

修士論文

温度情報と色情報を統合的に利用
する映像メディアの研究

平成17年度

東京大学大学院 情報理工学系研究科
電子情報学専攻 46425

西貝 吉晃

指導教員 苗村 健 助教授

内容梗概

本論文では、温度情報と色情報を統合的に利用する映像メディアの研究と題して、システム開発に始まり、基礎、応用研究まで含んだ領域について、多様な視点で考察する。本論文で述べることは画像処理の研究であり、具体的には、後述する可搬型 thermo-key の開発と、ソフトウェア側の基礎研究、そして、thermo-key という手法の応用研究について成果を述べる。Thermo-key とは、温度情報を利用して人物領域の実時間抽出を行う手法である。色情報を利用する chroma-key や、距離情報を利用する depth-key と比べてロバストな人物抽出が可能な手法として期待されているものである。具体的には、人物の体温の温度を温度カメラ¹を利用して抽出する。そして、カラーカメラと温度カメラを光軸を一致させて配置することにより、2カメラのピクセル単位の整合性が取れ、2つのカメラから得られる画像情報をもとに人物領域の抽出を行う。この機構を利用したシステムが2000年に開発され（従来の thermo-key システム）、これを利用した各種アプリケーションの研究が行われてきていた。しかし、従来の thermo-key システムは、固定して使うことのみを想定して作られており、可搬性のあるものではなかった。この問題を解決するために、2005年4月に新しく可搬型 thermo-key システムを NEC 三栄（株）と共同開発した。本論文ではこの thermo-key 新システムの開発とそれに伴うソフトウェアについての事項を、従来の thermo-key の研究での成果と比較しつつ述べる。続いて、thermo-key システムの応用研究として行ってきた「Thermo-NINJA」「透明人間の世界」、そして、プライバシー保護のためのアプリケーションである「Thermosaic」について詳しく述べる。これらを簡潔に書くと次のようになる。

●可搬型 thermo-key システムの開発とそれに伴うアプリケーションの開発と基礎研究

可搬型 thermo-key システムを開発することで、「屋外での撮影」「動きながらの撮影」に耐えうるシステムを実現した。これにより、特に屋外での撮影に対する thermo-key という手法の堅牢性に対する検証が可能になった。補足事項として、カラーカメラの持つ画質が向上したことで、温度カメラの性能（温度分解能、放射率設定）が向上したことがあげられる。可搬型システムの開発により、専用アプリケーションの開発を行った。また、温度情報と色情報を統合する保存形式の基礎研究を行ったのでこれらについて述べる。

●Thermo-key システムを用いた応用研究

Thermo-key の応用としては、映像制作技術としてのもの、リアルタイムエンタテインメントシステムとしてのもの、社会貢献を模索するものが考えられる。具体的に、映像制作、リアルタイムエンタテインメントシステムとしてのデジタルコンテンツ制作基盤としての thermo-key の応用例を示す。そして、映像中の人物のプライバシー保護に焦点を当てた Thermosaic の研究について述べる。

今後の課題としては、thermo-key のロバスト性を向上させる画像処理技術の研究（堅牢性の向上）、電源ケーブルなど有線仕様となっている現行システムの改善（可搬性の向上）、温度カメラを利用したセンシングの有効性をより多くの場所で検証すること（実用性の検証）、そして、thermo-key における表現の探求（応用研究）などが挙げられる。

¹従来の thermo-key に関連する論文では温度カメラのことをサーマルビジョンカメラと呼んできたが、温度、あるいは、熱エネルギーを計測する機器のアレイを総称して温度カメラと本論文では呼ぶことにする。呼び名の統一の由来は、サーマルビジョンは Nikon 社製のカメラの名前で、現在 thermo-key では、NEC 三栄（株）製のサーモグラフィーを利用していることに因る。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本論文の背景	2
1.2 本論文の目的	2
1.3 本論文の構成	2
第 2 章 関連研究	4
2.1 はじめに	5
2.2 人物領域を抽出する手法	5
2.2.1 色情報を用いる手法	5
2.2.2 距離情報を用いる手法	7
2.2.3 温度情報を用いる手法	7
2.2.4 まとめ	12
2.3 映像表現に関する関連研究	13
2.3.1 EffecTV：色センシングによる映像表現	13
2.3.2 ZECTO：距離センシングによる映像表現	14
2.3.3 ThermoPainter：温度センシングによる映像表現	14
2.3.4 3種の信号を利用した映像表現のまとめ	15
2.3.5 その他の映像表現	15
2.4 関連研究のまとめ	17
第 3 章 Thermo-key システムにおける基盤技術の整備と基礎研究	18
3.1 可搬型 thermo-key システムの開発	19
3.1.1 Thermo-key システムの開発の背景	19
3.1.2 可搬型システムの仕様と旧システムとの比較	19
3.2 Thermo-key を利用するための PC 側の構成	20
3.2.1 PC 側ハードウェア構成	20
3.2.2 ソフトウェアアプリケーションの開発	21
3.2.3 映像保存フォーマットに関する基礎検討	28
3.3 まとめ	38
第 4 章 Thermo-key を利用したデジタルコンテンツの制作	40
4.1 はじめに	41
4.2 Thermo-key における映像効果	41
4.3 Thermo-NINJA	46
4.4 透明人間の世界の構築	48
4.4.1 機能の説明	48
4.4.2 技術的な課題	49

4.4.3	DPA での展示	51
4.5	まとめ	52
第 5 章	Thermosaic : 映像中の人物領域または背景領域を自動的に隠す処理	54
5.1	はじめに	55
5.2	関連研究との比較	55
5.3	Thermosaic の実装	56
5.3.1	ぼかし処理とモザイク処理の分類	56
5.3.2	ぼかし処理の実装	57
5.3.3	モザイク処理の実装	60
5.3.4	Thermosaic のまとめ	66
5.4	モザイク付き画像から原画像を復元する埋め込み技術の検討	67
5.5	まとめ	70
第 6 章	結論	71
6.1	結論	72
6.2	今後の課題	72
	謝辞	73
	参考文献	74
	発表文献	76

目次

2.1	Chroma-key	6
2.2	色相環中の肌色の分布	6
2.3	Axi-vision カメラの外観と構造	7
2.4	Axi-vision で人物と CG との遮蔽関係を表現している様子	7
2.5	Thermo-key の概念図	8
2.6	温度の高い部分ほど高い α 値を与える線形写像 (ハイパスフィルタ).	9
2.7	画像内に高温物体と人物が並存する場合 (左: 温度背景, 中央: 温度, 右: カラー).	10
2.8	線形写像 (ハイパスフィルタ) のみ適用.	10
2.9	熱背景差分後に写像関数を適用.	10
2.10	厚着をして抽出が困難な例 (左: カラー, 右: 温度).	11
2.11	厚着の改善 (左: 抽出結果, 右: 改善された α 画像).	11
2.12	薄着時における問題点の提起 (左: 入力カラー, 中央: 温度, 右: 抽出結果).	11
2.13	非等方性平滑化フィルタを適用した結果 (左: 入力カラー, 中央: 拡散された温度情報, 右: 抽出改善結果).	12
2.14	EffecTV の映像出力例.	13
2.15	EffecTV におけるカメラとディスプレイの配置 (左: 自分自身を見るタイプ, 右: 観客に自分を見せるタイプ).	14
2.16	ZECTO を利用して遠近感を逆にした例.	14
2.17	ThermoPainter による描画の様子.	15
2.18	マシュマロスコープ (左上: 外観, 右上: のぞき窓を見た様子, 下: 映像効果のアップ).	16
2.19	光学迷彩 (左: システム構成, 右: 出力例).	17
3.1	初代 thermo-key システム.	19
3.2	新 thermo-key システム.	19
3.3	可搬型 thermo-key システムの様子.	22
3.4	アプリケーションを操作中の様子.	23
3.5	アプリケーションダイアログの機能説明.	24
3.6	特定の温度領域のみ高い α 値を与える線形写像 (バンドパスフィルタ)	25
3.7	熱放射の角度依存性	26
3.8	バンドパスによるエッジ抽出 (左上: カラー, 右上: 温度, 左下: バンドパス, 右下: エッジ検出フィルタ (8 近傍ラプラシアン).	27
3.9	単純なバンドパスの結果 (左: 入力温度画像, 右: 出力画像).	27
3.10	エッジ除去アルゴリズム適用結果.	28
3.11	ウェーブレット変換の処理フロー	29
3.12	Cr チャネルの HH 成分に埋め込む場合.	30
3.13	LL 成分以外に埋め込む場合.	30

3.14	埋め込みに使うカラー画像（左）と温度画像（右）	31
3.15	（手法 1）Cr チャンネルの HH 成分を温度画像で上書きした結果（左）とその画像から抽出した温度画像（右）	31
3.16	（手法 2）和を温度画像にするように埋め込んだ結果（左）とその画像から抽出した温度画像（右）	31
3.17	（手法 3）Cr チャンネルの HH 成分を $\frac{1}{9}$ の輝度の温度画像で上書きした結果（左）とその画像から抽出した温度画像（右）	32
3.18	（手法 4）差分を計算して値をずらす手法による埋め込み結果（左）とその画像から抽出した温度画像（右）	33
3.19	剰余を利用した手法の埋め込みの結果のカラー画像（左）ととその画像（無圧縮）から抽出した温度画像（右）	34
3.20	符号化後のカラー画像から復元した温度画像	35
3.21	温度画像の解像度を半分（ 160×120 ）にして埋め込み	35
3.22	図 3.21 のカラー画像を 5 分の 1 の容量に圧縮したものから温度画像を抽出した結果	36
3.23	温度レベルと設定する剰余の場所のモデル	36
3.24	温度画像の色深度を $2bit$ に落として埋め込み	36
3.25	温度画像の解像度と色深度を下げて埋め込み	37
3.26	温度画像の解像度と色深度を両方下げて埋め込む手法の圧縮耐性	38
3.27	2 値的な温度画像を持つ場合の例	39
4.1	インタラクティブな透明人間の例	43
4.2	半透明人間 ($Dst = ImgBack \oplus ImgR_{(ImgT \times s)}$ $s = 0.5$) の例	43
4.3	テクスチャ人間 ($Dst = ImgR \oplus ImgTex_{ImgT}$) の例	44
4.4	テクスチャ背景 ($Dst = ImgTex \oplus ImgR_{ImgT}$) の例	44
4.5	モノクロ人間 ($Dst = ImgR \oplus (ImgR^{mono-effect})_{ImgT}$) の例	44
4.6	モノクロ背景 ($Dst = ImgR^{mono-effect} \oplus ImgR_{ImgT}$) の例	45
4.7	紫色のシルエット人間 ($Dst = ImgBack \oplus Img(150, 0, 150)_{ImgT}$) の例	45
4.8	Thermo-NINJA の展示の様子	47
4.9	黒子の要らない人形劇	48
4.10	エッジ人間と冷たい物体（左上：入力カラー，右上：温度，左下：エッジ抽出，右下：出力	49
4.11	シルエット人間（上段は背景の変化を反映している．下段は固定背景．左からカラー，温度，結果画像	50
4.12	エッジ付近にのるノイズの問題	50
4.13	DPA での展示の様子	51
4.14	Thermo-NINJA における機器の配置図	52
4.15	DPA における機器の配置図	52
5.1	MosaicTV（色背景差分を利用）	56
5.2	Stealth Vision	56
5.3	マニュアルでモザイク，ぼかし効果を与えた例	57
5.4	入力画像（左：カラー，右：温度）	58
5.5	線形補間によるぼかし処理（左：人物をぼかす，右：背景をぼかす）	58
5.6	提案平滑化フィルタの適用結果（左：人物をぼかす，右：背景をぼかす）	60
5.7	全身にモザイク	61

