

【 博 士 論 文 】

デュアル撮像素子型 FG 視覚センサによる  
バスルーム監視システムの開発

2005 年度

西 浦 朋 史

# 論文要旨

近年，わが国において家庭内事故が社会問題となっている．これらの事故は寝室，トイレおよびバスルームなどのプライベート空間で多く発生し，特にバスルームにおける事故は，重篤な症状に陥ったり死に至ったりすることもある．事故の内訳としては，心筋梗塞や脳梗塞によって気を失い，浴槽内で溺水した状態で発見されるケースが大半である．また，洗い場における転倒も頭部損傷や骨折などの二次的被害につながるといわれている．これらの事故を防ぐため，既に多くのシステムが提案され商品化もされているものの，それらの多くは，画像センサなどを用いて人物の身体の動きを検知し，動きがなくなった場合にアラームを発するというものであり，くつろいだ状態と気を失った状態の区別が難しいという問題がある．

そこで本研究においては，呼吸検出によって浴槽における溺水状態を確実に検知するとともに，入浴者の姿勢を取得することによって洗い場における転倒状態をも検知可能なバスルーム用監視システムの開発を目的とする．そのため，呼吸計測と人物のシルエット抽出を同時に行うための，デュアル撮像素子型 FG 視覚センサを提案し，これから得られる輝点画像とカラー画像を組み合わせる呼吸検出と姿勢取得を行う監視アルゴリズムを開発した．

まず，デュアル撮像素子型 FG 視覚センサの原理と，センサの基本部分である FG 視覚センサによる距離計測原理について述べた．そして本システムの全体的な仕様を示した．

次に，上記デュアル撮像素子型 FG 視覚センサから得られる輝点画像とカラー画像を用いて，バスルーム室内を監視する手法を提案した．これは，(1)カラー画像の視認性，(2)シルエットの位置，(3)シルエットの動き量，(4)呼吸信号および(5)シルエットの高さをそれぞれ定量化した判定パラメータを用いて入浴者の状態を判別するものである．これらの判定パラメータを取得するための処理は

大きく分けて、くもり判定処理、シルエット抽出処理、呼吸検出処理、シルエットの高さ判定処理の4つからなる。

くもり判定処理は、カラー画像に対してラプラシアンフィルタを適用することで画像のくもりの度合いを定量化するものである。予備実験の結果、湯気の発生に対して判定パラメータの低下が見られ、センサ異常を自ら検知する仕組みを与える有効な手法であることを確認した。シルエット抽出処理においては、色ベクトルの正規化距離を用いた背景差分により、バスルーム内の照明変動にロバストなシルエット抽出が可能となった。呼吸検出処理においては、慶應義塾大学理工学部中島研究室で開発されたファイバ・グレーティングによる呼吸モニタリング技術を用いる。シルエットの高さ判定処理においては、シルエット情報と輝点情報を併用し、輝点の分布が空乏となる領域を探索することによって高さギャップの存在を判断する。これについても予備実験を行ったところ、被験者の転倒に当該の判定パラメータが追随しており、洗い場における転倒事故の検知を可能とする手法であることを確認した。

開発したシステムを一般的なユニットバスに適用して行った実験の結果、すべてのシーンに対して正しく警報を発するとともに、安全に入浴しているシーンに対する誤報もないことが確認され、本システムの有効性が示された。

# 目次

第1章	緒言	6
1.1	研究の背景	7
1.2	本研究の目的および立場	10
1.3	本論文の構成	12
第2章	開発システム	13
2.1	はじめに	14
2.2	FG 視覚センサ	14
2.2.1	ファイバ・グレーティング	14
2.2.2	FG 視覚センサによる距離計測	17
2.3	デュアル撮像素子型 FG 視覚センサの提案	24
2.4	FG のセンサ配置と距離計測性能	25
2.4.1	センサ配置の決定	25
2.4.2	距離計測範囲	26
2.5	システム仕様	28
2.6	本章のまとめ	33
第3章	監視アルゴリズム	34
3.1	はじめに	35
3.2	判定パラメータと処理の流れ	35
3.3	くもり判定	36
3.4	人物シルエットの作成	39
3.5	輝点抽出	43
3.6	呼吸の検出	44
3.7	シルエットの高さ取得	47
3.8	状態判別	50
3.9	本章のまとめ	51



第4章	入浴実験	52
4.1	はじめに	53
4.2	判定パラメータに対するしきい値の決定	53
4.3	アラーム精度に関する実験	54
4.4	くもり判定処理の有効性に関する実験	61
4.5	本章のまとめ	63
第5章	FG 視覚センサ単独による監視のための補足的提案	64
5.1	はじめに	65
5.2	輝点画像のみから呼吸と体動を抽出する手法	65
5.2.1	概要	65
5.2.2	手法	66
5.2.3	実験結果と検討	69
5.3	くつろぎ状態を積極的に検知する手法	70
5.3.1	概要	70
5.3.2	手法	71
5.3.3	実験結果と検討	71
5.4	本章のまとめ	83
第6章	総括的検討	84
6.1	輝点間における移動量のばらつきについて	85
6.2	実用における待機時間の設定	87
6.2.1	デュアル型センサ手法の待機時間	88
6.2.2	FG 視覚センサ単独手法の待機時間	91
6.3	技術的な課題	95
6.4	システム運用時に考慮すべきこと	97
第7章	結言	99

参考文献

# 第1章

## 緒言

---

本章では、本研究の背景である家庭内事故・入浴中急死の現状について述べ、周辺的な研究動向について述べる。次に、それらの背景を考慮して本研究の目的と位置づけを明確にする。最後に、本論文の構成について述べる。

## 1.1 研究の背景

### 入浴中急死の実態

新聞やテレビの報道において、人身事故に関するニュースが扱われない日はない。事故と言った場合、通常は交通事故やレジャーにおける事故など家庭の外で起こるものを思い浮かべるが、家庭内における事故も相当数起きており、死亡に至るケースも報告されている。

人口動態統計 [1] と警察庁の調べ [2] によると、家庭における不慮の事故は、交通事故死に匹敵するほど多い。交通事故は数十年も前から社会問題として深刻に受け止められたこともあって近年は減少傾向であるが、家庭内事故の方は常に1万人を超える水準が続いており、65歳以上の高齢者だけでも交通事故死の総数を上回っている(図1.1)。国民生活センターの調べ [3] によると、発生場所と症状の重さ(軽症・重症・重篤症・死亡の4段階に分類)の関係では、階段や台所での事故は軽症から重症にとどまっているのに対し、バスルームにおける事故は重篤症・死亡のカテゴリ内で発生場所の第1位となっている。このことは、人口動態統計から抜粋した結果(図1.2)において、家庭内の死亡事故の内訳の中で浴槽内溺死が主要な原因の一つとなっていることから裏付けられている。

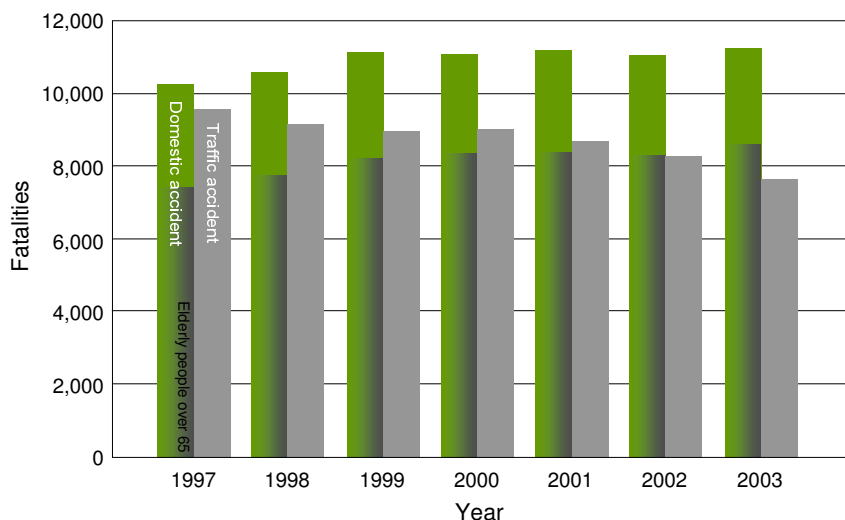


図 1.1 家庭内事故死と交通事故死の推移

Changes in fatalities from domestic accident and traffic accident.

家庭内事故は厚生労働省の「人口動態調査 上巻 表 5.34 交通事故以外の不慮の事故の傷害発生 の場所別にみた年齢別死亡数及び百分率」(平成 9~15 年)に記されているもの、交通事故は警察庁 Web Page にある統計資料「平成 15 年中の交通事故死者数について」に記されているものである。

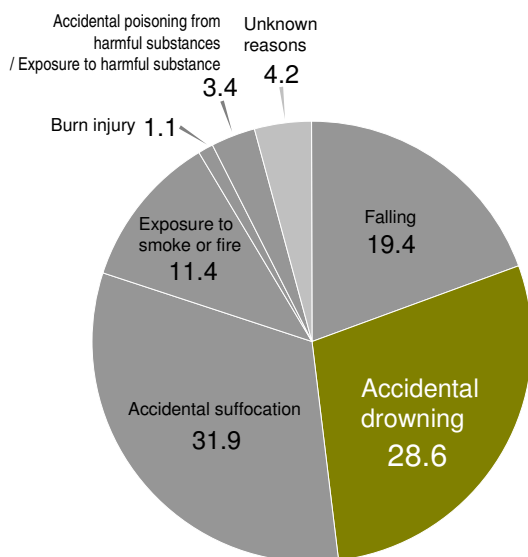


図 1.2 2003年に発生した家庭内事故の内訳  
Breakdown of domestic accident in 2003.

厚生労働省の「人口動態調査 上巻 表 5.35 家庭における主な不慮の事故の種類別にみた年齢別死亡数及び百分率」(平成 15 年)に記されているもの。単位は %。家庭内の場合、浴槽以外で溺れるという状況は考えにくいので、「不慮の溺死」はほとんどすべてが浴槽内溺死とみなせる。

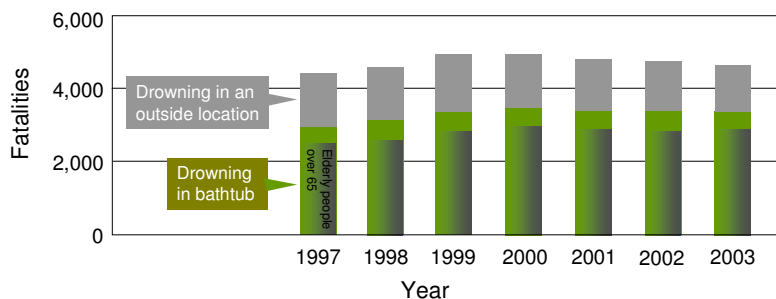


図 1.3 浴槽内溺死と屋外での溺死の推移  
Change in fatalities from drowning in bathtub and an outside location.

厚生労働省の「人口動態調査 上巻 表 5.31 不慮の事故の種類別にみた年齢別死亡数」(平成 9～15 年)に記されているもの。この資料にある「浴槽内での及び浴槽への転落による溺死」を浴槽内溺死とし、「自然の水域内での及び自然の水域への転落による溺死」を屋外での溺死とした。

前述のとおり、「安らぎの場であるはずの家庭」と「死亡事故」の結びつきが強いことがあまり認識されていないため、レジャーなども含めたすべての溺死事故の中で最も多くの割合を占めるのが浴槽内におけるものであることもあまり知られていない。図 1.3 に人口動態統計による溺死者に関する資料を示す。

### 統計に表れない入浴中急死

入浴中溺死の主要な要因は循環器系の疾患と脳血管障害による急病であり、これらは体温の上昇にともなう血圧の急変動によりもたらされる [4]。また、このような既往症がなくても一過性の意識障害や脱水症状など、熱中症を疑わせる臨床診断が事故の相当割合を占めるといふ報告 [5] もある。

先に示した図 1.3 の資料は“事故としての溺死者数”が集計されたものであるから、臨床診断の場面において、医師が“事故ではなく病死”と診断した患者の数はこの統計には含まれないことになる [6]。したがって、この統計値をそのまま入浴中急死の規模と捉えることは不適切である。

事故・病死に関わらず、浴槽の中で顔面が水面下に沈んだ状態で発見されるケースが大半であるため、外見的な区別はつきにくいといわれる。そのため、事故か病死かという判断については、担当医師の裁量に委ねられているのが実情であり、行政区ごとの統計データにも両者の死者数比にはばらつきがある [7]。さらに、溺死以外にも熱湯によるやけどや洗い場等における転倒も想定され、これらの死者も統計上のカテゴリが異なる。

財団法人東京救急協会はこれらのことを考慮し、実質的な入浴中急死者を、図 1.3 に示した数値の 4 倍にあたる約 14,000 人 (2000 年) と推定した [5]。

### 周辺研究の動向

入浴中の危険に関するこうした実態が近年になってようやく報道 [8] され始め、社会的にも認知されるようになった。病院や介護施設では非常ボタンを設置し、本人の意思で外部に危険を通報することができるような設備となっているのが普通であるし、近年の安全性重視の住宅設計により、家庭内の各部屋をつなぐ通信網を通じて中から外部に通報できるデバイスが設置されたバスルームも少なくない。しかし、現実にはボタンを押せないまま失神状態に陥るケースも多く、非常ボタンのみでは不十分との意見が強い。このような現状を踏まえ、非常ボタンに代わる入浴中の安全を維持するための手法が大学や電機メーカー等によりいくつか提案されている。

磯永ら [9] は、バスルーム内の異常監視への応用を見据え、音響センサを用いた水位計測システムを提案した。くびれのある管を浴槽に浸し、水面を閉端とする定常波をマイクロフォンで測定することにより、バスルーム内における直接的な音声だけでなく、管内温度と水位をも計測するというもので、標準偏差が数 mm 前後の安定した精度で水位が計測できることが報告された。

安藤ら [10] は、天井に設置した低解像度の CCD カラーカメラを用いて、それらの輝度情報から浴室内の動き分布をメッシュ状に取得し、動きがなくなったときに音声で通報するシステムを開発し、この技術を組み込んだセンサが商品化されている。

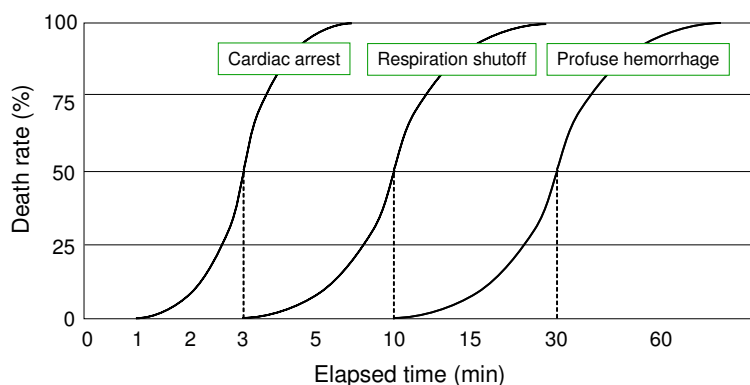


図 1.4 カーラーの救命曲線  
Cara's curve.

仏ネッカー大学病院教授 M. Cara が 1981 年に報告したもので、現在、日本で行われている応急手当の理論的根拠となっている。上図は文献 [11] より引用した。

ここにあげた手法の基本的な考え方は、“浴室内で音声や光の変化がなくなった場合に危険と判断する”というものである。しかし、わが国においては浴槽に浸かってくつろぐという入浴行動が一般的であり、動きがなくなった状態が即危険な状態に結びつくとは限らない。したがって、このようなシステムを実際の浴室で用いる場合、システムが危険な状態を検知してから警報を発するまでの待機時間の設定が難しく、待機時間が短いと誤報が頻発し、長いと救命の役割を果たすことが難しくなる。救急の分野でよく使われるカーラーの救命曲線（図 1.4）によれば、入浴者が発作によって心停止の状態に陥った場合 3 分で生存率が半減、溺れて呼吸停止となってから 10 分で生存率が半減すると言われている [11]。したがって、できるだけ短い時間で精度の高い警報を発することがシステム要件となる。このような考えから、入浴者の健康状態を反映する生体情報を取得する手法が提案されている。松井ら [12] は、浴槽の内壁に設置した圧力センサによって、水面上を伝播する心拍動や音声に伴う入浴者の振動を取得するシステムを開発した。しかし、得られる生体信号の強度が十分でないという問題や、水や汚れによるセンサの感度低下の問題が残されている。

## 1.2 本研究の目的および立場

以上のような社会的背景や周辺研究の動向、従来手法の問題点を考慮に入れ、以下の各項目を要件とするバスルーム用監視システムを開発することを本研究の目的とする。

### 呼吸情報を取得

入浴中急死は水面下で溺れた状態で発見されるケースが多いことから、入浴者が浴槽内において呼吸が止まっている状況を検出することが危険の検知にとって有効であると考えられる。本研究では入浴者の呼吸情報に注目し、ファイバ・グレーティングによって投光されるマトリクスパターン（後述）を用いた呼吸の検出を試みる。

### くつろぎ状態の考慮

入浴者が身体の動きを止めて浴槽でくつろいだ状態に入っても、くつろぎの有無を反映する信号を取得して誤報アラームが発生しないようにする。またその一方で、見過ごしの状況も極力生じないように、万が一事故が発生した場合には確実に検知できるシステムを構築する。

### 転倒状態の検知

入浴中急死の大半は浴槽内での溺死であるが、洗い場における事故も存在する（昭和20年代以降、日本家庭のバスルームは浴槽と洗い場に分かれた構造となっている [13]）。この種の事故は直接死につながるものが少ないものの、バスルーム事故の危険に最も多くさらされている高齢者にとっては、転倒による外傷が間接的要因となって生命に危険が及ぶことも少なくないと推察される。本研究では、洗い場における転倒状態も検知できるようにする。

### 簡便なセンサ構成

開発システムは、実用時に製造されるとき生産性向上のため、安価で監視機能が実現できるものであることが望ましい。また、既存のバスルームにも容易に設置できるよう、簡素な装置構成で済む手法であることも重要である。本論文では、提案センサに含まれる一部のデバイスを取り除き、簡易構成にしたセンサによる監視の可能性についても言及する。

### 実用を意識した監視手法

実用を考慮し、入浴者に肉体的・心理的な負担をかけないシステムにする。本研究では非接触、無拘束による監視手法を開発し、使用レーザーも安全基準に沿うようにする。また、バスルーム室内のくもりを検知し、センサが監視を正常に行える状態にあるかを自己診断する機能も設けた。



### 1.3 本論文の構成

本論文は、前節で述べた目的に基づいて行われたバスルーム監視システムの開発について述べたもので、本章を含めて7章から構成される。本章では、バスルーム監視システム研究の背景、動向について述べ、その中で本研究の目的を示すことによりその位置づけを示した。

第2章 開発システムでは、開発システムで用いるセンサの原理について述べる。まずセンサの基本部分であるFG視覚センサによる距離計測原理について述べ、この原理を基にしたデュアル撮像素子型FG視覚センサを提案する。そして本システムの全体的な仕様を示す。

第3章 監視アルゴリズムでは、デュアル撮像素子型FG視覚センサによって得られる画像を用いた監視手法について述べる。取得画像の処理手順を示したあと、処理後画像データから状態判別に必要な各情報を得る手順を述べる。

第4章 入浴実験では、開発したシステムを一般的なユニットバスに適用して行った実験について述べる。実験方法とその結果について述べる。

第5章 FG視覚センサ単独による監視のための補足的提案では、デュアル撮像素子型FG視覚センサよりも簡便なセンサ構成として、FG視覚センサ単独での監視を想定したときの監視システムとしての可能性について述べる。まずFG視覚センサ単独での監視手法を述べ、第4章の実験において得られた入浴シーン画像シーケンスにその手法を適用する。

第6章 総括的検討では、本研究の全体的な検討事項について述べる。まず、FGにより生成される輝点マトリクスによる距離計測の基本性能について述べ、実験システムにおけるセンサ設置方法がそれにどう影響するかを考える。次に、通報システムとしてのアラーム性能を、事故検知後の待機時間という観点から再評価する。この他に、バスルームで監視を行う際の実用的問題について考察する。

第7章 結言では、本研究における全体的な成果をまとめる。



## 第 2 章

# 開発システム

---

本章では、バスルーム監視のために開発したセンサについて述べる。まず、提案センサの構成要素の一つである FG 視覚センサの原理について述べた上で、これを組み込んだデュアル撮像素子型 FG 視覚センサを提案する。そして、実験用システムへの設置状況と、実験システム全体の仕様をまとめる。

## 2.1 はじめに

前章で述べたような目的に沿った監視を実現するため、本章においては“デュアル撮像素子型 FG 視覚センサ”を提案し、そのハードウェア的な構造について述べる。デュアル撮像素子型 FG 視覚センサは、3次元レンジファインダとして多くの応用手法が提案されている FG 視覚センサにカラー撮像素子が組み込まれたもので、距離計測用の輝点マトリクス画像とカラー画像を同時に取得するものである。

本章ではまずセンサの構成要素の一つである FG 視覚センサの原理について述べる。次に、それをベースにデュアル撮像素子型 FG 視覚センサの構造について述べ、実験システムへの取り付け状況と、監視システム全体としての仕様、距離計測性能についてまとめる。

## 2.2 FG 視覚センサ

### 2.2.1 ファイバ・グレーティング [14]

ファイバ・グレーティング (以下 FG ; Fiber Grating) とは、図 2.1 に示すように直径  $20 \sim 50 \mu\text{m}$  程度の光ファイバを「すだれ状」に並べ、それら 2 枚を互いに直交するよう貼り合わせた透過型回折格子で、この FG 面にレーザ光をコリメートして得られる平面波を

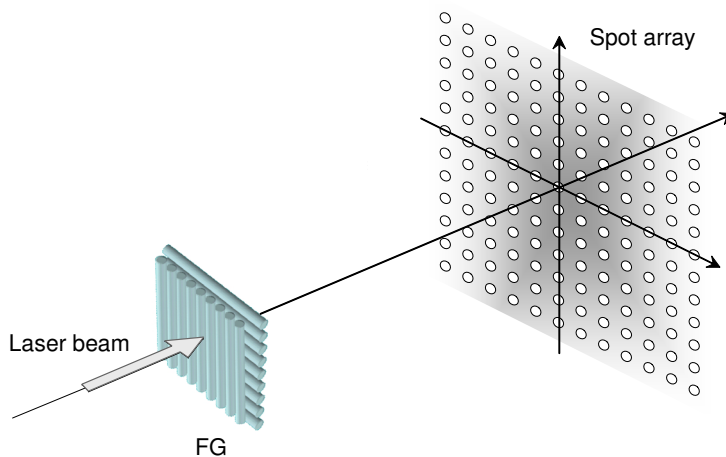


図 2.1 ファイバ・グレーティング構造図  
Fiber grating.

この図は、2 枚の FG を直交させたもので、コリメートしたレーザ光を入射させると、遠方には回折スポットアレイが生成される。

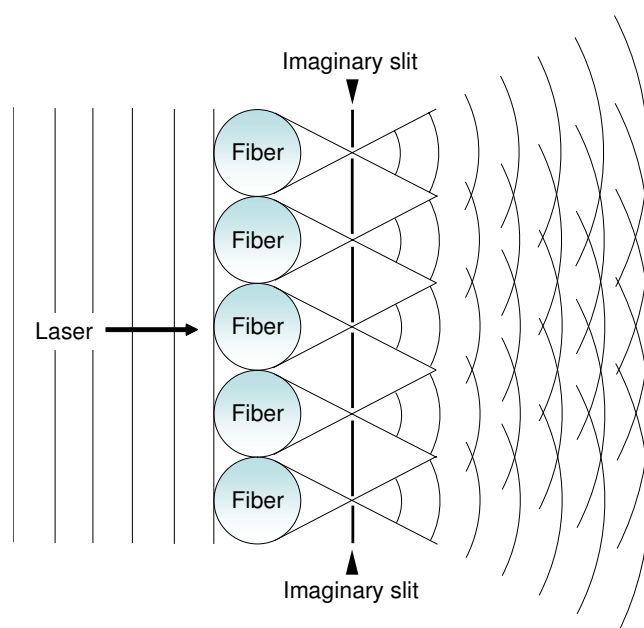


図 2.2 ファイバ・グレーティングによる回折の原理  
Principle of diffraction through fiber grating.

平面波をファイバシートに直交入射させると、焦点位置から球面波が発生して互いに干渉する。上図においては1枚のファイバシートを描いているので「スリット」と表現しているが、2枚使用した場合は各ファイバの焦点位置に点光源が存在するのと同等となる。

垂直入射させると、対向する平面上に正方格子状に並んだ光の点群が投影される。以降、この光の点を輝点と呼ぶ。

一本一本のファイバは、図 2.2 に示すように、シリンドリカルレンズとして作用する。そのためこのファイバシート面に対して平面波を垂直に入射させると、光波は各シリンドリカルレンズの焦点に集光され、ファイバ焦点面にはマトリクス状に並んだ微小光源が存在しているのと等価になる。入射した光波はこれらの光源から図 2.2 のような球面波を形成しながら広がっていく。

この回折現象はキルヒホッフの回折理論により定式化できる。 $z = 0$  に位置する焦点面上の位置  $(x, y, 0)$  における光強度が  $f(x, y)$  と表されるとき、観測点  $(X, Y, Z)$  における波動  $U(X, Y, Z)$  は、キルヒホッフの回折積分

$$U(X, Y, Z) = C_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \frac{e^{jkr}}{r} dx dy \quad (2.1)$$

ただし、

$$r = \{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + Z^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

$$C_0 \propto \frac{j}{\lambda} \quad (2.3)$$

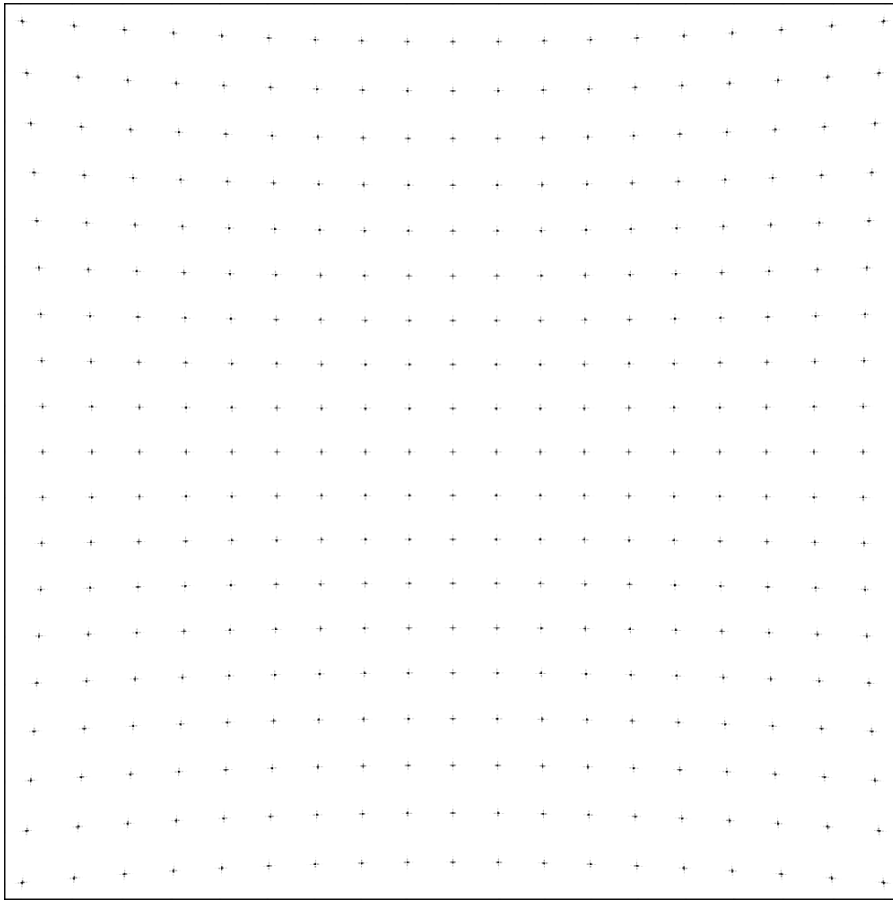


図 2.3 数値計算による回折像

Diffraction pattern provided by a numerical calculation.

FG から 1500 mm 離れた 1000 mm 四方の平面 ( $z = 1500, -500 \leq x, y \leq 500$ ) に投影される回折像である。計算に際しては実際のシステムと同様の数値を与えた。  $\lambda = 810$  nm とし、焦点面における光強度分布  $f(x, y)$  としては、 $(0, 0, 0)$  を中心とする 4mm 四方の矩形に  $25 \mu\text{m}$  間隔で点光源が配列するモデルを与えた。

によって得られる [15, 16]。ここで、 $j$  は虚数単位、 $k$  は波数、 $C_0$  は位置に依存しない定数である。図 2.3 は、本システムと同じ仕様でレーザを入射したときの回折像を式 (2.1) から求めたものである。

本システムで使用している FG の写真を図 2.4 に示す。FG は他のグレーティングと比較すると、

- (1) 光を遮断する部分がないため、入射光の利用効率が低い。
- (2) 同程度の性能を持つ回折格子よりも製作が容易で安価である。
- (3) 回折光の強度分布が高次までほぼ一様である。

以上 3 点の特長が挙げられる。

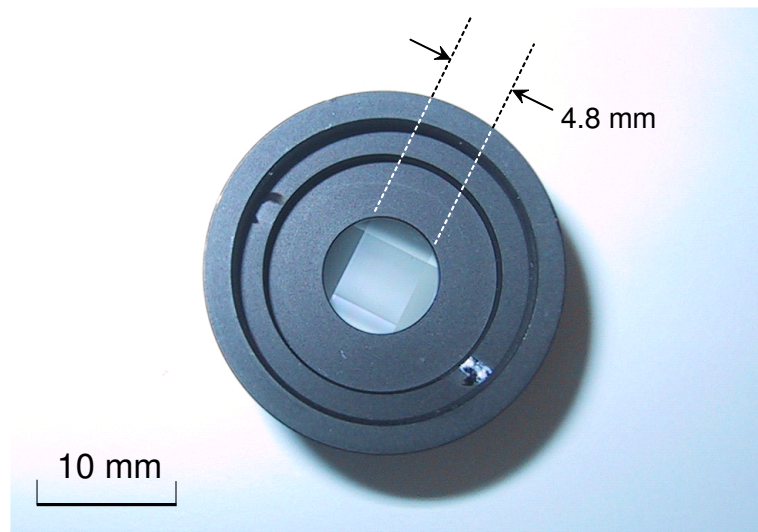


図 2.4 ファイバ・グレーティングの写真  
Real picture of fiber grating.

