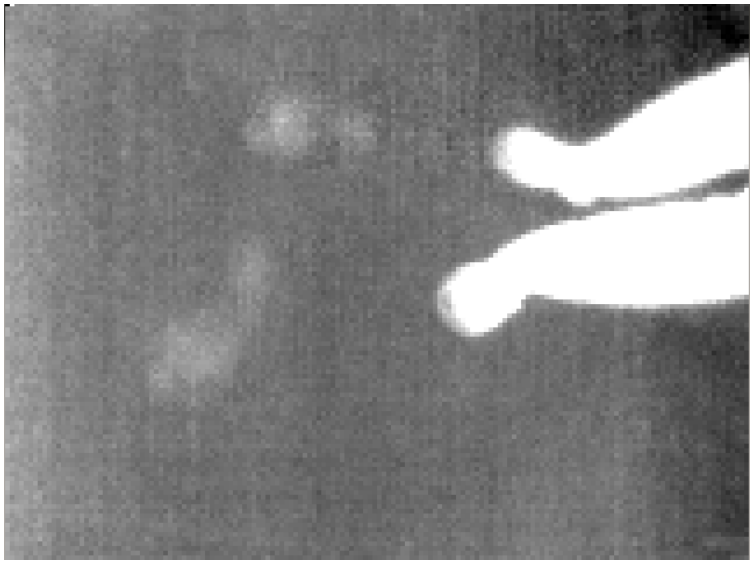

図 2-3　サーモグラフィーカメラに映った足跡の様子（ゴム製スリッパ着用、床：カーペット）

第3章 サーモグラフィーカメラ

第 3 章では本研究の主軸とするデバイスサーモグラフィーカメラについて説明する。また研究で扱っているデバイスの仕様とデータ処理ツールを述べる。

3.1 サーモグラフィーカメラとは

可視光線の波長は、０．３８～０．７８マイクロメートルである。波長は０．３８マイクロメートルより短い電磁波および０．７８マイクロメートルより長い電磁波は人間の目には見えない。０．７８マイクロメートルよりも長い電磁波は、可視光スペクトルの赤色の外側に位置し、赤外線と呼ばれ、波長が０．７８～１０００マイクロメートルの電磁波を指す。 波長が０・７８～２．5 マイクロメートルの部分は近赤外線と呼ばれ、波長が２．０～１０００マイクロメートルの部分は遠赤外線と呼ばれる。自然界では、温度は絶対零度（マイナス 273.15℃）以上のあらゆる物質から赤外線が放射されている。

サーモグラフィーカメラ（英: Thermography Camera）は赤外線検出器と特別な光学ガラスで作られたレンズを使用して、捕捉した遠赤外線を熱画像の形で出力する装置である。物体から放射される赤外線を分析し、熱分布を図として表した画像はサーモグラフィー（英: Thermography）と呼ばれる。サーモグラフィーカメラによる獲得熱画像は物体の表面上の熱分布場に対応する。物体から放出された不可視の赤外線エネルギーを可視の熱画像に変換する。 熱画像の異なる色は、測定対象の異なる温度を表す。図 3-1 は赤外線の周波数帯とサーモグラフィーカメラが扱う周波数帯を示す。

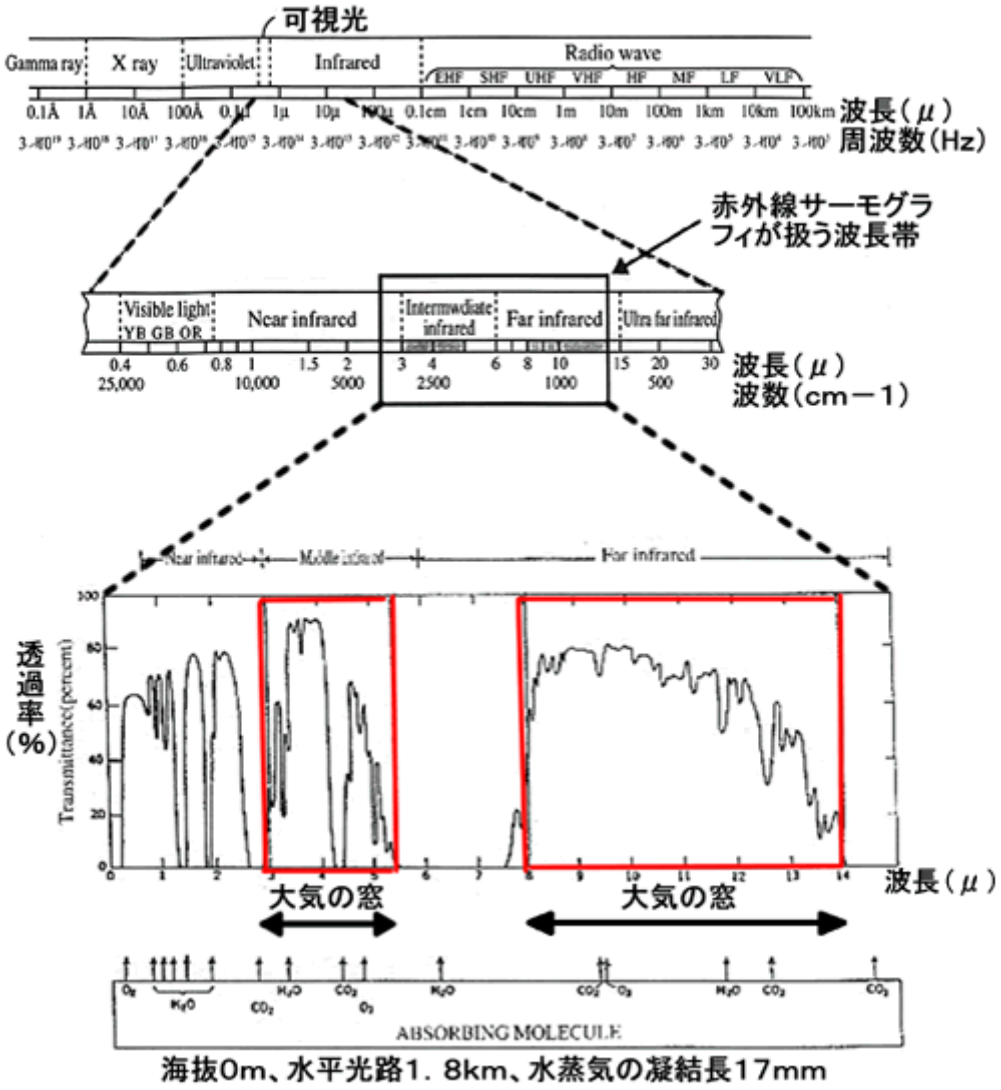

図 3-1　サーモグラフィーカメラ扱う波長帯 [8]

サーモグラフィーカメラの用途は非常に広く、特に軍隊では、サーマルイメージャーを使用すると、夜間に熱を放出する車両や兵士を見つけることができる。業界では、サーマルイメージャーを使用してワークピースの温度を迅速に検出し、必要な情報を把握することができる。モータやトランジスタなどの電子機器が故障すると、温度が異常に上昇し、サーモグラフィーカメラを使用して故障を迅速に診断することができる。医学では、インフルエンザ、肺炎などの病気が流行している場合は、熱画像カメラを使用して熱があるかどうかをすばやく判断できる。 がん細胞は高温であるため、乳がんなどの疾患の診断にも使用できる