5.8	メガネが欠けて顔を覆うモザイクに失敗した例.	61
5.9	ディレイション処理の模式図.	62
5.10	ディレイションの例.	62
5.11	顔のアップに対するディレイション処理.	63
5.12	ディレイション回数を上げていく様子.	63
5.13	横向き顔に対するディレイションの適用.	64
5.14	顔の一部が隠れている場合のディレイションの適用.	64
5.15	背景領域に対するモザイク処理.	66
5.16	様々なレベルでモザイク処理, ぼかし処理をかけている様子	67
5.17	実験で使った画像 (左: カラー, 右: 温度).	68
5.18	モザイク領域の変化と差分画像.	69
5.19	ぼかし効果 (左) と差分画像 (右).	69
5.20	復元した画像.	70

表目次

2.1	人物領域抽出手法の分類	12
3.1	システム全体の仕様	20
3.2	各カメラの視野角	20
3.3	温度カメラの仕様	20
3.4	赤外反射ミラーの反射特性	21
3.5	初代システムと新システムのカメラ性能の比較	21
3.6	映像データ取得方法の比較（初代 thermo-key システムと新 thermo-key システム）	21
3.7	アプリケーションの比較（初代 thermo-key システムと新 thermo-key システム）	22
3.8	基本機能と使用した GUI コンポーネントの対応	24
4.1	主なパラメータ	42
5.1	Thermosaic の各々の処理の処理時間	59
5.2	人物-カメラ間の距離と必要なディレイション回数の関係	62
5.3	復元情報の圧縮法と復元後画像の画質（PSNR）の関係	70

第1章

序論

1.1 本論文の背景

近年、コンピュータやカメラの普及、技術進歩により、画像処理を利用したリアルタイムシステムの研究が急速に進んでいる。画像処理を利用したリアルタイムシステムでは、それ単体で、放送用のシステムとして映像製作に応用できるほか、エンタテインメントアプリケーション、メディアアートなどの様々な応用が期待されている。

さて、上述の画像処理を利用したリアルタイムシステムの一つである thermo-key の研究が、数年にわたって行われてきている。Thermo-key は、温度情報を利用して画像中の人物領域を実時間で抽出するものである。Thermo-key システムは 2000 年に開発され、これを利用して人物領域抽出の改善手法の提案や、映像表現の提案など複数の観点から研究が行われてきている。

本論文では、この thermo-key を大きなテーマとして研究報告を行う。

1.2 本論文の目的

本論文の目的は、thermo-key という手法を技術的に高めることを主とする。手法を技術的に高めるためにも、ハードウェアレベルからの見直しを必要としたので、2005 年には、可搬型 thermo-key システムを新しく開発し、現在ではこれを用いて研究を行ってきている。本論文では、旧システムのと時の研究の背景も紹介しつつ、thermo-key という手法自体の洗練をハード面、ソフト面双方から行う。これには、thermo-key を利用した応用研究による thermo-key の将来性を期待させる成果も含むことにする。

これらの成果により、thermo-key という手法がより一般に受け入れられるようになり、製造コストが安価になるなどして、早期に実用化されれば幸いである。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は次のようになる。

第1章	序論
第2章	関連研究
第3章	Thermo-key システムにおける基盤技術の整備と基礎研究
第4章	Thermo-key を利用したデジタルコンテンツの制作
第5章	Thermosaic：映像中の人物領域または背景領域を自動的に隠す処理
第6章	結論

以下、各章について略述する。

第2章では、関連研究について述べる。人物領域を抽出し、何らかの映像表現を行う thermo-key は、大雑把に分ければ人物領域抽出プロセスと表現表現プロセスという2つのプロセスがあるといえる。ここに着目し、それぞれのプロセスにおける関連研究を述べる。また、これら2つのプロセスの枠組みを超えた研究も将来的な thermo-key の発展に必要なのであるので、参考になる関連研究をさらに2つ追記してある。

第3章では、システムの開発、それに伴うアプリケーションや機能の整備、そして、温度情報と色情報を統合的に扱うための画像保存形式の基礎研究について述べる。旧システムと新システムの比較や、温度カメラの詳細なスペックなど、必要十分な程度に詳述してある。温度情報と色情報を統合的に扱うための画像保存形式は、従来ではリアルタイムに映像合成ができる thermo-key の汎用性をさらにあげる試みである。すなわち、温度情報と色情報を汎用的なフォーマットとして1ファイルに保存できれば、「その場限

り」の映像体験ではなく、「いつでもどこでも」映像再合成が可能になり、映像制作基盤としての質が高められることとなる。

第4章では、Thermo-key を利用したデジタルコンテンツの制作について述べる。従来の映像効果を一般化、数式化することで整理すると共に、thermo-key ならではの映像効果を探求している。また、複数回の展示に関するノウハウについても述べている。

第5章では、Thermosaic という研究について述べている。Thermosaic は、たとえば、人物領域にモザイクをかける、という処理であり、これは、第4章の枠組みの中に入れることができる。しかし、Thermosaic における研究目的の中にはプライバシー保護という社会問題の解決を図るものがあり、そのためには、浅い考察では充分ではない。このことを考慮した結果、独立した章を設けて詳述している。

第6章でまとめを行う。

第2章

関連研究

2.1 はじめに

ここでは, thermo-key と関連ある研究の紹介を行う. Thermo-key は, 温度を利用して人物領域を“抽出”し, 実時間で画像合成(“映像表現”)を行うシステムである. したがって, “抽出”と, “映像表現”という2つに研究に着目し, 人物領域を抽出する手法, そして, 映像表現という2つの視点から関連研究の紹介をする.

2.2 人物領域を抽出する手法

ここでは, オブジェクト抽出, 特に, 人物領域を抽出する手法について紹介する. 関連研究の中には特に人物領域の抽出に特化したものではないものも含まれているが, 人物領域を抽出することも可能であるので, 同時に紹介している.(以下, 人物領域を抽出する手法として統一表記する.)

映像中の人物領域を抽出するためには, ピクセルレベルで人物領域か否かを判定する必要がある. それを判定する手法として, 色情報を用いる手法や, 距離情報を用いる手法, そして, 本論文のテーマである温度情報を用いる手法が提案されている.

次項からは, 色情報, 距離情報という, 抽出に用いる情報に分類して関連研究について述べていく.

2.2.1 色情報を用いる手法

色情報を用いて人物領域を抽出する手法は基礎的な手法として以下のようなものがある.

1. chroma-key
2. 背景差分
3. 肌色領域抽出(肌の部分を抽出)

1. は, 放送用に実用化されているシステムである. 図 2.1 に示すように, 単色の背景(肌色の補色といわれている青や緑のものが使われることが多い. ブルーバック, グリーンバックと呼ばれる)を用いて人物領域を切り出して, 他の背景と合成する. 抽出精度が高い一方で, 背景が固定されるという不便さがある.

2. は, あらかじめ撮影しておいた背景画像との差分を人物領域として抽出する手法である. 背景画像が固定あるいは, 何らかのモデルに置き換えられ, かつ, 静止カメラによるシステムという前提下でオブジェクトを抽出可能な手法である. Chroma-key と比較して, 実空間の背景画像を利用できる点で使いやすい手法であるが, 抽出対象の影, 照明条件の変化(背景の変化)などによる抽出におけるノイズがのりやすいことが欠点としてあげられる. 参考文献 [1] では, HIS 表色系を用いた影の分離を行っている. また, 照明条件の変化に頑健な手法が参考文献 [2] で紹介されている. また, 参考文献 [2] では, 二種類の相補的な手法を併用する. 一方は, 照明に不変な特徴を用いて背景画像と観測画像の比較を行なう手法である. 他方は, 背景差分を行なう前に観測画像の照明条件を推定し, 輝度の正規化を行なう手法である. これらの手法を組み合わせ, 最終的に双方の検出結果を統合することで精度の高い検出結果を得ることができる. とはいえ, 背景色と人物の肌, 服の色などが近い場合には, 抽出に失敗することもある.

3. は, 画像中の肌色部分を抽出することで, 顔や手などの抽出を試みるものである [3]. 1., 2. の手法を人物抽出に使う場合は, 全身の抽出が主目的であったが, 肌色抽出法は, 顔や手などの部分のみの抽出を可能とする. 具体的には, 肌色か否か, ということと, 数値的相関が高いといわれる HSV 色空間上での H (色相) の値を利用して抽出を行う. 図 2.2 における青点が肌色の分布を示す. したがって, HSV のうち, H (色相をあらわすパラメータであり, 図 2.2 では角度である) を利用することで抽出が可能となる. また, HSV 色空間に関しては, 肌色抽出に特化した修正 HSV [4] という色空間も提案されている.