25  $\mu\text{m}$  径の光ファイバをすだれ状に並べたものが直交するように 2 枚貼り合わされている。レンズによりコリメートされたレーザーをこのシートに入射すると、回折パターンが対向平面に照射される。

### 2.2.2 FG 視覚センサによる距離計測

FG による輝点を用いた距離計測は、三角測量の原理によって行われる。筆者の所属している慶應義塾大学電子工学科中島研究室において、この FG を用いた応用技術が数多く開発されてきたが、距離計測の手法は、大きく分けて、

- (1) 回折パターンの回折次数を用いる手法
- (2) 基準となる平面を設ける手法
- (3) 隣接フレームの輝点分布を用いる手法

に分けられる。

#### 回折次数を用いる手法

図 2.5 は、FG を用いて距離計測する際の光学配置の例である。カメラレンズの中心を原点とするカメラ座標系において、 $(0, 0, -\ell)$  に撮像面の原点があり、 $(0, d, 0)$  に FG が配置されているものとする。レンズ光軸、レーザーの入射方向ともに  $Z$  軸に平行とし、レンズおよび FG から  $(X, Y, Z)$  に存在する輝点を見込む角度をそれぞれ  $\alpha, \beta$  とすると、

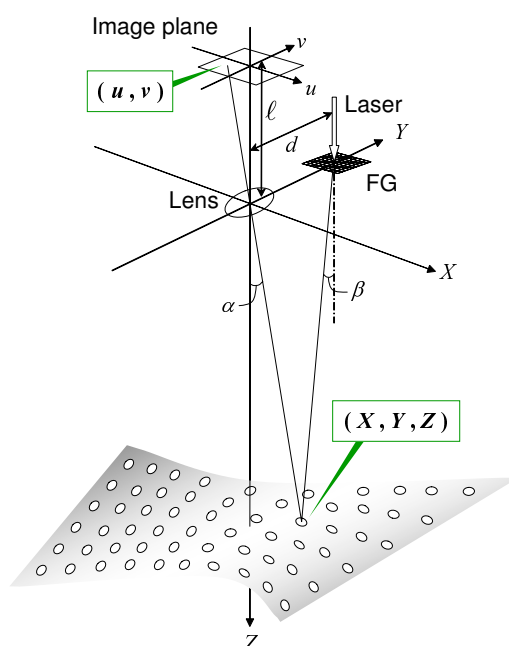


図 2.5 輝点座標  $(X, Y, Z)$  と撮像面上における輝点座標  $(u, v)$  の関係  
Relationship between the spot coordinate  $(X, Y, Z)$  and that on the image plane  $(u, v)$ .

図中の  $\alpha$  は撮像面上の座標  $(u, v)$  から求めることができ、 $\beta$  は輝点の回折次数を特定することで求められる。

輝点座標は次式のようになる。

$$\begin{cases} Z = \frac{d}{\tan \alpha + \tan \beta} \\ X = \frac{u}{\ell} \cdot Z \\ Y = \frac{v}{\ell} \cdot Z \end{cases} \quad (2.4)$$

$(X, Y, Z)$  にある輝点が撮像面上の座標  $(u, v)$  に結像したとすると、式 (2.4) における  $\alpha$  は、次式によって求められる。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v}{\ell} \quad (2.5)$$

一方、 $\beta$  は、スポット光の回折次数と回折角との関係を予め計測しておき、このテーブルを参照する形で決定する。回折次数の決定に際しては、最も光強度の強い 0 次光を基準に数えていく手法も考えられるが、物体の形状によってはオクルージョンの影響を受ける輝点も存在するため、常に正しい 0 次光が特定できるとは限らない。

図 2.5 のようにレーザの入射方向とレンズ光軸が平行の場合、イメージプレーン上の輝点は物体の形状に応じて基線方向 (FG とレンズを結ぶ線分を基線と呼ぶ。図 2.5 の場合

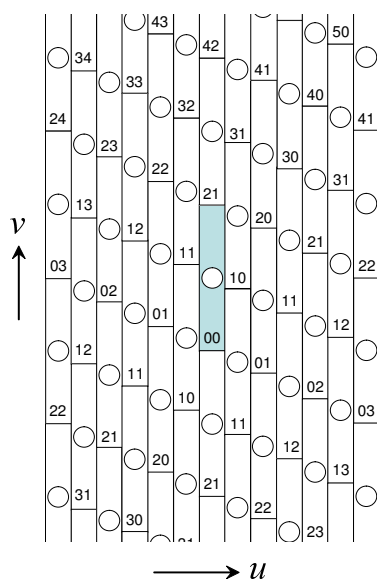


図 2.6 回折次数認識のための枠設定

Defined cells for recognizing the diffraction orders of spots.

図のように、輝点アレイを基線に対して傾けることで枠を長く設定することができ、距離計測の範囲を広げることができる。

は  $v$  軸となる) に移動する。このことを用いて、図 2.6 に示すような枠を撮像面上に設け、輝点を形成する回折光の次数を特定する。この枠の基線方向の辺の長さが当該輝点がかバーする距離計測範囲となる。このとき、図 2.6 に示すように、入射光を軸として FG を傾けることにより、長辺がより長い枠を効率よく配置することができる [17]。この手法は、カメラから輝点までの距離を直接的に算出するため、複数視点からの距離計測結果から 3 次元形状を再構築する用途に適している [18, 19]。

#### 基準面を設ける手法

回折次数による手法は、輝点までの距離を直接的に算出するものであるが、撮像面上における輝点座標と回折次数双方の情報が必要であるため、距離計測の際の演算が煩雑になりがちである。床など高さの基準となる平面があり、輝点のオクルージョンが発生する可能性が低く単視点からの計測で事足りる場合には、以下に示すような、基準面を設ける手法が用いられる [20]。

- (1) 基準となる平面上に輝点を照射したときの輝点分布を保持しておく。
- (2) 物体が挿入されたときの輝点分布と (1) を比較し、撮像面上での輝点座標の変位を求める。

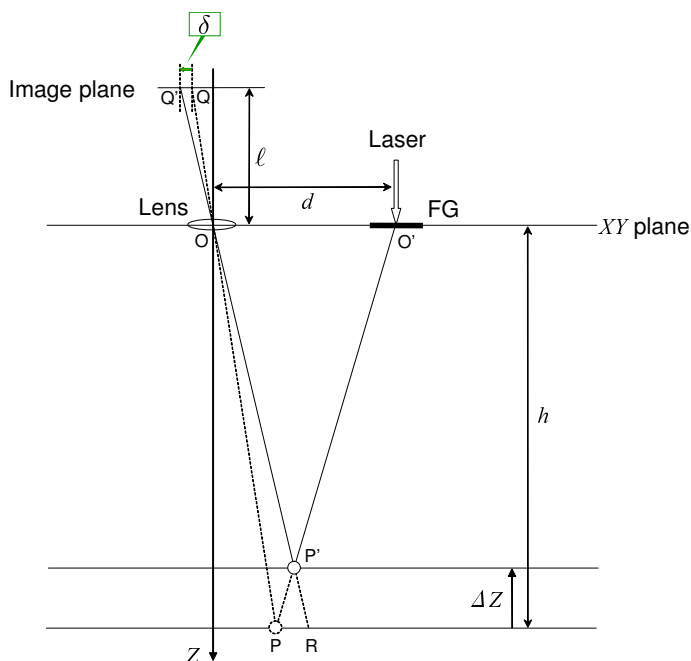


図 2.7 距離変化による輝点移動 (1)  
Movement of spot by change in distance (1).

FG から照射された輝点が、高さ変化を受けて光路変化を起こした様子を表している。式 (2.6) は、 $\triangle P'OO' \propto \triangle P'RP$ 、 $\triangle OPR \propto \triangle OQQ'$  より得られる。

(3) (2) より、当該輝点の基準面との距離差を得る。

図 2.7 は、平面  $Z = h$  上にある輝点が、 $\Delta Z$  の高さ変動 (図 2.7 では  $-Z$  方向) を受け、撮像面上において基線方向に  $\delta$  (撮像面上では  $-v$  方向) だけ移動したことを示している。基線長を  $d$ 、レンズ-撮像面間の距離を  $l$  とするとき、幾何学的な関係から  $\delta$  は次式のようになる。

$$\delta = \frac{dl\Delta Z}{h(h - \Delta Z)} \tag{2.6}$$

すなわち、

$$\Delta Z = \frac{h^2\delta}{h\delta + dl} \tag{2.7}$$



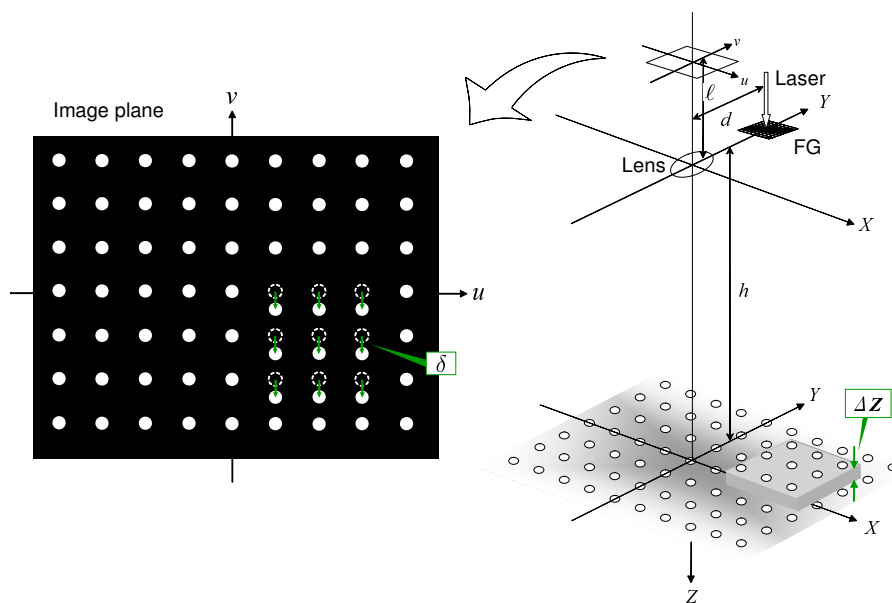


図 2.8 距離変化による輝点移動 (2)  
 Movement of spot by change in distance (2).

図 2.7 を 3 次元的に描いたものである．同じ基準面から同じ高さ移動をした輝点は，撮像面上では互いに同じ移動量を持つ．

となる．よって，式 (2.7) と，撮像面上における輝点座標  $(u, v)$  を用いて，輝点の 3 次元座標  $(X, Y, Z)$  は次式によって算出できる．

$$\begin{cases} Z = h - \Delta Z \\ X = \frac{u}{\ell} \cdot Z \\ Y = \frac{v - \delta}{\ell} \cdot Z \end{cases} \quad (2.8)$$

式 (2.7) に示すように， $\Delta Z$  は，撮像面上における輝点座標  $(u, v)$  に依存しないため，コンピュータ処理上は式 (2.7) によって  $\Delta Z$  を求める演算を各輝点に対し一様に施すことにより対象面の 3 次元分布を得ることが可能である． $\delta$  の算出は回折次数による手法同様，移動を許可する範囲を輝点ごとに定め，それぞれの枠内で画像処理的に移動量  $\delta$  を求める．この場合も，輝点配列を傾けることにより計測範囲を拡大することができる．この手法は，顔認識 [21]，室内における人物の侵入検知 [22] や，トイレ室内における人物監視 [23] といったシステムに応用されている．

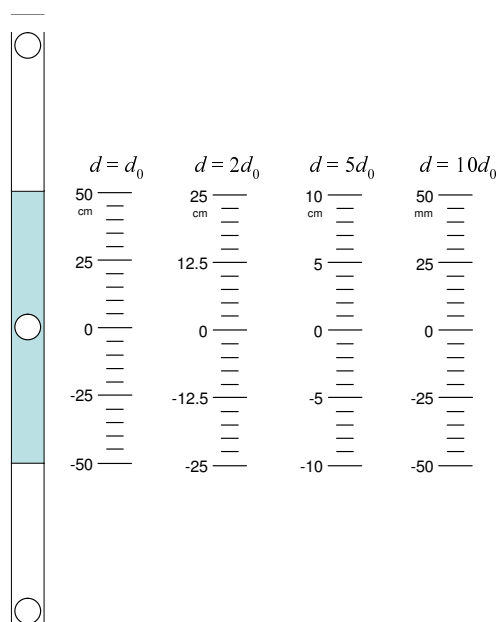


図 2.9 基線長と計測範囲の関係

Relationship between baseline and measurement scope.

基線長を 2 倍, 5 倍, 10 倍にしたとき (他の条件は同じ), 撮像面上での輝点移動によって, どの範囲の距離計測が可能になるかを表したものである.

#### 隣接フレームの輝点分布を用いる手法

式 (2.6) から, 基線長  $d$  が大きくなると撮像面上での輝点移動が増幅されることがわかる. 本論文で提案するシステムでは, 入浴者の体表面に輝点を照射し, 呼吸によってそれが上下動する様子を捉えるものであるため, 人物の侵入検知システムで用いる場合よりも基線長を大きくして計測範囲を数 cm 以内にしなければならない (図 2.9). しかしながら, 計測対象である人物の身体の厚みだけでも計測範囲をはるかに超えるため, 呼吸によって動く体表面までの距離を, 床などの“静的な”基準面からの距離差という形で計測することは適切ではない. 上記のように基準面を設けることが難しく, 距離変動自体も非常に小さい場合には, 隣接フレームにおける輝点分布を用いた以下の手法がとられる.

- (1) 1 フレーム前の撮像面上の輝点分布を保持しておく.
- (2) 現フレームにおける輝点分布と (1) を比較し, 撮像面上での輝点座標の変位を求める.
- (3) (2) を, 当該輝点におけるフレーム間の高さ変動を反映する値として用いる.

図 2.7 から式 (2.7) を導いたのと同様の手順を踏めば、前フレーム（移動前）の輝点の  $Z$  座標が  $z_0$  であった場合、高さ変化  $\Delta Z$  は、式 (2.7) の  $h$  を  $z_0$  で置き換えた次式で表される。

$$\Delta Z = \frac{z_0^2 \delta}{z_0 \delta + d\ell} \quad (2.9)$$

ここで、式に含まれる  $z_0$  を算出する手段がないため、 $\Delta Z$  の値を求めることはできない。そこで、式 (2.9) を展開すると、次式が得られる。

$$\Delta Z = z_0 \cdot \left\{ \frac{z_0 \delta}{d\ell} - \left( \frac{z_0 \delta}{d\ell} \right)^2 + \left( \frac{z_0 \delta}{d\ell} \right)^3 - \dots \right\} \quad (2.10)$$

このとき、 $z_0 \delta \ll d\ell$  を仮定し、2 次以上の項を無視すれば、

$$\Delta Z \simeq \frac{z_0^2 \delta}{d\ell} \quad (2.11)$$

が得られ、 $\delta \propto \Delta Z$  と考えることができる [24]。以上より、

- (1)  $z_0 \delta \ll d\ell$  である。
- (2)  $z_0$  のばらつきが小さい。

これらの条件が成り立つ場合には、 $\Delta Z$  の代わりに  $\delta$  をもって輝点の上下動と見なして差し支えないことがわかる。なお、本システムにおいては、 $z_0 \sim 1600$  mm、 $\delta \sim 10$   $\mu$ m、 $d \sim 900$  mm、 $\ell = 6.0$  mm であるため、 $z_0 \delta / d\ell \sim 3.0 \times 10^{-3}$  となり、上記 (1) の仮定は有効である。(2) に関しては 6.1 節 (p.85) にて議論する。

青木ら [25] や竹村ら [26] は、この手法により、睡眠中の人の呼吸をモニタリングするシステムを開発した。これらの研究では、フレーム間の輝点移動量を積算して算出した換気量を表す指標が、既存の医療機器によって計測した実際の換気量と高い相関を持つことが報告されている。また、佐藤ら [27] は、短基線長の光学系もシステムに組み込む（2 台のカメラを設置する）ことで  $z_0$  を直接算出し、計測誤差の低減を試みている。

本論文で提案するシステムにおいては、上記に述べた隣接フレームの輝点分布を用いる方法により、入浴者の呼吸情報を得る。以降、新センサの提案（次節）、実験用システムの構成（2.5 節）、監視アルゴリズム（第 3 章）の順に、システムの詳細について述べる。

## 2.3 デュアル撮像素子型 FG 視覚センサの提案

本研究の目的とする監視を実現するため、前節で述べた FG 視覚センサによる距離計測機能に、カラー画像情報取得機能を追加した、デュアル撮像素子型 FG 視覚センサ（以降、デュアル型センサと呼ぶ）を新たに提案する。デュアル型センサは図 2.10 に示すとおり、輝点投光器と受光器からなる。輝点投光器には半導体レーザと FG が組み込まれており、距離計測機能のための輝点が床に向かって照射される。このとき、入浴の妨げにならないよう、光源には目に見えない近赤外レーザを用いる。さらに、レーザはパルス化し、受光側カメラ（後述）のシャッタータイミングと同期をとる。これは、時間出力を下げることによって JIS 規格で定めるレーザ機器安全基準をクリアできる効果と、FG 輝点以外の外乱光の影響が軽減される効果を期待するものである。

受光器にはハーフミラーが組み込まれており、2 光路に分けられた光はそれぞれの CCD に導かれる（これらを CCD1、CCD2 と区別する）。CCD1 は、輝点投光器から照射された輝点を撮像するためのものである。CCD1 に導かれる光をバンドパスフィルタに通し、CCD1 がレーザの波長付近にのみ感度を持つように設定すると、図 2.11(a) に示すような、輝点のみが映った画像（以下、輝点画像と呼ぶ）が得られる。CCD2 は、室内の様子

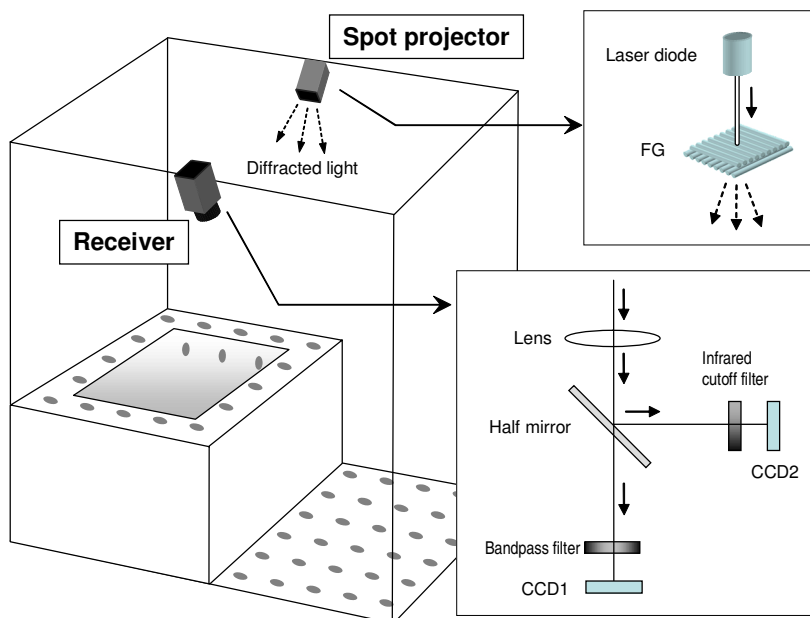


図 2.10 デュアル撮像素子型 FG 視覚センサ  
Dual-pickup FG vision sensor.

受光器では、入射光がハーフミラーにより 2 光路に分けられ、それぞれ異なるフィルタリングを受けることにより、輝点画像とカラー画像が取得できる。

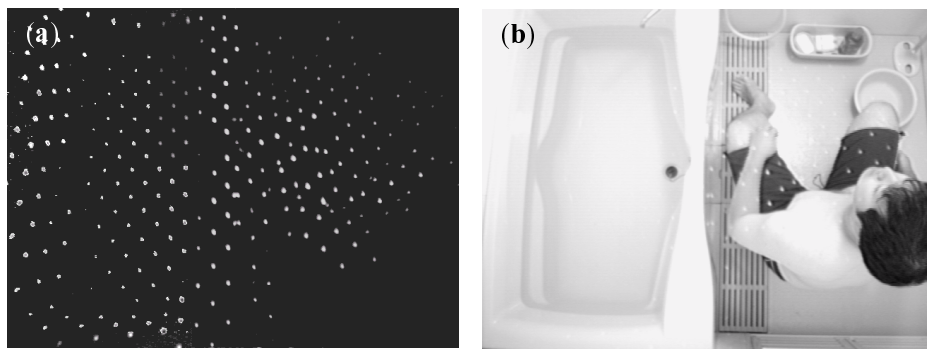


図 2.11 輝点画像  
Bright spot image.

(a) は輝点画像，(b) は比較のため，可視光カットフィルタを外して同じ状況を撮影したものである．

を撮像するためのもので，カラー画像を取得する．このとき，輝点投光器から照射される赤外光が混入しないように，CCD2 直前に赤外光カットフィルタを配置する．

入浴者の監視に際しては，CCD1 から得られる輝点画像と CCD2 から得られるカラー画像を用いる．双方でカメラシャッターの同期を取りながら連続的にそれぞれ画像を取得する．

## 2.4 FG のセンサ配置と距離計測性能

### 2.4.1 センサ配置の決定

FG 視覚センサの距離計測性能は，輝点投光器と受光器の光学配置によって決まるため，入浴者の呼吸が検出可能な計測精度（0.5 mm 程度が理想的である）となるようなセンサ配置を式 (2.6) を用いて決定する．

距離計測精度をできるだけ高めるには，式 (2.6) において，同じ  $\Delta Z$  に対して輝点移動量  $\delta$  がより大きくなるよう，

- (1) レンズ—撮像面間距離  $l$  をできるだけ大きく
- (2) 受光用カメラの CCD のセル密度をできるだけ大きく
- (3) 高さ変動が生じている輝点までの距離  $h$  をできるだけ小さく（すなわち，センサの設置高さをなるべく低く）
- (4) 基線長  $d$  をできるだけ大きく

すればよい．(1) と (2) に関しては入手可能な範囲で最適な機器を選択した（ $l = 6.0$  mm，垂直方向のセル密度は  $9.8 \mu\text{m}/\text{画素}$  である）．(3) のセンサ設置高さは，低いほど精度が

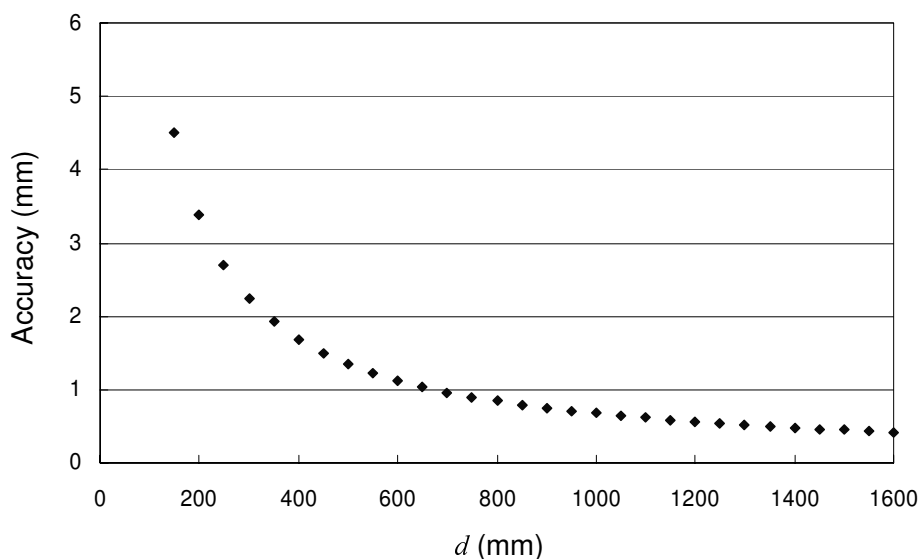


図 2.12 基線長と精度の関係

Accuracy for variations of baseline length.

測定精度は、高さ変動のない輝点を撮像したときの輝点像のノイズレベルによって決まる。ここではそれを経験的に 0.03 ピクセルとし、撮像面上で 0.03 ピクセルに相当する輝点移動（セル密度を乗じて求める）を生じさせるための高さ変動を式 (2.6) により求めた。なお、 $h$  に関しては、床から 300 mm の高さにおいて高さ変動が生じている輝点を床から 1900 mm の高さにあるセンサで受光する場合を想定し、 $h = 1600$  mm とした。

向上するが、実用においてセンサが入浴の邪魔になることを避けるためには、天井ぎりぎりの位置に設置せざるを得ない（本システムでは 1900 mm とした）。上記の中で最もセッティング変更の自由度が高いのは (4) であるが、式 (2.6) を用いて求めた基線長と精度の関係（図 2.12）によれば、0.5 mm の精度とするには 1350 mm の基線長が必要である。本システムでは理想とする精度に少しでも近づけるため、投光器と受光器を可能な限り離して設置した（ $d = 900$  mm）。このときの計測精度は床から 300 mm の高さにおいて 0.75 mm となる。

#### 2.4.2 距離計測範囲

次に、前項で定めたセンサ配置において、計測範囲（計測可能な距離変動の最大値）を求める。光学配置 FG 視覚センサによって異なる時刻における距離変化を計測する際には、輝点の対応付けが必要である。これが可能となるのは、イメージプレーン上の輝点が隣接する輝点を超えて移動しない場合に限られる。図 2.13 は、隣接する 2 つの輝点が、カメラで撮像される様子を模式的に表したものである。光源および受光器のレンズ中心は

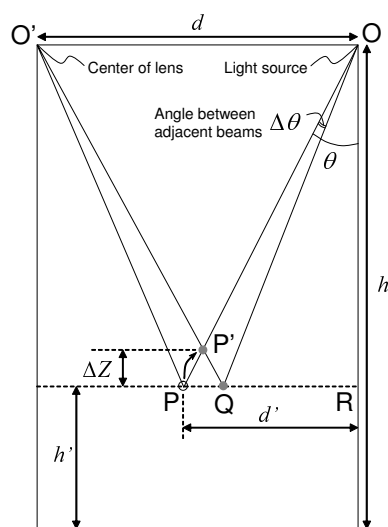


図 2.13 輝点によって距離計測が可能な範囲  
Measuring range of a spot.

この図においては，レーザービームの奥行き方向成分は無視する．

ともに床から  $h$  の高さにあるものとし，基線長を  $d$  とする．また，光路の奥行き方向成分は考慮しないこととする．床からの高さが， $h'$  ( $0 \leq h' \leq h$  とする)，光源側の壁から  $d'$  ( $0 \leq d' \leq d$  とする) である点  $P$  の位置にある輝点が高さ変動を受ける状態を考える．この輝点が  $OP$  と  $O'Q$  の交点  $P'$  の高さを超えて移動すると，取得画像において輝点の対応付けができなくなる．したがって，この輝点によって計測できる高さ変化は図 2.13 における  $\Delta Z$  未満となる．測定範囲  $\Delta Z$  は，図 2.13 において  $\triangle PP'Q \propto \triangle OP'O'$  を利用すると，以下の式で表される．

$$\Delta Z = (h - h') \cdot \frac{PQ}{PQ + d} \tag{2.12}$$

ここで， $PQ = d' - h' \tan(\theta - \Delta\theta)$ ， $\theta = \tan^{-1}(d'/h')$  であることから，

$$\Delta Z = (h - h') \cdot \frac{d' - h' \tan(\tan^{-1}(d'/h') - \Delta\theta)}{d' - h' \tan(\tan^{-1}(d'/h') - \Delta\theta) + d} \tag{2.13}$$

が得られる．

図 2.14 は，前項で定めたとおり  $h = 1900 \text{ mm}$ ， $d = 900 \text{ mm}$  とし， $d'$ ， $h'$  を変化させたときの  $\Delta Z$  を算出したものである．なお，ビームの回折角は一定の間隔であるものとし，光学配置と実際に床に投影された輝点の間隔から，隣接するビームがなす角度  $\Delta\theta = 0.032 \text{ rad}$  とした．この図が示すように，高さ変化を受ける輝点の元の高さと基線方向の位置によって  $\Delta Z$  は大きく変動するものの，実用においては  $h' = 500 \text{ mm}$  以下の



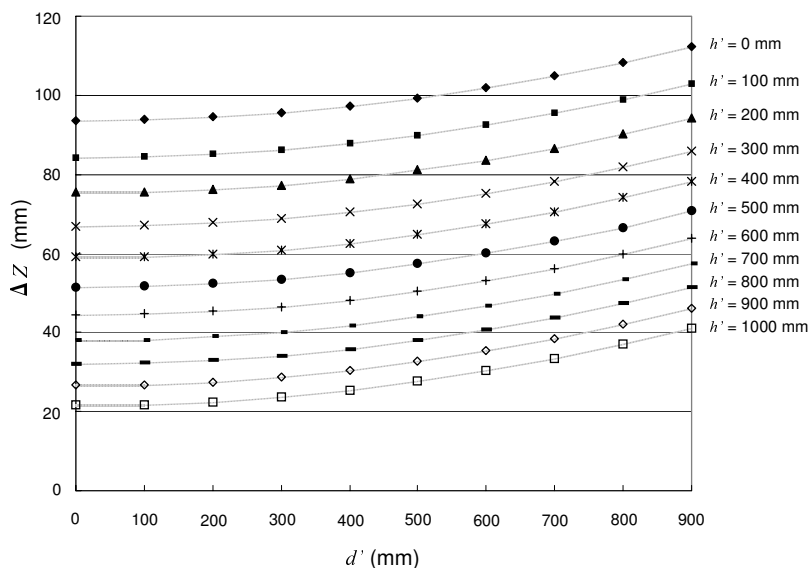


図 2.14 輝点の横座標  $d'$  と  $\Delta Z$  の関係  
 $\Delta Z$  for variations of  $d'$ .

グラフが示すように、センサまでの高さが高いほど計測範囲が狭くなっていく。これは、同じ高さ変動であっても、センサに近い位置で生じたものであるほど撮像面上での輝点移動が大きくなり、計測範囲が狭くなることを意味する。

プロットを考慮すれば十分である。グラフより、 $h' = 500$  mm のときの  $\Delta Z$  の最小値は約 52 mm である。

## 2.5 システム仕様

実験用システムとして、マンションの新築・改築時に採用される標準的なユニットバスを採用した。画像処理及び状態判別処理は浴室天井裏に設置した演算処理装置内で行うのが本来の運用形態であるが、本研究においては、システム開発を容易にするため、両 CCD から取得される画像を外部の PC に組み込んだ画像ボードによって取り込み、画像処理及び状態判別処理もこの PC 上で行うようにした。さらに、警報用のスピーカもこの PC に接続して用いた。図 2.15～図 2.17 にシステムの写真、表 2.1 に本システムの具体的な仕様を示す。





図 2.15 実験に用いたユニットバス  
Experimental system.