3.2 サーモグラフィーカメラの特徴と強み

嘗て、ある有名なアメリカの赤外線学者は「人類の発展は三つの段階に分けられる」と指摘した。第 1 段階は人間が道具を作り、体力活動を広げる能力である。第 2 段階は、判断力を高めることで、より明確かつ幅広い理解と判断の基準を求める。近年、人類がより多くの情報を受け取ることができるため、感知範囲の広げるまたは新しい感官を求めるのが第三段階である。この段階では、赤外線技術の発達によって、人類の感官を五種類から六種類に増やした。他のセンサーと比べて、サーモグラフィーカメラは以下の優勢が。

- **有効データに当たるコストが低い。**研究で扱っているデバイス「Lepton 3.5」の解像度 160*120 であり、一つのピクセルは一つの温度データである。つまり、1 フレームの情報は 19200 個の温度データが獲得できる。現時点で、「Lepton 3.5」の販売価格は約 4 万円で、一つ温度データに当たるコスト 2.1 円で、極めてローコストと考えられる。更に、サーモグラフィーカメラの導入は不要なセンサーを排除することができて、システム構築と運用のコスト削減に役立つ。
- **プライバシの問題が避けられる。**可視光線カメラによる画像取得は極めて情報量の高いセンシング手段だが、可視光を用いたカメラではプライバシの問題がつきまとうが、解像度を適宜落としたサーモグラフィー画像については抵抗感が薄れることが期待される。
- **通常の手段で取得できない情報を獲得できる。**サーモグラフィー画像は人体の健康状態や機器の稼働状況のモニタリングといった可視光では実現不可能な情報を取得できる可能。
- **反応速度が速い。**普段の接触式温度センサーは精度が高いと考えられているが、該当センサーの計測速度が遅く、ターゲットと同じ温度になるのは時間がかかる。急激に変化する環境温度に対応できず、広い環境を計測するために大量なセンサーが求められる。一方で、サーモグラフィーカメラからは変化する温度に対応する計測はほぼリアルタイムである。

3.3 研究機材

本研究はアメリカのメーカーFLIR 社制のコンパクト的なサーモグラフィーカメラ Lepton 3.5（図 3-2）を使用していた。

名称	Lepton 3.5
測定波長	長波長赤外線、8～14μm
解像度	160×120、プログレッシブスキャン
ピクセルサイズ	12μm
有効フレームレート	8.7 Hz（商用アプリケーションはエクスポート可能）
感熱性	<50 mK（0.050°C）
温度補正	自動です。 カメラの温度に関係なく画像を出力する。
ラジオメトリック精度	ハイゲインモード：+/- 5°C または 5%（標準） ローゲインモード：+/- 10°C または 10%（標準）
測定温度範囲	ハイゲインモード：-10°C～+ 140°C ローゲインモード：-10°～+ 400°C（室温） -10°～+ 450°C（標準）
測定視野角 - 水平	57°
測定視野角 - 対角	71°
絞り	F / 1.1
出力フォーマット	ユーザー選択可能な 14 ビット（熱力学温度 ） または 24 ビット RGB（AGC とカラー化適用）
入力クロック（公称）	25 MHz
ビデオデータインターフェース	SPI
制御ポート	CCI（I^2C）
入力電源電圧（公称）	2.8 V、1.2 V、2.5 V～3.1 V IO
消費電力	公称 150 mW（動作時）、650 mW（シャッター時）
外形寸法	10.50 x 12.70 x 7.14 (mm)
重量	0.9 g

表 3　Flir Lepron 3.5 仕様書 [9]

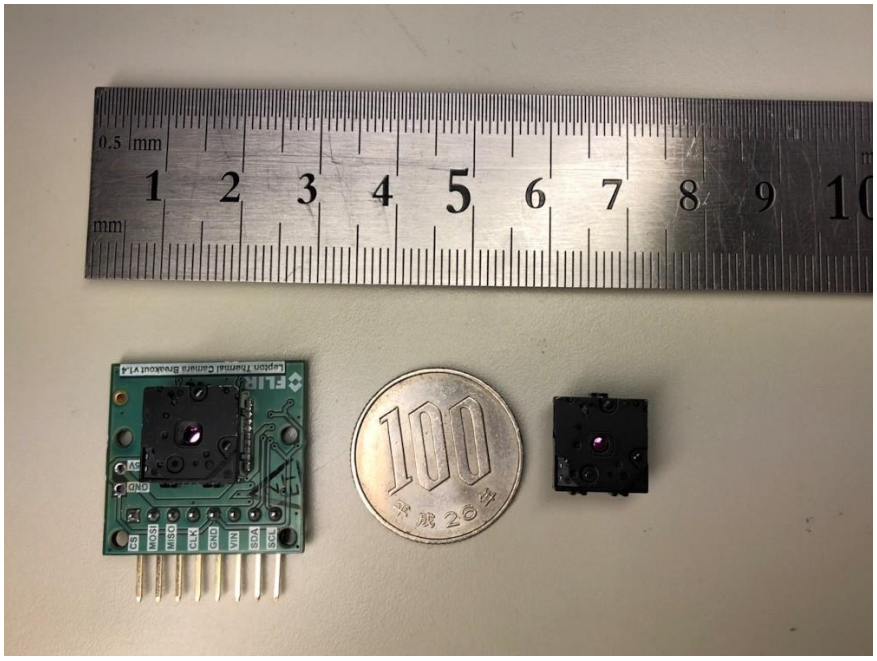

図 3-2　Flir Lepton 3.5 の様子

3.4 サーモグラフィーカメラのデータ構造

本研究で扱っているサーモグラフィーカメラ「Lepton 3.5」は SPI インターフェースを通じて、秒間約 8 フレームの 160 x 120 配列の温度データを Raspberry Pi に送る。当該デバイスから獲得した生データは熱力学温度である。一つのピクセルは 2Ｂｙｔｅのデータを占めている。センシングシステムを構築する時、まず図 3.3 が示すように、生データをセルシウス温度テータに変換する必要がある。また、画像を出力するため、Python のライブラリ 「numpy」 [10]を利用し、8bit グレースケール配列に変換し、画像を出力する。以上のデータ処理を行って、研究の基礎データを入手する。