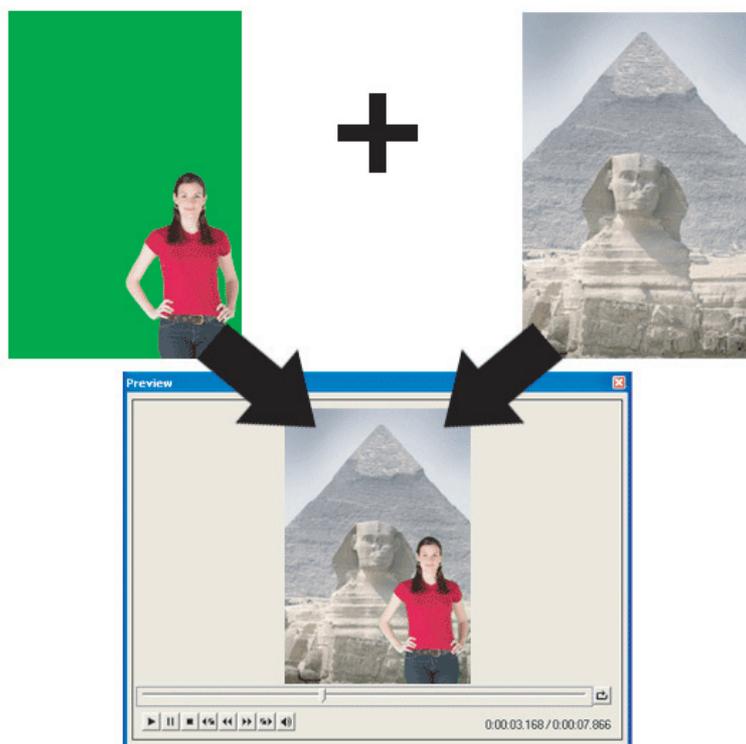


図 2.1: Chroma-key

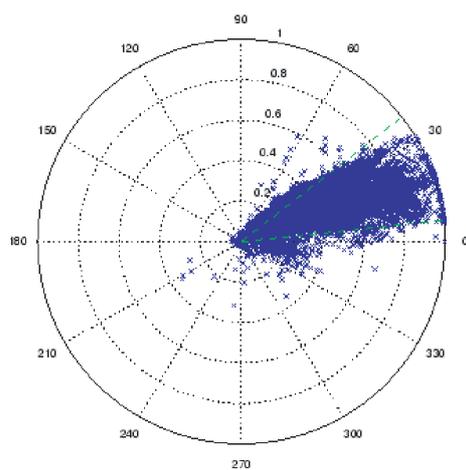


図 2.2: 色相環中の肌色の分布

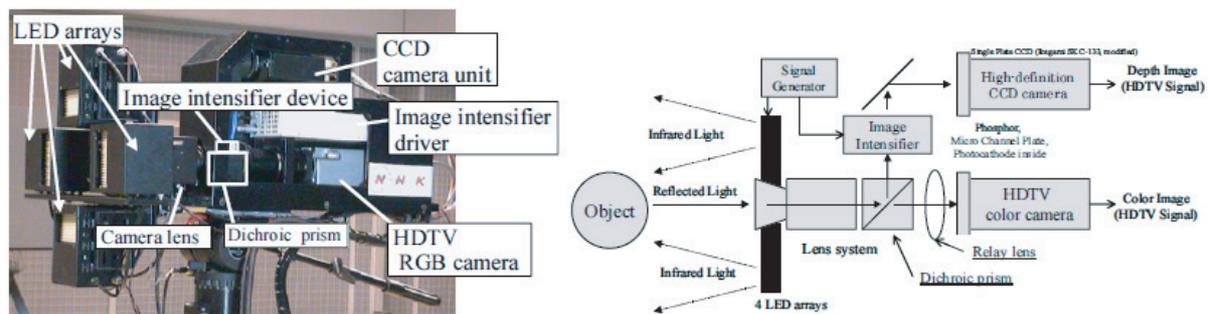


図 2.3: Axi-vision カメラの外観と構造

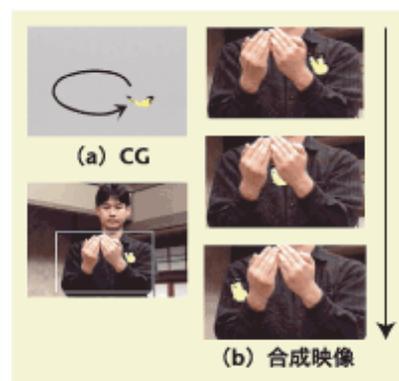


図 2.4: 人物と CG との遮蔽関係を表現している様子

2.2.2 距離情報を用いる手法

カメラと被写体間の距離情報を用いてオブジェクトを抽出する手法も提案されている。距離情報は、照明条件の変化に不変な情報量であり、色情報を用いるうえでの弱点がない。

具体的な実現方法としては、まず、ステレオカメラの利用が考えられる。カメラ同士の視差から距離を算出するものである。しかし、視差を得るための対応点探索に時間がかかる問題、均一または低コントラストな領域では視差が得られないなどのステレオ特有の問題に対処しなければならない。そのため、実際には、ステレオ自体は、背景モデル推定のために使い、あらかじめ撮影、計算しておいた視差と比較して、視差に変化があった部分を抽出する手法 ([5, 6, 7]) が提案されている。

一方、近赤外線カメラと、カラーカメラを組み合わせたシステムである Axi-vision (図 2.3) が提案されている。Axi-Vision は、色情報を取得するカメラに加え、近赤外 LED と近赤外を取得するための CCD カメラを組み合わせた色と距離を同時に取得できるカメラである。距離情報を取得できるため、物体と CG の遮蔽関係 (前後関係, オクルージョン) の再現ができることが強みである。遮蔽関係の再現の様子を示したものを図 2.4 に示す。しかし、Axi-Vision を用いて人物領域を抽出する場合、人物の場所が制限されることが弱点である。

2.2.3 温度情報を用いる手法 [9, 10]

人物領域を抽出する手法として温度情報を用いる手法も提案されている。これは、人物が一定レンジの体温を持つことを利用して抽出する手法である。温度情報を利用した人物検知の信頼性は高く、屋外監視用

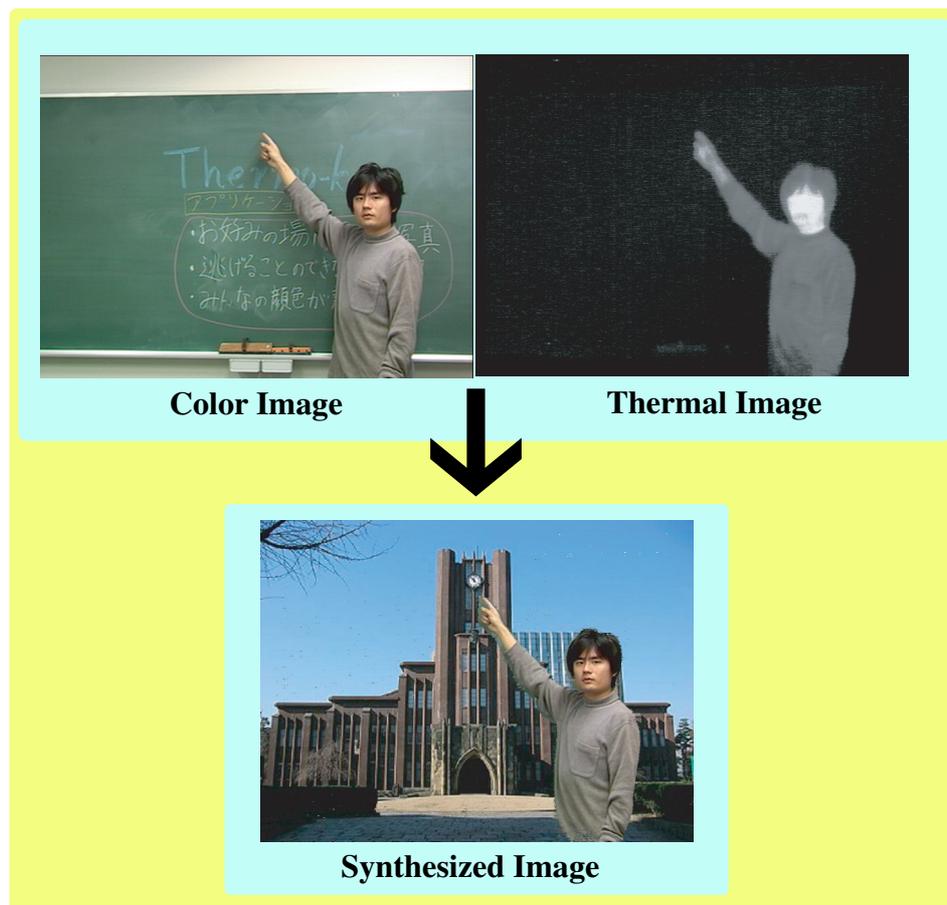


図 2.5: Thermo-key の概念図

途のための研究 [11] や、車載カメラとしての利用 [12] など、幅広い研究分野が存在する。中でも、温度情報と色情報を統合して人物領域を抽出する手法は thermo-key と呼ばれる。Thermo-key の概念図を図 2.5 に示す。図 2.5 は、第 3 章で述べる thermo-key 新システムで撮影した。

本論文のテーマであるので、まず、他の手法との比較をし、次に、従来の研究成果を紹介する。温度情報を利用することで、次に示す点で色情報を利用する手法と比較し、ロバストである。

- 背景の色環境を選ばない。
- 背景の色変化に依存しない。
- 人物の顔の向きなどに依存しない。

そして、距離情報を利用する手法と比較しても次の点でロバストである。

- 人物の立つ場所を選ばない。

このように、thermo-key を利用することでロバストな人物領域抽出が可能である。これを利用して、人物領域を chroma-key のように切り抜いて仮想空間に提示したり、実背景に対して、人物領域をモノクロにしたりというアプリケーションが可能となる。応用としては、自分の分身をビデオアバターとしてディスプレイの中に映して、遠隔地との通信を行うテレプレゼンスの研究、リアルタイム映像システムとしてのエンタテインメント志向のデモンストレーションなどが行われてきた。

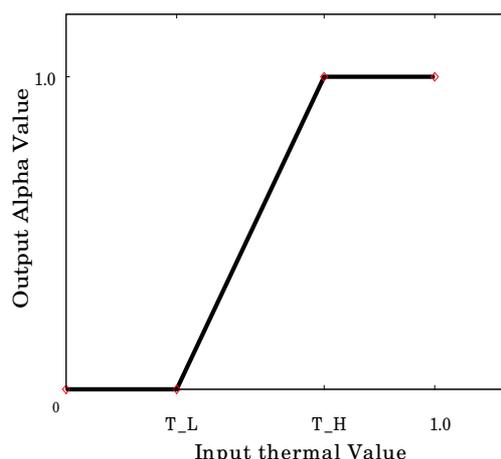


図 2.6: 温度の高い部分ほど高い α 値を与える線形写像 (ハイパスフィルタ)。

しかし、温度というアナログな情報を扱うので、以下に示す問題が課題としてある。

1. (人物領域内の) 温度画像に起伏が出やすい。2 値的な閾値処理だと人物と背景の境界付近でぎざぎざしたノイズが乗りやすい。
2. 温度が高い物体が画角内に存在するとその物体も抽出してしまう。
3. 服の部分の温度が下がり、抽出できないことがある。

1. の問題は、人物領域を切り抜いて他の背景に貼り付けようとするときに 2 値的な閾値を用いることが難しいことをいっている。ライブビデオにたいして実装することを考えても、2 値的な閾値処理では、最高の抽出精度を維持する閾値の値が安定しないため、有効ではない。そこで、図 2.6 に示す線形写像を利用して温度情報を α 値 (本論文では人物である確率を示すパラメータという扱いにする。 α 値が高いほど、人物である確率が高いことになる。) に写像し、それをもとに、 α ブレンディングを行う手法が適用されている。実装では、温度画像の温度分布が t_L から t_H ($t_L < t_H$) の範囲であったとき、得られた温度を $t(x, y)$ から輝度値としての出力 $T(x, y)$ を式 2.1 のように決定している。これは、ある一定以上の温度になると、 α 値が線形に上昇し、 α 値が最高になると、それ以上は α 値は変化しないというハイパスフィルタの概念と同じである。この手法の提案をまとめたものは、参考文献 [13] で紹介されている。この手法により、色と温度を組み合わせる画像合成を行う基盤ができたといえる。

$$T(x, y) = \begin{cases} 1 & (t_H \leq t(x, y)) \\ \frac{t(x, y) - t_L}{t_H - t_L} & (t_L \leq t(x, y) < t_H) \\ 0 & (t(x, y) < t_L) \end{cases} \quad (2.1)$$

2. の問題は、画角内に高温物体と人物が並存する場合の抽出における問題である。これに対しては、1. で考えた写像関数だけでなく、熱背景差分法が提案されている。具体例は、図 2.7 に示される。この状態で、1. の写像を利用した結果画像が、図 2.8 である。温度の高いポットが人物と一緒に抽出されてしまっていることが確認できる。これに対し、温度画像から背景温度画像の差分をとり、その後に写像関数を適用した結果が図 2.9 である。人物のみ抽出することに成功している。しかし、この手法では、人物が、高温ポットの手前に立つと、ポットのある部分だけ抽出できない、という問題が残っている。この手法 (熱背景差分) は、人物が重ならないという仮定がある限り、良好に人物のみを抽出することができているオプション機能を提供したといえる。この手法は、参考文献 [14] で紹介されている。



図 2.7: 画像内に高温物体と人物が並存する場合 (左: 温度背景, 中央: 温度, 右: カラー).