センサの配置は図 2.10 とほぼ同じである．奥の壁に見えるのは輝点投光器である．

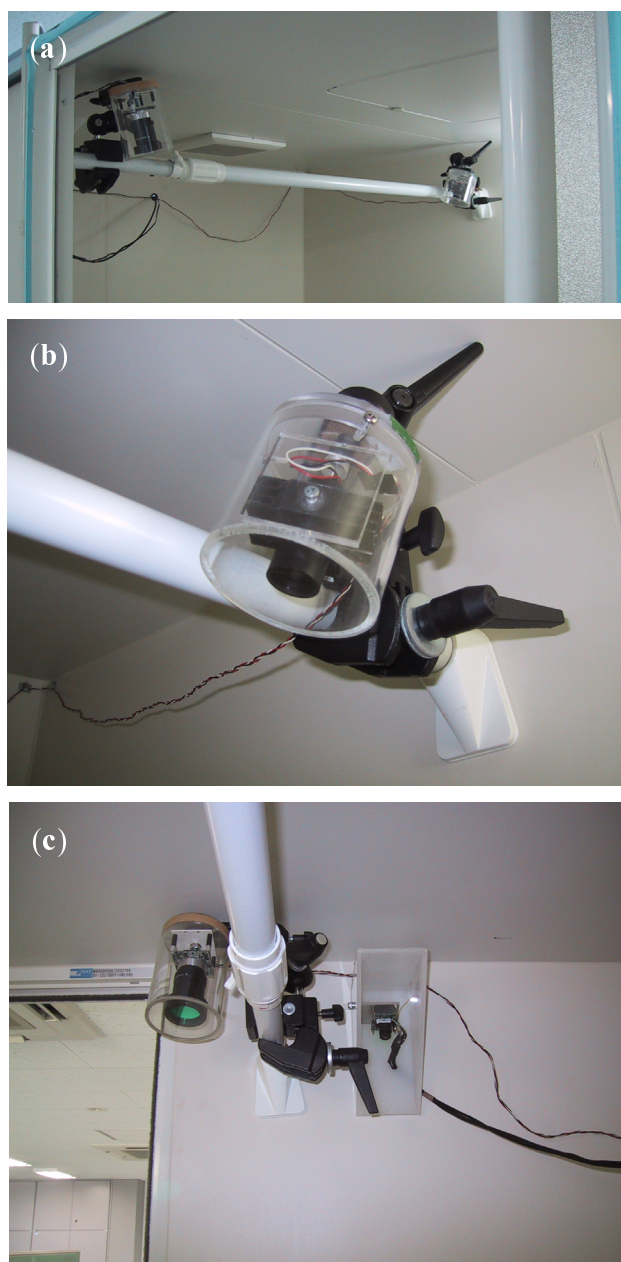


図 2.16 各センサの写真  
Real pictures of parts of sensor.

(a) センサ設置用ポール．このポール方向が基線方向となる．(b) 投光器拡大写真．(c) 左が輝点画像取得用モノクロカメラ，右がカラー画像撮像カメラ．今回製作した実験用システムでは，それぞれの光学フィルタを別々に取り付けた 2 台のカメラを視野がほぼ一致するように設置し，両者のシャッタータイミングを合わせて画像を取得することで，デュアル型センサと同様の画像が得られる状況をつくった．



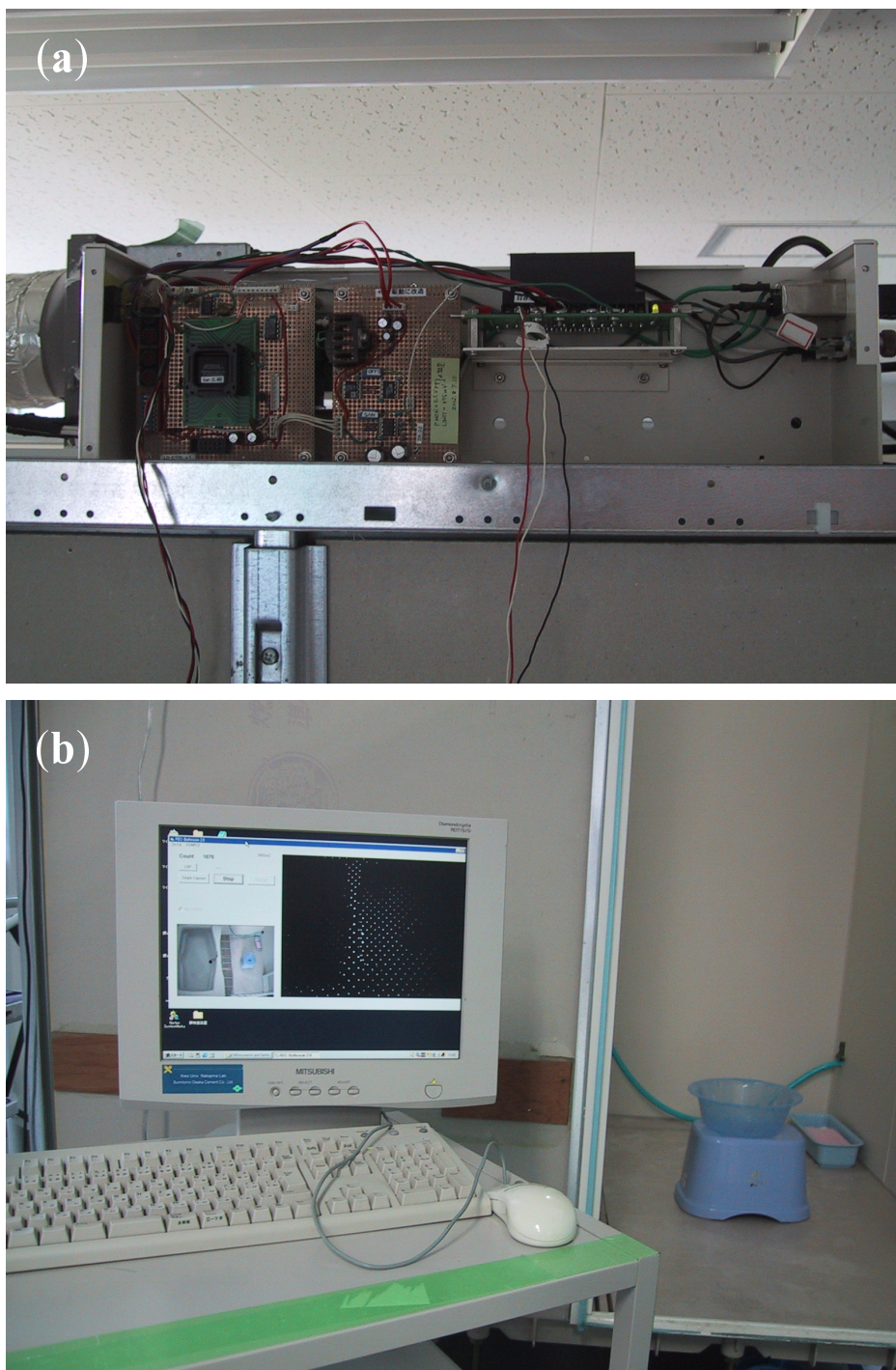


図 2.17 制御ユニットと画像処理用 PC  
Control unit and computer for image processing.

(a) レーザ制御ユニット．輝点画像取得用モノクロカメラのシャッタータイミングに合わせてレーザを発光させる．(b) 画像処理用 PC ．

表 2.1 システムの仕様  
System configuration.

ユニットバス	
寸法	1700(D)×1300(W)×2000(H) mm
浴槽内寸	700(D)×1150(W)×450(H) mm
光学配置	
基線長	900 mm
レンズ—撮像面間距離	6.0 mm
レンズ光軸の向き	鉛直方向と 18.3° の角をなすよう投光器側に傾けた方向
FG 輝点投光器	
光源	半導体レーザ
波長	810 nm
パルス	幅 0.1 ミリ秒, 周期 1/60 秒
ファイバ径	25 μm
レーザ安全基準	クラス I
受光用カメラ - 輝点画像取得用	
受光素子	1/2 インチモノクロ CCD
CCD 有効画素	768(H)×494(V) ピクセル
シャッタースピード	1/10000 秒
レンズ	F1.2, $f = 8$ mm
画角	対角: 56.12°, 水平: 44.89°, 垂直: 33.67°
セルサイズ	8.4(H) μm×9.8(V) μm
受光用カメラ - カラー画像取得用	
受光素子	1/4 インチカラー CCD
CCD 有効画素	512(H) × 492(V) ピクセル
レンズ	ピンホールレンズ F3.5, $f = 3.7$ mm
画像処理用 PC	
プロセッサ	Intel pentium4 2.2 GHz
メモリ	512 MB
OS	Windows 2000 Professional
輝点画像形式	8 bit モノクロ bitmap 640(H)×480(V) ピクセル
カラー画像形式	24 bit カラー bitmap 320(H)×240(V) ピクセル
画像取得間隔	0.25 秒/frame

## 2.6 本章のまとめ

本章では、バスルーム監視に用いるためのデュアル撮像素子型 FG 視覚センサを提案し、その構造と実験システムへの設置状況について述べた。

まず、センサの一要素である FG 視覚センサについて述べた。FG は高次まで均一な回折パターンを生成する透過型回折格子である。回折パターン（輝点マトリクス）を用いた距離計測手法としては、(1) 回折次数を用いる手法、(2) 基準面を設ける手法および (3) 隣接フレームの輝点分布を用いる手法がある。本システムにおいては呼吸による身体表面の微小な高さ変動を計測する必要があるため、隣接フレームの輝点分布を用いる手法を用いる。

次に、FG 視覚センサにカラー撮像素子を組み込んだ、デュアル撮像素子型 FG 視覚センサを提案した。このセンサは、ハーフミラーを用いて入射光を分離し、片方は可視光をカットすることで輝点画像を、もう片方は赤外光をカットすることでカラー画像を取得するものである。

上記センサを一般的なユニットバスに設置し、実験システムを構築した。このとき、入浴者の呼吸検出が可能となるようセンサ配置を考慮した。本システムのセンサ配置の場合、FG 視覚センサによる距離計測の精度は、床から高さ 300 mm の位置において 0.75 mm、また、床からの高さ 500 mm 以下で生じている高さ変動の計測可能範囲は 52 mm 以内であることがそれぞれわかった。

## 第3章

# 監視アルゴリズム

---

本研究において、入浴者の溺水状態と転倒状態を区別して検知するための監視アルゴリズムを構築した。この章では、システムに入力された輝点画像とカラー画像に対する処理手順と、そこから得られる各情報を用いた状態判別手法について述べる。

## 3.1 はじめに

本章では、システムに入力された輝点画像とカラー画像に対する処理手順と、そこから得られる情報を用いた状態判別手法 [28, 29] について述べる。

浴槽においては溺水事故が多いのに対して、洗い場においては転倒事故が多い。本監視アルゴリズムの構築にあたってはこの事故発生傾向を考慮し、人物がバスルームのどこにいるかをシルエット抽出によって判断し、その居場所に応じて危険と判断する要素を変動させるようにした。このために、カラー画像からシルエットの位置とシルエットの動き量を、輝点画像から呼吸信号を、両方の画像からシルエットの高さをそれぞれ定量化する手法を提案する。危険の検知には、これらの定量化された値が利用される。

また、浴室特有の現象である湯気への対策として、カラー画像にラプラシアンフィルタを適用することで、センサから得られる画像の視認性が低下していることを自ら検知する機能を追加した。

## 3.2 判定パラメータと処理の流れ

監視は、同期して取得される輝点画像およびカラー画像を処理することで行われる。第1章で述べたように、本システムの開発において我々が想定しているのは、浴槽内での溺水と洗い場での転倒である。転倒により引き起こされる症状のうちでシリアスなものは頭部損傷や大腿部骨折などであり、即呼吸停止に陥るものばかりではない。このため、浴槽内溺水の検知には呼吸検出を行い、転倒の検知には人物が低い姿勢をとっているか否かを判定するのが現実的である。

このように浴槽と洗い場それぞれに特化した監視を実施するために、表 3.1 に示す 5 つの判定パラメータを考える。これらの判定パラメータは、輝点画像とカラー画像をソースとして、図 3.1 に示す各処理を経て算出される。以下の節では、各パラメータ算出のための処理について述べる。各節と図 3.1 内の処理ブロックは以下のように対応する。

- 3.3 節 くもり判定
- 3.4 節 人物シルエットの作成
- 3.5 節 輝点抽出
- 3.6 節 呼吸信号探索
- 3.7 節 シルエットの高さ取得



表 3.1 判定パラメータ  
Judgement parameters.

パラメータ	意味
V (visibility)	カラー画像の視認性 (以下, 視認性パラメータ V と呼ぶ)
P (position)	シルエットの位置 (以下, 位置パラメータ P と呼ぶ)
M (movement)	シルエットの動き量 (以下, 動きパラメータ M と呼ぶ)
B (breathing)	呼吸信号 (以下, 呼吸パラメータ B と呼ぶ)
H (height)	シルエットの高さ (以下, 高さパラメータ H と呼ぶ)

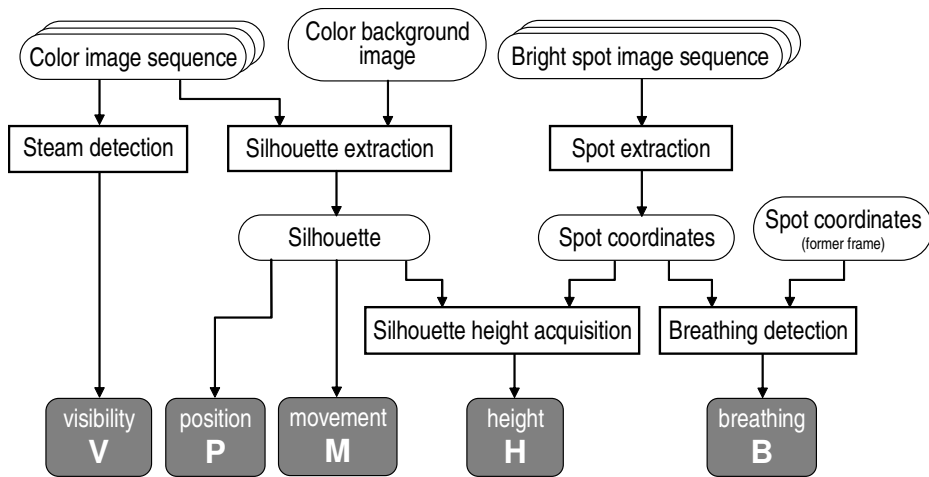


図 3.1 データの流れと処理の流れ  
Process flow.

処理の流れを, データ (トラック) とそれらを変換する処理 (矩形) に分けて表したものである.

### 3.3 くもり判定

本システムの溺水や転倒を検知するためのアルゴリズムは, 湯気が少なく, 取得画像の視認性があるレベル以上に保たれていることを前提としたものになっている. しかしながら, 浴室という特殊な環境から, 室内が湯気でくもり, 視認性が低下することがないわけではない. 多少のくもりであれば換気扇を使用したり浴室暖房を併用したりすることによってこの問題は解消できるが, 室温に比べて極度に熱い水を蛇口やシャワーから出した場合には, 温泉地で見られるような濃い湯気が生じることがある. このような想定外の環



境下で通常の監視アルゴリズムを適用すると誤認識が頻発することが予想されるため、システムを安定的に動作させるためには、取得した画像がくもりの影響を受けていないかを検査し、くもりの激しい状態が続いている間は監視を一時中断し、家族等へその旨通報する（あるいは、くもりの検知をトリガとして浴室暖房や換気扇のスイッチを入れる）機構を設けるのが適切である。

そこで、CCD2により取得されたカラー画像に対してくもり判定処理を行い、取得画像の視認性を定量化する。湯気が充満している時の視認性の低下は、いわゆる“ぼけ状態”となって現れる。ぼけた画像は人物や物体の輪郭線が曖昧となり、画像処理分野でいうエッジの強度が小さくなることが予想される [30]。この仮定に基づき、カラー画像にラプラシアン（空間2次微分）フィルタを適用する。2次微分に相当するラプラシアンを用いたのは、人物の肌やバスタブの丸みなど輪郭以外の部分において照明むらが生じやすいことを考慮し、輝度がなだらかに変化する領域に対して感度が小さくなることを狙いとするためである（図3.2）。

$x, y$  座標上における画像の輝度値  $f(x, y)$  に対して、ラプラシアンは次式で与えられる。

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (3.1)$$

デジタル画像においては座標値  $x, y$  は離散値であるため、この式をそのまま適用することはできない。よって、微分に対しては隣接画素間の輝度レベルの差分を用いるのが一般的である。座標  $(i, j)$  における輝度値を  $f(i, j)$  とすると、

$$\begin{cases} \frac{\partial f(i, j)}{\partial i} = f(i+1, j) - f(i, j) \\ \frac{\partial f(i, j)}{\partial j} = f(i, j+1) - f(i, j) \end{cases} \quad (3.2)$$

が用いられ、さらに2次微分に対しては次式が用いられる [31]。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial i^2} = \{f(i+1, j) - f(i, j)\} - \{f(i, j) - f(i-1, j)\} \\ \quad = f(i+1, j) - 2f(i, j) + f(i-1, j) \\ \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial j^2} = \{f(i, j+1) - f(i, j)\} - \{f(i, j) - f(i, j-1)\} \\ \quad = f(i, j+1) - 2f(i, j) + f(i, j-1) \end{cases} \quad (3.3)$$

上記の式を用いて、画素  $(i, j)$  におけるエッジ強度を算出する演算子  $edge(i, j)$  を次式のように定める。なお、輝度値  $f(i, j)$  としては、カラー画像の画素  $(i, j)$  における R, G,

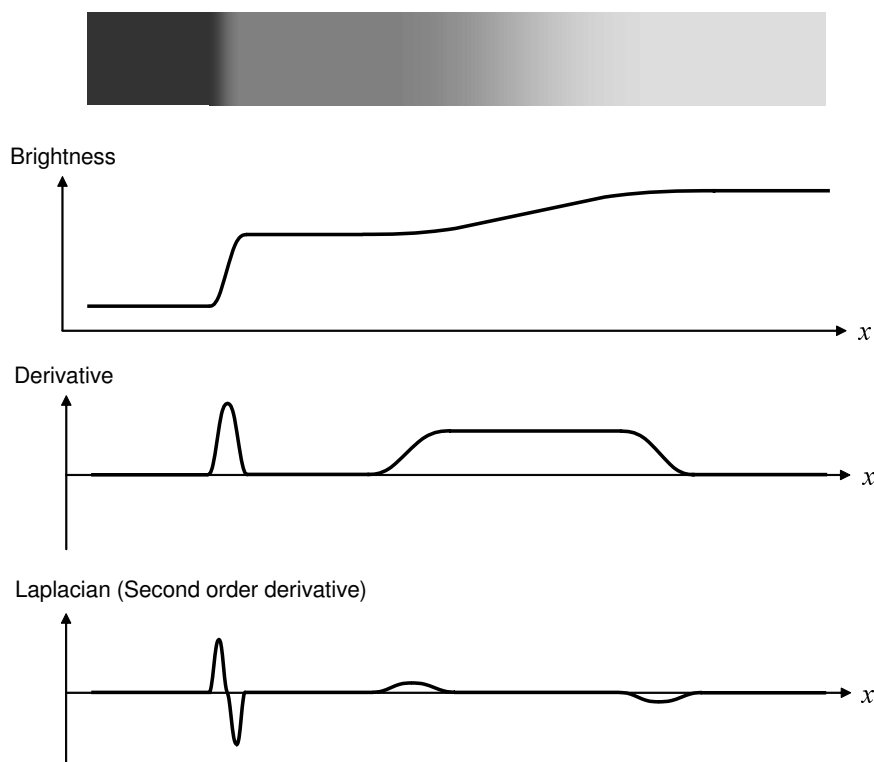


図 3.2 ラプラシアン の 性質  
Property of Laplacian.

位置  $x$  における輝度値が上段の曲線で表されるとき の 微分 (中段) と ラプラシアン (下段) を示したものである。1 次微分では輝度がなだらかに変化する部分に対して感度を持ってしまふ。ラプラシアン (2 次微分) 処理を行うと、そのような部分に感度を持たないので、浴室の人や物の輪郭のみを検出対象にできる。

B 各成分の最大輝度値を用いた。

$$edge(i, j) = f(i-1, j) + f(i+1, j) + f(i, j-1) + f(i, j+1) - 4f(i, j) \quad (3.4)$$

図 3.2 に示すように、ラプラシアンは輝度が変化する境界の前後で正負の値となって現れ、画像全体の総和は 0 となる。この特徴を考慮し、 $edge$  の値が正となる画素のみを残し、それら画素群の  $edge$  の平均を視認性パラメータ  $V$  とする。このとき、明るい室内であるほどエッジライン付近の輝度差が広がることを考慮し、フィルタ適用前に画像全体の平均明度がある一定値となるよう輝度補正を施しておく。

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i,j} edge(i, j) \quad \text{where } edge(i, j) > 0 \quad (3.5)$$

ここで  $N$  は  $edge > 0$  となる画素数を表す。

図 3.3 は、ユニットバス内に湯気を発生させたときの  $V$  の変化を表したものである。グラフの上部にこの実験で取得されたカラー画像を掲載した。くもりのない場合とある場合

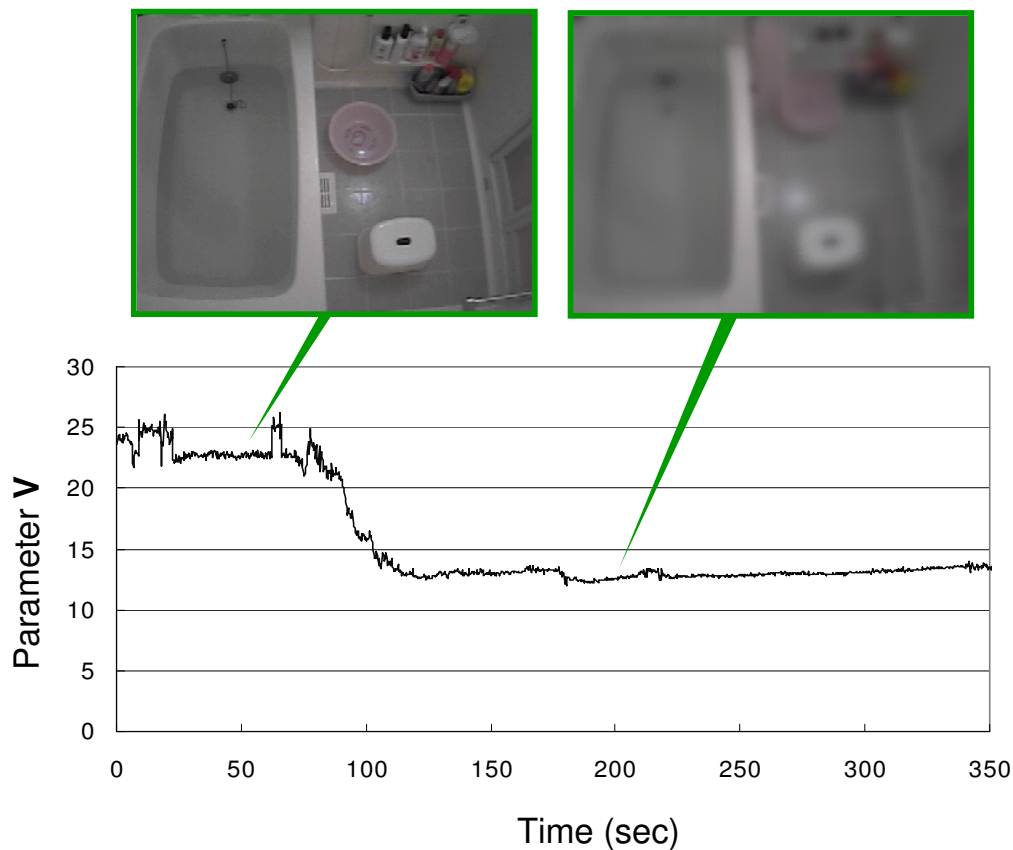


図 3.3 くもり予備実験

Experimental result for setting the threshold of V.

湯気の発生により画像がぼけてくると、視認性パラメータ V の値が低下していくことがわかる。後に述べる本実験においては、くもりがあるか否かの判定のためのしきい値を 17.5 に設定した。

とで V の値に明らかな格差があり、15~20 の間にしきい値を設けてくもり判定を実施することが可能であることが示唆されている。なお、この予備実験において使用したカラー画像シーケンスは、第 4 章 入浴実験のものとは異なる（以降も“予備実験”と記したものはすべて同様である）。

### 3.4 人物シルエットの作成

くもり検査によってカラー画像が処理に耐えうるものであると判断した場合には、入浴している人物のシルエットを背景差分によって算出する。差分に用いる基準画像として、あらかじめ無人時の画像をシステムに取得しておく。カラー画像、基準画像ともに入力時は 320(H)×240(V) ピクセルであるが、処理に際してはノイズの影響を軽減するため、カ

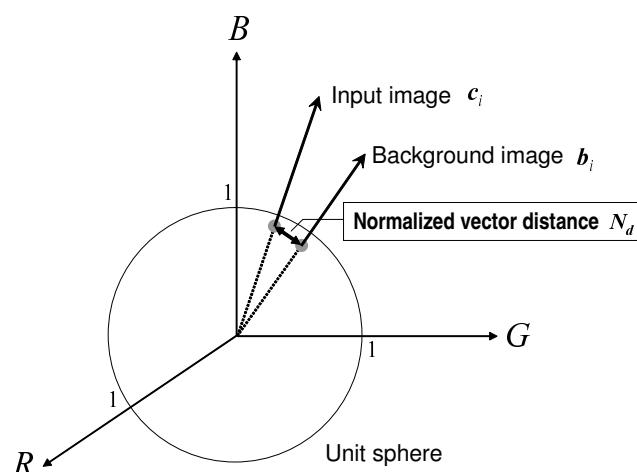


図 3.4 正規化距離

Normalized distance between a pixel in the background image and the corresponding pixel in the obtained image.

$c_i$  と  $b_i$  のなす角も照明変動とは独立であると予想されるが、小さい角に対する  $\cos$  値の分解能が悪くなるため、演算上不利である [33] .

ラー画像の  $R, G, B$  各成分を  $32(H) \times 24(V)$  ピクセルに低解像度化したものを用いる。なお、カラー情報は 1 画素あたり 24 ビットである。

背景差分による人物抽出に関しては、バスルームの室内環境の特殊性を無視することはできない。ユニットバスは狭く、人物の移動によって室内の照明状況が大きく変動するため、人物の周囲に影が多く生じる。背景差分手法として最も原始的な、対応画素の明度差による手法では誤抽出が頻発する。

そこで、人物の影領域からカメラ受光部に向かって反射する照明光が、各波長成分とも一様に弱められていると仮定し、対応画素における色ベクトルの類似度を各ベクトルの正規化距離によって評価する [32]。2 ベクトルの正規化距離  $N_d$  は次式によって表される。

$$N_d = \left| \frac{c_i}{|c_i|} - \frac{b_i}{|b_i|} \right| \quad (3.6)$$

ここで、 $c_i$  は取得画像における画素  $i$  の  $R, G, B$  成分からなるベクトル、 $b_i$  は基準画像における対応画素の  $R, G, B$  各成分からなるベクトル、 $|\cdot|$  はベクトルの大きさ（始点終点間のユークリッド距離）である。正規化距離は、それぞれのベクトルを単位球に射影してできる単位長ベクトル間の距離に相当する（図 3.4）。

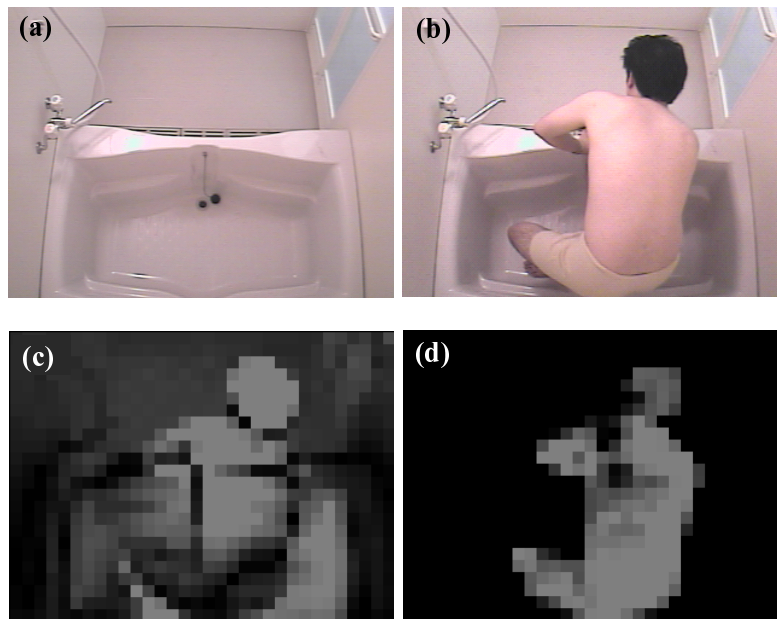


図 3.5 シルエット形状の比較

Extracted silhouette in brightness subtraction method and in NVD method.

(a) は基準画像，(b) は取得画像，(c) は単純明度によるシルエット，(d) は提案手法によるシルエット．差分値による 2 値化は行っていない．

図 3.5 は，予備実験として得たカラー画像を用いて，単純明度による差分値で作成したシルエットと，上記の定義による差分値で作成したシルエットである．単純明度の差は  $|MAX(R_c, G_c, B_c) - MAX(R_b, G_b, B_b)|$  ( $MAX(\cdot)$  は最大値を表す) によって求めた．単純明度の方は人物がつくる影の部分で誤抽出を起こしているのに対し，本手法においては人物の形状をより正しく抽出していることがわかる．

この正規化距離にしきい値を設け，しきい値未満となる画素を背景，しきい値以上となる画素を非背景とする 2 値分布をもって人物シルエット領域とする．ただし，この差分には，人物の他に，浴室に通常備えられている椅子や洗面器といった浴室常備品類の位置的な変化によって生じる差分も含まれるので，ラベリング処理 [34, 35] によって連結している差分領域どうしをグループ化し，最大の面積を持つグループを人物シルエットとする．このとき，人物シルエットと認識する最小構成画素数をあらかじめ決めておき，これに達するグループがない場合は「無人」と判定する．図 3.6(c) は，予備実験におけるシルエットの作成例である．斜線の模様で示された領域は椅子や洗面器によるシルエットであり，本来の差分結果からは除去される．さらに，シルエットの形状を安定させるため，膨張，収縮処理を 1 回ずつ行い，シルエット内部の欠落ブロックを埋める．

こうしてできるシルエットの分布によって，位置パラメータ  $P$  に，値 “W” (洗い場) または “B” (浴槽) を設定する．ただし，最小構成画素数から構成されるラベルがない場

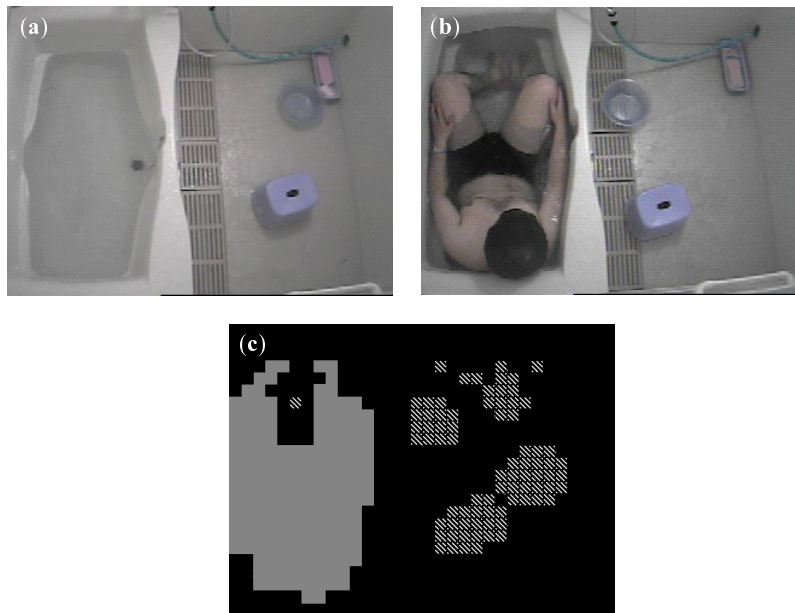


図 3.6 シルエット作成例  
Extracted silhouette.