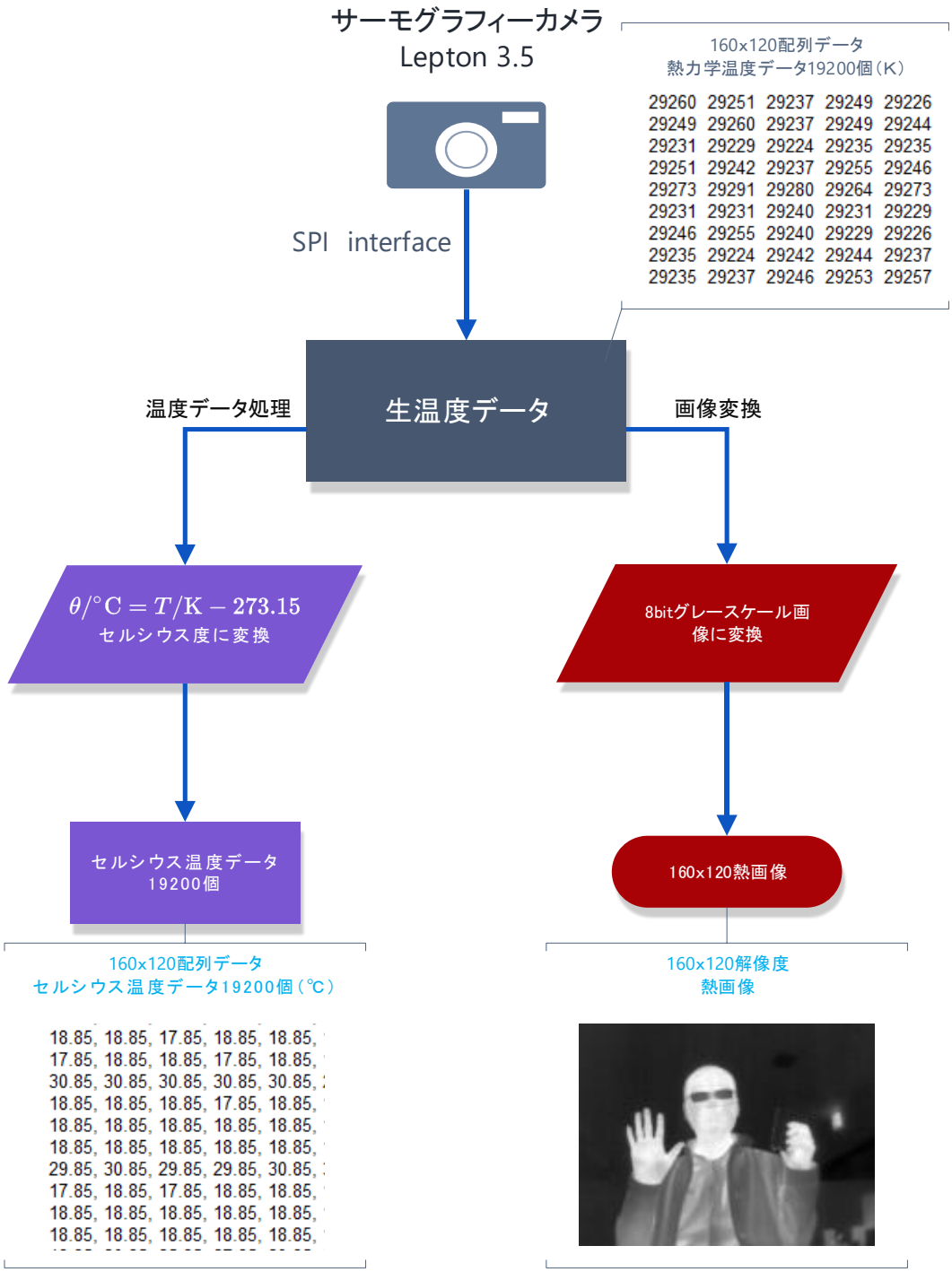

図 3-3　サーモグラフィーカメラからのデータ処理ツール

第4章 提案するセンシングシステム

本章では、本研究で提案するセンシングシステムについて記述する。

4.1 システム概要

本研究では、前章で述べるように、主軸デバイスとするサーモグラフィーカメラを主軸として、センシングシステムを構築する。カメラから獲得した単一種類の生データを加工し、一種のデバイスを複数のデバイスに抽象し、サービスプラットフォームに API を提供する。本研究で提案するセンシングシステムは対人部分と対環境部分の二つ部分から構成している。

対人部分はカメラ撮影範囲内の人間の部分を分析・処理し、識別した人間の情報を上層レイヤーに出力する。識別の精度と成功率を上げるため、画像分析と温度分析両方から着手し、対人部分の API を構築する。

対環境部分はカメらからの生データを転換した後、全画像の温度データと平均温度を出力する。それと同時に、環境内の異常温度を監視する。異常温度が発生する場合には、異常の情報を出力する

4.2 システム全体図

本研究で提案するセンシングシステムの全体図を図 4-1 に示す。赤い線で囲む部分が本研究の中心である。グレー色の線の API は他のセンサーをシミュレートする API である。緑の線の API は対人 API であり、青の線の API は対環境 API である。