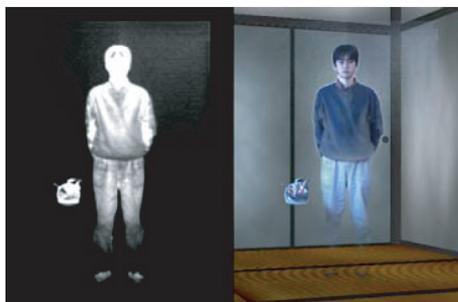


図 2.8: 線形写像 (ハイパスフィルタ) のみ適用.



図 2.9: 熱背景差分後に写像関数を適用.

3. の問題は、厚着をしている場合や、衣服のうち皮膚にほとんど触れない部分があるときに生じる。厚着の例を図 2.10 に示す。この場合、参考文献 [15] では、色情報と温度情報を併用し、K 平均アルゴリズム [16] を利用して低温人物領域の補完を試みている。具体的には、K 平均アルゴリズムを用いて実画像を色領域にしたがって領域分割し、その領域内での温度情報、すなわち α 値を一様化する。これにより、同じ色領域内 (ズボンやコートなど) における温度ムラを除去し、温度が低いために人物領域として判別されない領域の α 値を引き上げることで、図 2.11 のように、欠けてしまった領域を人物領域と認識させることができる。図 2.11 では、色背景差分情報も併用して、良好な抽出結果を得ている。これは、気温が低い状態で、人物の服の温度が下がってしまったときの、人物領域補完の検討と解釈することが可能である。

逆に、気温が高い状態での発汗などによる人物領域の部分的な温度低下も問題提起される。抽出が困難な例を図 2.12 に示す。この場合、参考 (発表) 文献 [49][50][51] では、非等方性平滑化フィルタを利用した人物領域の補完を試みている。この研究は筆者も参加している。この場合、抽出に失敗している部分については、服の一部や、髪の毛の一部であると仮定し、かつ、多くの場合、髪の毛の色や服の色は一様であるという条件の下で領域補完を提案している。具体的には、色情報のグラディエントを計算して、グラディエントが小さい場合は、色の変化が少ないと判定し、その場合に、温度情報を拡散させる。すなわち、もともと温度が高い部分と、高い色相関を持つ温度が低い部分の温度値を底上げする。

この処理を適用した結果を、図 2.13 に掲載する。髪の毛の色や服の色は一様であるという、上述の仮定の下では、有効に機能できると期待されるが、実時間システムとして動作させるためには計算速度の向上が目下の課題である。



図 2.10: 厚着をして抽出が困難な例 (左: カラー, 右: 温度).



図 2.11: 厚着の改善 (左: 抽出結果, 右: 改善された α 画像).

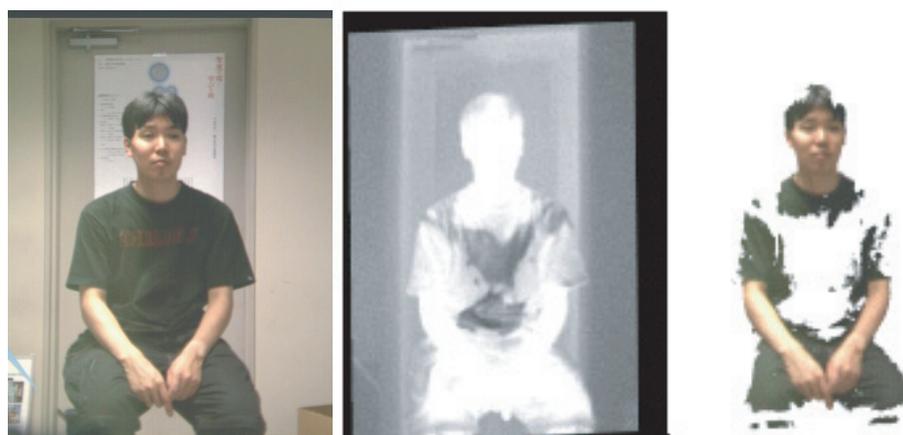


図 2.12: 薄着時における問題点の提起 (左: 入力カラー, 中央: 温度, 右: 抽出結果).



図 2.13: 非等方性平滑化フィルタを適用した結果（左：入力カラー，中央：拡散された温度情報，右：抽出改善結果）。

表 2.1: 人物領域抽出手法の分類

用いる情報	色情報		
手法	chroma-key	背景差分	肌色抽出
利点	抽出精度がよい	容易に実装可能	容易に実装可能
弱点	単一色背景が必要	色環境（背景，照明）の変化に弱い	目，髪など肌色以外の抽出が原理的に不可能
用いる情報	距離情報 (depth-key)		温度情報
手法	背景視差情報との差分抽出	Axi-vision	thermo-key
利点	遮蔽関係の表現が可能		色環境を選ばない
弱点	人物の場所が制限される		温度環境に過敏

2.2.4 まとめ

以上，人物領域抽出手法について，抽出で用いる情報に応じて分類し，紹介した．これらの手法をまとめると，表 2.1 のようになる．どの手法も長所と短所がある．本論文のテーマである thermo-key は，あいまいな人物領域抽出を温度カメラで行うために，色や人物の場所に依らないロバストな手法である．一方で，温度環境に過敏な抽出精度の改善が課題となる手法であるといえる．

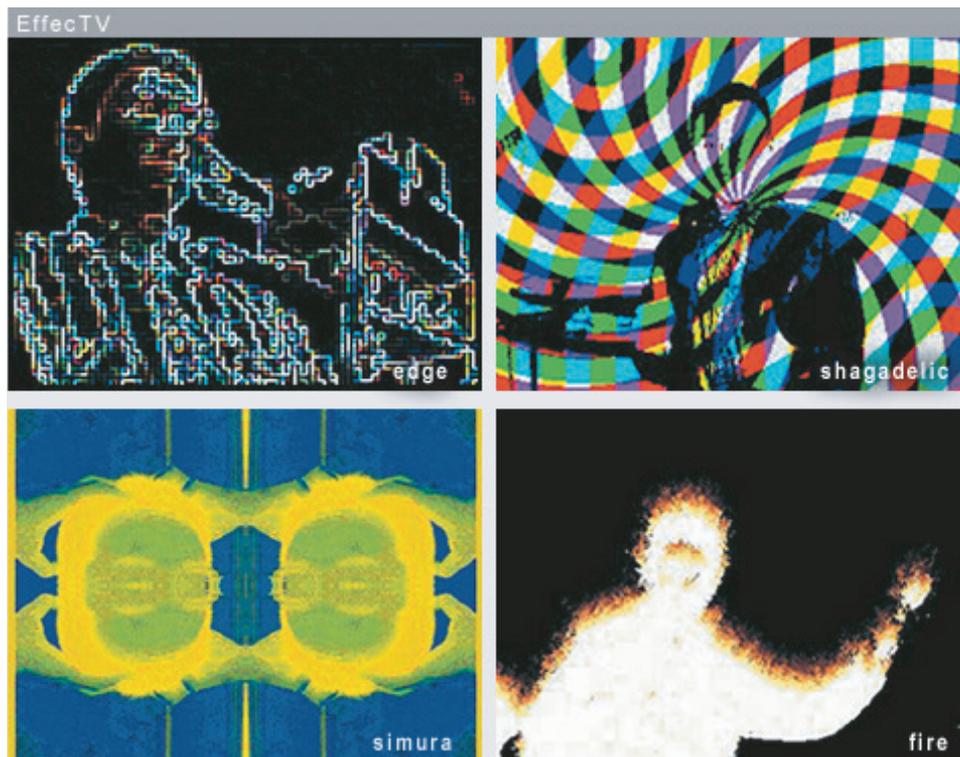


図 2.14: EffecTV の映像出力例.

2.3 映像表現に関する関連研究

ここでは、thermo-key と関連性の深い実時間画像合成システムの研究の紹介をする。

2.3.1 EffecTV：色センシングによる映像表現

EffecTV[18] は、カラーカメラとディスプレイを用いた実時間映像合成システムである。自分自身をカメラで写し、それに実時間で映像効果を付加することで、映像効果が付加された演出を、自分または、観客に提供できるエンタテインメント志向のシステムである。

映像効果をかける部分を抽出する手法として、背景差分を用いたり、フレーム間差分（動くところに映像効果）を用いたりしている。映像効果は多数のものが実装されており、図 2.14 に示すものはその一例である。

EffecTV では、図 2.15 に示すような 2 種類のカメラとディスプレイの配置によって、方向性が異なる演出を提案している。図 2.15（左）では、利用者はカメラの前に立ち、体を動かしながら同時にイフェクトのかかった自分の姿を正面のディスプレイで観ることができる。この場合の応用先は、街頭やショウウィンドウなどでのインタラクティブ玩具として設置するといったものが考えられる。一方、図 2.15（右）では、カメラは舞台上のパフォーマーを撮影し、イフェクト映像はパフォーマーの背後に投影され、観客はパフォーマーとディスプレイの両方を同時に観賞できる。この場合は、演劇や音楽演奏のステージで使用するといった応用が考えられる。

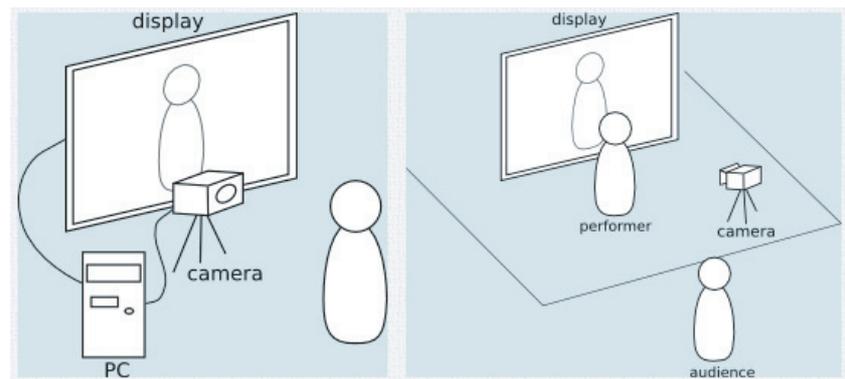


図 2.15: EffecTV におけるカメラとディスプレイの配置 (左: 自分自身を見るタイプ, 右: 観客に自分を見せるタイプ).



図 2.16: ZECTO を利用して遠近感を逆にした例.

2.3.2 ZECTO: 距離センシングによる映像表現

ZECTO[19] は, 色情報と距離情報を同時に取得できる Axi-Vision を用いた映像効果の研究である. 距離画像を利用することで, ライブモーションシーケンスにおける新しい表現手法を提案している. 具体的には, グレイスケールの距離画像を, その輝度に応じて多くのレイヤーに分ける. そして, たとえば, それぞれのレイヤーに応じて, 段階的に負の拡大定数を割り当て, この拡大定数を利用してカラー画像に対して計算を行うことで, 遠近感が逆の映像効果を実現している (図 2.16 参照).

2.3.3 ThermoPainter: 温度センシングによる映像表現

ThermoPainter[17] は, 筆などの道具をそのまま用いてコンピュータ上に描画できるインタフェースの研究である. 薄い紙面に暖かいものが触れたときの面上の温度変化を温度カメラで取得し, 接触領域の位置を計測するという方式を利用している. このため, 湯を利用することで筆やスプレーによる直感的な描画が可能となっている. 図 2.17 に, ThermoPainter による描画の様子を示す.