(a) は基準画像，(b) は取得画像，(c) は作成されたシルエット．人物のシルエットをグレーのベタ塗りで示している．斜線部分で示した領域は，面積によって人物シルエットと分離された領域である．

合は“E”（無人）を設定する．

$$P = \begin{cases} \text{“W”} & : \text{ シルエットの位置が洗い場} \\ \text{“B”} & : \text{ シルエットの位置が浴槽} \\ \text{“E”} & : \text{ 有効なシルエットが存在しない} \end{cases} \quad (3.7)$$

また，フレーム間のシルエットの AND 部分と OR 部分を考慮した次式をもって，動きパラメータ M とする．

$$M = 1 - \frac{\sum_{i,j} k\{S(i, j, t) \cdot S(i, j, t-1)\}}{\sum_{i,j} k\{S(i, j, t) + S(i, j, t-1)\}} \quad (3.8)$$

ただし，

$$k(X) = \begin{cases} 1 & : X = \text{true} \text{ の場合} \\ 0 & : X = \text{false} \text{ の場合} \end{cases} \quad (3.9)$$

ここで， $i, j$  は画素の座標値， $S(i, j, t)$  はフレーム  $t$  において画素  $(i, j)$  がシルエットに含まれるか否かを表す論理型関数（含まれる場合は true，そうでない場合は false），



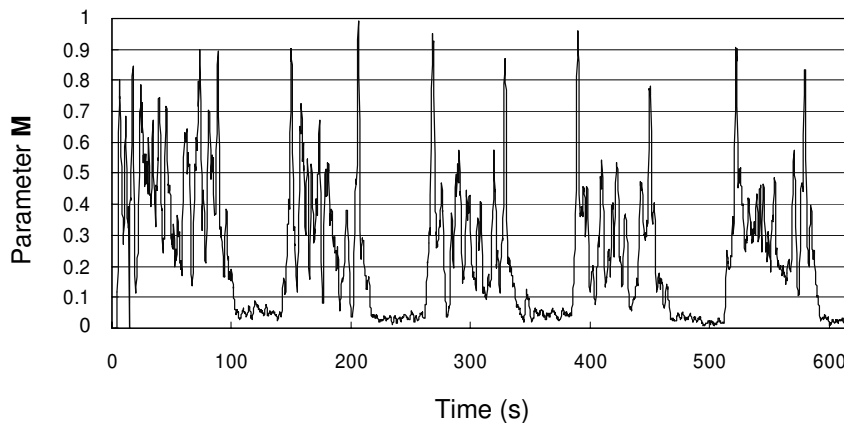


図 3.7 シルエットの動き予備実験

Experimental result for evaluating motion detection method.

被験者が浴槽内で安静にすると、動きパラメータ  $M$  の値が低下することがわかる。被験者は図 3.13 と同じである。後に述べる本実験においては、しきい値を 0.2 に設定した。

演算子  $\cdot$  は論理積，演算子  $+$  は論理和， $k(X)$  は論理型変数  $X$  の値によって整数を返す関数である。

図 3.7 は、バスルームの中で身体を洗う動作と浴槽で安静の状態を交互に 5 回ずつ行ったときの動きパラメータ  $M$  の変化である。5 回の安静姿勢に対して、 $M$  が十分小さな値となっていることがわかる。

### 3.5 輝点抽出

CCD1 から得られる輝点画像 (640(H)×480(V) ピクセルのモノクロ画像，1 画素あたりの輝度情報は 8 ビット) は，後に述べる呼吸信号探索処理およびシルエットの高さ取得処理で用いる座標情報に変換される。

まず前処理として，処理対象となった領域を 2 値化し，輝点を構成する画素を抽出する。このとき，バスルームの素材によってレーザービームの反射率が異なり，画像上での輝点の輝度値は均一ではないので，画像全体に唯一のしきい値を適用するのではなく，局所的に変動する値（浮動しきい値）にて処理を行う。具体的には，以下の手順を行う。

- (1) 輝点画像を 50×50 ピクセルの小領域に区切る。
- (2) 各領域内で輝度ヒストグラムを作成する。
- (3) 各ヒストグラムの上位 4 % に相当する成分を輝点画素，それ以外を背景画素として 2 値化する。

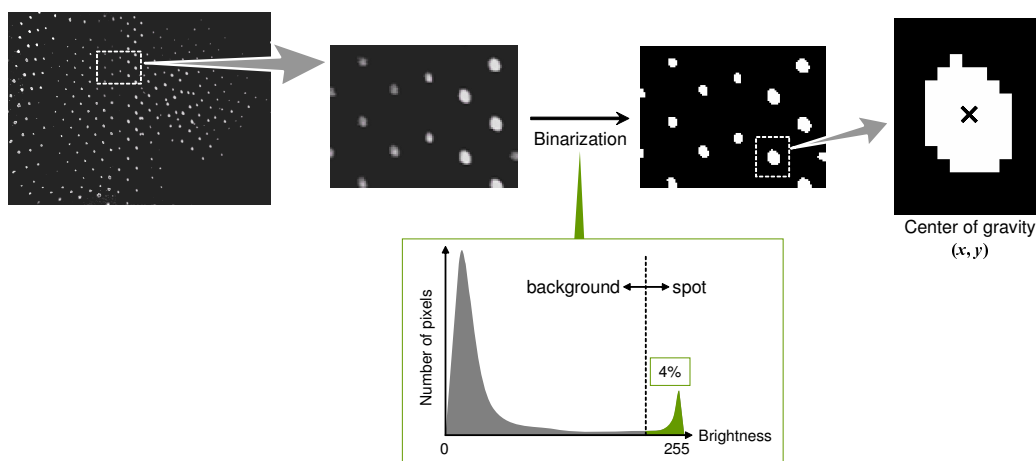


図 3.8 輝点の抽出

Process of spot extraction.

抽出された小領域内におけるヒストグラムを作成し、上位 4 % に相当する画素を輝点に属するものとする。この手法により、近赤外の波長が混入して局所的に輝度が上昇してもその領域に適したしきい値で輝点を抽出することができる。

なお、4 % という割合は経験的に定めたものである。

次に、ラベリング手法によって互いに連結している画素群をグループ化し、各グループの重心をサブピクセルで求める。以降この座標値を輝点座標と呼ぶことにする。輝点座標は、輝点画像中のすべての輝点に対して求められる。図 3.8 は以上の処理を図示したものである。

### 3.6 呼吸の検出

輝点画像を処理することで求まる輝点座標は、人物の体動や呼吸によって時々刻々と変化する。こうして生じる輝点移動に注目して人物の呼吸を検出する。呼吸パラメータ B は、こうした呼吸運動があるか否かを判定するために算出されるものである。処理に際しては 2.2.2 項 (p.22) で述べたように、隣接フレーム (現フレームと前フレーム) における輝点座標を用いる。

処理の詳細は以下の通りである。この処理は輝点 1 つ (これを“注目輝点”と呼ぶことにする) に対して行われる内容であるが、実際は繰り返し処理によって、現フレーム内の輝点に対して一様に行われる。

- (1) 輝点画像に先に求めたシルエットを重ねたとき、その内部に位置する輝点に対して、以降の処理を施す。
- (2) 注目輝点の座標を中心とする探索窓を設け、“探索窓内にあり、かつ注目輝点との



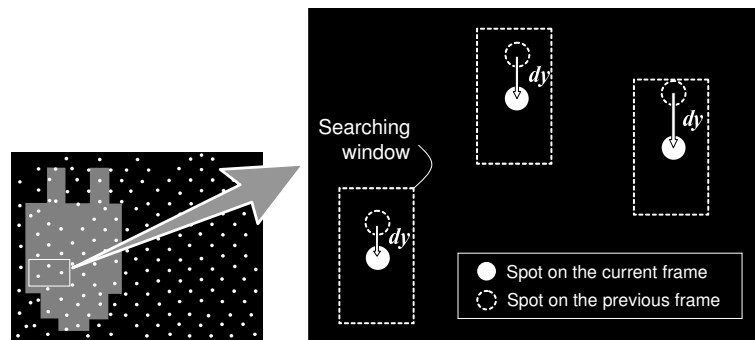


図 3.9 輝点探索

Process of searching for a corresponding spot.

輝点ごとに探索窓が設定され、前フレーム輝点群から対応輝点が求められる。この処理は、抽出されたシルエット上の輝点に対して行われる。

距離が最小となる”輝点を前フレーム輝点群から探索する（図 3.9）。探索窓のサイズは輝点投光器と受光器の光学配置によって決まる距離測定範囲を用いて定める。

(3) (2) の操作で条件を満たす輝点が探索できた場合には、その注目輝点にフラグをつけ、基線方向の移動  $dy$  を記録する。

(4) 探索に失敗し、 $dy$  算出が不可能な場合にはそのまま次の輝点処理に移る。

$dy$  は撮像面上での  $v$  方向の移動量  $\delta$  (p.23) に準ずる値であり、さらに、当該の節で考察したとおり、 $\delta$  は高さ変動  $\Delta Z$  (p.23) を反映する。このことを踏まえ、上記の処理でフラグがついた輝点それぞれの  $dy$  を平均した、平均移動量 (AAOM; Average Amount Of Movement) をシルエット上で生じている平均的な高さ変動として用いる。フラグが付いた輝点の中には、呼吸ではなくノイズの影響で移動したものも含まれるが、これらの輝点の移動量は概して小さくかつランダムなため、AAOM を算出する際にこれらの輝点も統計雑音として足しこむことで、雑音どうしの  $dy$  が相殺されるとともに、AAOM の精度も向上すると考えられる。

図 3.10 は、予備実験として行われた入浴演技から得られた AAOM を時間軸上に描いたものである。時間軸に沿って、体動、くつろぎ、呼吸停止（呼吸を意識的に止める）の動作を連続して行った。体動の場合は振幅が大きく周期性のない波形となる。体動をやめ、くつろいだ状態になると、それまで体動による信号に埋もれていた周期的な呼吸信号が観測できるようになる。そして呼吸を止めると、信号はノイズ成分のみとなり、振幅が体動やくつろぎの場合と比較して振幅が非常に小さくなることがわかる。このように、AAOM は入浴者の呼吸の傾向をよく反映していることから、AAOM の絶対値を呼吸パラメータ B とする。

なお、人物が浴槽内において身体表面が水面下にある場合でも、投光器からのビームは水

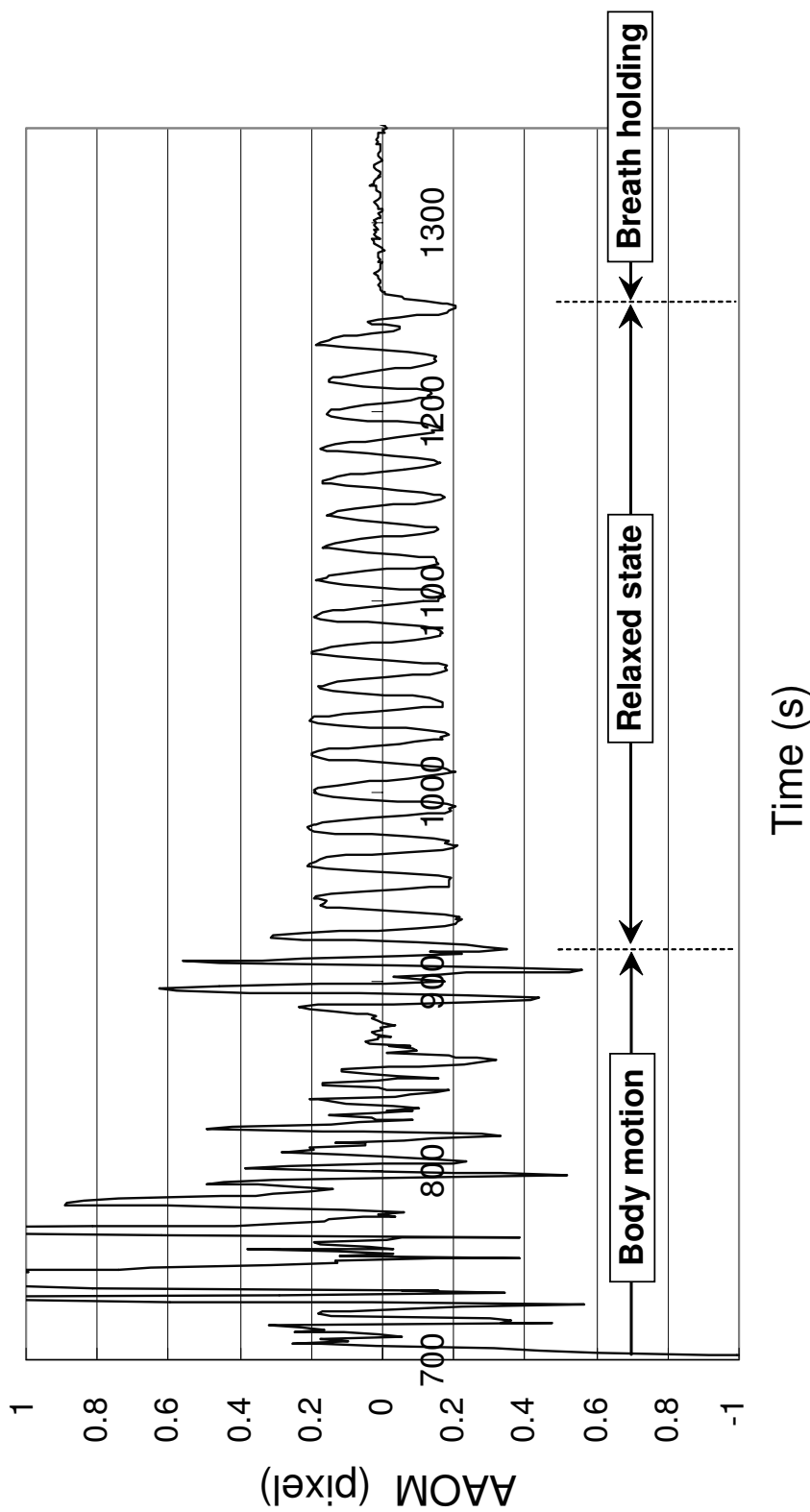


図 3.10 AAOM (平均輝点移動量) の変化  
Waveform plotted the AAOM in actual bathing.

“体動”と表記された時間帯では、被験者は手足を動かしたり身体を洗ったりする動作を行った。“くつろぎ状態”の時間帯では、浴槽内で身体を動かさず安静にしていた。“呼吸停止”の時間帯では、くつろぎ状態のまま呼吸を止めた。

中を進み，身体表面上に輝点が形成される．また，ビームは水面において屈折するが，先に記したように呼吸検出に際してはフレーム間の輝点座標情報を用いるため，この影響は問題とはならないと考えられる．

### 3.7 シルエットの高さ取得

本処理は，転倒事故検知のために行われるものである．抽出されたシルエットがバスルーム空間においてどのように分布しているかを推定し，入浴者が低い姿勢をとっていないかを判定する．

人物がとっている姿勢を区別するためには，数百 mm オーダーの高低差を検出しなければならないが，この距離計測を FG を用いて行うためには，受光器を追加するなどして短基線長の光学系を追加する必要がある．

実用の際にはなるべく必要最小限の機器構成が望ましいこと，さらに，姿勢の判定のみを目的とする場合にはさほどの計測精度を必要としないことから，以下に述べる手法によって，シルエット付近に存在する高低差を算出する．図 3.11 は，輝点投光器から出射された多数のレーザビームのうちの 1 本が受光器へ進む様子を模式的に表したものである．光源および受光器のレンズ中心はともに床から  $h$  の高さにあるものとし，基線長を  $d$  とする．また，光路の奥行き方向成分は考慮しないこととする．

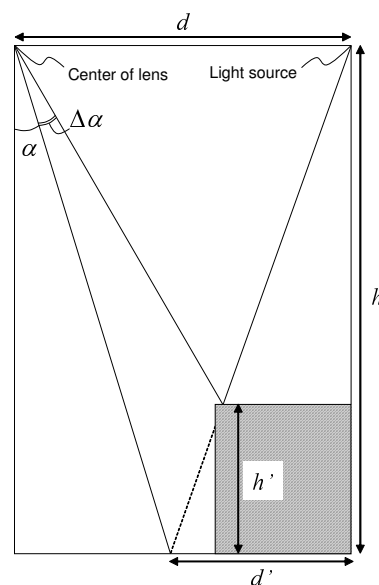


図 3.11 高さギャップによる光路の変化  
Change that a height gap makes in a light path.

ここでは，物体の受光部側に存在する高さギャップを対象とする．

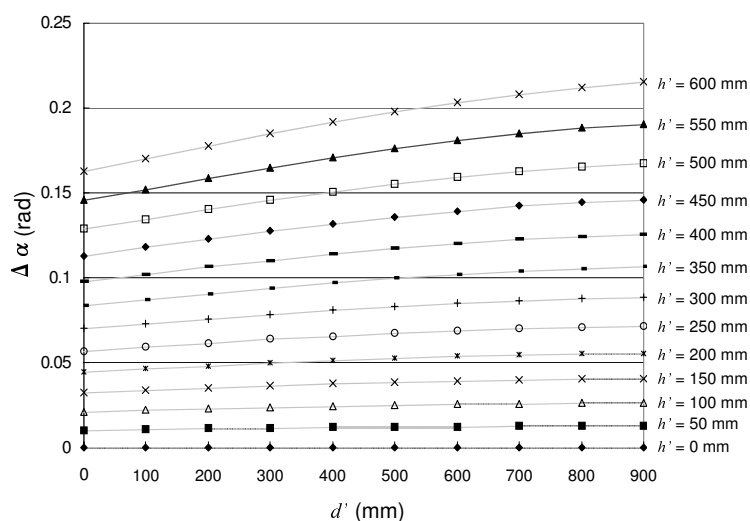


図 3.12  $d'$  と  $\Delta\alpha$  の関係  
 $\Delta\alpha$  for variations of  $d'$ .

ここでは、実用における転倒状況を考慮し、 $h' = 600$  mm までの高さギャップについてグラフ化した。

図 3.11 のように、本来であれば光源から  $D$  ( $0 \leq D \leq d'$  とする) 横に移動した位置で床に当たる輝点が、 $h'$  ( $0 \leq h' \leq h$  とする) の高さギャップを持つ物体に当たって光路が変わる場合を考え、両者の光路がなす角を  $\Delta\alpha$  とする。 $\Delta\alpha$  は以下の式で表され、この分だけ画像上の輝点は元の位置からずれる。

$$\Delta\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{\tan(\alpha + \Delta\alpha) - \tan \alpha}{1 + \tan(\alpha + \Delta\alpha) \tan \alpha} \right\} \tag{3.10}$$

ここで、図 3.11 における幾何学的関係

$$\tan \alpha = \frac{d - d'}{h} \tag{3.11}$$

$$\tan(\alpha + \Delta\alpha) = \frac{d' h'}{h(h - h')} \tag{3.12}$$

を用いれば  $\Delta\alpha$  が求まる。図 3.12 は、式 (3.10) を用いて、実際に開発したシステムと同じ  $d = 900$  mm,  $h = 1900$  mm としたとき、 $d'$  の値に対して  $\Delta\alpha$  がどう変化するかを幾つかの  $h'$  について示したものである。

この図が示すとおり、同一の高さギャップであっても入射角によって  $\Delta\alpha$  は変動するので、監視領域全体の高さ分布を一意に定めることは不可能であるが、輝点間隔が本来よりも大きい箇所においては、その増え分に応じた高さギャップが存在していると考えられ

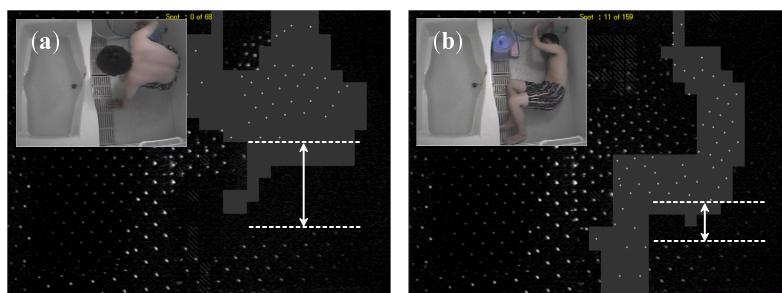


図 3.13 安全入浴時と転倒時の空乏領域  
Depletion region in safety bathing and falling.

(a) 安全入浴時の輝点画像，(b) 転倒時の輝点画像である．シルエット下部に存在する輝点空乏領域に差が見られる．

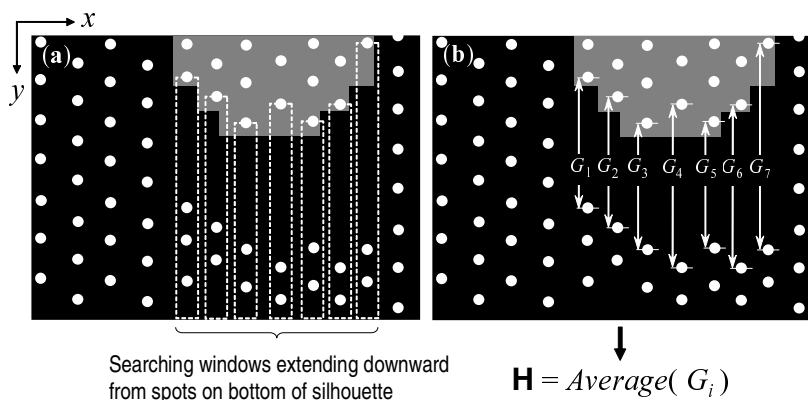


図 3.14 高さギャップの算出  
Height gap detection.

関数  $Average(\cdot)$  は，各要素の平均値を表す．

る．図 3.13 は，実際の演技シーンから，転倒時の輝点画像を比較したものである．転倒して高低差が小さくなると，輝点の間隔が広がることがわかる．

以上のことを踏まえ，輝点画像高低差の存在を図 3.14 ように算出する．まず，シルエットを列に分割し，各列の最下端に位置する輝点を選択する．次に，これらの輝点を起点とし，輝点の位置が低くなったときに画像上で移動する方向（図 3.14 では  $+y$  方向）に向かって伸びる探索窓を設ける．このとき，窓の幅は輝点配列の  $x$  軸方向のずれを緩衝するよう適切に定める（本システムでは 15 ピクセルとした）．そして，探索窓の中で  $y$  座標の値が最小となる輝点を選択し，この縦座標の差  $G_i$  の平均値をもって高さパラメータ  $H$  とする．

### 3.8 状態判別

以上の処理を経たのち、算出された判定パラメータを用いて浴室内の状態判別を図 3.15 に示す状態遷移図にしたがって行う。

システム起動時の初期状態は不在とする。まず、視認性パラメータ  $V$  がしきい値  $TH_V$  以上で、かつ位置パラメータ  $P$  が“E”でない場合は安全入浴に状態遷移する。危険の検知に際しては、シルエットの位置によって以下のように異なる。

- $P = \text{“W”}$  のとき  
 高さパラメータ  $H$  がしきい値  $TH_H$  未満となる状態が  $T_f$  秒間継続した場合に転倒に状態遷移し、アラームが解除されるまで警報を発する。
- $P = \text{“B”}$  のとき  
 動きパラメータ  $M$  がしきい値  $TH_M$  未満であり、かつ呼吸パラメータ  $B$  がしきい値  $TH_B$  未満となる状態が  $T_d$  秒間継続した場合に溺水に状態遷移し、アラームが解除されるまで警報を発する。

なお、アラーム発報中以外において視認性パラメータ  $V$  が  $TH_V$  未満となった場合は、画質不良に状態遷移し監視を中断する。くもりが消え、 $V$  が再び  $TH_V$  以上となったら初期状態に戻る。

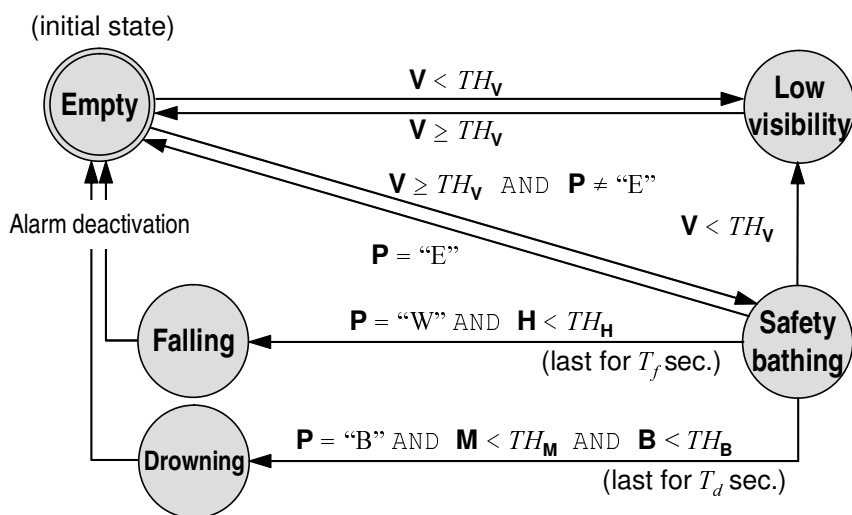


図 3.15 状態遷移図

State transition diagram for the system.

図中のしきい値  $TH_{PARAMETER}$  の設定については、次章で述べる。

### 3.9 本章のまとめ

本章では、デュアル型センサにより得られる輝点画像とカラー画像を用いて、バスルーム内を監視するアルゴリズムについて述べた。

まず、状態判別の元となる5種類の判定パラメータを考える。これらは、(1) カラー画像の視認性、(2) シルエットの位置、(3) シルエットの動き量、(4) 呼吸信号、(5) シルエットの高さをそれぞれ定量化したものである。

カラー画像の視認性を表すパラメータ  $V$  は、カラー画像にラプラシアンフィルタを適用して得られるエッジ強度である。シルエットの位置を表すパラメータ  $P$  は、カラー画像を背景差分して得られる人物シルエットの分布によって、浴槽、洗い場、不在のいずれかの値が設定される。ここで、背景差分を行う際にカラーベクトルの正規化距離を考慮することにより、照明変動による明度の変化にロバストなシルエット抽出が可能である。シルエットの動き量を表すパラメータ  $M$  は、抽出されたシルエットをフレーム間で比較し、その重なった部分の面積をもとに算出される動き量である。呼吸信号を表すパラメータ  $B$  は、シルエット上の輝点について算出される、隣接フレームにおける平均輝点移動量である。このとき、算出される平均値の精度向上のため、ノイズ成分も足し込んでいる。シルエットの高さを表すパラメータ  $H$  は、抽出されたシルエット下部に存在する輝点が空乏となっている領域の大きさである。

人物の状態判別には、以上5つの各パラメータの値によって不在、視認性低下、安全入浴、溺水、転倒の各状態を遷移する状態遷移図が用いられる。洗い場にいる場合と浴槽にいる場合とで異なる危険検知アルゴリズムを用いることで、溺水と転倒の検知を行う。

## 第 4 章

# 入浴実験

---

本章では、システムの有効性を検証するため、デュアル撮像素子型 FG 視覚センサによって得られた、溺水、転倒および湯気の発生を模したシーンからなる画像シーケンスに対して前章で述べた監視アルゴリズムを適用した結果について述べる。



## 4.1 はじめに

以上に述べた監視アルゴリズムの有効性を検証するため、実験システムにて入浴実験を行った。まず、監視結果の元となる判定パラメータに対するしきい値を決定し、溺水、転倒に対するアラーム精度を検証するための実験を行う。このとき、安全（普段どおりの）入浴に対してもシステムを運用し、誤報がないかどうか調べる。さらに、くもり判定処理の有効性についても実験によって調べる。

## 4.2 判定パラメータに対するしきい値の決定

まず、図 3.15 (p.50) に示した状態遷移図に関して、各パラメータごとに与えるしきい値をそれぞれ、以下のように定めた。

### 視認性パラメータ V

この値は視認性が低下するほど小さな値となる。状態遷移させるためのしきい値は、図 3.3 (p.39) に示した予備実験の結果から、 $TH_V = 17.5$  とした。

### 位置パラメータ P

まず、背景差分の際人物とみなす正規化距離  $N_d$  に対しては経験的に  $3.1 \times 10^{-2}$  をしきい値とした。位置パラメータ P に対しては、背景差分で用いる基準画像を用いて、図 4.1 に示すような分布をあらかじめ定め、“W”、“B”のうち、シルエットを構成する画素がより多く属している方を設定する。このとき、最小構成画素数を 50 とし、この数以上の画素から構成されるシルエットが存在しない場合には P=“E”となる。

### 動きパラメータ M

動きパラメータ M は 0 から 1 の間の値をとり、隣接フレームにおけるシルエットの重なりが少ない（すなわち体動の動きが激しい）ほど大きい値となる。図 3.7(p.43) に示す予備実験の結果から、 $TH_M = 0.2$  とした。

### 呼吸パラメータ B

図 3.10(p.46) に示す予備実験の結果から、 $TH_B = 0.03$  とした。

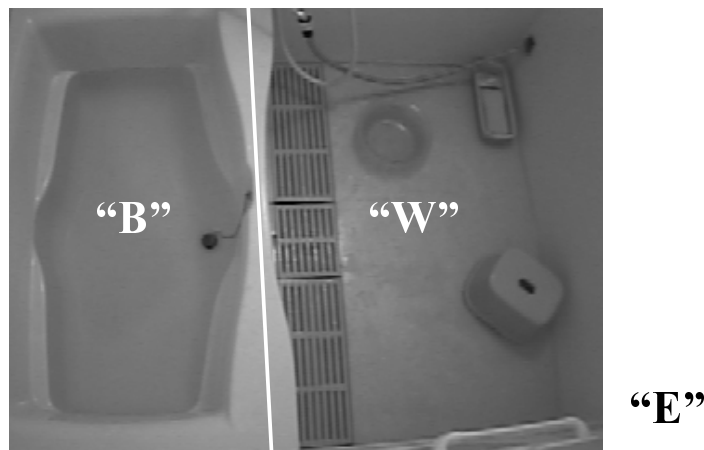


図 4.1 カラー画像の領域分け  
Segmentation of the color image.