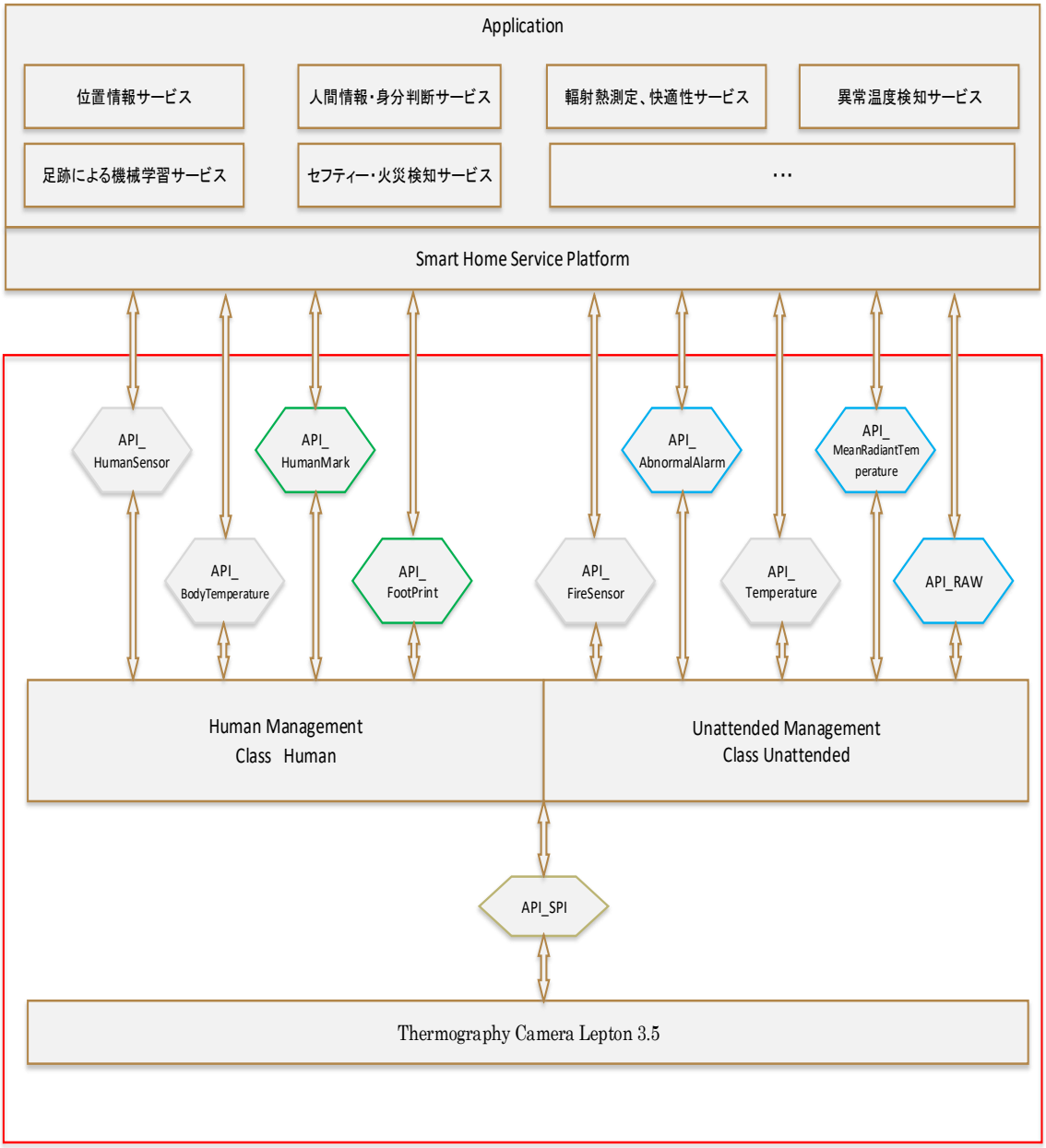

図 4-1　提案するセンシングシステムの全体図

4.3 API_SPI

サーモグラフィーカメラメーカーFLIR 社の「Lepton 3.5 SDK」 [11]を利用する。

4.4 有人環境管理

有人環境の管理クラス「Class Human」と提供する API について述べる。

4.4.1 対人 Class

表 4-1 は提案したセンシングシステムの有人環境管理の「対環境 Class」を記述している。

Class Human
Cam_ID Msg_Time Set_Human_Body_Threshold Set_Human_Head_Threshold Get_Human_Body Get_Human_Head Get_FootPrint Get_Human_ID Get_Human_Max

表 4　対人 Class の設計

- Cam_ID：カメラの番号
- Msg_Time：情報を記録する時間
- Set_Human_Body_Threshold：人間の体を識別するための温度の閾値
- Set_Human_Head_Threshold：人間の頭部部分を識別するための温度の閾値
- Get_Human_Body：検出した人間の体を保存する
- Get_Human_Bead：検出した人間の頭部を保存する
- Get_FootPrint：検出した足跡を保存する

- Get_Human_ID：人間情報の番号
- Get_Human_Max：検知した人間部分の温度の最大値

4.4.2 対人 API

有人環境に対応する「対人 API」は検知範囲以内の温度を分析する事によって、環境内の人間部分を識別し、人間に関する情報を記録する。対人 API は以下の部分から構成している。

- API_HumanSensor
  人間の温度帯に位置するターゲットを検知する。それによって、人体センサーをシミュレートする。従来の人体センサーに依存するサービスやアプリケーションに情報を提供する。この機能はすでに API_HumanMark に含まれているので、本センシングシステムはこの API を実装しない。
- API_BodyTemperature
  検出された人間部分の温度の最大値を出力する。体温センサーをシミュレートする。従来のスマートホームにおける体温センサーに依存するサービスやアプリケーションに人間の体温データを提供する。この機能はすでに API_HumanMark に含まれているので、本センシングシステムはこの API を実装しない。
- API_HumanMark
  センシング範囲以内の人間ターゲットを識別する。人間が画像の中の位置・頭部部分・最大温度と画像を出力する。
- API_FootPrint
  検知する範囲以内の人間が地面に残される足跡を検知する。画像処理と温度識別に基づいて、足跡が画像の中の位置を出力する。

4.5 無人環境管理

無人環境の管理クラス「Class Unattended」と提供する API について述べる。

4.5.1 対環境 Class

表 4-2 は提案したセンシングシステムの無人環境管理の「対環境 Class」を記述して

いる。

Class Unattended
Cam_ID Msg_time Set_Threshold Get_Image Get_Temp_All Get_Temp_Max Get_Temp_Min Get_Temp_Mean Get_State

表 5　対環境 Class の設計

- Cam_ID：カメラの番号
- Msg_time：情報を記録する時間
- Set_Threshold：無人環境管理の閾値（最大値と最小値）を設置する
- Get_Image：熱画像を記録する
- Get_Temp_All：全部の温度データをセルシウス温度保存する
- Get_Temp_Max：対象範囲内の温度の最大値を保存する
- Get_Temp_Min：対象範囲内の温度の最小値を保存する
- Get_Temp_Mean：対象範囲内の温度の平均値を保存する
- Get_State：対象範囲の状態（通常・低温・高温・発火）

4.5.2 対環境 API

無人環境に対応する「対環境ＡＰＩ」は検知範囲以内の温度を分析することによって、異常温度や危険温度を識別し、出力する。対環境 API は以下の部分で構成している。

- API_FireSensor
  センシング範囲以内の高温に対する検知を通じて、火炎センサーをシミュレートする。従来の火炎センサーに依存する上層レイヤーのサービスにデータを提供する。この機能はすでに API_AbnorMalAlarm に含まれているので、本センシングシス

テム実装する時はこの API を実装しない。

- API_AbnorMalAlarm
  センシング範囲以内の異常温度について検知する。事前にデフォルト閾値を設定し、もし閾値を超える場合は、異常温度が発生すると判断し、異常部分の温度値・画像の中における座標と異常タイプを出力する。異常タイプは低温・高温と発火三つに規定する。
- API_Temperature
  センシング範囲以内の温度データをすべて出力する。普通の温度センサーをシミュレートする。従来の温度センサーに依存する上層レイヤーのサービスに温度データを提供する。この API の機能は API_RAW に含まれているので、本センシングシステム実装する時ではこの API を実装しない。
- API_MeanRadiantTemperature
  センシング範囲以内の平均温度を出力する。
- API_RAW
  生データ API である。デバイスから獲得したデータをセルシウス度に変換を行う。他の処理をせずに生データとセルシウス度データを上層レイヤーに出力する、他のサービス開発のために提供する

第5章 実装

本章は提案するシステムの実装について述べる。

5.1 開発環境

本研究のセンシングシステムの実装において用いた開発環境は以下のとおりである。

- ＯＳ環境：Ubuntu 16.04
- 開発言語：Python、C/C++
- ソフトウェア環境：OPENCV [12]、numpy [10]、Flir Lepton SDK [11]
- ハードウェア環境：Raspberry Pi 3 Model B

5.2 対人 API

各対人 API についての実装を述べる。

5.2.1 人間識別 API　API_HumanMark

人間識別 API の構造は表 5-1 に示す。この API の機能は検知区間内の人間及び人間の頭部部分を検出することである。

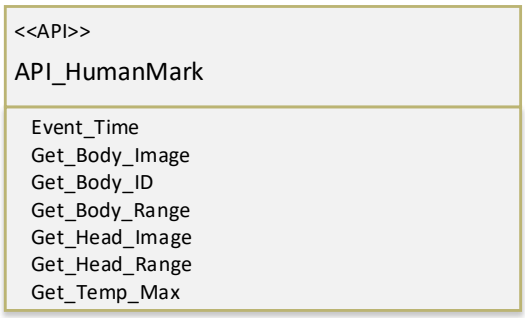

表 6　対人 API　 API_HumanMark　人間検知

- Event_Time：時間を記録する
- Get_Body_Image：検知し人体を画像で出力する
- Get_Body_ID：複数目標を区別するために、目標に ID を付ける
- Get_Body_Range：体の配列の座標を保存するレイヤー
- Get_Head_Image：検知した頭部を画像で出力する
- Get_Head_Range：頭部の配列の座標を保存するレイヤー
- Get_Temp_Max：検視された人体の最高体温を出力する。