このインタフェースデバイスを用いて, 絵を描くシステム, 複合現実地球儀システムが開発されている. 絵を描くシステムでは, 指・筆・スプレー・吐息などでの入力, 同時多点入力を利用した絵の形状変形を行えるものとなっている. また, $150[cm] \times 90[cm]$ の大スクリーンへの描画, 暖かければ膨張し冷たけれ

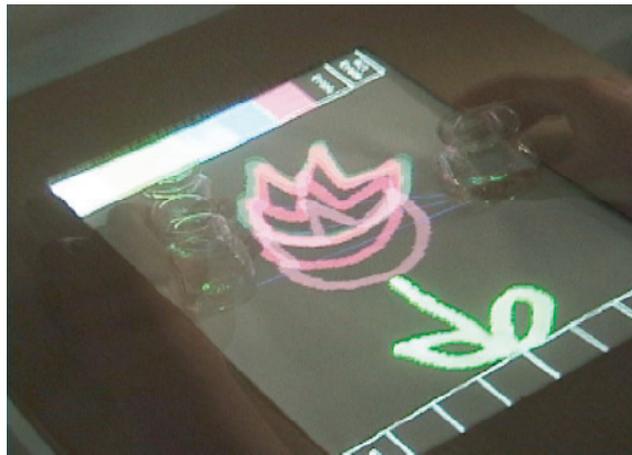


図 2.17: ThermoPainter による描画の様子.

ば収縮するという熱メタファを利用した画像変形も可能としている。複合現実地球儀は、立体形状タッチ面での操作を利用して、半球型スクリーンへ地球の像を投影し、それを自由軸周りに回転させることができるシステムである。

また、[17]の研究を行っている岩井らは、ThermoReality という作品も提案している。こちらは、温度カメラを利用して温度分布を得て、温度が高い領域（部分）に対して、プロジェクタを利用して実世界の該当部分に色効果を付加するものである。自分の体に対するフィードバックを得ることができる作品であるということが出来る。

2.3.4 3種の信号を利用した映像表現のまとめ

以上、色、距離、温度という3つのセンシングを利用した映像表現に関する研究の紹介をした。

色を利用する EffecTV は、ごく一般的ではあるが、色の変化を重視した多彩な表現を可能としており、実際に i-toy などでも応用されている。

距離を利用する ZECTO は、距離感という色とは別のパラメータを変えることにより、距離センシングならではの映像表現を可能にしたといえる。

最後に、温度を利用する ThermoPainter は、お湯などを使うことで、温かさという温度メタファと、映像表現を関連付けることに成功している。

結果として出力される映像表現が同じものとなることもある。しかし、どんな情報を計測するかによって、映像表現にも個性が現れてくることもわかる。

2.3.5 その他の映像表現

ここでは、その他の映像表現として、thermo-key での映像表現を考える上で重要であると思われるもの2つを紹介する。

まずは、マシュマロスコープ [20] を紹介する。マシュマロスコープの正式名称は、

『Another Time, Another Space in Marunouchi ～マシュマロスコープ』

岩井 俊雄 2002年」

である。マシュマロスコープは、時間や空間を歪ませることで可能な不思議な映像表現を実時間で体験できるものである。



写真提供:岩井俊雄

図 2.18: マシュマロスコープ (左上: 外観, 右上: のぞき窓を見た様子, 下: 映像効果のアップ)。

システム構成は、屋外に置くことにも配慮し、作品自体の防滴性、防塵性、機器の耐久性、映像の視認性を高めたものとなっている。特に、HDD のトラブルを防ぐために、HDD を利用しないシステムを構築したことが長時間の安定動作に寄与しているといえる。実際に、据え置きシステムとして、街中の歩道上においてあるもの図 2.18 (左上) から、様々な展示会での展示など、多くの展示を経験しているシステムであり、堅牢性において非常に優れたものであることがいえる。

映像効果としては、街角の風景の時間軸や空間をゆがませるものがある。歩いている人や自転車がその動きに合わせて奇妙にゆがむ図 2.18 (下)。また、人の動きがスローモーションや早まわしになったり、時間が前後になったりといったいろいろなイフェクトが各々のマシュマロスコープごとに設定され、街を歩く人々がそれぞれの場所で違った楽しみ方ができる工夫をしている。

次に、既存の液晶やプラズマといったディスプレイのなかから飛び出した映像表現について紹介する。先述した ThermoReality もその一つであるが、ここでは、光学迷彩 [21] を挙げる。

光学迷彩では、透明人間の映像効果を体験できる。具体的には、再帰性反射材を用いたコートなどを着ることでプロジェクタ光を再帰させ、目に入れることで透明人間の演出を可能にしている。光学迷彩の構成は図 2.19 のようになる。

光学迷彩ではディスプレイの中ではなく実体として人間が透明になる透明人間効果を、閲覧することができる。しかし、専用ののぞき窓が必要であったり、被写体は、専用の素材を着用する必要があるなど、素材レベルでの制約は大きい。カメラの視野内に入るだけで映像効果が始まる他の関連研究とは一線を画するものであるといえる。

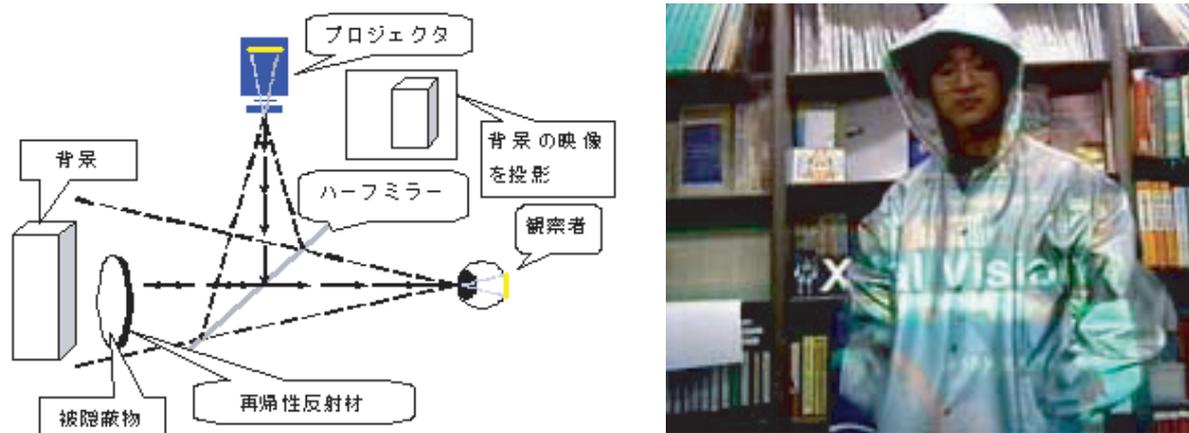


図 2.19: 光学迷彩 (左: システム構成, 右: 出力例) .

2.4 関連研究のまとめ

Thermo-key の研究は、温度を利用した人物領域の抽出を行うだけでなく、映像表現も含んだものであると筆者は考えている。人物領域の抽出精度を改善するといった入力系の基礎的な研究テーマがある一方で、thermo-key ならではの映像表現の検討も必須のテーマであるといえる。さらに、温度環境を変えることで thermo-key のロバスト性を検証、改善させることも重要なテーマである。

本論文では、上記の3つのうち先の2つのテーマについて述べる。Thermo-key システムの構築、改善など基礎的なテーマに関して第3章で述べ、映像表現について第4章以降で詳しく述べていく。

第3章

Thermo-keyシステムにおける 基盤技術の整備と基礎研究

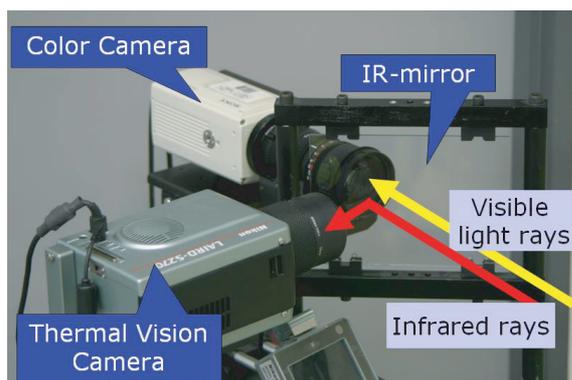


図 3.1: 初代 thermo-key システム.

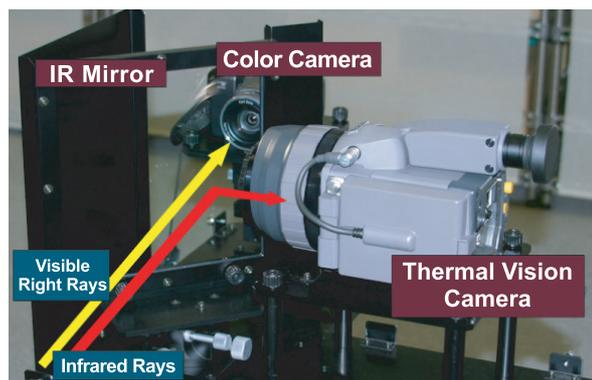


図 3.2: 新 thermo-key システム.

3.1 可搬型 thermo-key システムの開発

3.1.1 Thermo-key システムの開発の背景

Thermo-key システムでは、カラー情報と温度情報の双方を取得することが必要となる。現段階ではこれを実現するために、CCD カメラと温度カメラの2つのカメラが必要となる。さらに、2つのカメラ間の座標の整合性を取る(光軸を一致させる)ことも必要である。そこで、2つのカメラを、熱反射(赤外線反射)ミラーに対して光学的に共役な位置に置くことで、2カメラ間の座標の整合性を保たせている。これを示したものが図 3.1 である。これが初代 thermo-key システムである。

初代システムは、基本的にカメラ系を固定して撮影する、という目的で構築されているため、すぐカメラ、ミラーの位置がずれる、というシステムの物理面が不安定であった。これでは、カメラ系を動かしながら使用することは不可能であるし、部屋の外、屋外に持ち出して撮影するという実験が容易にはできなかった。屋外に持ち出せないのでは、thermo-key という手法のロバスト性の検証が屋外で行えないことになってしまうので、屋外にも持ち出せるシステムが必要であった。新システムを開発する動機は以上のようなことになる。

3.1.2 可搬型システムの仕様と旧システムとの比較

実際に開発するときには、旧システムで弱点であった、2つのカメラとミラーをしっかりと固定することが、可搬性の実現のために重要である。この機構を精密に、堅牢に行ってもらうために、温度カメラの製造企業である(株)NEC 三栄と共同開発という形を取って、可搬性のある thermo-key 新システム(以下 thermo-key システムと呼ぶときには、こちらの新システムのことを指す)を開発した。光軸一致のメカニズムは初代システムと同じである。新システムの写真を図 3.2 に示す。

まず、新システムにおける重要と思われる部分の仕様を説明する。

システム全体の仕様は表 3.1 のようになる。

各カメラの仕様のうち、視野角の情報を表 3.2 に示す。二つのカメラの視野角が異なっているので、カラーカメラで得られたすべての画素に温度の値を反映させることはできない。カラーカメラで得られた画素の一部に対して、温度カメラの画素を考慮して画像処理を行っていくことになる。

特に、温度カメラの仕様について、表 3.3 に示す。温度測定範囲、温度分解能などの点において、人物を抽出する上では十分な能力を持つカメラであると考えられる。

また、赤外線反射ミラーの反射特性について表 3.4 に示す。ミラーの特性は、旧システム、新システム共

表 3.1: システム全体の仕様.