本研究においては、この分布は手動によりピクセル単位で与えた。

#### 高さパラメータ $H$

高さパラメータ  $H$  は、入浴者が低姿勢であるほど小さな値となる。本システムの環境 ( $h = 1900 \text{ mm}$ ,  $d = 900 \text{ mm}$ ) においては、図 3.12 (p.48) の  $H = 30 \text{ cm}$  のプロットを利用し、この系列の最大値  $\Delta\alpha = 0.089 \text{ rad}$  を得た。レンズ収差の影響やレンズ中心から離れるほど隣接画素間の画角が広がる影響を無視すれば、この  $\Delta\alpha$  は撮像面上で約 53 ピクセル分に相当する。これに本来の輝点間隔も考慮して、 $TH_H = 70$  とした。また、シルエット下部の輝点から延びる探索窓の幅は、15 ピクセルとした。

#### 事故時の待機時間 $T_d$ , $T_f$

転倒または水没の状態になった場合には、その継続時間によって、溺水状態 (継続時間  $T_d$ ) および転倒状態 (継続時間  $T_f$ ) に遷移させる。本実験では、 $T_d = T_f = 10 \text{ 秒}$  とした。

### 4.3 アラーム精度に関する実験

まず、バスルーム事故 (溺水, 転倒) の発生に対するアラームの正しさを検証する。通報精度は、次の 2 種類のエラーの頻度を調べることによって行う。

- (1) 見過ごし：入浴者が溺水または転倒の状態にあるのに、警報を発しないまま監視を続けている。

- (2) 誤報：入浴者が安全に入浴している時に，溺水または転倒に状態遷移し，警報を発する．

被験者には，以下の3種類の演技をしてもらう．

- (1) 溺水シーン：浴槽内で呼吸停止に陥る演技（呼吸を意識的に止める）．
- (2) 転倒シーン：洗い場で転倒して苦しむ演技．
- (3) 安全入浴シーン：入浴時の通常の動作．

被験者にはそれぞれ，平均35分程度の入浴をしてもらい，この中で，溺水シーン5回，転倒シーン5回，安全入浴シーン10回，計20回の演技を行ってもらうよう指示した．演技時間は，溺水と転倒は30秒，安全入浴は1分とした．また，安全入浴シーンにはくつろぎ状態（身体を動かさず，呼吸だけを行う）を少なくとも1回は含むようにし，気を失う演技においても体の向きをいろいろ変えてもらうよう指示した．

この演技を10名（全員20代男性）に指示し，溺水50シーン，転倒50シーン，安全入浴100シーンを得た．なお，検証事項をアラーム精度に絞るために，この実験においては湯気を発生させないようにし，くもり判定の結果は常に“視認性良好”の状態を保つようにした．図4.2（p.56～60）は，実験中のいくつかのシーンに対する画像処理結果である．

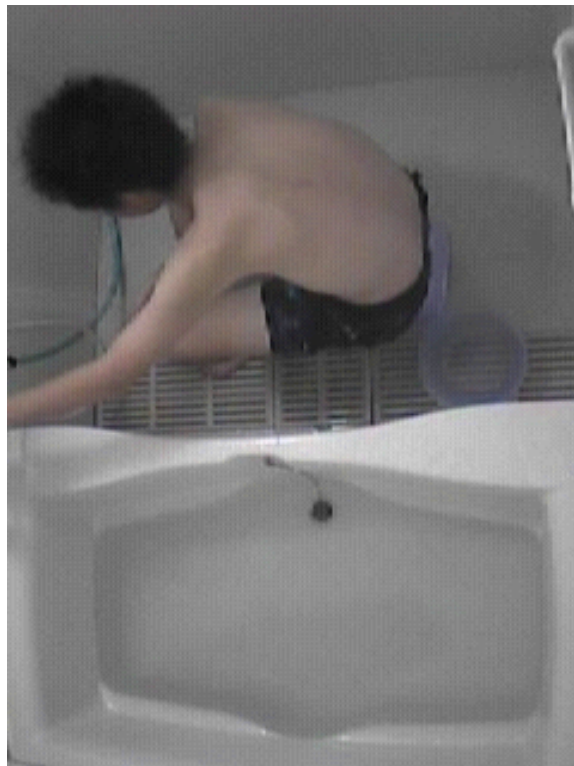
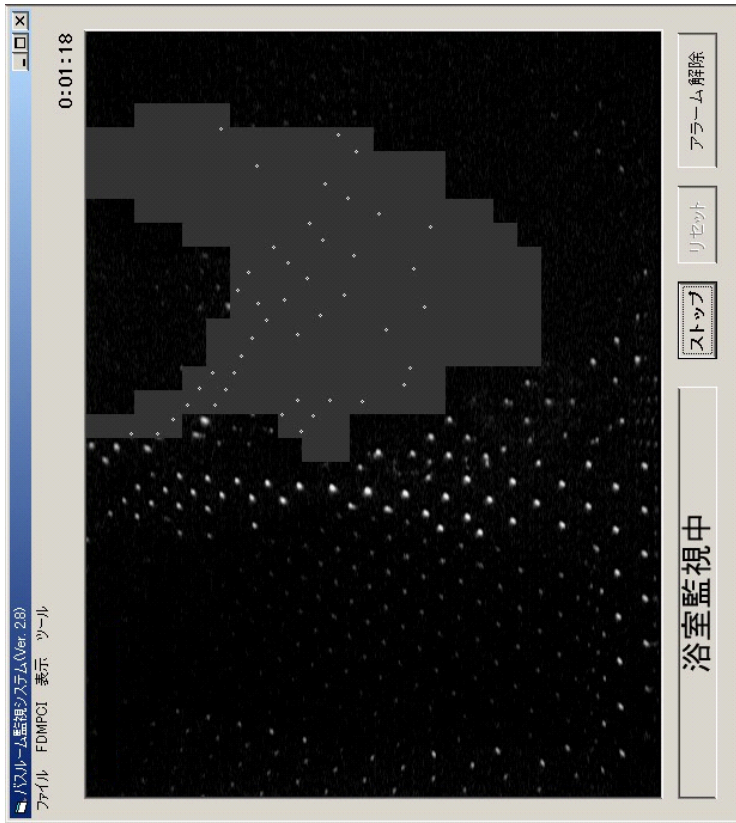


図 4.2 入浴シーン処理結果

Processing result from image sequence of bathing scene.

(a) 安全入浴中・洗い場で身体を洗っている場面である。人物のシルエットをグレーのベタ塗りで示している。白のドットは輝点を表す。フォーム右上にシーン取得開始からの経過時間を表示している。

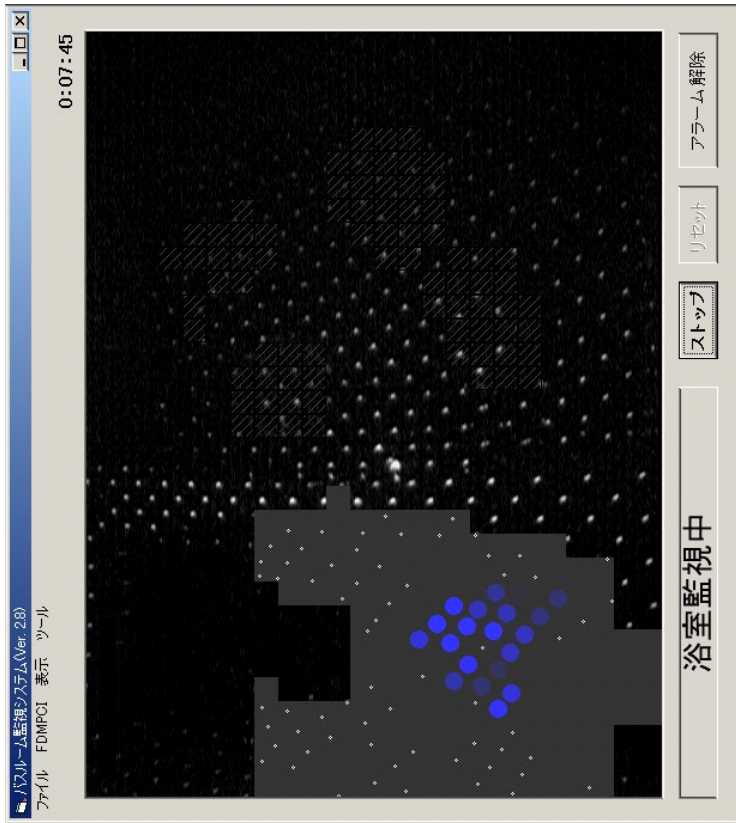


図 4.2 入浴シーン処理結果

Processing result from image sequence of bathing scene.

(b) 安全入浴中・浴槽で呼吸（吸気）をしている．グレーの斜線で示した領域は，正規化距離では非背景と判断されながらも回塊の面積によって人物シルエットからは除外された領域である．青いマーキングは，移動量が正である輝点があることを示し，色が濃いほど移動量の絶対値が大きいことを示す．



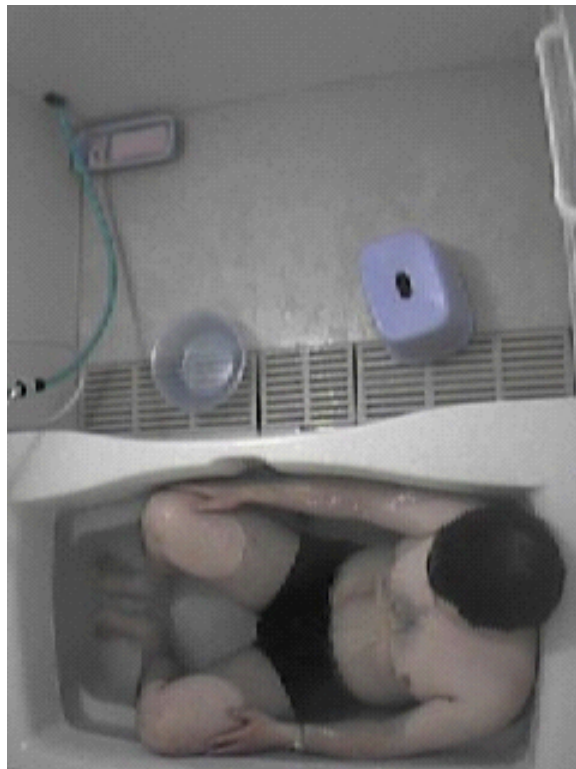
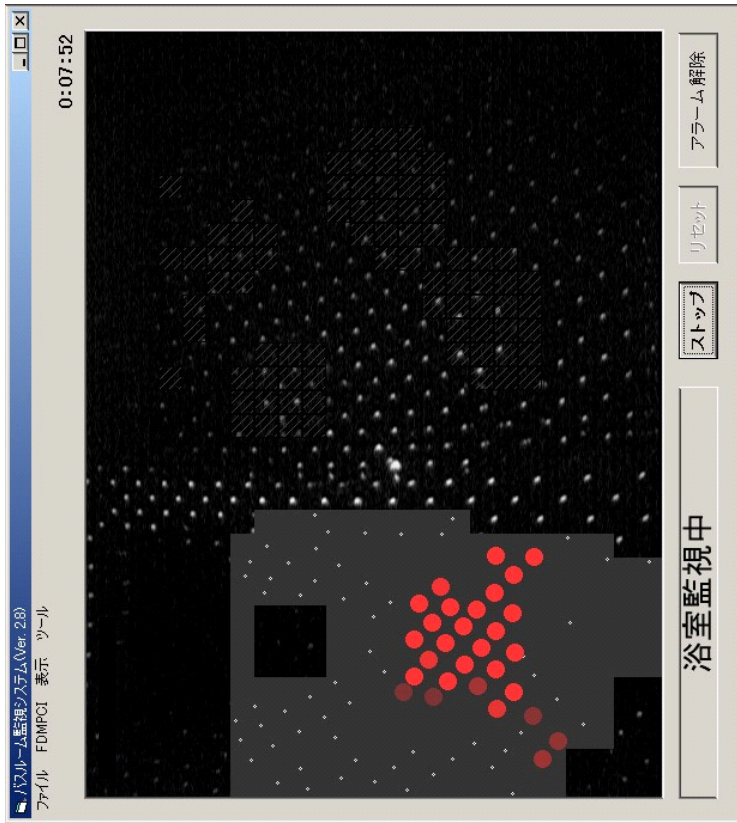


図 4.2 入浴シーン処理結果

Processing result from image sequence of bathing scene.

(c) 安全入浴中・浴槽で呼吸（呼吸）をしている．赤いマーカーは、移動量があることを示し、色が濃いほど移動量の絶対値が大きいことを示す．

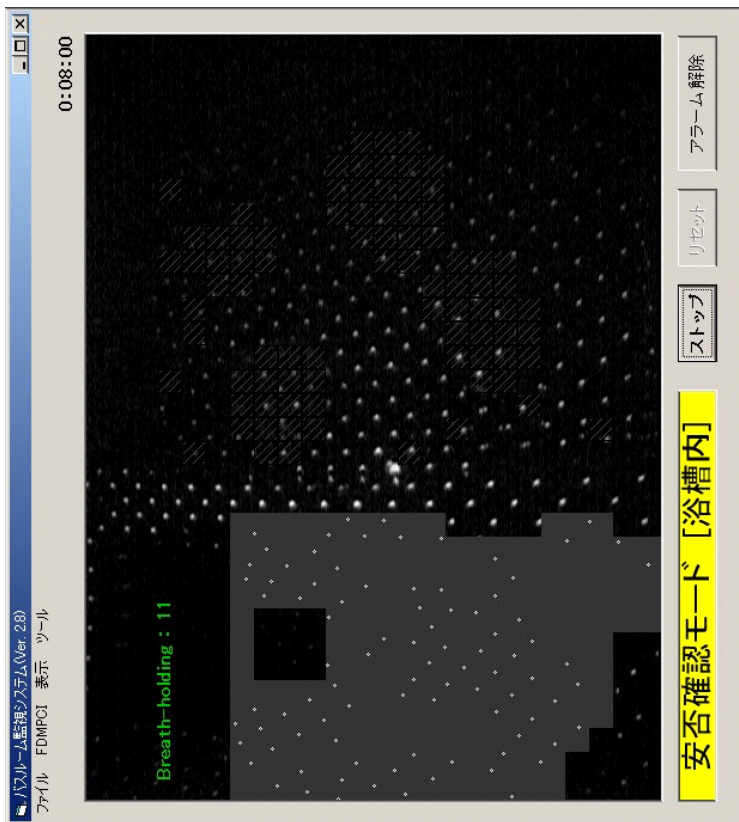
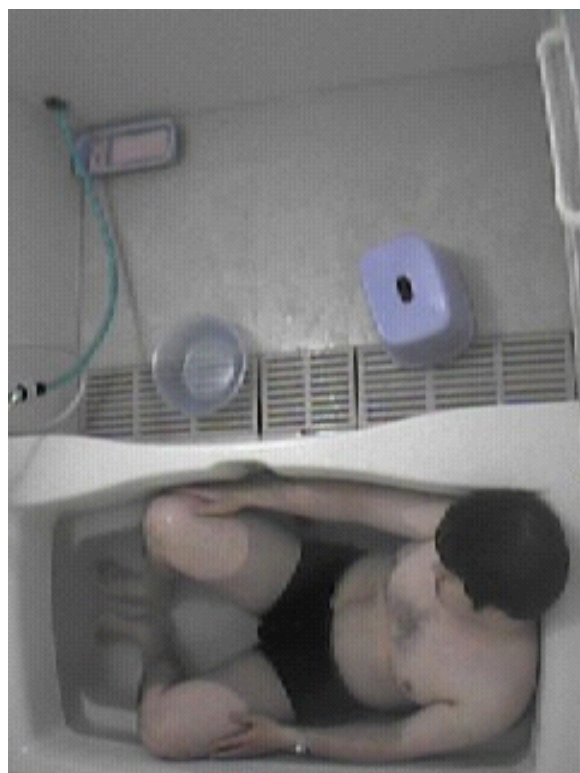


図 4.2 入浴シーン処理結果

Processing result from image sequence of bathing scene.

(d) 溺水を模したシーン．呼吸停止が継続し，システムがアラームを発したところ．実用を意識し，開発プログラムにおいては安否確認・外部通報の 2 段階にわけて通報するようにしている．輝点画像左上に，安全入浴から溺水に状態遷移するための条件  $P = \text{“W” AND } H < T_{HH}$  が継続している時間を表示している．

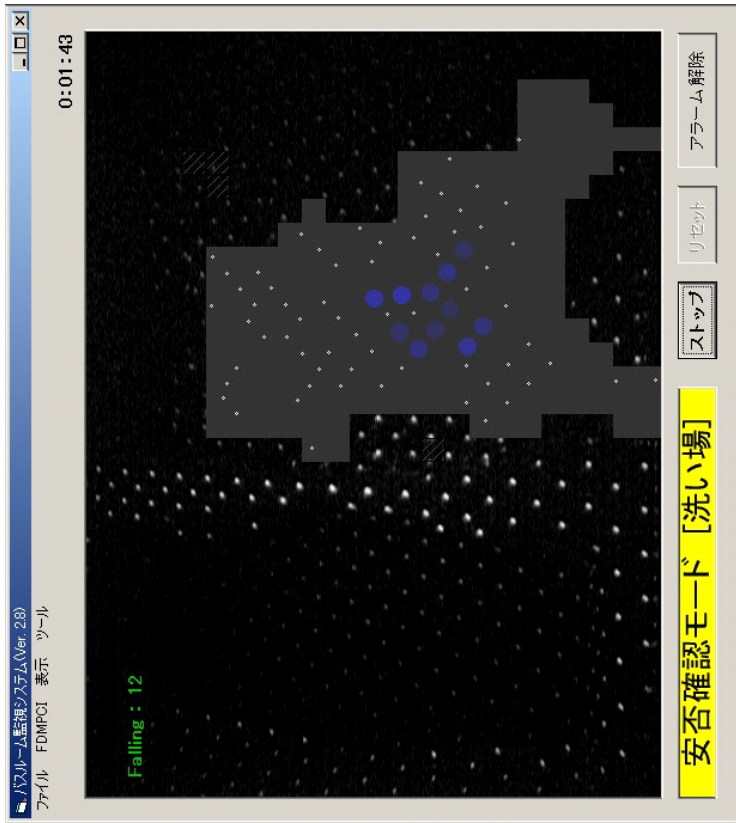
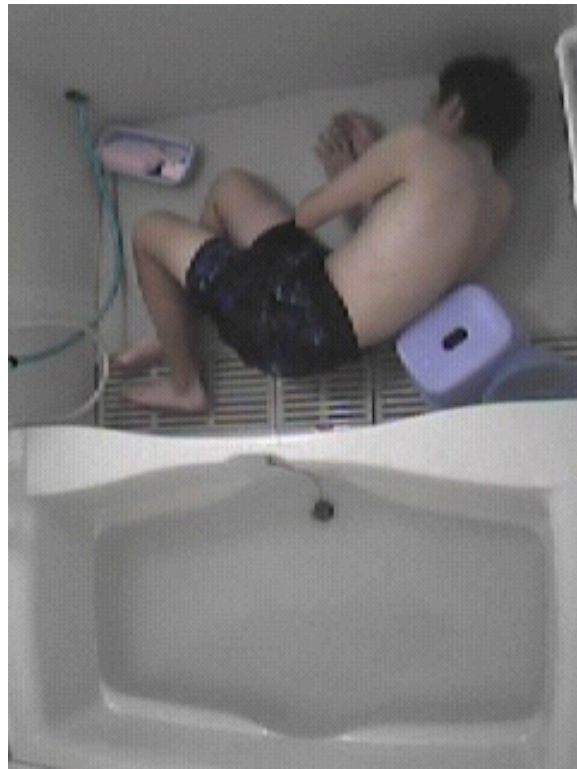


図 4.2 入浴シーン処理結果

Processing result from image sequence of bathing scene.

(e) 転倒を模したシーン、システムがアラームを発したところ、輝点画像左上に、安全入浴から転倒に状態遷移するための条件  $P = \text{“B” AND } M < TH_M \text{ AND } B < TH_B$  が継続している時間を表示している。シルエット内部に呼吸に参与していると思われる輝点群があるが、転倒の検知に呼吸情報は使用しない。



表 4.1 実験結果  
Experimental result.

	演技回数	見過ごし回数	誤報回数
溺水シーン	48 回	0 回	—
転倒シーン	49 回	0 回	—
安全入浴シーン	100 回	—	0 回

表 4.1 は、それぞれの演技に対する見過ごし、誤報の回数を示したものである。ここで、本実験における見過ごしと誤報の定義は次の通りである。

- (1) 見過ごし：溺水、転倒各シーン 30 秒の演技中、アラームが発生しない。
- (2) 誤報：安全入浴通常入浴中、1 回以上のアラームが発生する。

なお、被験者のコンディションにより 30 秒の演技が完了しなかったものが溺水シーンに 2 例、転倒シーンに 1 例生じたため、これらのシーンは除外した。危険シーンの見過ごしと安全入浴シーン中の誤報はこの実験の範囲では発生しなかった。

これらのエラー頻度については、アラームまでの待機時間を考慮に入れて 6.2.1 項 (p.88) にて改めて検討する。

#### 4.4 くもり判定処理の有効性に関する実験

次に、くもり判定処理の有効性を検証するため、以下のような実験を行った。

- (1) ユニットバス内で意図的に湯気を発生させ、しばらく放置する。
- (2) その後、湯気を少しずつ抜く。
- (3) 上記 (1)(2) の間、被験者は前節で述べた安全入浴と同様の行動をとる(くつろぎや呼吸停止の演技は行わない)。

図 4.3 は、上記入浴時の  $V$  の変化を表したものである。この図より、くもりのない場合とある場合の  $V$  の値が予備実験とほぼ同レベルとなっていることから、入浴行動を伴うシーンであっても、4.2 節 (p.53) で定めたしきい値  $TH_V = 17.5$  は適正であると考えられる。

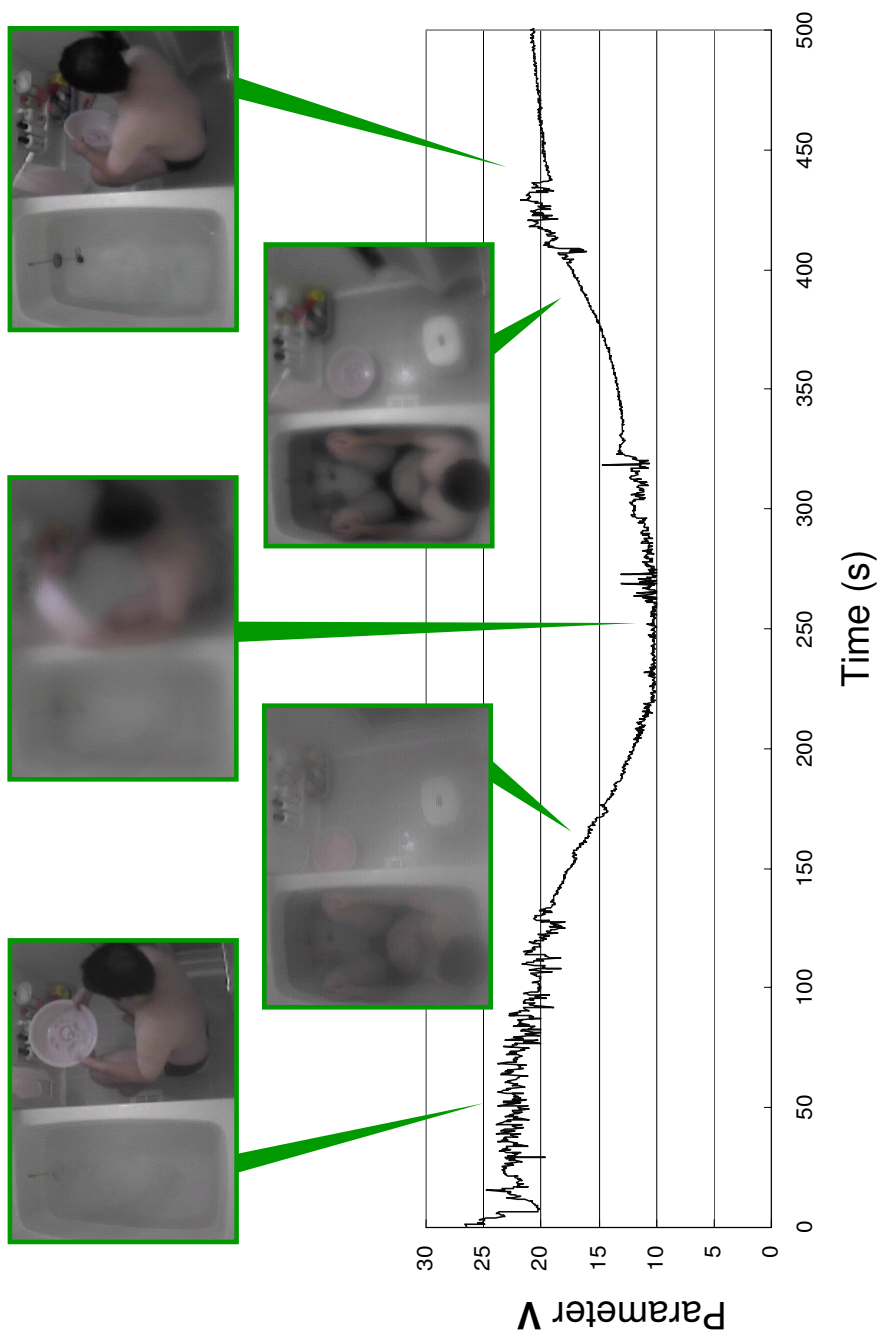


図 4.3 湯気が発生させたときの V の変化

Change of V against time when the experimental bathroom is filled with steam.

湯気は，床にシャワーで熱湯をふりかけることによって発生させた．この間換気扇は OFF にし，湯気がバスルーム内に留まるようにした．320s 頃からバスルームの扉を開けて換気扇も動作させることによって，湯気を抜いていった．

## 4.5 本章のまとめ

システムの有効性を検証するため，バスルームを模したシーンと，湯気を発生させたシーンに対して，監視アルゴリズムを適用した．実験の結果，溺水と転倒のシーンを模したシーンに対する見過ごしはなかった．また，安全に入浴するシーンに対して，誤報を発生することもなかった．

さらに，くもり判定の有効性を監視するため，湯気を発生させたシーンに本アルゴリズムを適用したところ，視認性パラメータ  $V$  の変化に予備実験と同様の傾向が見られることを確認した．

## 第5章

# FG 視覚センサ単独による 監視のための補足的提案

---

本章では、FG 視覚センサ単独での監視を想定し、輝点画像のみから呼吸情報を得る方法と、くつろぎ状態を積極的に取得する手法を提案する。そして、それぞれの提案手法を前章の実験において取得された画像シーケンスに適用した結果について述べる。

## 5.1 はじめに

これまで述べてきたシステムは、カラー画像と輝点画像の2種類の画像をソースとして情報を得るというものであった。これにより入浴者の溺水と転倒の両方が検知可能となっているのであるが、このような監視を FG 視覚センサ単独で実施しようとする、センサに要求される両者の計測範囲が著しく異なることが問題となる。

2.2.2 項 (p.22) で述べたように、FG 視覚センサによる距離計測の範囲と精度は基線長 (輝点投光器と受光器間距離) によって決まる。呼吸検出を実現するには、計測範囲を狭くして mm オーダーの微小な高さ変動を検出できるようにする必要がある。本システムにおける FG 視覚センサの計測精度は、床から 300 mm の高さにおいて 0.75 mm、計測範囲は 52 mm 以内となる (これらの導出に関しては、2.4 節, p.25 にて述べた)。このため、たとえ基準となる輝点画像を用意したとしても、上記計測範囲を超える高さ変動が生じた輝点からは、その高さ変動を取得することはできなくなる。人物の高さを判別するためには少なくとも数百 mm の計測範囲が必要であるため、呼吸検出用のセンサ配置で得られる輝点画像単独では転倒したか否かを判断することは困難である。同様の考察をすれば、人物の転倒を検知すべく基線長を短くして検出する高さ変動を数百 mm のオーダーに合わせると、今度は呼吸が計測できなくなることがわかる。

バスルーム事故の大半が浴槽内における溺死である (資料によりばらつきがあるが、およそ 8~9 割といわれている) ことを考慮すれば、機能が溺水検知に限定されても、より安価で簡便なシステムを開発することには意義があると考えられる。そこで本章では、FG 視覚センサによる輝点画像のみを用いて浴槽内における溺水を検知する手法を、これまでの開発システムに補足する形で提案する。

## 5.2 輝点画像のみから呼吸と体動を抽出する手法

### 5.2.1 概要

ここでは、溺水状態を検知するために、輝点画像のみから呼吸情報と体動情報を得る手法 [36, 37] について考える。

デュアル型センサによる手法では、カラー画像による人物シルエットに含まれる輝点を処理対象とした。呼吸状態や体動情報を抽出するためには、輝点画像のみからシルエット領域に代わる関心領域 (以下 ROI ; Region Of Interest) を決定する必要がある。まずその手法を提案し、次にその ROI から呼吸または体動に關与する輝点群を抽出する手法を提案する。

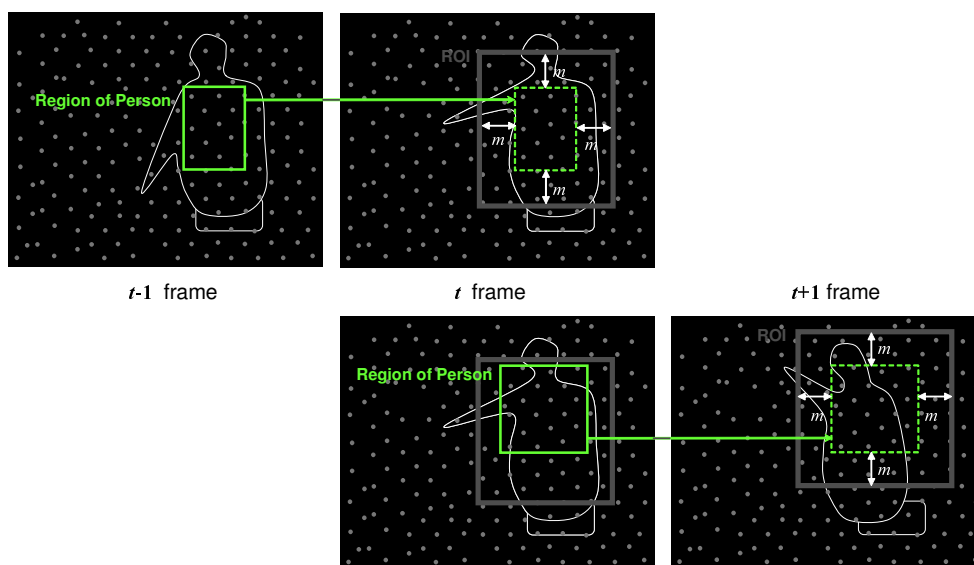


図 5.1 ROI の決定  
ROI construction.