対人 API の中では、人間識別 API は最も重要である、この API 動作の流れは図 5-1 に示す。流れの各部分について説明する。

①. 計算による、サーモグラフィーカメラからの熱力学温度をセルシウス度に変換し、配列 TEMP_C に保存する。

②. カメラからの生データをスケーリングして、8bit グレースケール画像データに変換する

③. 対象範囲の中では、人体の体温に近い熱源（ライト・電源アダプター等）が存在する可能性がある。誤検査をさけるため、まずは動的背景差分法 [13]によって、移動するターゲットを検出し、記録用レイヤーMark 配列に座標を保存する。

④. 記録用レイヤーMark と温度配列 TEMP_C を合わせて、ペアリングスクリーニングを行う、Mark 配列に人体温度範囲（本研究の閾値は 24℃-39℃である）のテータをスクリーニングする。処理したデータを Mark_Body に保存し、出力する。つまり動的かつ温度が人間に近いものを検出する。それと同時に、ボディー範囲内の温度最大値を体温として出力する。

⑤. このステップの目的は頭部部分の検出である。精度を高めるため、まずボディー部分を記録する Mark_Body の上から 1/3 を取り出し、この部分に対して、温度

空間（本研究で設置していた頭部温度範囲は 29℃-39℃である）のスクリーニングを行う。それから、選ばれた部分の形を OPENCV [12]で大円検知する大円と判断すれば、頭部と認識し、Mark_Head に記録し、出力する。

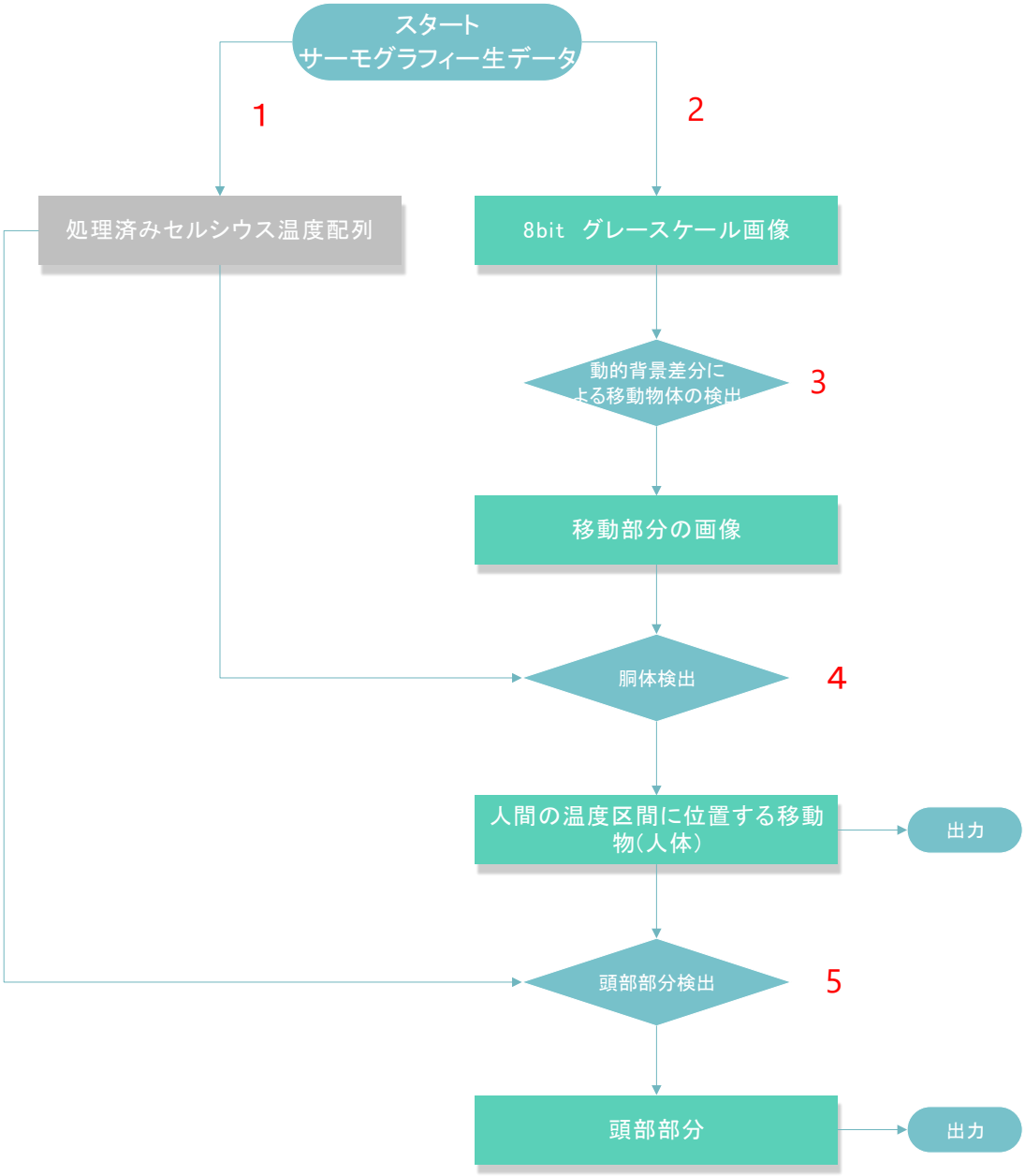

図 5-1　API_HumanMark 人間識別 API 動作の流れ

5.2.2 足跡検知 API　API_FootPrint

当 API は感知範囲内の足跡を検出し、足跡が画面の中の位置を記録レイヤーに出力する。足跡を認識するためには、事前に足跡温度の閾値（本研究では、足跡の温度範囲は 17℃-22℃）を設置する必要がある

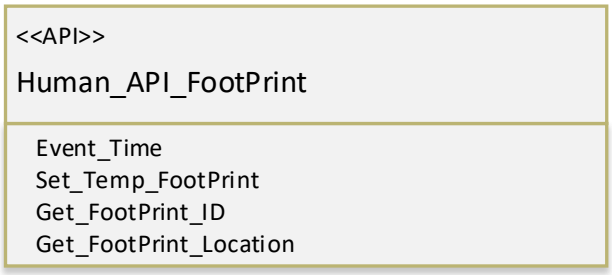

表 7　対人 API　API_FootPrint　足跡検知

- Event_Time：時間を記録する
- Set_Temp_FootPrint：足跡を検出ための温度範囲を設定する
- FootPrint_ID：複数足跡検知するため、各足跡に ID を付ける
- FootPrint_Location：足跡を記録する配列レイヤー

5.3 対環境 API

各対環境 API についての実装を説明する。

5.3.1 異常温度感知 API　API_AbnormalAlarm

異常温度検知 API(API_AbnormalAlarm)の構成は、表 5-1 のように示す。異常判断するためには、事前に閾値を設置する必要がある。本研究では異常温度を 3 種類に分類する。それぞれの名称と閾値以下のように定義している。

- Low：Temp < 10℃　　低温が発生する
- High：60℃ < Temp < 140℃　　高温、異常発熱
- Flir：Temp > 140℃　　発火している。

この API は各タイプの異常に対して、記録用のレイヤーを用意し、異常が発生する部分の座標をその記録用レイヤーに保存する。異常温度検知 API の処理流れは次のペ