名称	形式 (型番)	メーカー
温度カメラ	TH9100MVI	NEC 三栄
可視カメラ	DCR-HC1000	SONY
カメラ取り付けステージ	NS91-2002	NEC 三栄
赤外反射ミラー	ITO 膜コート TX シート	NEC 三栄
三脚 (ステージを取り付け用)	LZ-70M (2A)	Libec

表 3.2: 各カメラの視野角.

カメラ	温度カメラ	可視カメラ
水平方向視野角	約 21.7°	約 24.6°
垂直方向視野角	約 16.4°	約 16.4°

通のものとなる.

次に, 初代システムと新システムの処理能力やその他の点の比較表を表.3.5 に示す.

温度カメラの解像度が下がっているが, これは, VGA 相当の解像度を持つ温度カメラの製造を行っている企業がすでに存在しないことに起因する. 新システムを開発したことにより, システムに可搬性が付与されたので, 初代システムのときに比べて多くの屋外サンプル写真を撮ることができるようになった. これには, 撮像系が強固に固定されることで安定性が増したことが寄与している.

屋外撮影のための具体的なシステムを図 3.3 に示す.

新システムを開発したことに伴い, thermo-key システムから得られる画像データを扱う PC 部分のハードウェア, ソフトウェア機構も新しく開発した. これについて 3.2 で述べる.

3.2 Thermo-key を利用するための PC 側の構成

3.2.1 PC 側ハードウェア構成

Thermo-key システムを動作させるためには, 2つの映像データをリアルタイムに取得, 処理する必要がある. この点に関して, 初代システムと新システムのハードウェアの比較を, 表.3.6 に示す. 初代システムでは, 汎用のキャプチャカード (画像, 音声のキャプチャ用) GV-BCTV5/PCI を 2 枚 PCI スロットに刺

表 3.3: 温度カメラの仕様.

温度測定範囲	-20°C~100°C モード変更により, 0°C~250°C
最小検知温度差	0.02°C~0.15°C
検出器	2次元非冷却センサ (マイクロボロメータ)
測定波長	8~14 μ m

表 3.4: 赤外反射ミラーの反射特性.

透過率	400~700nm > 70% (可視)
反射率	3000~5000nm > 80% 8000~14000nm > 75%

表 3.5: 初代システムと新システムのカメラ性能の比較

バージョン	初代システム	新システム
カラーカメラの解像度	VGA(640 × 480)	VGA
温度カメラの解像度	VGA	QVGA(320 × 240)
可搬性	無し	あり
バッテリー駆動	無し	あり
屋外使用	困難	可能
重量	20kg 以上	12.5kg (三脚含まず)

していたが、新システムでは、4チャンネル同時に取り込み可能な、画像に特化したフレームグラバ PicoTetra-X を PCI-X バスに刺して利用している。専用のボードを利用することにより、メーカーの動作保証外の使用法をしていた初代システムでの利用と比較して、安定して4チャンネルまでビデオレート (30fps) で取り込み可能になったといえる。しかし、初代システム、新システムともに、同期制御を行ってはいない。これは、キャプチャのタイミングで、1フレームほどのずれが生じる可能性があることを示す。現段階では、同期制御の必要が急務であるほど合成画像の品質が落ちていないが、将来的な課題になる可能性はある。

3.2.2 ソフトウェアアプリケーションの開発

初代システムのアプリケーションと、新システムのアプリケーションの比較の表を表 3.7 に示す。誰でも扱うことが可能な直感的な入力を実現させるだけでなく、将来的に thermo-key システムを一つのハードウェアとして開発した場合に必要なスイッチの数、機能の検証も行いたいと考えたため、UI は GUI とした。また、コンピュータビジョンライブラリである OpenCV[22] を組み込むことにより、開発スピードの向上を図っている。なお、表示部分は、初代システム、新システム共に OpenGL を利用している。

表 3.6: 映像データ取得方法の比較 (初代 thermo-key システムと新 thermo-key システム)

	初代システム	新システム
構成ハードウェア	GV-BCTV5/PCI × 2	PicoTetra-X
データ取り込み方法	Video for Linux	付属 SDK
同期制御	無し	無し

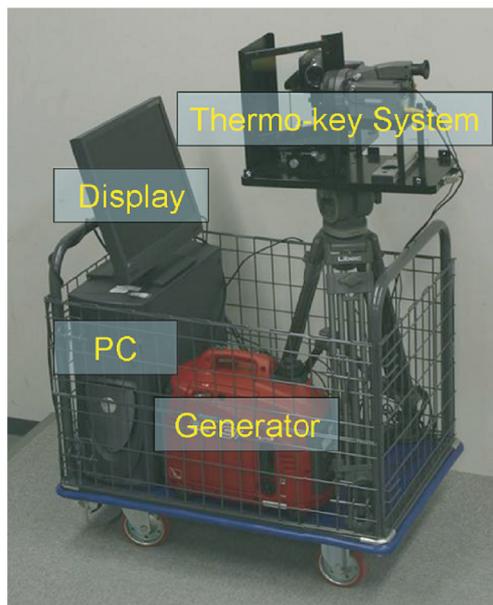


図 3.3: 可搬型 thermo-key システムの様子.

表 3.7: アプリケーションの比較 (初代 thermo-key システムと新 thermo-key システム)

バージョン	初代システム	新システム
開発 OS	Linux	Windows
UI	CUI(glut)	GUI(MFC)
映像出力	OpenGL	OpenGL
その他ライブラリ	無し	OpenCV[22]

アプリケーションの説明

まず、開発したアプリケーションの概要は以下のようになる。

1. コントロール用ダイアログを 1 つ持つ。
2. カラー画像、温度画像、 α マップ画像、結果画像、背景用静止画をすべて別ウィンドウで実時間で表示できる。

このソフトウェアを操作している様子の図を図 3.4 に示す。研究用ソフトウェアであるので、常に開発中という扱いである。

ダイアログを 1 つにし、それぞれの画像を別ウィンドウに出すことで、操作性と視認性の両立を図っている。表 3.8 に、アプリケーションの基本機能と GUI コンポーネントの対応を示し、これを説明するダイアログの図を図 3.5 に示す。

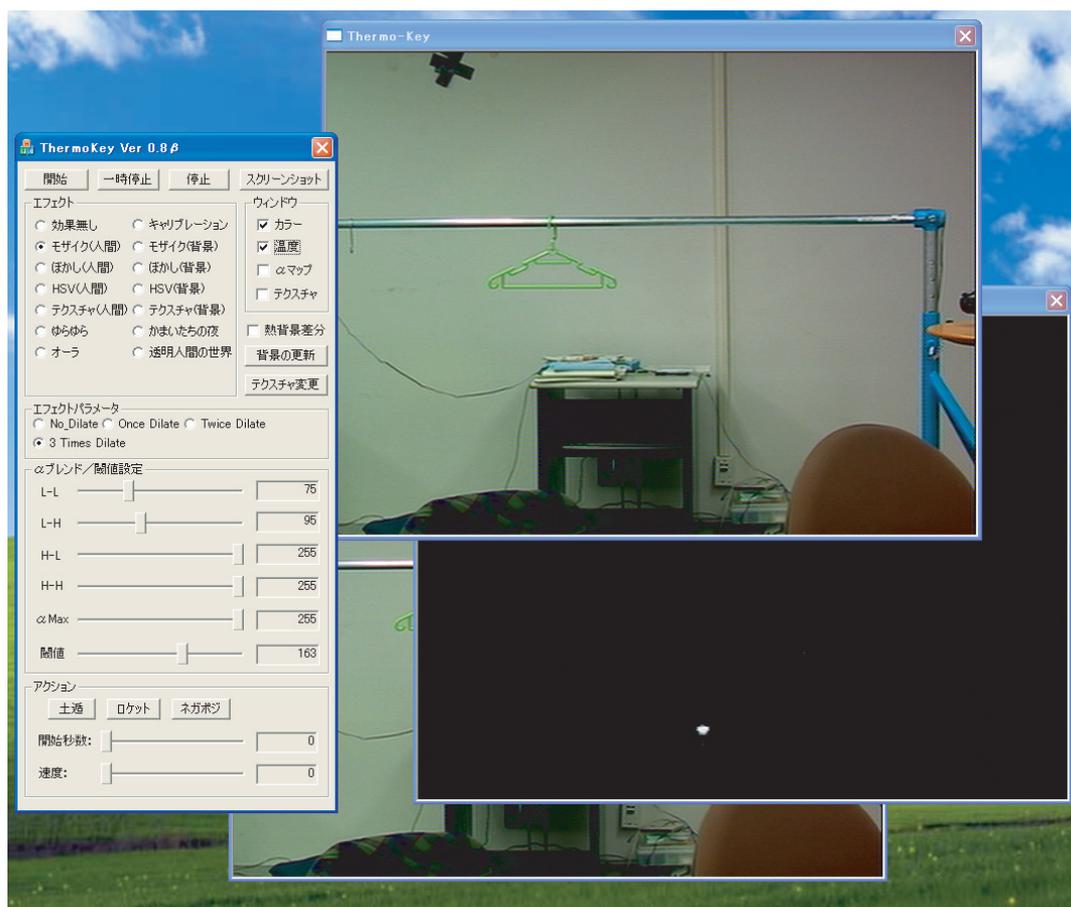


図 3.4: アプリケーションを操作中の様子.

機能の追加：バンドパスフィルタ

次に、基本機能の追加について述べる。従来の thermo-key では、人物領域の抽出のために、線形ハイパスフィルタの写像関数を利用していたが、新システムでは線形バンドパスの写像関数を利用している。この考え方は、相対的に温度が高い領域を抽出するモデルと異なり、ある特定のレンジの温度に属する物体を抽出することを視野に入れている。

図 3.6 がそのバンドパスフィルタの図である。実装上は、式 3.1 のように、バンドパス関数を定義して温度情報と α 情報のマッピングを行うことにしている。図 3.5 における、閾値変更用スライダーの L-L, L-H, H-L, H-H が式 3.1 における $t_{LL}, t_{LH}, t_{HL}, t_{HH}$ (図 3.6 では, $T_{LL}, T_{LH}, T_{HL}, T_{HH}$) に対応している。

$$T(x, y) = \begin{cases} 0 & (t_{HH} \leq t(x, y)) \\ \frac{t_{HH} - t(x, y)}{t_{HH} - t_{HL}} & (t_{HL} \leq t(x, y) < t_{HH}) \\ 1 & (t_{LH} \leq t(x, y) < t_{HL}) \\ \frac{t(x, y) - t_{LL}}{t_{LH} - t_{LL}} & (t_{LL} \leq t(x, y) < t_{LH}) \\ 0 & (t(x, y) < t_{LL}) \end{cases} \quad (3.1)$$

バンドパスを利用することによる利点は、次の 2 点が期待される。

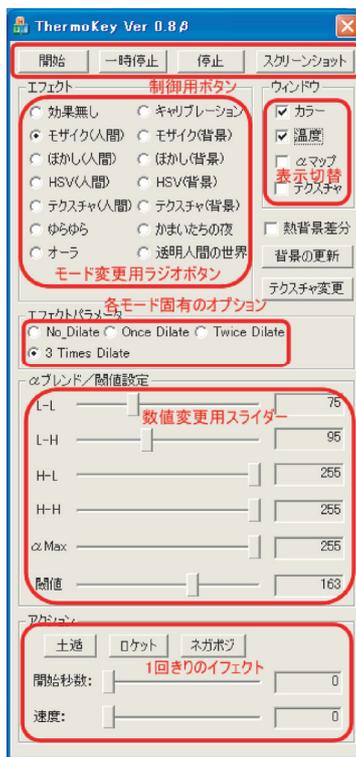


図 3.5: アプリケーションダイアログの機能説明.