図中の“Region of Person”は呼吸または体動情報を与える輝点群に外接する矩形領域であり、次フレームのROIをこの領域を四方に  $m$  ピクセルずつ拡大した領域とする。

## 5.2.2 手法

### ROI の決定

ROI を決定することは、人物が存在するおおよその位置を特定することに等しい。画像取得間隔を前と同じ 0.25 秒/frame にすれば、バスルームにおける人物のフレーム間移動はさほど小さくなく、かつ連続的であると考えられる。このことを考慮し、次の手順で処理を行う（図 5.1）。

- (1) 前フレームの処理結果から決定する ROI 内の輝点群に対して、呼吸または体動情報を与える輝点群を抽出するための画像処理を施す。
- (2) (1) で抽出された輝点群に外接する矩形（図 5.1 において“Region of Person”と記した領域）を上下左右に一定画素（この量を  $m$  とする）だけ拡大した領域を次フレームにおける ROI とする。
- (3) (1) で輝点群が抽出できない場合は、現フレームの ROI を同様に拡大した領域を次フレームにおける ROI とする。
- (4) 監視開始直後初めのフレームの ROI は画像全体とする。

## 呼吸に關与する輝点群の抽出

前フレームの処理結果から決まる ROI 内の輝点群に対して、デュアル型センサ手法と同様の輝点抽出 (3.5 節, p.43) を行い、輝点座標を算出する。次に、やはりデュアル型センサ手法と同様に前フレームにおける輝点座標と比較 (3.6 節, p.44) するのであるが、ここでは以下の点を変更する。

- (1) 探索窓を用いて結果輝点が探索できた場合には、その輝点に有効フラグをつける。このとき、基線方向の移動  $dy$  だけでなく、直交する方向の移動  $dx$  も記録する。
- (2) (1) のうち、 $dy$  が微小なものはノイズ成分による移動と見なし、この輝点に不動フラグをつける。
- (3) 探索に失敗した場合には、この輝点に無効フラグをつける。

以上の処理により、ROI 内の輝点が有効、不動、無効の 3 種類に分類される。

次に、有効フラグがついた輝点群に注目して、呼吸情報の取得を試みる。人物の腹部や胸部に乗って上下動を繰り返す輝点群は、自身の座標とフレーム間の移動量が互いに似通ったものになることが予想される。そこで、輝点の重心  $(x, y)$  および前フレームからの移動  $(dx, dy)$  を用いて、輝点どうしの特徴距離  $D_{ij}$  ( $i, j$  は輝点を表すインデックス) を次式により定義し、距離統合法によりクラスタリングを行う (図 5.2)。

$$D_{ij} = \{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2\}^{\frac{1}{2}} + K_{dx}|dx_j - dx_i| + K_{dy}|dy_j - dy_i| + W \quad (5.1)$$

ただし、

$$W = \begin{cases} \infty & (dy_1 dy_2 < 0) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

ここで、 $K_{dx}$ 、 $K_{dy}$  は輝点移動の成分ごとに重みを設定するための係数であり、予備実験により適切に定めるものとする。輝点の距離変化は、画像上では FG 視覚センサの基線に沿う方向の移動となって現れるので、輝点移動の基線方向成分の類似性を強調することによって、水の揺らぎ等の外乱要因を抑えることができる。また、 $W$  は  $dy$  の正負が異なる輝点どうしが統合されないようにするための成分である。

上記の方法で得られたクラスタのうち、構成輝点数が最大となるものに属する輝点群を呼吸に關与する輝点群とする。このとき、有効なクラスタとみなす最小構成輝点数 (この数を  $N_b$  とする) を定めておき、この数以上の輝点からなるクラスタがない場合、呼吸情報なしと判断し、体動情報の取得を試みる。



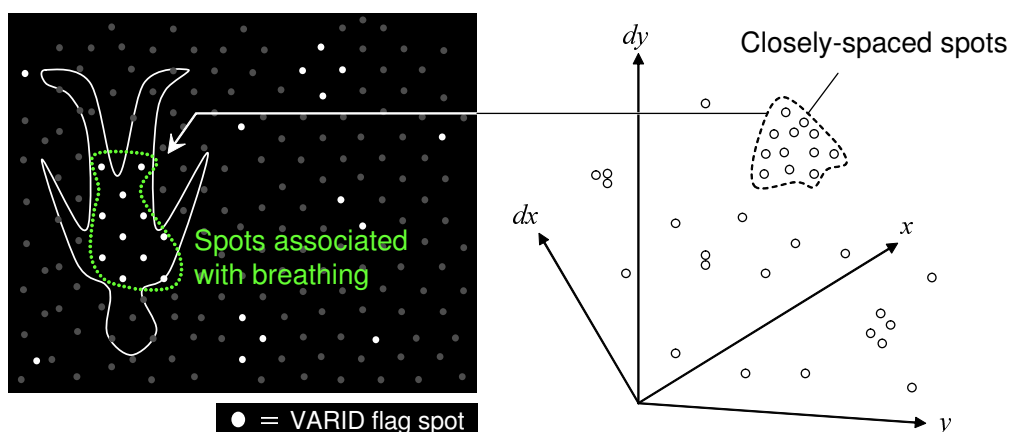


図 5.2 クラスタリングのイメージ  
Image of the clustering method.

本項で述べているクラスタリング処理は、 $x, y, dx, dy$  を軸とする 4 次元空間上に有効フラグのついた輝点群をプロットし、互いに密集している輝点群を探すというイメージである。そして、これらの輝点群を元の輝点画像に戻したとき、呼吸に関与する輝点群が形成されることが考えられる。

#### 体動に関与する輝点群の抽出

体動情報の取得に際しては、無効フラグのついた輝点群に注目する。無効フラグの輝点は、対応輝点探索処理に失敗したものであり、具体的な高さ変動は不明であっても、呼吸よりもはるかに大きな移動を経たと予想される。

そこで、有効な呼吸情報が得られなかった場合には、無効フラグのついた輝点群を対象に前節同様のクラスタリングを行い、体動に関与する輝点群の抽出を行う。ただし、無効フラグの輝点は  $dx, dy$  の情報を持たないため、輝点どうしの特徴距離として両者の重心座標のユークリッド距離を用いる。

呼吸情報の場合と同様、有効なクラスタとみなす最小構成輝点数（この数を  $N_m$  とする）を定めておき、この数以上の輝点からなるクラスタがない場合、体動情報もなしと判断し、処理を終了する。

#### 危険の検知

以上の処理を経て、呼吸情報も体動情報も得られない状態が一定時間 ( $T'_d$  秒とする) 続いた場合に警報を発するようにすればよい。

表 5.1 追加設定パラメータ  
Additional parameters.

ROI の拡大幅 $m$	上下左右とも 40 ピクセル
不動フラグをつける条件	$dy < 0.03$ ピクセル
距離係数	$K_{dx} = 250, K_{dy} = 50$
同クラスと見なす特徴距離の条件	$D_{ij} \leq 150$
最小構成輝点数	$N_b = 8, N_m = 4$
アラームまでの待機時間 $T'_d$	10 秒

表 5.2 実験結果 (FG 視覚センサ単独手法)  
Experimental result (Watching method using FG sensor solely).

	演技回数	見過ごし回数	誤報回数
溺水シーン	48 回	0 回	—
安全入浴シーン	100 回	—	2 回

### 5.2.3 実験結果と検討

この提案手法の有効性を検証するため、前章で述べた実験で得られた輝点画像（溺水 48 シーン，安全入浴 100 シーン）に対して，本手法を適用し，見過ごしと誤報の回数を調べた．センサの光学配置や画像処理環境はこれまでと同じである．本手法の適用に際して新たに設定が必要なパラメータは，表 5.1 に示すとおりとした．

表 5.2 は，溺水演技に対する見過ごしと，安全入浴時の誤報の回数を示したものである．本実験における見過ごしと誤報の定義は前章で述べた実験と同様である．

デュアル型センサ手法の時と比較すると，誤報が発生した．処理の様子を目視で観察したところ，クラスタリングの失敗によって人物領域が抽出できないままのシーンが原因となっていることがわかった．デュアル型センサ手法による実験結果同様，待機時間の長さを考慮に入れた性能評価に関しては 6.2.2 項 (p.91) で述べる．

## 5.3 くつろぎ状態を積極的に検知する手法

### 5.3.1 概要

デュアル型センサ手法においては、AAOMの振幅に注目し、くつろぎ状態と呼吸停止状態を区別した。これは、シルエットを併用することで人物の身体表面に存在する輝点群をほぼ明確に選択できていたからである。

一方、前節で述べたクラスタリング手法による監視においては、予め定めた個数以上の呼吸フラグ輝点からなるクラスタが存在するか否かで呼吸の有無を判断した。この手法は、呼吸を反映する輝点を直接扱うため、呼吸の開始に対する反応が早いという利点があるものの、息を吸いきった時のフレームと吐ききった時のフレームでは、身体表面の動きがほぼゼロとなるため、呼吸情報を反映する輝点群が十分な個数抽出できない。

図5.3は、浴槽で安静に呼吸しているシーンの輝点画像にこの手法を適用して得た呼吸クラスタ構成輝点数の変化である。この図に示したように、呼吸に合わせて値が非常に小さくなる瞬間がほぼ必ずある。アラームまでの待機時間を前節と同じ10秒、有効クラスタと見なす最小構成輝点数をやはり同様に  $N_b = 8$  とした場合、図5.3のシーン中は誤報が発生しないことがわかるが、これらのパラメータの組み合わせがロバストなものかどうかは疑問である。

そこで、図3.10 (p.46) に示したように、くつろぎ時に現れるAAOMの周期性に注目し、くつろぎ状態を“積極的に”検知する手法を提案する。

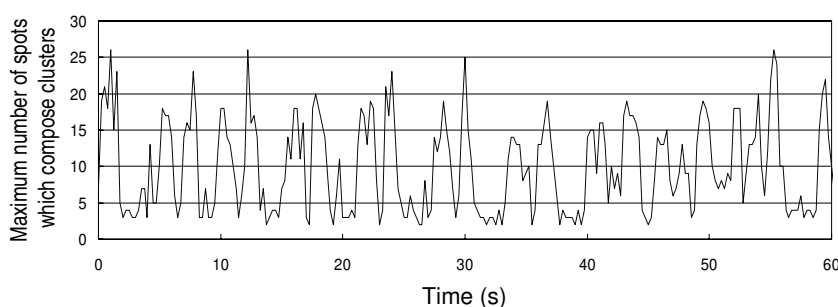


図 5.3 クラスタ構成輝点数の最大値

Maximum number of spots which compose clusters.

この図は、呼吸フラグのついた輝点に対してクラスタリングを行い、各クラスタの構成輝点数の中の最大値の変化を示している。前節の手法においてはこの数値が  $N_b = 8$  以上の場合に“呼吸あり”と判断される。

### 5.3.2 手法

以下の処理は、輝点画像に対する処理によって得られた AAOM の時間変化データに対して行われる。

まず、現フレームを終端とする  $N$  フレーム分の AAOM データ列（サンプリング間隔は画像取得間隔と同じ 0.25 秒/frame）を  $x[i]$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ;  $N$  は 2 のべき乗とする) とし、これを離散フーリエ変換することによって得られるパワースペクトル  $Po[k]$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) を求める。次に、直流成分を除く周波数成分を確率分布と見なし、式 (5.2) で表される関数  $p(\ell)$  ( $\ell = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}-1$ ) を定義し、 $p(\ell)$  のエントロピー  $E$ <sup>\*1</sup> を式 (5.3) により求める。

$$p(\ell) = Po(\ell) / \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} Po(k) \quad (5.2)$$

$$E = - \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} p(k) \log p(k) \quad (5.3)$$

呼吸波形が周期的であるほど、周波数分布がある周波数成分に集中するため、 $E$  は小さな値になると考えられる。体動情報がなく、かつ  $E$  の値があるレベルを下回った場合には、くつろぎが存在すると判断できる。

### 5.3.3 実験結果と検討

この手法の有効性を検証するため、ユニットバスを用いた実験を行った。被験者には、浴室における一般的な動作（洗い場で身体を洗い、浴槽で湯に浸かって出る）を 10 分前後行い、その中に少なくとも 3 分間のくつろぎ状態（浴槽内で身体を動かさず呼吸のみを行う）を模した演技を含めるよう指示した。この一連の入浴動作からなるシーンを互いに異なる 6 名の被験者（全員 20 代男性）から 1 シーンずつ得た。また、画像処理的な条件は表 5.1 のとおりとした。

図 5.4 (p.71 ~ 76) は、それぞれのシーンにおける呼吸波形とエントロピーの変化を、くつろぎ状態に入った時刻を 0 秒とした時間軸上にプロットしたものである。エントロピーの算出に関しては、 $N=128$  とし、算出された値を  $E$  の理論上の最大値  $E_{max} = -\log \frac{1}{63}$  で除した相対値  $E/E_{max}$  で表した。

<sup>\*1</sup> 情報理論におけるエントロピーは通常、記号  $H$  で表されるが、高さパラメータ  $H$  との混同を避けるため、 $E$  とした。

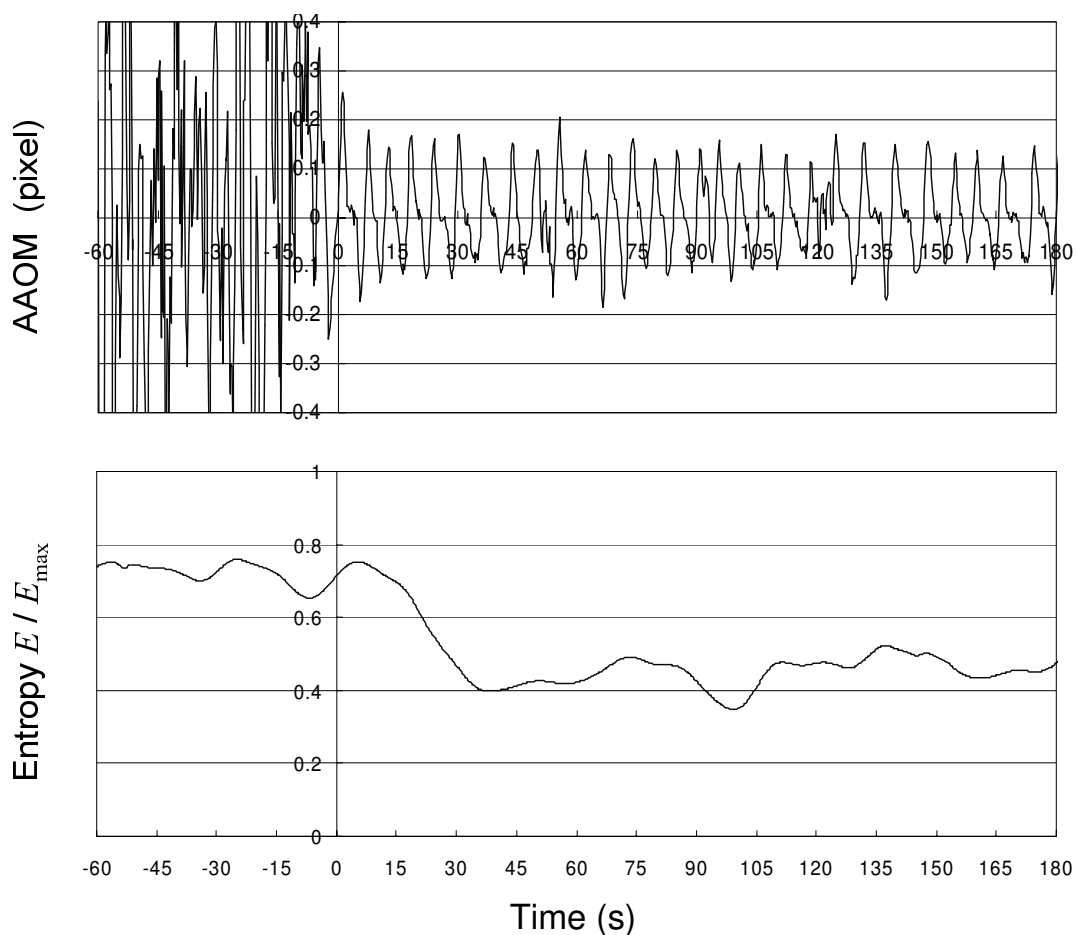


図 5.4 AAOM とエントロピーの変化  
Change of AAOM and entropy.

(a) 被験者 A の結果 . 上段は AAOM の変化 , 下段はエントロピーの変化である .

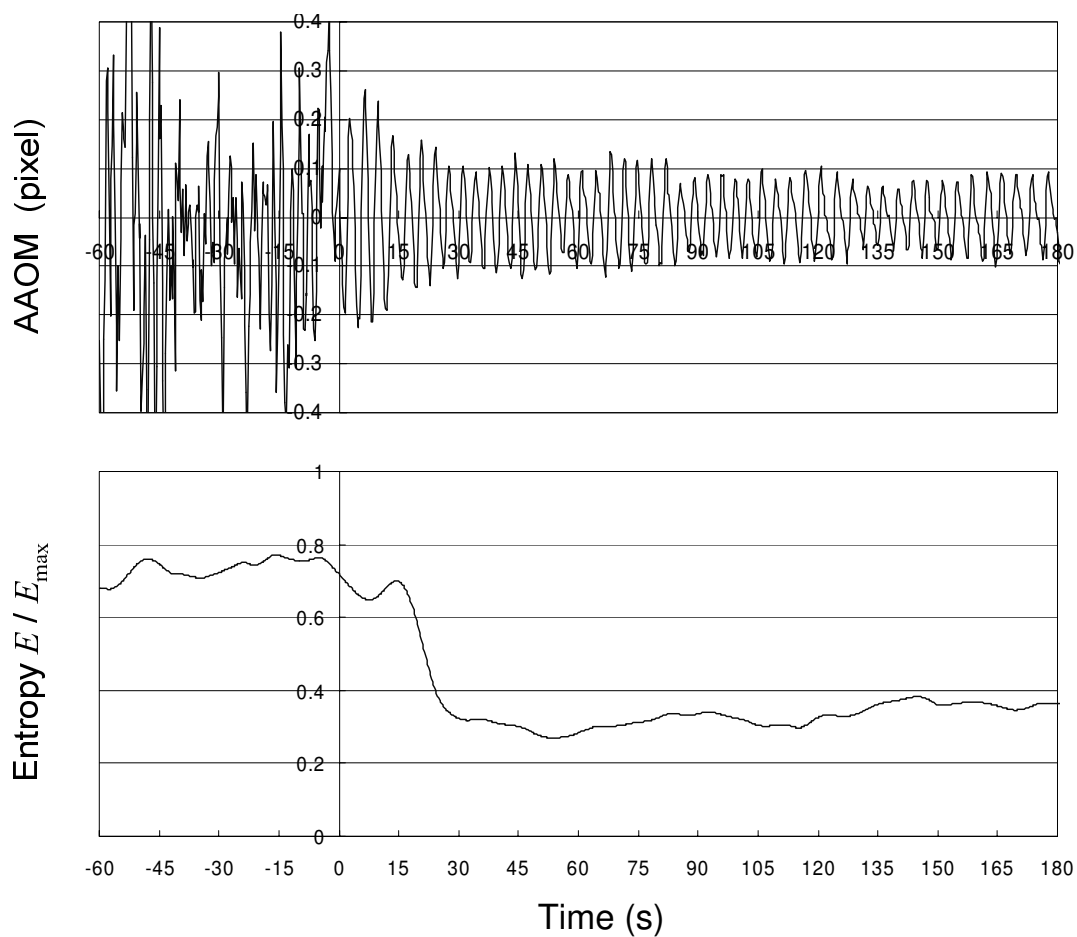


図 5.4 AAOM とエントロピーの変化  
Change of AAOM and entropy.

(b) 被験者 B の結果 .



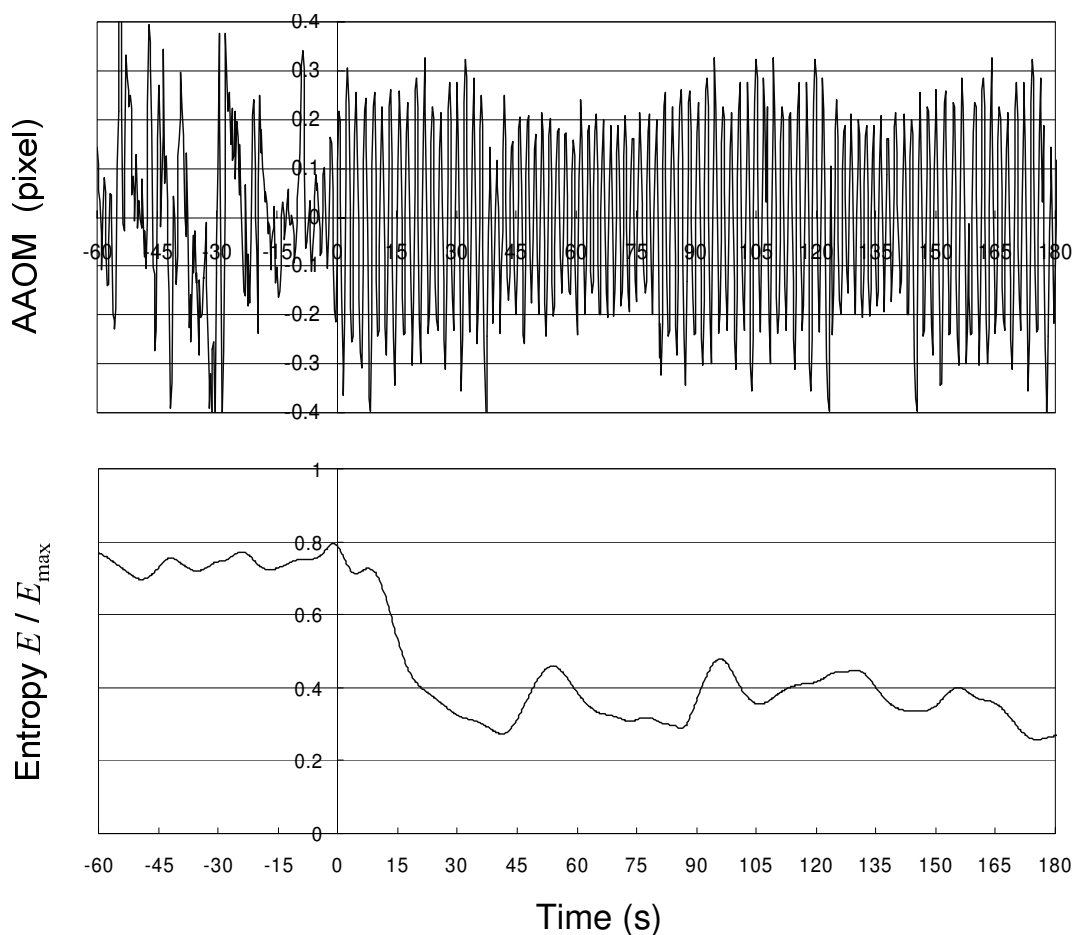


図 5.4 AAOM とエントロピーの変化  
Change of AAOM and entropy.

(c) 被験者 C の結果 .

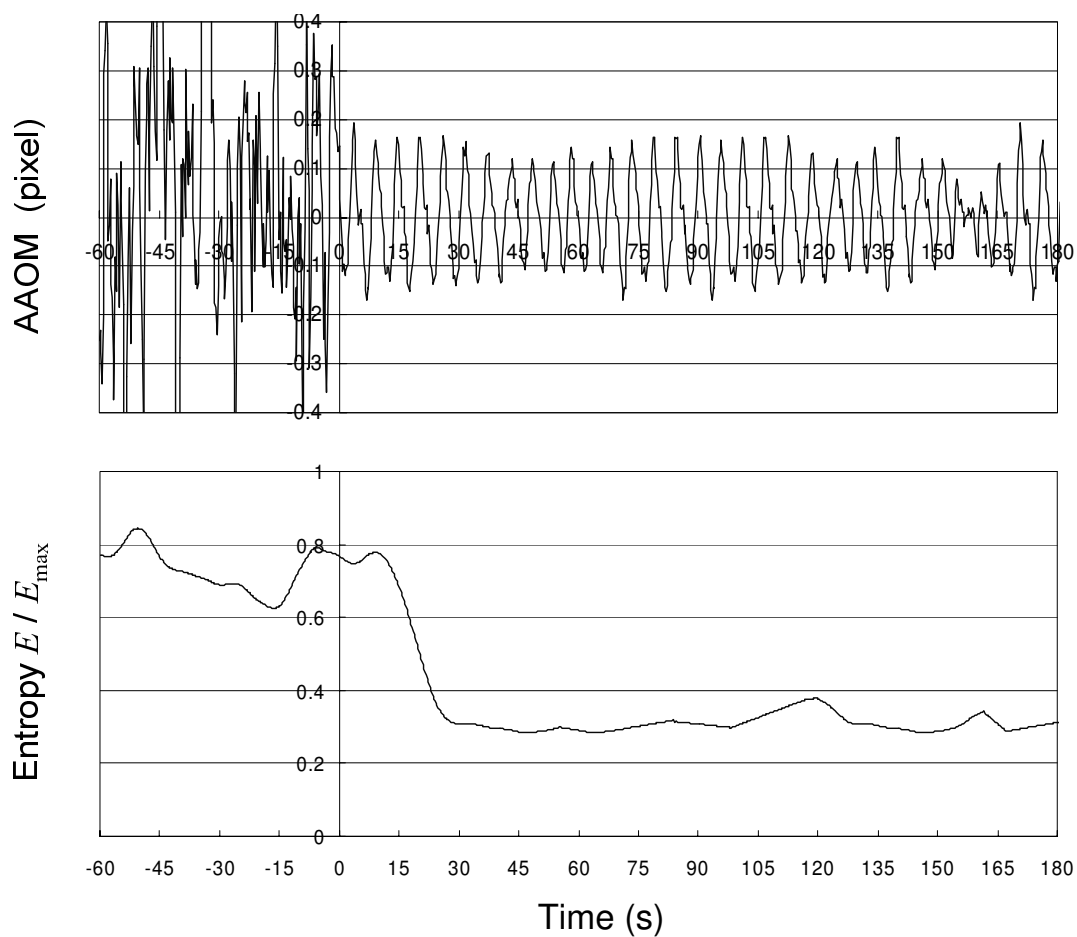


図 5.4 AAOM とエントロピーの変化  
Change of AAOM and entropy.

(d) 被験者 D の結果 .

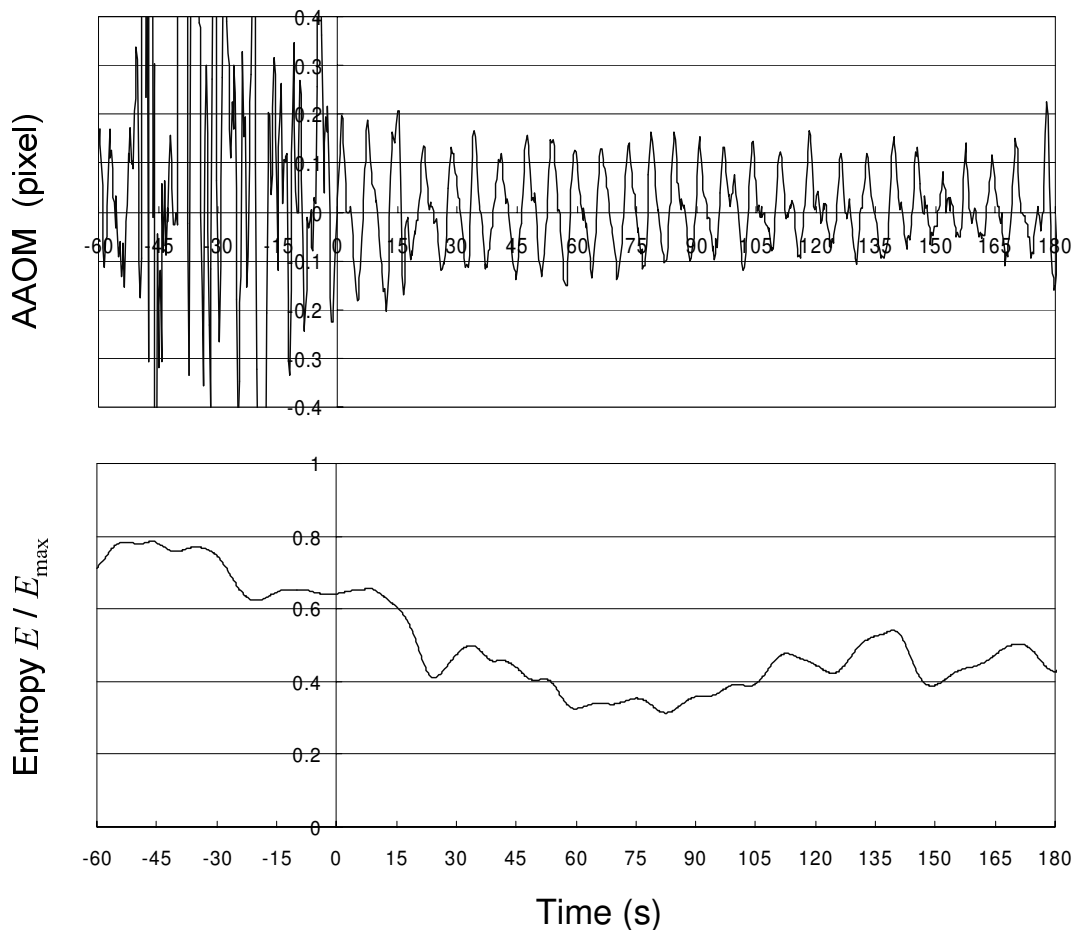


図 5.4 AAOM とエントロピーの変化  
Change of AAOM and entropy.

(e) 被験者 E の結果 .

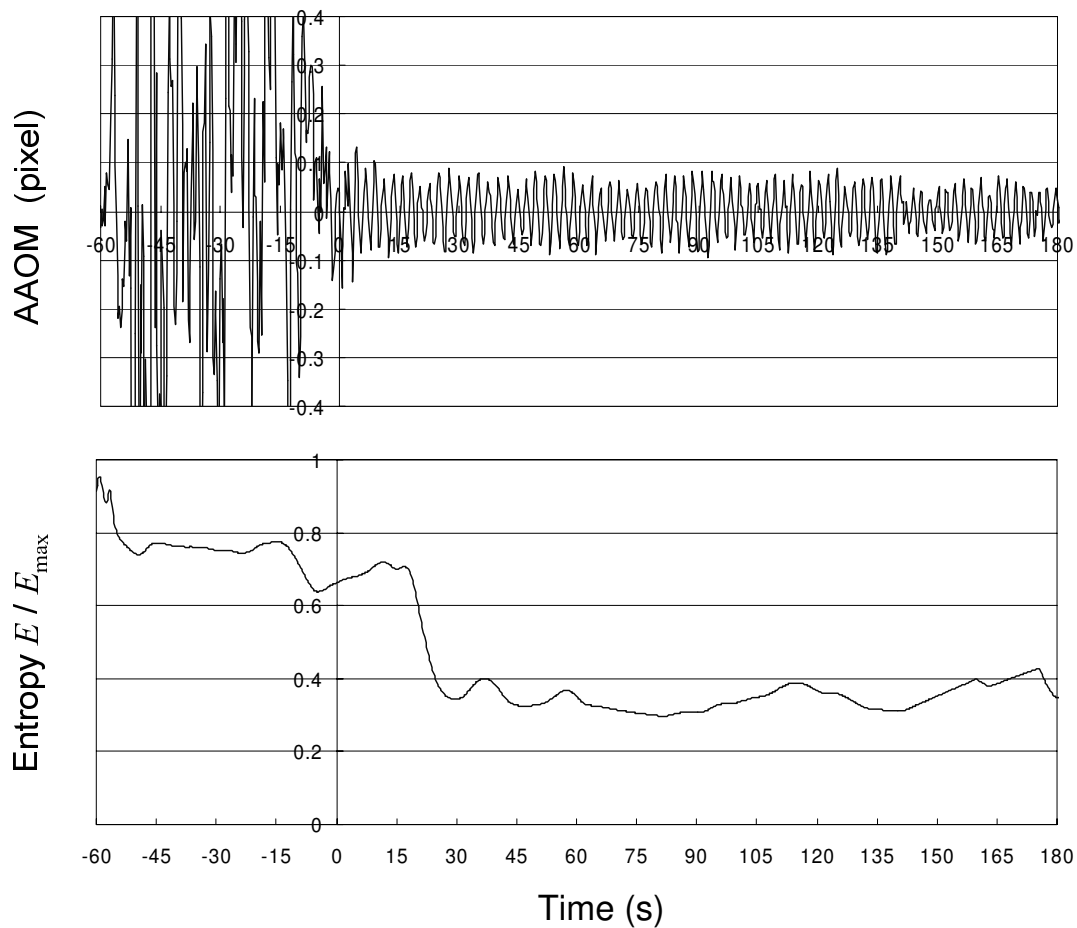


図 5.4 AAOM とエントロピーの変化  
Change of AAOM and entropy.

(f) 被験者 F の結果 .

表 5.3 しきい値にできるエントロピー相対値  $E/E_{max}$  の範囲  
Appropriate threshold of  $E/E_{max}$ .