ージに示す。

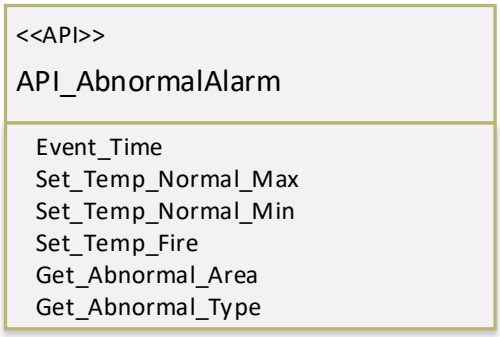

表 8　対環境 API　API_AbnormalAlarm　異常温度検知

- Event_Time：異常を検知した時間
- Set_Temp_Normal_Max：通常状態の温度の最大値を設置する
- Set_Temp_Normal_Min：通常状態の温度の最小値を設置する
- Set_Temp_Fire：発火と判断する温度値
- Get_Abnormal_Area：熱画像内異常が発生する位置を出力する
- Get_Abnormal_Type：異常の種類（低温・高温・発火）

API_ AbnormalAlarm
Require：変換された温度データ配列（セルシウス度）temp[160][120] Resource:異常エリアの最大値 max/最小値 min、座標を表す配列 mark[160][120] 異常タイプ Abnormal_Type

1. 異常座標記録用の画像レイヤーmark（ゼロの配列）を作る
2. mark_Low[160][120] type = 8bit　all = zero　低温部分を記録配列
3. mark_High[160][120] type = 8bit　all = zero　高低温部分を記録配列
4. mark_Fire[160][120] type = 8bit　all = zero　発火部分を記録配列
5. 閾値設定：
6. Set_Temp_Normal_Max = 通常温度最大値　（デフォルト値 60）
7. Set_Temp_Normal_Min = 通常温度最小値　（デフォルト値 10）
8. Set_Temp_Fire = 火炎温度値（デフォルト値 140）

```
異常判断：
for i in temp[160][120]  温度データ配列 temp 中すべてのデータを対象にする
低温判断：
        if temp[i] < Temp_Normal_Min
                mark_Low[i] = 1

高温判断：
        if temp[i] > Temp_Normal_Max || temp[i] < Temp_Fire
                mark_High[i] = 1
発火判断：
                if temp[i] > Temp_Fire
                mark_Fire[i] = 1
情報出力：
        if mark_Low  は空配列ではない
                return mark_Low  異常タイプ低温　最小値 min
        if mark_High  は空配列ではない
                return mark_High  異常タイプ高温　最大値 max
        if mark_Fire  は空配列ではない
                return mark_Fire　異常タイプ発覚　最大値 max
```

5.3.2 平均放射温度 API　API_MeanRadiantTemperature

当 API は体感温度を計算する物理量平均放射温度放射温度を出力する。生温度データの配列をトラバースし、その温度の平均値を計算する。そのほかに、環境ないの温度の最大値と最小値も出力する。

表 9　対環境 API　API_MeanRadintTemperrture　平均放射温度計測

- Event_time：時間を記録する
- Get_Temp_Mean：環境の平均温度、平均放射温度を出力する
- Get_Temp_Max：環境内の最大温度値を出力する
- Get_Temp_Min：環境内の最小温度値を出力する

5.3.3 生データ出力 API　API_RAW

当 API は生データを出力するための API である。この API がサーモグラフィーカメラからの熱力学温度をセルシウス度に変換し、両方を一緒に二次元配列の形で出力する。温度センサーに依存するサービスやアプリケーションにも情報を提供する。

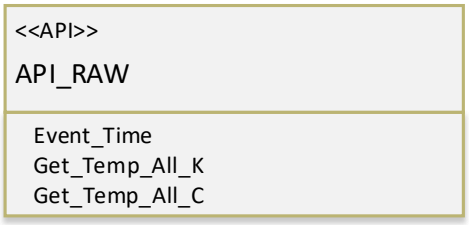

表 10　対環境 API　API_RAW　生データ出力

- Event_Time：時間を記録する
- Get_Temp_All_K：熱力学温度の形で全ての温度データを出力する
- Get_Temp_All_C：セルシウス度の形で全ての温度データを出力する

第6章 実験・評価

本章は本研究の検証実験の方法・結果、実験評価について述べる。

6.1 実験方法

検証実験は 4 F の輪講室で行い、対人 API と対環境 API を検証するために、異なるセンサー配置を実行する。また、実験の目的は以下の機能を確認することである。

対人 API に対しては、

- 実験環境では正しく人間識別する。人間の頭部部分を正しく識別する
- 足跡の検知

対環境 API に対しては、

- 低温、高温、発火するオブジェクトを正しく検知する
- 複数目標を同時検知すること
- 平均放射温度出力の確認
- 出力した全温度データから温度分布を把握する

6.1.1 対人 API

図 6-1　人間識別 API のデバイス配置

図 6-1 のようにカメラを設置し、正面から撮影し人間識別 API の動作を検証する。

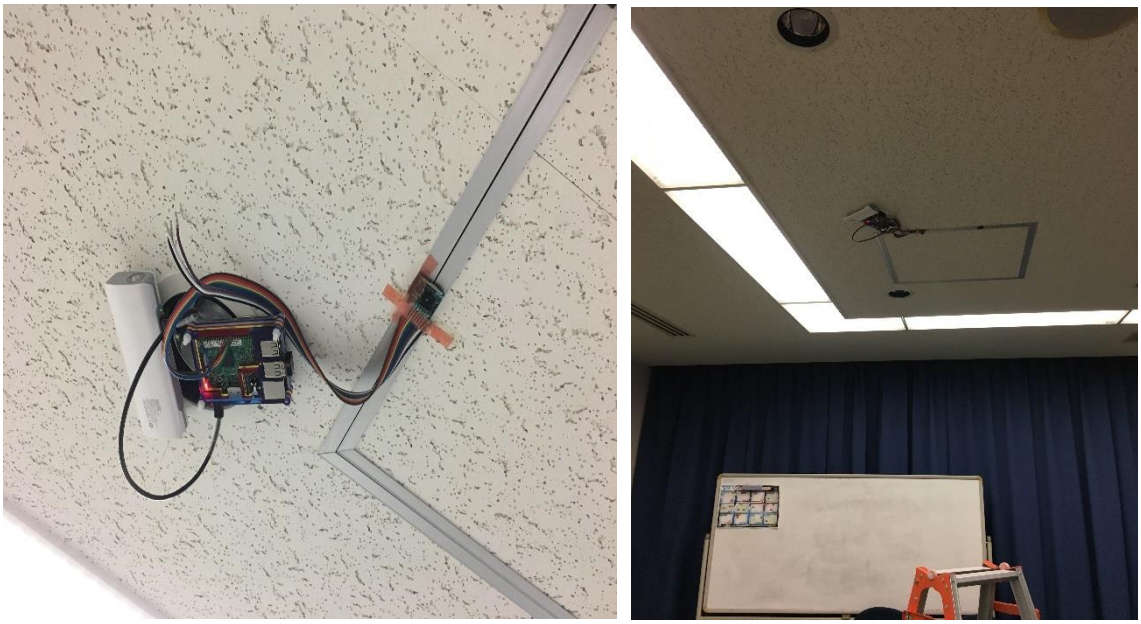

図 6-2　足跡検知 API のデバイス配置

図 6-2 のように、サーモグラフィーカメラを天井に固定し、下向きで実験を行う。

6.1.2 対環境 API

対環境 API の検証実験する時、安全を確保するために、実際の炎は実験環境ではシミュレートしない。その代わりに、炎のシミュレートは電気ヒーター（図 6-1）で行う。