表 3.8: 基本機能と使用した GUI コンポーネントの対応

機能	GUI コンポーネント
再生, 停止などのコントロール	通常ボタン
映像効果切替	ラジオボタン (効果の多重付加には GUI レベルでは非対応)
各種ウィンドウの表示, 非表示切り替え	チェックボックス (ウィンドウは隠したり表示させたりすることが可能)
閾値など数値の切り替え	スライダー

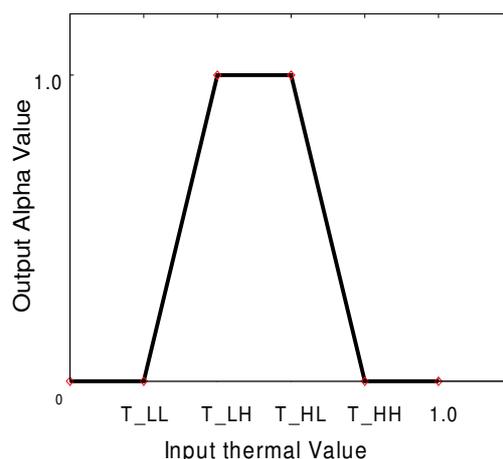


図 3.6: 特定の温度領域のみ高い α 値を与える線形写像 (バンドパスフィルタ)

1. 温度画像のエッジを鮮明に抽出できる。
2. 特定の温度領域のみを抽出した画像を得ることができる。

まず、温度測定における一般的な現象について説明する。温度情報は遠赤外線放射によって取得されているが、温度カメラに入ってくる情報は、赤外放射をする物質毎に実験的に求められた放射率に依存する。そして、放射率は測定角度（遠赤外線カメラに対する入射角度）と強い相関がある。たとえば、放射率の一般的な傾向として、直角から 50 度までの測定条件下では放射率は一定であるが、50 度を超えると、放射率が下がり始め、60 度を超えると急激に下がる、というものがある。したがって、多くの高温物体では、そのエッジ付近の温度が、見かけ上低く測定されることになる。

この情報は、温度カメラの製造企業である（株）日本アビオニクス社の資料をもとに説明しており、放射率の角度依存性についての図を図 3.7 に示す。

したがって、1. について、滑らかな面を持つ物体ならば、温度画像のエッジを鮮明に抽出できることになる。具体的には、エッジ付近の温度測定値が減少することを利用して、中間的な温度値をとっている部分のみ抽出することになる。線形なバンドパスフィルタを利用しているので、4つのパラメータを動かすことで、結果を観察しながらインタラクティブに抽出率を調整できる。また、特定の高温物体と中間温度物体、そして、低温物体が混在する場合でも、高温物体のエッジだけを取り出すことが可能である。エッジ検出フィルタを利用するときと比べて、用途に応じて柔軟に対応できると考える。図 3.8 に例を示す。この場合は、人物が高温、背景が中間温度、消火器が低温の物体である。温度画像のノイズの特徴としてはメディアンフィルタでも消すことのできない「大きなちらつき」が多い。したがって、エッジ検出フィルタの結果にもそれが現れてしまっている。一方、バンドパスフィルタを用いれば、良好なエッジ抽出が可能であることがわかる。このエッジ抽出の原理を利用したアプリケーションについては第 4 章の 4.4 で述べる。

次に、2. についてであるが、抽出対象を対象の温度に応じて切り替えたい要望があると考えられる。これは、第 2 章の最後で述べた検出対象モデルの考え方になる。第 2 章では、熱背景差分を利用して、高温物体と人物の画像から人物領域のみを抽出した。しかし、熱背景差分では、人物は、高温物体の手前に入ることにはできない。また、人物を抽出する場合ならば、50 度を超える物体の抽出は無意味である。これらより、バンドパスを利用したあるレンジの温度を持つ物体のみを抽出する手法の基礎検討を行う。

まず、単純にバンドパスをかけた状態の図を図 3.9 に示す。人物が高温物体（高温の液体が入ったコーヒーマグ）を持っている状態である。1. で述べたように高温物体の周囲にエッジが確認できる。2. の目的では、これを除去する必要がある。

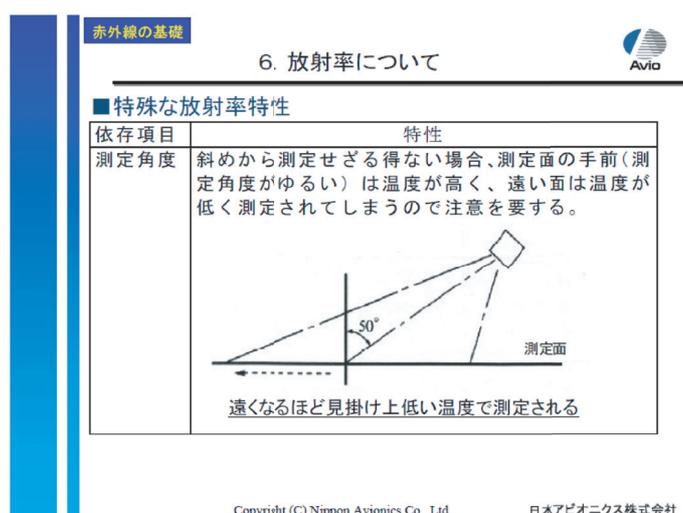


図 3.7: 放射率の角度依存性

ここで、高温物体のエッジを除去する必要があることが確認できる。そのため、以下のような処理を考える。高温物体の周囲に中程度の温度を持つエッジが存在するため、高温部の周囲を走査し、中程度の温度ならばその部分も高温物体領域として考える。具体的な実装は以下のようなになる。

1. 高温領域のみ抽出する（この段階ではエッジは抽出されない）
2. 「高温のピクセルが存在した場合、その上下左右の方向に中程度の温度を持つピクセルが存在するかチェックし、存在したらその部分も高温領域とする。」という処理を画像全体にかける。
3. 2. の処理を反復する。
4. 膨張した高温領域を得る。

このアルゴリズムを適用した結果画像を図 3.10 に示す。

エッジが除去されていることがわかる。この手法の欠点は人物領域に対して侵食が行われる危険があることであり、この点の改善が次の課題となる。

ここでは、バンドパスを用いることで、主にエッジ検出を良好にできることを示した。指定した温度レンジを持つ物体のみをロバストに抽出する手法の検討は、今後の課題という位置づけである。



図 3.8: バンドパスによるエッジ抽出 (左上: カラー, 右上: 温度, 左下: バンドパス, 右下: エッジ検出フィルタ (8近傍ラプラシアン)).



図 3.9: 単純なバンドパスの結果 (左: 入力温度画像, 右: 出力画像).



図 3.10: エッジ除去アルゴリズム適用結果.

3.2.3 映像保存フォーマットに関する基礎検討

従来の thermo-key では、実時間映像表現あるいは、静止画でのキャプチャを利用した映像効果再合成を行っている。ここで、色情報と温度情報の双方を持つ動画を保存して、映像効果を再合成できればデジタルコンテンツ基盤技術としての完成度を高められると考える。ここでは、上記のものを実現するものとして、カラー動画像として DV など様々なメディアに記録された情報の中から、温度情報を復元できるようにすることを考える。すなわち、カラー画像への温度画像の埋め込みである。圧縮や画像編集などへの耐性が課題となる。従来の電子透かし技術に比べると、埋め込むべき情報の量が多く、また画素単位での埋め込みが必要であるという点に特徴がある。

本項では、基礎検討として静止画レベルでの埋め込みを行うこととし、さらに、次に述べる条件で検討を行う。

■汎用性のための条件

- カラー画像を圧縮しても温度情報がある程度の精度で復元できること。
- 画像の一部を切り取っても、その部分の温度情報が失われないこと。(埋め込み場所の局所性)

■ thermo-key システム側の制約条件 (画像形式について)

- カラー画像は、VGA (640 × 480) 24-bit, 温度画像は、QVGA (320 × 240) 8-bit を入力とする。

■望まれる条件 (実用性)

- カラー画像の画質の劣化が少ないこと。
- 埋め込んだ温度画像の復元精度が高いこと。

カラー画像に対する温度画像の埋め込み手法を考えると、まず、温度画像を、カラー画像の、周波数領域に埋め込み手法と、空間領域に埋め込む手法が考えられる。

一般に、周波数領域に対する埋め込みは、電子透かし技術によく用いられている。順に検討を行う。

周波数領域に対する埋め込み

まず、周波数領域に対する埋め込みを検討する。

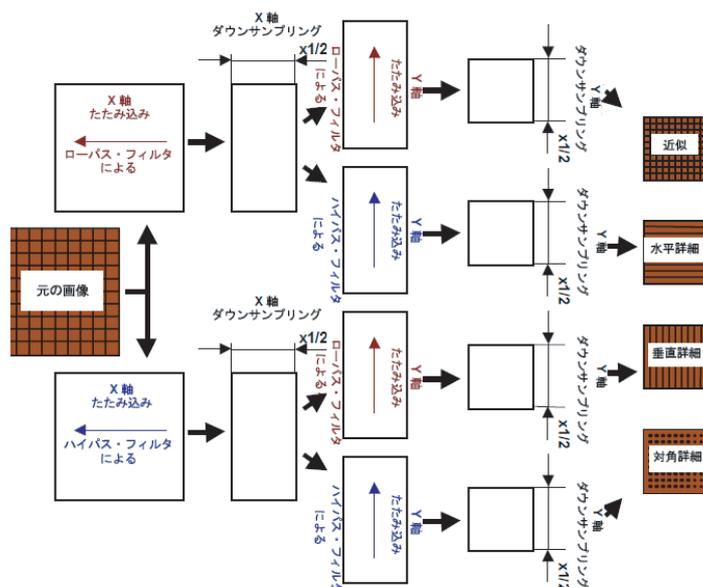


図 3.11: ウェーブレット変換の処理フロー (IPP のマニュアルから抜粋)。

すなわち、VGA24-bit の画像の周波数領域に対して、QVGA8-bit の画像を埋め込むことになる。手法としては、「半分の大きさの画像を埋め込む」ということ、「半分」ということに着目し、ウェーブレット変換を利用する。関連研究として、参考文献 [23] をあげる。参考文献 [23] は、モノクロ画像の中に、カラー情報 (文献中では Cr, Cb の情報) が含まれる手法をウェーブレット変換を用いて実現している。一般のビューアで開くとモノクロ画像 (R,G,B の値がほぼ同じ) であるが、そのモノクロ画像を YCrCb 空間にいる空間変換をしてからウェーブレット変換すると、カラー成分が Cr, Cb の高周波成分に存在し、それを抽出、再合成することでカラー画像を復元できるというものである。なお、ここで言及しているモノクロ画像とカラー画像は、同じ絵が写っているものである。埋め込む領域としてウェーブレット変換による高周波領域を利用しているため、見た目は VGA のモノクロ画像でも、実際の解像度は QVGA (LL 成分のみ) の解像度分しか情報は持っていないことになる。この手法は、同じ絵であるからこそ、ノイズが目立たない手法であると考えられる。