	くつろぎ開始前の最小値	くつろぎ開始後の最大値
被験者 A	0.653	~ 0.523
被験者 B	0.677	~ 0.401
被験者 C	0.697	~ 0.478
被験者 D	0.625	~ 0.387
被験者 E	0.623	~ 0.540
被験者 F	0.638	~ 0.459
AND 範囲	0.623	~ 0.540

表 5.4 くつろぎ状態の検知に要する時間  
Time for detecting relaxing state.

	所要時間 (s)
被験者 A	22.5
被験者 B	19.8
被験者 C	13.8
被験者 D	18.0
被験者 E	17.0
被験者 F	21.0

図 5.4 に示すように、被験者の呼吸の傾向（周期や振幅）が互いに異なっているにもかかわらず、くつろぎ状態に入った後はどの被験者においてもエントロピー相対値が同じようなカーブを描いて減少していくことが確認できる。また、周期的な呼吸が続いている間は、エントロピーも低い値を維持することもわかる。この結果をもとに、くつろぎ状態か否かを判定するための  $E/E_{max}$  に対するしきい値の決定を試みる。図 5.4 に示した各結果に対して、くつろぎ状態に入る前のエントロピーの最小値と、くつろぎ状態に入った後のエントロピーの最大値を調べると、表 5.3 のようになった（ただし、フーリエ変換の対象となる信号列が周期的な呼吸波形を完全にカバーするまでにかかる時間を考慮し、くつろぎ状態に入った後の時間帯に関して、最初の 32 秒間を対象外としている）。この結果から、 $E/E_{max}$  に対してしきい値を設けることが十分可能であると考えられる。仮にしきい値を 0.582（表 5.3 に示した AND 範囲の中間）とした場合のくつろぎ状態検知の所要時間は最大で約 23 秒であり（表 5.4）、事故発生時の迅速な通報を妨げるものではないと考えられる。

次に、呼吸停止の状態におけるエントロピー値の変化を調べた。前章および前節の実験用に得た溺水シーン画像シーケンスのうち、3人の被験者G、H、Iのデータに対してエントロピー相対値  $E/E_{max}$  を求めた。いずれのデータも、5回の呼吸停止シーンが連続して含まれており、シーンとシーンの間は体動またはくつろぎ状態が行われている。図5.5 (p.80~82) は、呼吸波形とエントロピーの変化を時間軸上にプロットしたものである。これらの結果より、エントロピーはAAOMの振幅とは関係なく、くつろぎ状態となってAAOMが周期的な変化をするようになった場合にのみ低下することがわかる。これは呼吸停止状態になってAAOM波形がノイズ成分のみとなり、あらゆる周波数成分を等確率で含むようになったためと考えられる。この傾向は、他の被験者のデータにおいても同様に見られた。



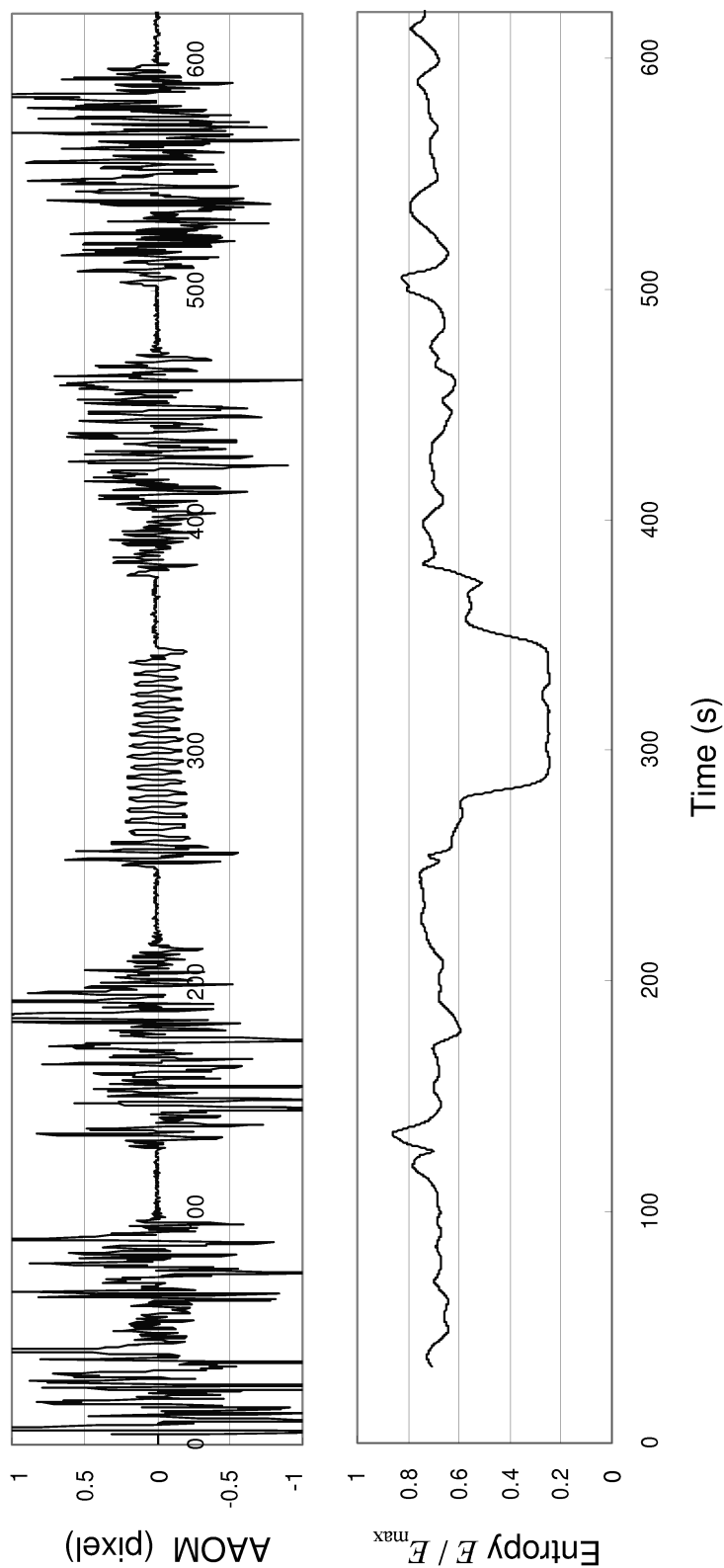


図 5.5 AAOM とエントロピーの変化 (溺水シーン)  
Change of AAOM and entropy. (drowning scene)

(a) 被験者 G の結果．呼吸停止の 2 回目と 3 回目の間に行われたくつろぎ動作の時間帯のみ，エントロピー相対値が低下している．AAOM の振幅が大きく周期性のない時間帯は，浴槽から出て身体を動かさず動作が行われていた．なお，開始から 128 フレーム (32 秒) 以内のエントロピー値は表示していない．

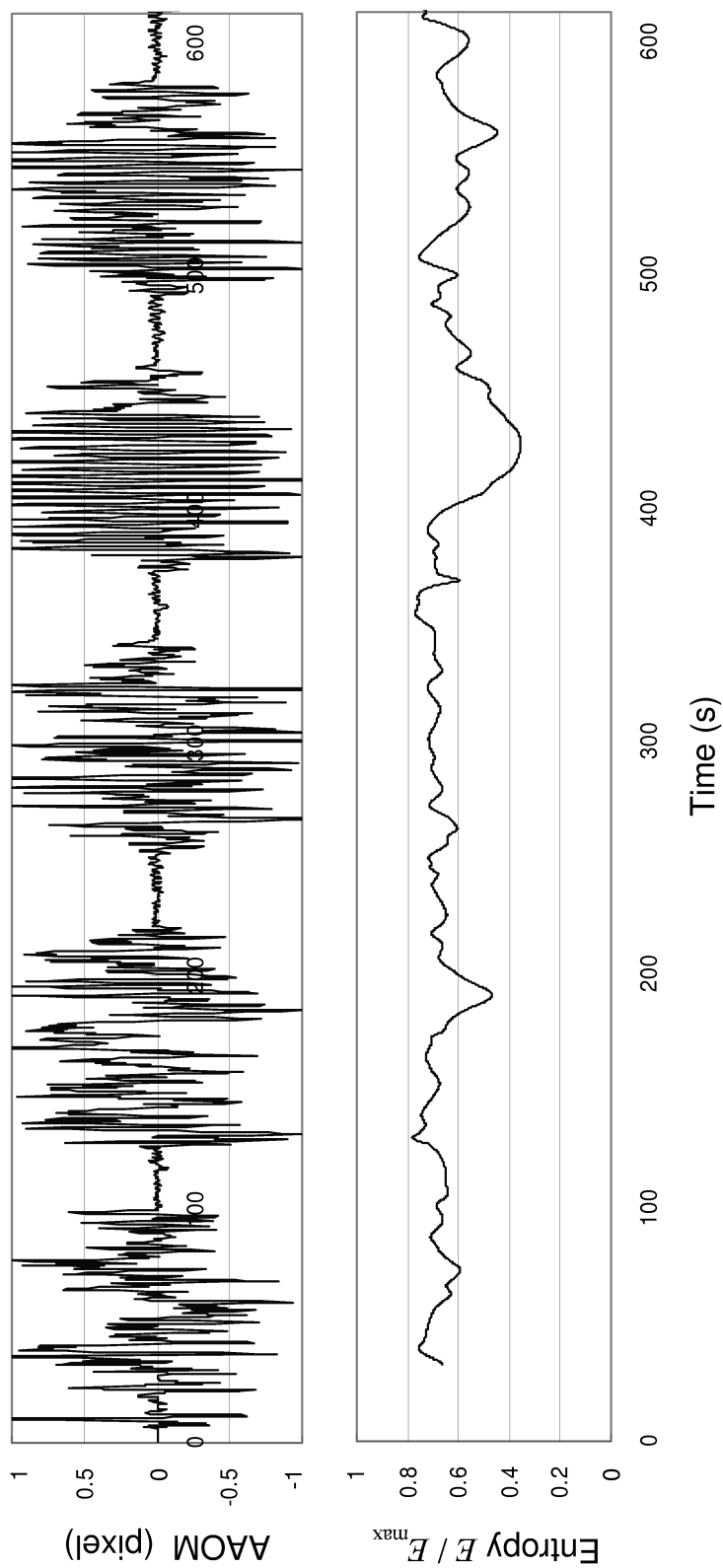


図 5.5 AAOM とエントロピーの変化 (溺水シーン)  
Change of AAOM and entropy. (drowning scene)

(b) 被験者 H の結果．呼吸停止の 3 回目と 4 回目の間に行われたくつろぎ動作の時間帯のみ，エントロピー相対値が低下している．

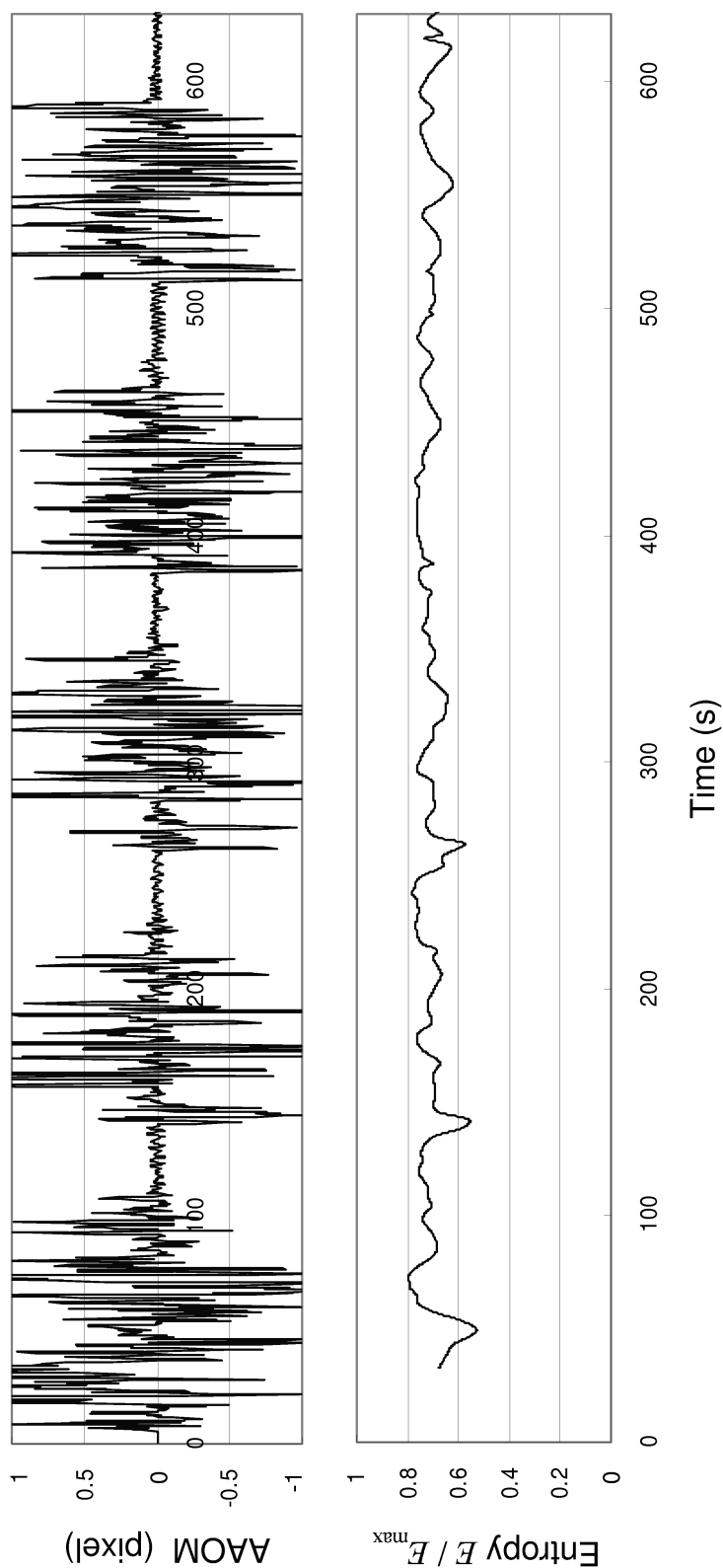


図 5.5 AAOM とエントロピーの変化 (溺水シーン)  
Change of AAOM and entropy. (drowning scene)

(c) 被験者 I の結果．この被験者は呼吸停止の間にくつろぎの動作を一度も行わなかった．全時間帯において，エントロピー相対値が低下する様子は見られなかった．

## 5.4 本章のまとめ

本章では、輝点画像のみを用いて、浴槽内における溺水状態を検知する手法について述べた。まず、輝点画像を用いて呼吸と体動を検知するために、呼吸あるいは体動に寄与している輝点群を輝点画像中から抽出する手法について述べた。前章で述べた実験で得られた輝点画像シーケンスに本手法を適用してエラー率を調べたところ、見過ごしが 0 %、誤報がおよそ 2 % という結果が得られた。

次に、くつろぎ状態を積極的に検知するために、AAOM の周期性に注目し、周波数スペクトルのエントロピーを考慮に入れた評価関数を導入した。これについても同様に輝点画像シーケンスに適用したところ、どの被験者においても、くつろぎ状態に入ったあとの関数値が一様に低下することがわかった。また、呼吸停止シーンを含むシーケンスに適用したところ、関数値の低下は入浴者がくつろぎ状態にあるときに限られることもわかった。

## 第6章

# 総括的検討

---

本研究では、従来のFG視覚センサにカラー撮像素子を組み込んだデュアル撮像素子型FG視覚センサを提案し、このセンサを用いて入浴者の溺水と転倒を検知するバスルーム監視システムを開発した。そして、入浴実験の結果、本手法の原理的有効性が示唆された。以下においては、本システムの実用化へ向け、開発システムに関して全体的に検討を加える。

## 6.1 輝点間における移動量のばらつきについて

2.2.2 隣接フレームの輝点分布を用いる手法 (p.22) で述べたように、撮像面上における輝点移動量  $\delta$  とそれを引き起こす距離変動  $\Delta Z$  は、式 (2.11) (p.23) に示すとおり、比例関係にある。ただし、この式には移動前輝点の距離  $z_0$  を含んでいるため、輝点間での  $z_0$  のばらつきが輝点移動量に影響を与える。そこで、本システムにおいてこの影響がいかほどかを考える。

これまで FG 視覚センサの距離計測に関する議論においては、受光器のレンズ光軸と FG に入射するレーザが平行であるとした。しかしながら、呼吸検出を可能とするために基線長を長くとらねばならないことから、投光器と受光器をバスルームの天井両隅に設置せざるを得ない (シルエットの高さ取得 (p.47) においても受光器が室内を斜めに見込んでいることを用いている)。レンズ光軸とレーザが平行でない場合、撮像面上の輝点移動は基線方向以外の成分を持つようになり、基線方向成分にも影響が生じる。したがって、 $z_0$  のばらつきを議論する前に斜め光軸の影響について考える。図 6.1(a) は、レンズ光軸とレーザが平行な場合であり、 $Z = z_0$  において  $\Delta Z$  の距離変動が生じたとき、回折角  $\alpha$  のビームが進む光路を図示している。このときには当然式 (2.11) (p.23) が成立している。

ここで、光軸を  $\phi$  だけ傾けたカメラ座標系で輝点移動  $P \rightarrow P'$  を観測することを考える (図 6.1(b))。光軸とレーザが平行になるように光源を直線  $P'O'$  上の点  $O''$  に移し、回転によって新たに定まる移動前輝点の距離を  $Z = z'_0$ 、高さ変動を  $\Delta Z'$ 、基線長を  $d'$ 、撮像面上の輝点移動量を  $\delta'$  とすると、式 (2.11) を斜めカメラ座標系に合わせて書き換えた、

$$\Delta Z' \simeq \frac{z_0'^2 \delta'}{d' \ell} \quad (6.1)$$

が成立する。ここで、幾何学的に

$$\begin{cases} \Delta Z' = \frac{\cos(\alpha + \phi)}{\cos \phi} \cdot \Delta Z \\ z_0' = \frac{1}{\cos \phi} \cdot z_0 \\ d' = \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha + \phi)} \cdot d \end{cases} \quad (6.2)$$

であることから、これらを式 (6.1) に代入すると、 $\Delta Z$  と  $\delta'$  の関係式

$$\Delta Z \simeq \frac{1}{\cos \phi \cos \alpha} \cdot \frac{z_0^2 \delta'}{d \ell} \quad (6.3)$$

が得られる。この式における変動要素は  $z_0$  と  $\alpha$  であるから、これらの値がとり得る範囲を考慮すればよい。入浴者が本システムで用いたユニットバスの浴槽で呼吸をしている

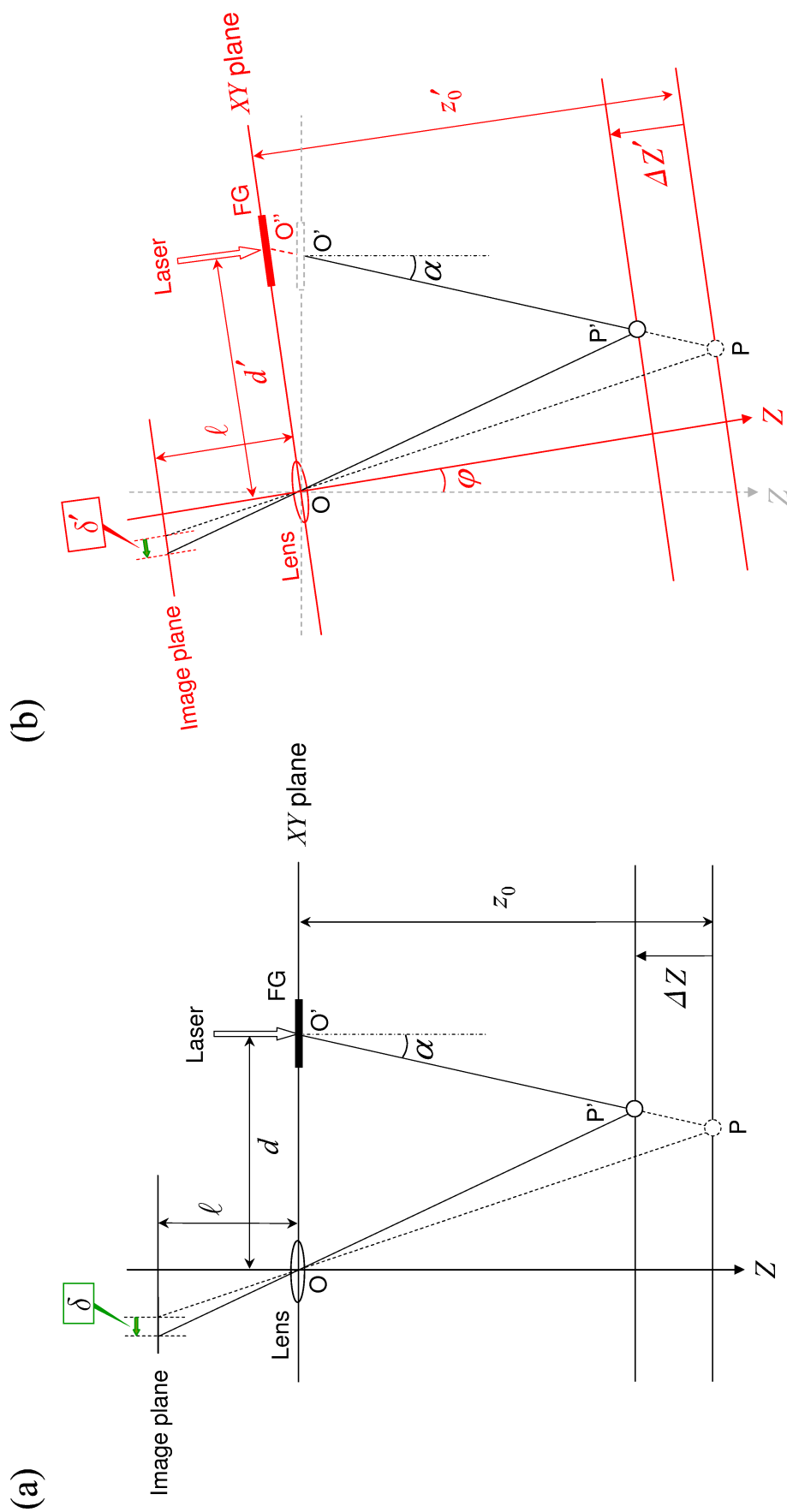


図 6.1 受光器を斜めに傾けたときの輝点移動量の変化  
 Amount of movement of spot when optic axis is inclined from the perpendicular.  
 (a) レンズ光軸とレーザー入射が平行である場合、(b) 光軸を FG 側に  $\phi$  だけ傾けた場合、本システムにおいては  $\phi = 18.3^\circ$  である。



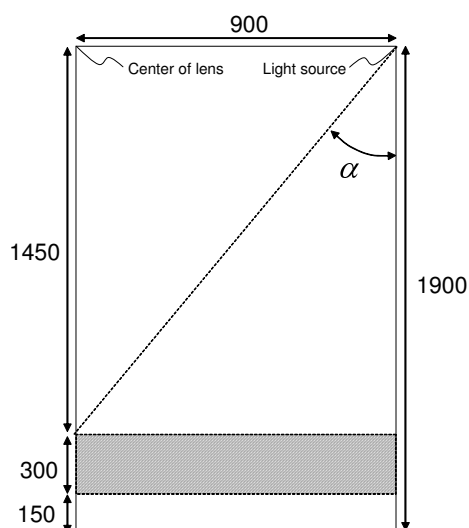


図 6.2 仮定する輝点の存在範囲  
Assumed spot existence area.

範囲の下限 ( $z_0 = 1750$  mm) は身体の厚さの下限を，上限 ( $z_0 = 1450$  mm) は浴槽の高さをそれぞれ考慮して決定したものである．単位は mm．この場合の  $\alpha$  は最大  $31.8^\circ$  となる．

シーンを想定し，図 6.2 に示す範囲に輝点が分布するとしたとき， $1/\cos \alpha$  の部分で最大 1.18 倍， $z_0^2$  の部分で最大 1.46 倍，全体で最大 1.72 倍の格差がそれぞれ生じる計算となる．本システムでは呼吸停止が否かを判断する目的にのみ輝点情報を使用するため，監視システムの運用における影響は少ないと思われるが，輝点移動量の推移を用いて呼吸の傾向を本格的に解析しようという場合には注意が必要である．

## 6.2 実用における待機時間の設定

顔照合や指紋照合などのバイオメトリクス個人認証技術の分野においては，本人拒否率 (FRR ; False Rejection Rate) と他人受容率 (FAR ; False Acceptance Rate) が用いられる．これらの値は，本人と判断するために入力データに要求する本人データとの類似度 (しきい値) の決定に用いられ，類似度によって両者はトレードオフの関係で変化する (図 6.3)．

一方，本論文で述べているバスルーム監視システムのアラーム性能に関しても，待機時間が短いほど誤報の頻度が高くなり，長いほど見過ごしの頻度が高くなると考えられる．したがって，図 6.3 の関係を，

- FRR 見過ごし

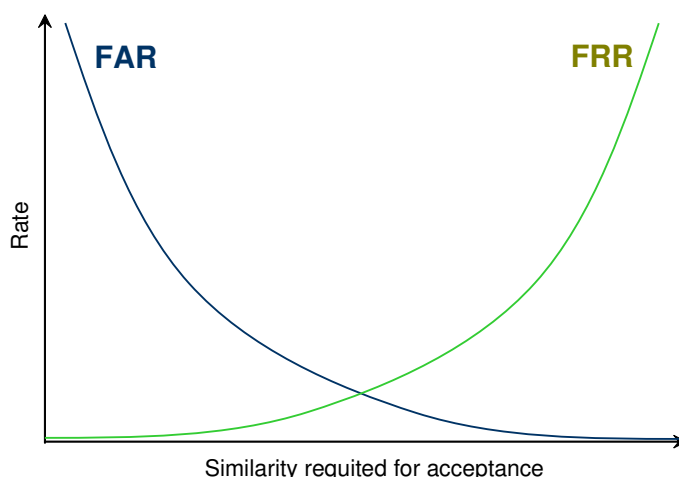


図 6.3 本人拒否率と他人受容率  
FRR and FAR.

横軸は入力データを本人と判定するために要求される本人データとの類似度，縦軸は FRR および FAR を表す．なお，この図は一般論を表した模式図であり，実際のデータを示したものではない．

- FAR 誤報
- 類似度 事故検知からアラーム発生までの待機時間

と読み替えることにより，本システムにおけるアラーム性能に関する議論に当てはめることができる．

これまでの章で，デュアル型センサ手法（表 4.1，p.61）と FG 視覚センサ単独手法（表 5.2，p.69）によるアラーム性能を調べたが，これらは待機時間を 10 秒に固定したときのものであり，見過ごしと誤報についての上記関係を考慮すれば，この結果のみをもってシステム性能に関する議論を尽くしたとはいえない．デュアル型センサ手法においては誤報も見過ごしもなかったが，この精度を保ったまま待機時間をさらに短縮できる可能性がある．また，FG 視覚センサ単独手法においては待機時間をうまく設定すれば誤報率が下がるかもしれない．以下の各項においては，それぞれの手法について待機時間とエラー率の関係に注目した検討を加える．

### 6.2.1 デュアル型センサ手法の待機時間

図 6.4 は，デュアル型センサ手法において，待機時間を 0.25 秒から 30 秒まで 0.25 秒刻みで変化させたときの誤報の割合を示したものである．図に示したとおり，待機時間を短くすると誤報となるシーンが見られるようになった．

処理の様子を目視で観察したところ，体動をせずに呼吸している時に，息を吸いきっ

た時のフレームと吐ききった時のフレームでは、身体表面の動きがほぼゼロとなり、これが待機時間に相当する数のフレームが連続したときに溺水の誤報が発生することがわかった。また、被験者のとる姿勢によって、安全入浴の演技中であつたも一時的に高さパラメータ  $H$  が低い値となる時間帯があり、これが転倒の誤報につながっていることがわかった。なお、見過ごしエラーは、溺水、転倒とも待機時間をデータ長と同じ 30 秒まで引き上げても発生しなかつた。

今回の実験の範囲においては、デュアル型センサ手法における待機時間は、溺水アラームを  $T_d = 4.5$  秒、転倒アラームを  $T_f = 6.3$  秒にまで短縮できるといえる。

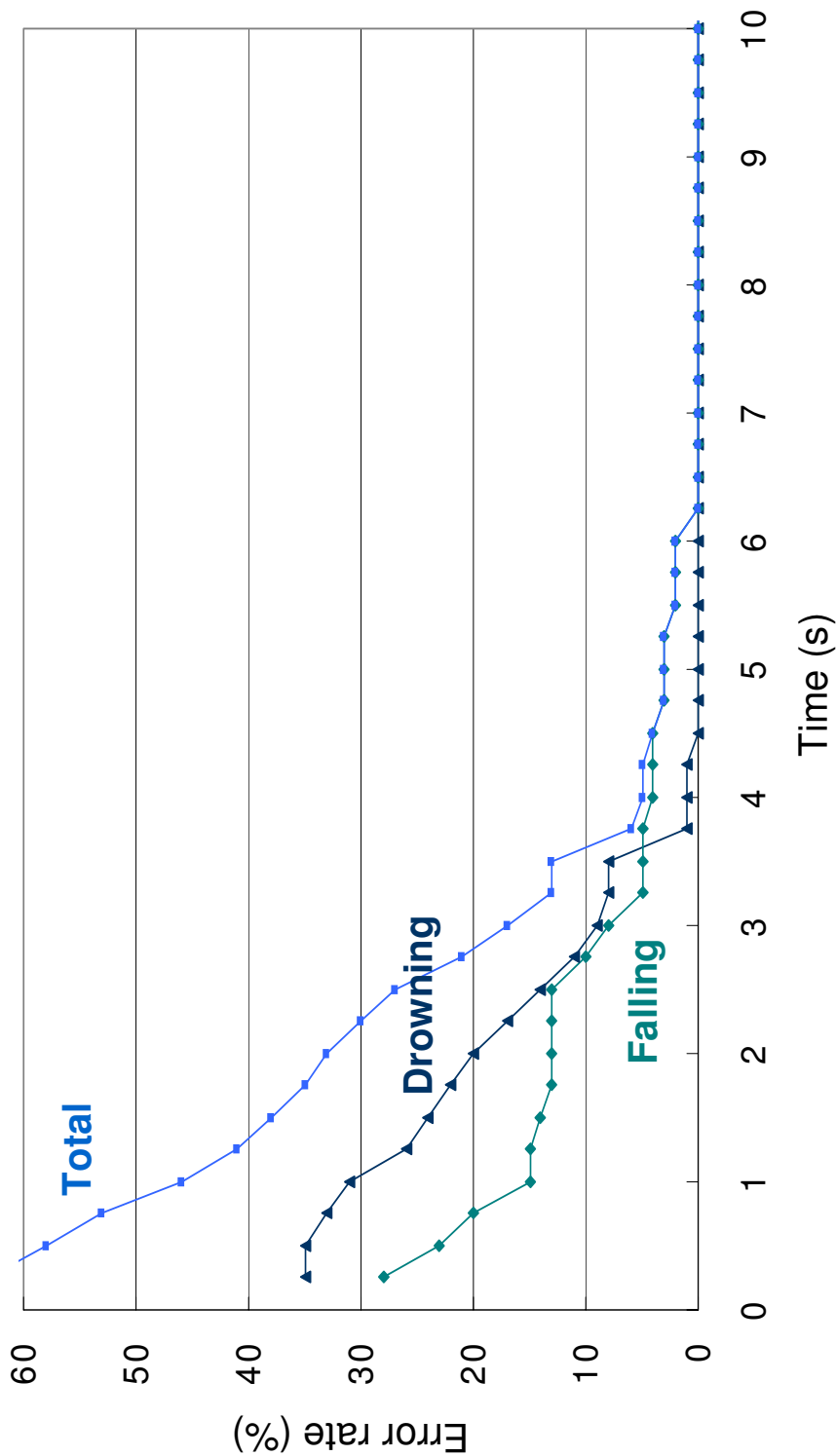


図 6.4 待機時間と誤報率の関係 (デュアル型センサ手法)  
False alarm rate for variations of waiting time. (using dual type sensor)

横軸はアラームの待機時間、本システムにおける処理間隔と同じ 0.25 秒単位でエラー率を調べた。本来これらのプロットを線でつなぐべきではないが、待機時間の増加にもなって誤報率が減少する様子を見やすくするため、単純に折れ線ではないである。また、この解析手法において見逃しは発生しなかったため、この図では省略してある。

## 6.2.2 FG 視覚センサ単独手法の待機時間

図 6.5 は、FG 視覚センサ単独方式において、前項同様待機時間を 0.25 秒から 30 秒まで 0.25 秒刻みで変化させたときの溺水に対する見過ごしと誤報の割合を示したものである。図に示したとおり、今度は双方のカーブが交わっており、両方のエラーをなくするような待機時間は存在しない。このような場合の待機時間（認証技術の分野でいう類似度）の設定方法として最もオーソドックスなのは両者のクロスポイントを用いる方法であり、まずこの方法で図 6.5 のクロスポイントを求める。両者のプロットを指数近似すると、誤報率は  $y = 23.95 \times e^{-0.2449x}$ 、見過ごし率は  $y = 0.069 \times e^{-0.1949x}$  ( $x$ : 待機時間,  $y$ : エラー率) となり、クロスポイントは  $x = 13.3$  秒,  $y = 0.92\%$  となる。これらの値はいずれもデュアル型センサ手法の性能には及ばないものの、人命を救うという観点から見ればこの待機時間は十分短い。さらに、表 6.1 に示すとおり処理時間においては本手法が優位である。

表 6.1 処理時間  
Prodesing time.