図 6-3　炎をシミュレートする電気ヒーター

熱湯を積んだ水筒（図 6-2）を使って家電の異常発熱をシミュレートする。

図 6-4　異常発熱家電をシミュレートする熱湯を積んだ水筒

異常の低温の発生のシミュレートは氷が入っている製氷皿を使用している。

図 6-5　異常の低温をシミュレートする製氷皿

多数ターゲット検知の有効性を検証するために、前文述べた三つのサンプルを同時に検知範囲以内に設置する。

6.2 実験結果

6.2.1 対人 API 実験

図 6-6　実験結果　人間識別 API 動作確認 I（Body、Head 識別成功）

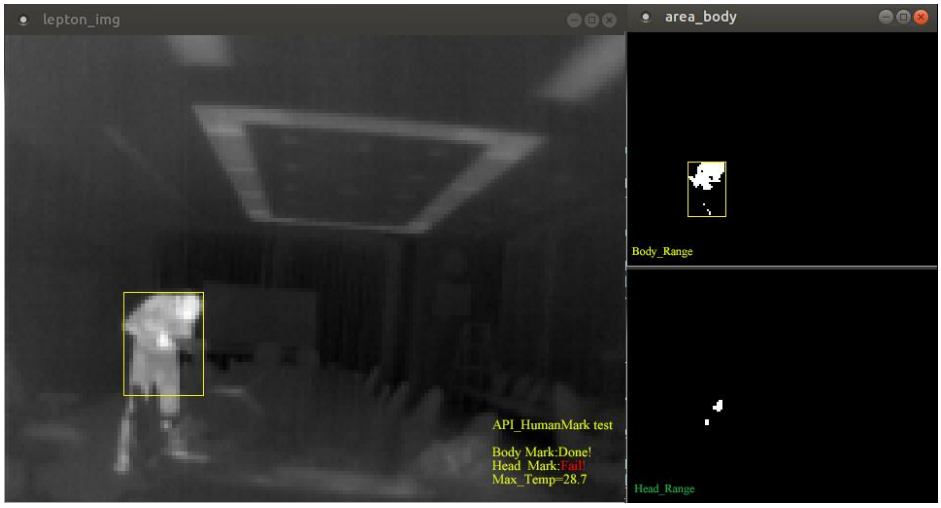

図 6-7　実験結果　人間識別 API 動作確認 II（Body 成功 Head 失敗）

図 6-8　実験結果　足跡検知 API 動作確認 I

図 6-9　実験結果　足跡検知 API 動作確認 II

6.2.2 対環境 API 実験

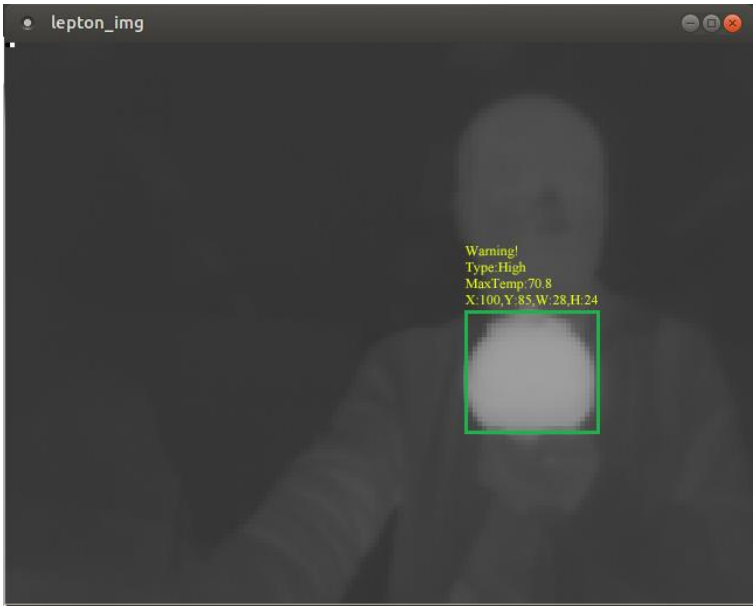

図 6-10　異常温度検知する時の様子（高温）

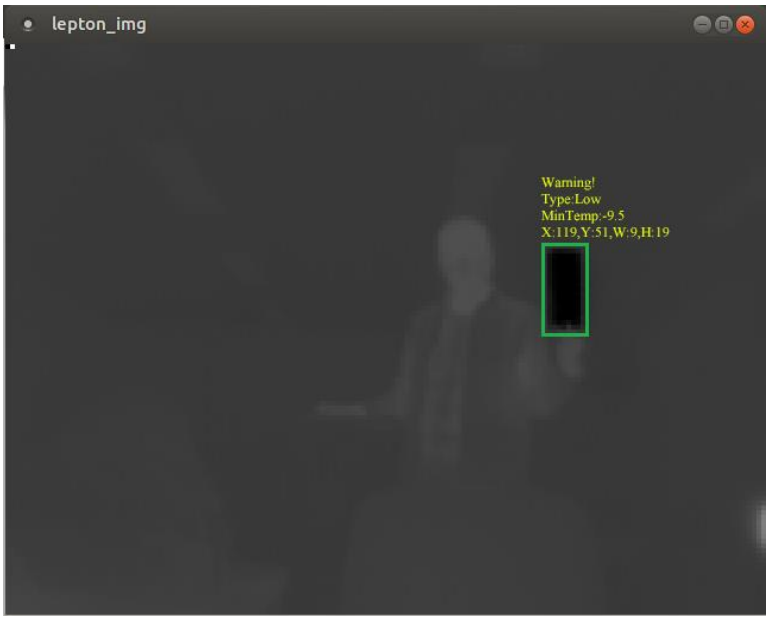

図 6-11　異常温度検知する時の様子（低温）

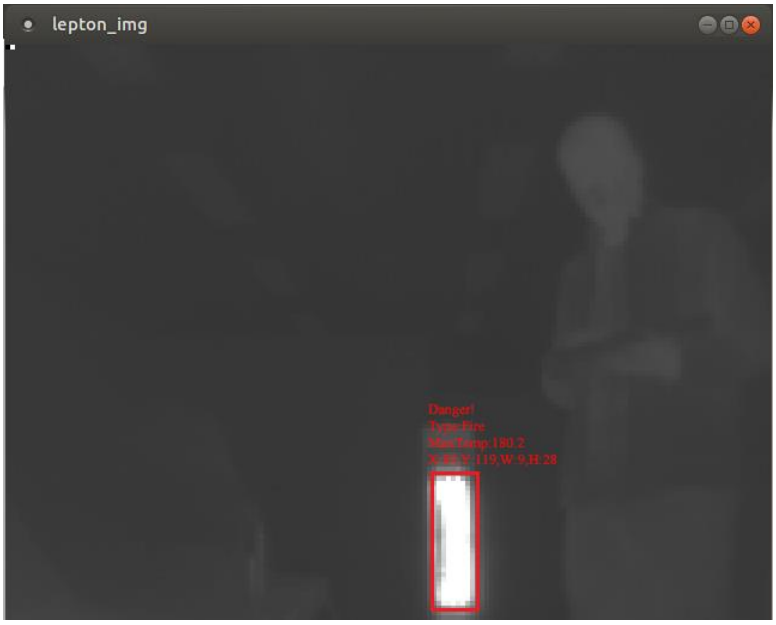

図 6-12　異常温度検知する時の様子（発火）

図 6-13 異常温度検知する時の様子（複数目標）

図 6-14　環境の平均輻射温度を計測様子

6.3 考察・評価

本研究の目的はサーモグラフィーカメラを用いて、住宅内の様々な状況をセンシングする総合センシングシステムを構築すべく、単一のサーモグラフィデバイスを用いた複数の物理量の計測および抽出技術を開発することである。一つのデバイスによって、大量かつ有効的なデータを獲得と同時に、一種のデバイスを複数のデバイスに抽象し、サービスプラットフォームにＡＰＩを提供する。

実験の検証を通じて、対環境の異常温度検知 API は温度異常のターゲットを正確に識別し、温度センサーよりも豊富なターゲットの位置や温度などのインターフェース情報を出力することができる。同時に、通常方法では測定が困難な平均放射温度を測定することも可能であり、それは体感温度の計算をより正確にし、そして快適性サービスためのより正確なデータサポートを提供する。

実験の検証を通じて、対環境の異常温度検知 API は温度異常のターゲットを正確に識別し、温度センサーよりも豊富なターゲットの位置や温度などのインターフェース情報を出力時に、通常方法では測定が困難な平均放射温度を測定することも可能である。

対人 API では、ヒューマンターゲットを検出したときの身体部分の成功率は比較的高い。本研究で設計した頭部を判断するためのアルゴリズムは頭部に対する認識基準が厳しく、カメラからの距離が遠くなると、成功率が下がっていく。将来の研究では、アルゴリズムを改善する必要がある。同時に、足跡検知 API は非常に成功し、足跡の認識率は非常に高い。この情報を活用すれば、足跡の距離・サイズから人体の身長を推定することも可能であると考えられる。

通常の温度センサーと比較すると、反応速度が非常に速い。温度センサーは計測するために少なくでも 10 秒-1 分が必要、サーモグラフィーカメラはほぼリアルタイム。

		目標距離			
		<1m	1m-4m	>5m	2.7m
対人API	体	○	○	△	-
	頭部	○	△	×	-
	足跡	-	-	-	○
対環境API	低温	○	○	○	-
	高温	○	○	○	-
	炎	○	○	○	-

表 11　距離別の実験結果

第7章 まとめ

従来型の特定目的センサーを用いたシステムでは、単一のサービスに対する実装としては現実的な解となりうるものの、スマートホームのように様々なサービスが存在しうる環境下では、それぞれの要求の違いにより、結局はサービスごとのセンサー増設が求められてしまっていた。また、カメラによる画像取得は極めて情報量の高いセンシングシステムとして知られてはいたが、人間の視覚に近い可視光の画像はプライバシ問題を引き起こすとして避けられる傾向にあった。これに対し、本研究では近年コストが劇的に下がってきたサーモグラフィーカメラに着目し、サーモグラフィーというデバイスを主軸としたシンプルな構造ながら、多数の情報を取得可能な高機能な宅内センシングシステムを実現しようとするものである。サーモグラフィー画像は人体の健康状態や機器の稼働状況のモニタリングといった可視光では実現不可能な情報を取得できる可能性もあり、本研究の成果がスマートホームシステムに与える貢献には極めて大きなものがある。

本研究を通じ、サーモグラフィーカメラ技術は幅広い展望を持つハイテク技術であることが明らかになった。大量に応用することができれば、多くの業界で革命的な変化を引き起こすと予測する。コンパクト実装化された製品の精度が少々不足だが、温度差に対する検知は非常に敏感である。この特性を活用し、スマートホームシステムの熱環境に対する検知と分析はより進化することができる。科学技術の発展に伴い、サーモグラフィーカメラはさらに進化し、将来のスマートホームセンシングシステムにおいて大きな役割を果たすと考えられる。

第8章 今後の課題

本研究の実験結果では、夏と冬の異なる季節の実験データが備えるべきである、しかし、夏の間では本研究が提案したセンシングシステムの構築は未完成の状態である。今後の研究では、この部分の空白を埋めることが残されている問題の一つと考えられる。

研究で構築したセンシングシステムにおいては、識別ための閾値（例えば：人間体の温度範囲・頭部の温度範囲・足跡の温度範囲なと）の設定は手動で行われていた、対象環境が変化すると、再び最適値を探らざるを得ない。これらの最適化の計算や自動設定も今後の重要な研究課題であると考えられる。

また、今回構築したセンシングシステムは現存スマートホームシステムのサービスとの連携は不足であると考えられる。将来は各システム間の連携と協同動作も力を入れるべきと考えられる。

本研究においては、一つのデバイスを複数種類の API を開発する、他のタイプのデバイスと同じ API を提供することで、システムのシンプル化を目指す。この角度から着手し、スマートホームシステムの複雑化を解決するのも研究方向と考えられる。

謝辞

本稿を執筆するにあたりまして、研究に対するご指導を賜りました丹　康雄　教授、リム 勇仁 准教授に心から感謝するとともに、ここにお礼申し上げます。研究用の設備の準備してくださって、研究に関する知識もいろいろ教えていただきました。

また適切なご助言を頂き、貴重な時間をさいて私の面倒を見てくたさった丹・リム研の研究員の Marios Sioutis さん、先輩の牧野義樹さん、及び同期の北川貴博さん・丸山公介さんに感謝します。

最後に、私の研究についてアドバイスや公私でのサポートをしてくださった丹研究室・リム研究室の皆様に感謝の言葉を申し上げます。

参考文献

[1] HITACHI, Ltd., “センサーデータ活用ソリューション,” [オンライン]. Available: http://www.hitachi.co.jp/Prod/comp/soft1/solution/search_s/iotdata_utilize/index.html.

[2] WIKIPEDIA, "Operative temperature," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Operative_temperature.

[3] WIKIPEDIA, "Mean radiant temperature," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_radiant_temperature.

[4] 株式会社 木族の家, “MRT の体感温度の影響,” [オンライン]. Available: https://kizokunoie.com/kizokunoie-no-heating/house-heat-reservoir/attachment/taikanondo/.

[5] 松尾　匡記, “スマートハウスシミュレーションにおける諸要素とのインタラクションを考慮した人間行動シミュレータ,” 北陸先端科学技術大学院大学, 2016.

[6] 丹治 博俊, “赤外線カメラを用いた人物照合,” *北陸先端科学技術大学院大学,* 3 2016.

[7] 塚越 航, “家庭内における統合位置情報システムに関する研究,” *北陸先端科学技術大学院大学,* 2 2017.

[8] 日本アビオニクス株式会社, “赤外線サーモグラフィとは,” [オンライン]. Available: http://www.avio.co.jp/products/infrared/what-thermo.html.

[9] FLIR® Systems, Inc., "FLIR Lepton 3.5 Datasheet," [Online]. Available: https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/lepton-3-3.5-datasheet.pdf.

[10] "numpy," [Online]. Available: https://ja.wikipedia.org/wiki/NumPy.

[11] FLIR® Systems, Inc., "FLIR Lepton SDK," [Online]. Available: https://groupgets.com/manufacturers/flir/products/lepton-3-5.

[12] OPENCV. [Online]. Available: https://opencv.org/.

[13] 中島 克人 教授, “動的背景差分による移動物体の検出,” 東京電機大学.