デュアル型センサ手法	FG 視覚センサ単独手法
0.21 ~ 0.22 秒/frame	0.13 ~ 0.18 秒/frame

CPU : Pentium4 3.2 GHz, メモリ : 1 GB の PC を使用した。

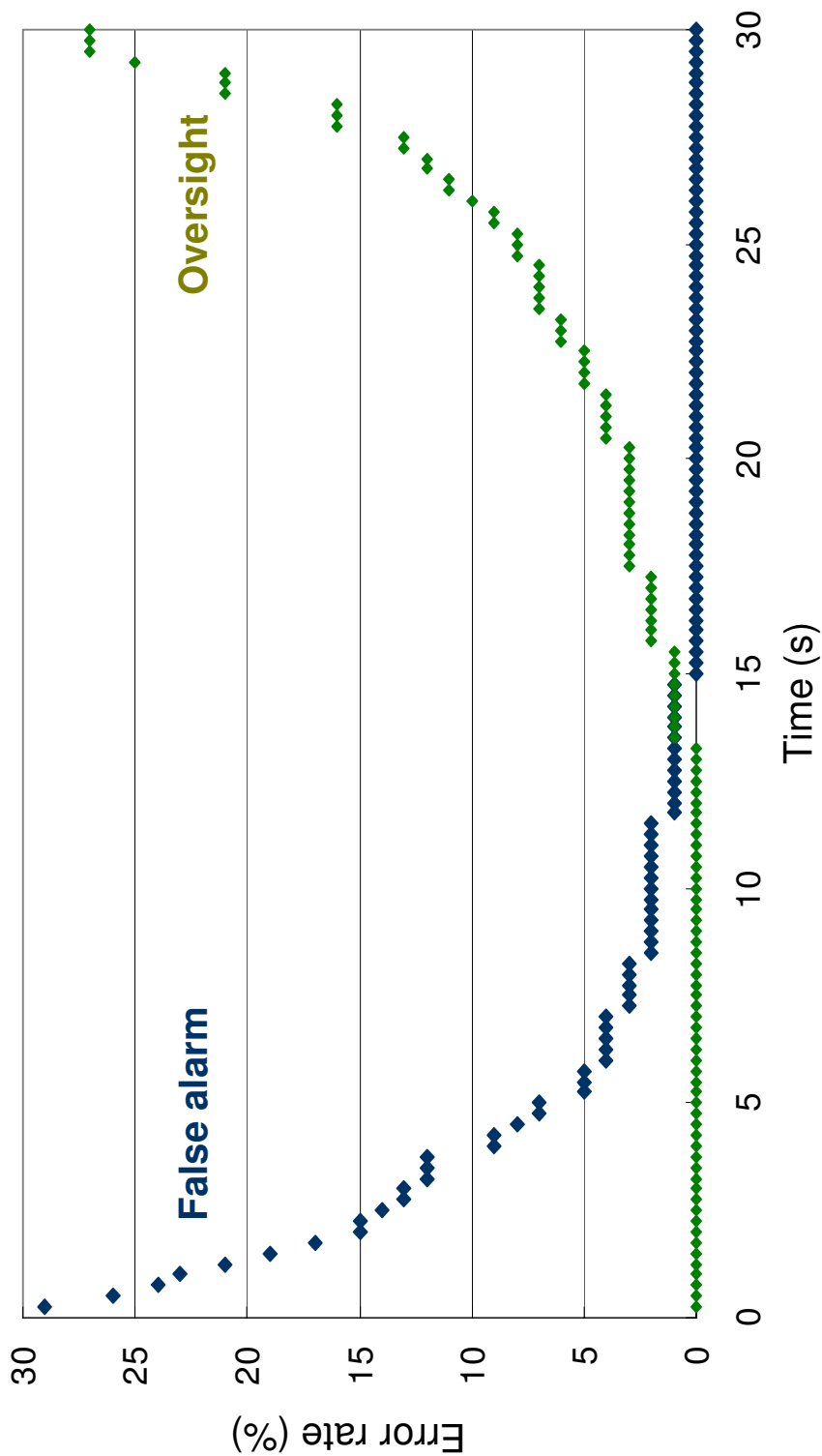


図 6.5 待機時間と各エラー率の関係 (FG 視覚センサ単独手法)  
 Error rate for variations of waiting time. (using FG sensor solely)

横軸はアラームの待機時間で，本システムにおける処理間隔と同じ 0.25 秒単位でエラー率を調べた．

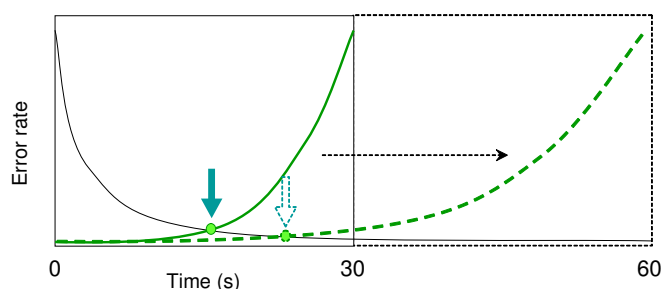


図 6.6 通報失敗と見なす無警報時間を延長したときの見過ごし率（予測）  
Change of oversight error rate when time limit for alarm activation is set longer.

30 秒という上限のために通報失敗とされたデータが減るため、同じ待機時間での見過ごし率も低下する。これにより、クロスポイントにおけるエラー率も下がることが予想される。

ここで、待機時間をより実用に即したものとするために、以下に挙げる 2 点について考察をさらに加える。

#### 考察 (1) 危険シーンの画像シーケンスが最長 30 秒である点

被験者に指示が可能な呼吸停止時間には制約があるため、図 6.5 における見過ごし率の算出にあたっては、用意した危険シーンの画像シーケンスの長さ、すなわち 30 秒の間無警報であったケースを通報失敗（見過ごし）とした。しかし、カーラーの救命曲線（p.10）によれば、呼吸停止から 3 分以内であれば死亡する可能性がほとんどないことから、呼吸停止の状況における通報のタイムリミットは、実際の場面においては 30 秒よりも長いと考えられる。このような画像シーケンスは実際には得ることはできないが、もし仮に 1 分あるいは 2 分の呼吸停止シーンがあったならば、アラーム発生までの“猶予時間”が増えるぶん、同じ待機時間でもエラー率が低下し、クロスポイントがより右下の（待機時間がより長く、エラー率がより低い）方向に移動すると予想される（図 6.6）。

#### 考察 (2) セキュリティシステムとしての誤報の影響

研究レベルにおいては、上記のように FRR と FAR のクロスポイントが多く使われるが、FRR（見過ごし）と FAR（誤報）がいつでも“同じ罪の重さ”と捉えられることは稀である。

認証の分野においては、他人にセキュリティを破られること以上に本人が拒絶されることの方が利用者にとってはストレスになるとされる。したがって、入力データに対して要求する類似度を低めに設定することによって FRR をできるだけ低くし、FAR に関しては犯罪抑止効果が働く程度の水準であれば多少のエラーは許容するという考え方が一般的である [38]。



表 6.2 各誤報率に対する最小待機時間  
Required waiting time for each false alarm rate.

要件とする誤報率	最小待機時間
1 % 未満	13.0 秒
0.1 % 未満	22.4 秒
0.01 % 未満	31.8 秒
0.001 % 未満	41.2 秒

一方、本システムのように万が一の異常を検知して通報するようなシステムの場合には、見過ごしが人命にかかわる重大なエラーである一方で、一度の誤報が“オオカミ少年”となってシステムに対する信頼を著しく損う原因となることも無視できない。このシステムはあくまで人命救助を目的とするものであるが、それを絶対条件として待機時間を短くすると、誤報が増えてシステム普及の障害になってしまうというジレンマにいずれ直面することになるだろう。

本研究を含むいくつかの監視システムの開発を行っている、慶應義塾大学理工学部中島研究室の救急対応画像センシングプロジェクトとしては、本システムのような監視システムの誤報率は、少なくとも 0.001 % (10 万回に 1 度のエラー) を下回らなければ普及は無理であると考えている。したがって、実用に際しては、誤報率がそのような水準にまで下がるよう待機時間を長くするのが現実的であると考えている。この考察に基づき、誤報率の近似曲線を用いて、誤報率に要求する水準と、それを満たす最小の待機時間を求めたものを表 6.2 に掲載しておく。

## 6.3 技術的な課題

ここでは、本システムの実用化を想定するとき、今後解決が必要と考えられる項目や、監視システムとしての信頼性を高めるために必要な事項などを挙げる。

### オートキャリブレーション

処理に際しての設定値（判定パラメータに対するしきい値や、画像処理的な設定値）については、大半が予備実験を経て定めたものであるため、類似したユニットバスであれば、そのまま適用できると考えられる。しかし、状態判別のための位置パラメータ  $P$  を使用するには浴室、洗い場の各領域をシステムにあらかじめ格納する必要がある。また、高さパラメータ  $H$  に対するしきい値  $TH_H$  と、シルエットの高さ取得で用いる探索窓の幅を定めるには、浴室の形状と、設置位置、センサの設置高さ、基線長の情報が必要である。

本システムが新品のユニットバスに初めから内蔵される形で利用者に提供されるのであれば、これらの情報は既知としても差し支えない。しかしながら、既存のバスルームに後付けすることを考えるとき、現実的にはユニットバスのメーカーがモデルごとに設定値のテーブルを保持し、それに従って設置するという方法がとられるであろう。このとき、システム側で浴室に関する情報を自動的に認識し、設定値を自身に格納する機能（オートキャリブレーション機能）があれば、システムの普及にとっては有利である。

### 赤外光使用による制約

本システムでは光源に近赤外光を用いているため、バスルーム内にこの波長帯の光が混入すると輝点抽出に影響が及ぶことが考えられる。現時点では、外乱光への対策として、レーザ発光と受光器のシャッタタイミングの同期、輝点抽出処理における浮動しきい値の導入を行っているが、窓から朝日がガラガラと差し込むような状況や、白熱灯など照明光自体が近赤外の波長を持ったものである場合などの環境における監視は難しいと思われる。目下のところ、本システムを用いるときのバスルームへの制約は以下のとおりである。

- 窓のないタイプが望ましい。窓がある場合はガラス表面に赤外カットフィルタを貼ってもらう。
- 照明は蛍光灯などの、近赤外の波長を持たないもの。

### バスルーム特有の環境に関する問題

バスルームは画像处理的な観点から言えば障害の多い環境である。本節では、バスルームを監視する際に不利となる要素について、本システムがどこまで対応できているかを Q and A 形式で述べる。なお、ここに列挙した障害要素は、本論文に関わる学会発表や、投稿論文の査読者とのやりとりで議論された内容から選んだものである。

- 水は？

これまでに述べた実験シーンを観察したところ、身体に付着した水についてはシルエット作成や輝点解析において支障はなかった。また、浴槽内で揺らぐ水の影響については、呼吸信号の取得にセンサの基線長方向の輝点移動成分のみを処理することによって軽減できる。

- 湯気は？

湯気が充満した状態において状態判別を続けることはできないものの、p.36 で述べた、カラー画像に対するラプラシアン演算により、センサ（カメラ）の視認性が監視に適さなくなったことを自動的に検知し、換気扇を操作したりセンサの確認を促したりすることが可能である。

- 照明変動は？

p.39 で述べたように、色ベクトルの正規化距離を考慮した背景差分法によって、狭いバスルーム室内において頻繁に起こる照明変動に対してロバストなシルエット抽出が可能となっている。

- 泡は？

石鹸やシャンプーの泡に関しては監視が可能な場合と不可能な場合があり、一般的な入浴行動では常に監視可能であったが、古い映画で女優が入浴するシーンのように上半身を完全かつ厚く泡で包まれるような状態においては監視不可能となった。

- 入浴剤は？

水中の身体が見えなくなるほど濃い入浴剤が使用された場合には対応できない。

### フィールドテストの必要性

本研究の実験で得たデータは、いずれも 20 代男性のものである。身長、体型、肌の色、くつろぎ状態に入った時の輝点移動量など、システム性能に関わる個人差に関する検討を今後行う必要がある。

## 6.4 システム運用時に考慮すべきこと

ここでは、利用者の立場から見て、システム運用時にどのような点を考慮すべきかを考える。

### 通報手段

本研究で製作した実験システムにおいては、画像処理用 PC のスピーカから音声にて危険を通報するようにした。家庭内の各部屋が通信網で結ばれたり、通信網そのものの容量も日進月歩で増大していることを考えれば、バスルーム事故発生の通報手段として、管轄の警備会社に直接通報する、予め指定した電話番号にダイヤルする等、様々な手段が考えられる。

しかしながら、あくまで入浴者の救命を第一要件とする場合には、救命する立場にある人が事故現場に何分でもたどり着けるかが最も重要となる（カーラーの救命曲線，p.10）。したがって、通信網の性能が発揮されるのは、病院や介護つき住居など、複数のバスルームを集中管理する必要があるケースに限られ、家庭で使用する場合は、同居している入浴者の家族に音声によって通報するという一見原始的な手段が最も適していると思われる。

### 基準画像の更新タイミング

本研究で提案しているシルエット抽出手法が照明変動にある程度のロバスト性を持つことはすでに述べた。しかしながら、照明の点いていない夜間の室内や、強烈な朝日が射し込む室内など、照明光が持つ波長成分が通常入浴時と極端に異なるシーンを基準画像とすべきではない。照明環境の変動や浴室常備品類の配置等を考慮すれば、基準画像として最もふさわしいのは、照明をオンにして入浴者がバスルームに入る直前と考えられる。本システムは、人がセンサの電源を操作することなく 24 時間動作していることを想定し、監視アルゴリズムも、無人の状態を考慮に入れたものとしているが、上記のことを考えると、脱衣場などに動きセンサ（焦電型のものなど）を設置し、人の感知と同時にバスルーム内の照明と監視システムを起動し、同時に基準画像を撮像するという方法が現実的と考えられる。

### 被監視者のプライバシーに関する見解

本研究を遂行する中で、学会発表等で“入浴者のプライバシーはどうなるのか”という意見を何度か受けた。システム原理の詳細を知った学会参加者が上記のような感想を抱くのはごく自然なことであろう。救急対応画像センシングプロジェクトとしての、被監視者のプライバシーに関する見解は以下の通りである。

これらの監視システムにおいては、状態判別に用いる情報が画像である以上、悪意のある者が監視エリアが映った映像信号を取得できるようセンサを改造することは不可能ではない。しかし、これらのシステムは公共の場における監視システムとは異なり、センサの使用を拒否する余地が利用者に残されている。また、家庭内事故が社会問題となっているわが国において、ご家族に危険が及んでいないかを切実に心配されている方が少なからずおられることも事実である。したがって、必要としている方々がシステムの機能や意義を理解した上で使用する限りにおいては、問題はないものとする。

上記のような利用条件を確立した上で、バスルーム利用者の心理的抵抗を少しでも和らげるような装置デザイン（センサを小型化し天井に埋め込む等）にしたり、映像取得から状態判別までの一連の処理を一括してハードウェア化することにより、装置外部からの映像取得を困難にしたりといった工夫が開発者側に求められよう。なお、図 4.2（p.56～p.60）に示した処理画面は、シルエット抽出と輝点解析の結果を確認する目的で作成したものであり、実用において通報コントローラ等に表示することを想定したものではない。

## 第7章

# 結 言

---

本章では、本研究で行ったこと、明らかになったことを挙げ、提案したバスルーム用監視システムの有効性や研究成果についてまとめる。

## 結 言

本研究では、バスルームにおける溺水事故と転倒事故の検知を目的とした監視システムの開発を行った。以下に本研究によって得られた成果をまとめる。

まず監視手段として、ファイバ・グレーティング視覚センサによる距離計測機能とカラー撮像素子によるカラー画像取得機能を併せ持つ、デュアル撮像素子型 FG 視覚センサを提案した。このセンサは、同一のレンズを通して進入する光をハーフミラーによって分け、一方は FG 投光器から照射される輝点の画像を取得するために可視光をカットし、もう一方はカラー画像を取得するために赤外光をカットするものである。

次に、上記デュアル撮像素子型 FG 視覚センサから得られる輝点画像とカラー画像を用いて、バスルーム室内を監視する手法を提案した。これは、(1) カラー画像の視認性、(2) シルエットの位置、(3) シルエットの動き量、(4) 呼吸信号および (5) シルエットの高さをそれぞれ定量化した判定パラメータを用いて入浴者の状態を判別するものである。これらの判定パラメータを取得するための処理は大きく分けて、くもり判定処理、シルエット抽出処理、呼吸検出、シルエットの高さ判定処理の4つからなる。くもり判定処理は、カラー画像に対してラプラシアンフィルタを適用することで画像のくもりの度合いを定量化するものである。予備実験の結果、湯気の発生に対して判定パラメータの低下が見られ、センサ異常を自ら検知する仕組みを与える有効な手法であることを確認した。シルエット抽出処理においては、色ベクトルの正規化距離を用いた背景差分により、バスルーム内の照明変動にロバストなシルエット抽出が可能となった。呼吸検出処理においては、慶應義塾大学理工学部中島研究室で開発されたファイバ・グレーティングによる呼吸モニタリング技術を用いている。シルエットの高さ検出に際しては、シルエット情報と輝点情報を併用し、輝点の分布が疎となる領域を探索することによって高さギャップの存在を判断する。これについても予備実験を行ったところ、被験者の転倒に当該の判定パラメータが追従しており、洗い場における転倒事故の検知を可能とする手法であることを確認した。

構築した監視アルゴリズムの有効性を確かめるため、一般的なユニットバスに本センサを設置し、監視アルゴリズムを適用した。浴槽での溺水と洗い場での転倒を模擬した画像シーケンスをシステムに入力したところ、すべてのシーンに対して正しく警報を発することを確認した。また、安全に入浴しているシーンに対して、溺水または転倒の誤報を発することもなかった。さらに、アラームまでの待機時間を短くしながら同様の検証を行ったところ、誤報の発生が見られるようになり、誤報が発生しない最短の待機時間は溺水アラームがおよそ5秒、転倒アラームがおよそ6秒であることがわかった。

本手法において提案した監視アルゴリズムは、カラー画像の持つ弱点（対象物自身の高さ分布や微小な高さ変化を取得できない）と、FG 視覚センサによる監視の弱点（呼吸検



出を行おうとすると数十 cm オーダーの高さ変化が検出できない)を互いに補完するものとなっており、現代の入浴事故の傾向に即した監視システムとしての有効性が示唆された。

また、デュアル撮像素子型 FG 視覚センサを用いた手法に代わるものとして、FG 視覚センサ単独による監視手法を提案した。この手法は、デュアル型センサ手法における人物シルエットに相当するものとして、フレーム間移動量によるクラスタリングによって人物の存在する領域を特定し、呼吸情報を取得するものである。デュアル型センサ手法同様の実験を行った結果、誤報率曲線と見過ごし率曲線のクロスポイントを用いて評価した場合、待機時間約 13 秒においてエラー率が約 1 % となることがわかった。エラー率、待機時間の短さともにデュアル型センサ手法に及ばないものの、人物の救命を妨げない程度に待機時間を長くすることで、誤報率を低く抑えられることが推定された。また、呼吸の周期性に注目したくつろぎ状態検知手法も提案した。

本研究で提案したバスルーム監視システムは、原理的な観点においての有効性は示されたものの、実用化に向けてのハードルは幾つか残されている。まず、すでに明らかとなっている泡や入浴剤の問題を解決することが必要である。また、既存のバスルームへの後付けが可能となるよう、オートキャリブレーション機能を追加することも必要である。さらに、呼吸検出や体型の個人差に関する検討が現段階では不十分なので、フィールドテストを行い、さまざまな入浴行動を考慮に入れたシステム開発が望まれる。このように引き続き検討を重ねていかねばならない点は少なくないが、本格的な高齢者社会を迎えようとしているわが国において、本システムが人々の健康と安全に大きく貢献することは確実であり、今後の研究開発の成果に期待したい。

# 謝 辞

本研究は筆者が慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程在学中に行ったものです。研究の遂行，本論文の執筆にあたり，たえず温かくご指導，ご意見を賜った，慶應義塾大学理工学部教授 中島 真人 博士に深く感謝します。中島先生，大変ご心配をおかけしました。7年間，中島研でご指導くださりましてありがとうございました。

本論文を審査してくださるとともに，本研究の内容に関して貴重なご助言を賜りました，慶應義塾大学理工学部教授 浜田 望 博士，同教授 池原 雅章 博士，同助教授 岡田 英史 博士ならびに同助教授 田中 敏幸 博士に深く感謝します。浜田先生，池原先生，岡田先生，田中先生，お忙しい中審査いただき，ありがとうございました。

また，本研究の一部は，平成 16 年度慶應義塾大学 21 世紀 COE プログラム“アクセス網高度化光・電子デバイス技術”の一環として行われました。関係者の皆様に感謝の意を表します。

本研究の遂行に際し貴重なご意見をいただくとともに，実験システムの製作にご協力くださった，住友大阪セメント株式会社 竹村 安弘 博士，同 味村 一弘 氏，徳島大学助教授 寺田 賢治 博士，東京理科大学 青木 広宙 博士ならびに宇宙航空研究開発機構 長田 泰一 博士に深く感謝します。竹村さん，味村さん，寺田先生，青木さん，長田さん，やっと出来上がりました。お世話になりました。

日常の研究活動において議論に加わっていただくとともに，長時間にわたる入浴実験にご協力くださった，慶應義塾大学理工学部中島研究室の OB 諸氏，現役学生諸氏に感謝します。風呂の中で息を止めるって本当に辛いね (^\_^;)。自分でやってみてよくわかりました。中島研の皆さん，ありがとう！

また，学位請求の手続きを進めるにあたり，大変お世話になった，慶應義塾大学理工学部教授 梅垣 真祐 博士ならびに中島研究室秘書 中村 香織 さんに深く感謝いたします。梅垣先生，お忙しいところ書類の添削をしていただき，ありがとうございました。それから，中村さんの的確なガイドなしでは学位取得はできなかったといっても過言ではありません。

最後に、世間の常識からは考えられないほど長い学生生活をするのを認め、経済的にも精神的にも支えてくれた両親と、博士課程在学中くじけそうになる度に温かく応援してくれたわが妻に、心から感謝します。

多くの方々に支えられ、ここに博士論文が完成しました。この論文の技術がさらに高度化され、安心できる入浴環境の提供に貢献することを願ってやみません。

2006年2月

西浦 明史

## 参考文献

- [1] 厚生労働省, “人口動態調査,” 人口動態統計 平成9年～平成15年
- [2] 警察庁, “平成15年中の交通事故死者数について,” 警察庁統計
- [3] 国民生活センター, “家庭内事故—その実態を探る,”  
<http://www.kokusen.go.jp/news/> (1999)
- [4] 重臣宗伯, 佐藤ワカナ, 円山啓司, 吉岡尚文, “高齢者の入浴中突然死に関する調査研究,” 日本救急医学会誌, **12**, 3, pp.109–120 (2001)
- [5] 東京ガス都市生活研究所, “入浴中急死の事例検討,” 都市生活レポート, **2001**, 10, pp.17–23 (2001)
- [6] 堀進吾他, “高齢者・入浴中急死の病態解明に関する提言,” 日本救急医学会誌, **9**, 9, pp.407–416 (1998)
- [7] 堀進吾他, “入浴時における高齢者の急病・事故,” 東京ガス, 入浴死問題講演会資料 (2000.11.27)
- [8] 産経新聞社, “入浴死 交通事故死を上回る,” 産経新聞, 2000年11月23日付 (2000)
- [9] 磯永聡, 服部哲, 岡本昌幸, 田中正吾, “浴室内監視システムにおける音響センサ使用浴槽水位計測,” 計測自動制御学会論文集, **41**, 1, pp.16–24 (2005)
- [10] 安藤由紀, 森幸夫, 内田亜紀子, “動き検知センサ『風呂用心』,” 三洋電機技報, **33**, 3, pp.31–38 (2001)
- [11] 東京救急協会, “応急手当のポイント,” <http://www.teate.jp/>
- [12] 松井穰, 渡辺嘉二郎, “浴槽における生体モニタリング,” 自動制御連合講演会前刷, **44**, pp.498–499 (横浜市, 2001)
- [13] 江夏弘, “お風呂考現学—日本人はいかに湯となごんできたか,” TOTO 出版, pp.132–135 (1997)
- [14] H. Machida, J. Nitta, A. Seko and H. Kobayashi, “High-efficiency fiber grating for producing multiple beams of uniform intensity,” *Applied Optics*, **23**, 2, pp.330–332 (1984)
- [15] 谷田貝豊彦, “光とフーリエ変換,” 朝倉書店, pp.19–23 (1992)

- [16] P.M.Duffieux (著), 辻内順平 (訳), “フーリエ変換とその光学への応用,” 共立出版, pp.83–90 (1997)
- [17] 中澤和夫, “ファイバグレーティングを用いたロボット視覚システムに関する研究,” 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士論文, pp.32–33 (1989)
- [18] 中澤和夫, 中島真人, 小林寛, “ファイバグレーティングを用いた 3 次元形状計測システムの開発,” 電子通信学会論文誌, **J69-D**, 12, pp.1929–1935 (1986)
- [19] 中澤和夫, 大矢晃久, 中島真人, 油田信一, “マニピュレータに装着したファイバグレーティング視覚センサによる三次元形状計測,” 電気学会論文誌 C, **107**, 7, pp.659–665 (1987)
- [20] 寺田賢治, “ファイバグレーティング視覚センサを用いた人の顔の自動識別に関する研究,” 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士論文, pp.16–17 (1995)
- [21] 寺田賢治, 中島真人, 山口順一, “ファイバグレーティング視覚センサを用いた人の顔の自動識別,” 電気学会論文誌 C, **113**, 12, pp.1072–1078 (1993)
- [22] 山口順一, 中澤和夫, 中島真人, “ファイバグレーティングを用いた実時間侵入者検知システム,” 電気学会論文誌 D, **110**, 7, pp.814–820 (1990)
- [23] 今井聡子, 青木広宙, 本田正, 中島真人, “FG 視覚センサを用いたトイレ用監視システム,” 第 5 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.159–164 (横浜市, 1999)
- [24] H. Takemura, J. Sato and M. Nakajima, “A respiratory movement monitoring system using fiber-grating vision sensor for diagnosing sleep apnea syndrome,” *Optical Review*, **12**, 1, pp.46–53 (2005)
- [25] 青木広宙, 青木広市, 中島真人, “近赤外輝点マトリクス照影による非接触・無拘束就寝者呼吸監視システム,” 電気学会論文誌 C, **124**, 6, pp.1251–1258 (2004)
- [26] 竹村安弘, 多田羅勝義, 中島真人, “非接触呼吸運動モニタ装置を用いた人工呼吸監視,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J88-DII**, 10, pp.2152–2162 (2005)
- [27] I. Sato and M. Nakajima, “Non-Contact Breath Motion Monitoring System in Full Automation,” *27th Annual International Conference of the IEEE EMBC '05*, Presentation No.3.6.2–30 (in Shanghai, 2005)
- [28] T. Nishiura, M. Nakajima, “Development of a bathroom watching system based on breath detection and silhouette extraction,” *International Symposium on Optomechatronic Technologies 2005, Proc. of SPIE*, **6051**, pp.238–245 (in Sapporo, 2005)
- [29] 西浦朋史, 中島真人, “カラー撮像素子内蔵型 FG 視覚センサによるバスルーム監視システムの開発,” 電子情報通信学会論文誌 D, **J89-D**, 5 (2006) 採録決定済
- [30] 西浦朋史, 青木広宙, 竹村安弘, 味村一弘, 中島真人, “バスルーム用セキュリティシステムの開発,” 第 8 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.39–42 (2002)

- [31] 高木幹雄, 下田陽久 (監修), “新編 画像解析ハンドブック,” 東京大学出版会, pp.1228–1231 (2004)
- [32] 長屋茂喜, 宮武孝文, 藤田武洋, 伊藤渡, 上田博唯, “時間相関型背景判定法による移動物体検出,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, **79-DII**, 4, pp.568–576 (1996)
- [33] 波部斉, 大矢崇, 松山隆司, “動的環境における頑健な背景差分の実現法,” 画像の認識・理解シンポジウム MIRU '98 講演論文集, **I**, pp.467–472 (1998)
- [34] 画像処理標準テキストブック編集委員会 (監修), “画像処理標準テキストブック,” 財団法人画像情報教育振興協会, pp.263–265 (1997)
- [35] 谷口慶治編, “画像処理工学—基礎編,” 共立出版, pp.122–123 (1996)
- [36] T. Nishiura and M. Nakajima, “Bathroom watching using a breath detection system,” *Optics East 2004, Proc. of SPIE*, **5603**, pp.282–290 (in Philadelphia, 2004)
- [37] 西浦朋史, 中島真人, “呼吸検出に基づいたバスルーム用監視システムの開発,” 電気学会論文誌 C, **125**, 4, 561–569 (2005)
- [38] 安藤慎吾, “手書き文字に現れる個人性特徴の定量化とその応用,” 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士論文, pp.75–77 (2002)