これを thermo-key に置き換えて考えるとき、カラー画像と温度画像には、エッジの類似性がある。よって、周波数領域への埋め込みとして、参考文献 [23] と同様に、ウェーブレット変換を利用してカラー画像への温度画像の埋め込みを検討する。この手法は、上に挙げた条件である、「圧縮耐性」「画像の一部を切り取っても、その部分の温度情報が失われないこと」の2つを考慮していない。手法の概要は次のようになる。なお、ウェーブレット変換自体は、Intel 社の Integrated Performance Primitives (通称 IPP) を用いている。順ウェーブレット変換の模式図を IPP のマニュアルから抜粋したものが図 3.11 である。逆変換の場合は、これを逆からたどればよい。

1. カラー画像の各チャンネルをウェーブレット変換する。(各チャンネルを構成する色空間には、チャンネルに重みを加えるときは、YCrCb 空間を利用して、CrCb チャンネルの値のみを変更するなどの工夫はありえるが、ここでは本質的ではない。) それぞれのチャンネルが、周波数成分、LL, LH, HL, HH 成分 (図 3.11 では、近似、水平詳細、垂直詳細、対角詳細となる。) に分解される。
2. 埋め込み処理として、LL (低周波成分) を除いた9つの成分のうち、一つ、または、複数の成分に演算を加える。(※)

Y		Cb		Cr	
LL	HL	LL	HL	LL	HL
LH	HH	LH	HH	LH	HH

図 3.12: Cr チャンネルの HH 成分に埋め込む場合.

Y		Cb		Cr	
LL	HL	LL	HL	LL	HL
LH	HH	LH	HH	LH	HH

図 3.13: LL 成分以外に埋め込む場合.

3. 逆ウェーブレット変換をして，元に戻す.

(※) の部分においては複数のアプローチが考えられる. 温度画像の情報をそのまま埋め込んでしまう手法 (たとえば温度画像で HH 成分を上書きする.) や, カラー画像の周波数成分に加算, 減算などの演算を加えて, 温度情報と等価な情報を持たせる手法がある.

実際に実験的に実装を行ってみる. テスト実装は, 以下の3通りの手法を用いた.

1. 温度画像でカラー画像の Cr (Cb でもよい) 成分の高周波領域 HH 成分を上書きする. 抽出時は Cr 成分の HH が温度画像となる.
2. 温度画像の輝度を $\frac{1}{9}$ にして, カラー画像の各チャンネルにおける LL 成分以外の9つの領域を, 輝度を小さくした温度画像で上書きする. 元の温度画像は, カラー画像の各チャンネルにおける LL 成分以外の9つの領域の和として抽出される.
3. (温度画像の色深度を落とす) 温度画像の輝度を $\frac{1}{9}$ にして, カラー画像の Cr (Cb でもよい) 成分の高周波領域 HH 成分を上書きする. 抽出時は Cr チャンネルの HH 成分の輝度を9倍にしたものが温度画像となる.

1. の手法は, 図 3.12 中の緑色の部分を, 温度画像そのもので上書きする. 2. の手法は, 図 3.13 中の緑色の部分を, 温度画像の輝度を $\frac{1}{9}$ にした画像で上書きする. 加算することで復元されるという意味では, 埋め込む温度画像の情報量の減少はないことになる. 3. の手法は, 図 3.12 中の緑色の部分を, 2. の手法で利用した温度画像の輝度を $\frac{1}{9}$ にした画像で上書きする. 温度画像の色深度が減少していることになる. その代わりに, カラー画像の画質劣化が少ないことが期待される.

実際に実験を行った結果を掲載する. 実験に使用した画像を, 図 3.14 に示す. そして, 1. の手法の結果を図 3.15, 2. の手法の結果を図 3.16, 3. の手法の結果を図 3.17 に示す.

手法 1 では, 特定の領域に温度画像をそのまま埋め込むために, カラー画像の画質劣化が鮮明に出ている. 一方, 手法 2 では, 分散させて温度画像を埋め込むために, カラー画像の画質劣化は手法 1 ほど大きくない. 以上が, 温度画像の情報量を落とさずに埋め込みを行った結果である. また, 手法 3, すなわ

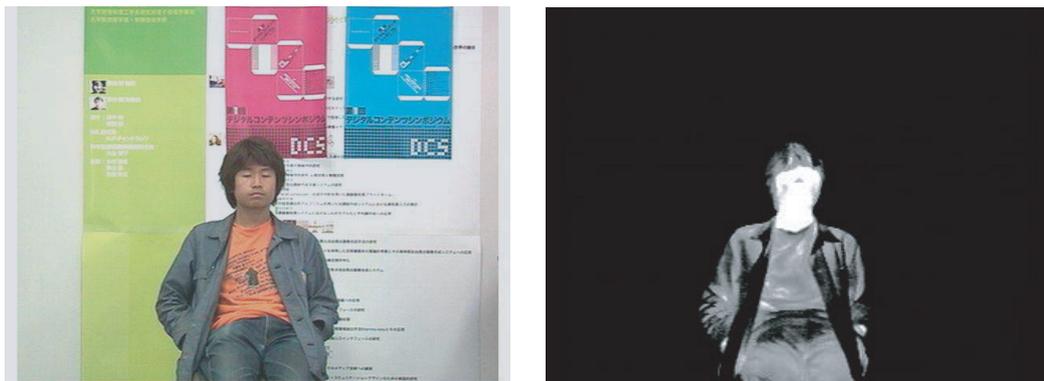


図 3.14: 埋め込みに使うカラー画像（左）と温度画像（右）.

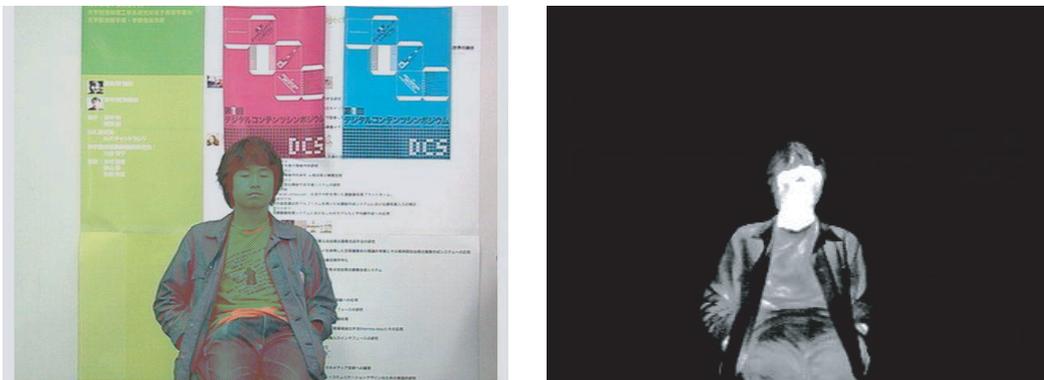


図 3.15: (手法1) Cr チャンネルの HH 成分を温度画像で上書きした結果（左）とその画像から抽出した温度画像（右）.

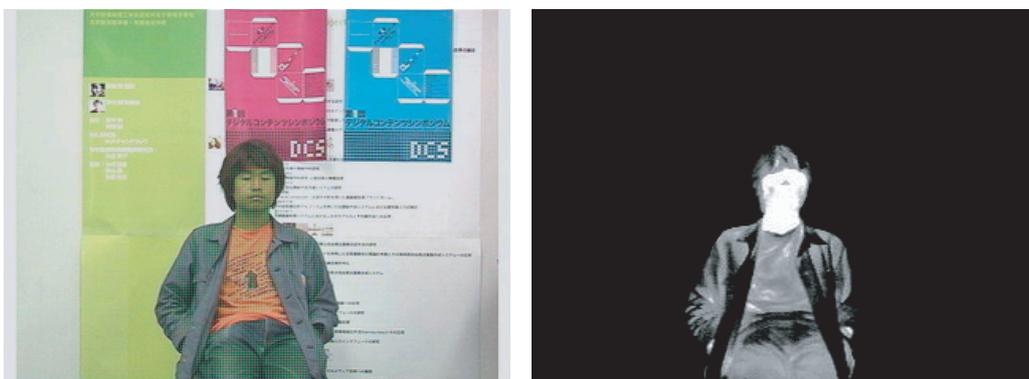


図 3.16: (手法2) 和を温度画像にするように埋め込んだ結果（左）とその画像から抽出した温度画像（右）.



図 3.17: (手法 3) Cr チャンネルの HH 成分を $\frac{1}{9}$ の輝度の温度画像で上書きした結果 (左) とその画像から抽出した温度画像 (右) .

ち、特定の領域に情報量を落とした温度画像を埋め込んだ場合は、カラー画像の画質劣化がさらに小さいことがわかる。さらに、温度画像の劣化に関しても、thermo-key システムが、温度測定を厳密に要求せず、常に温度画像を目視することで抽出を行っていることを考慮すれば、著しく大きいものではないといえる。

手法 1, 2, 3 は、カラー原画像の周波数成分に対して温度画像で上書きすることで埋め込みを行うものであった。そのため、元のカラー画像の情報は、温度情報を埋め込む領域においては完全に失われるものとなる。ここで、元のカラー画像の情報を活かしつつ、温度画像を埋め込む手法について検討する。具体的には、以下のようになる。これを手法 4 とする。

手法 4

1. LL 成分以外の各周波数成分をすべて加算する。加算した値を SUM とする。
2. SUM を対応する温度画像の輝度にするために、加減算する。LL 以外の計 9 つの成分を利用する場合は、SUM と温度画像の輝度の差の $\frac{1}{9}$ を加減算することで温度画像を埋め込むことが可能である。

これにより、カラー画像の輝度分布を活かしつつ埋め込むことにより、カラー原画像の画質劣化をさらに抑えられればよいと考える。手法 4 による実験結果を図 3.18 に示す。結果として得られるカラー画像の品質の問題では、図 3.16 のときと大きな変化は無い。総じて、埋め込み後カラー画像の品質を維持しつつ、温度画像の情報量を落とさないで埋め込むことには大きな課題が残る結果となっている。

ここでは、高周波領域に温度画像を埋め込む手法について検討した。そして、温度画像の色深度を 8bit、そして、その $\frac{1}{9}$ にすることで、埋め込み後カラー画質の変化を検討した。しかし、高周波領域に埋め込む手法は、原理的に高周波カットによる圧縮耐性が弱く、一般に画像の一部を切り取っても、その部分の温度情報が失われないことも実現できない。

そこで、次項で、「圧縮耐性」、「画像の一部を切り取っても、その部分の温度情報が失われないこと」という先述の条件を満たす手法について検討する。

空間領域に対する埋め込み

ここでは、空間領域に対する埋め込みについて検討を行う。すなわち、画像の輝度をそのまま変更することになる。

カラー画像が、温度画像の 2 倍の大きさであるので、カラー画像 4 ピクセル ($24 \times 4 = 96$ bit) の情報を利用して 8 bit を埋め込むことを考える。また、画像全体の相関などは利用せずに、対応するカラー画素

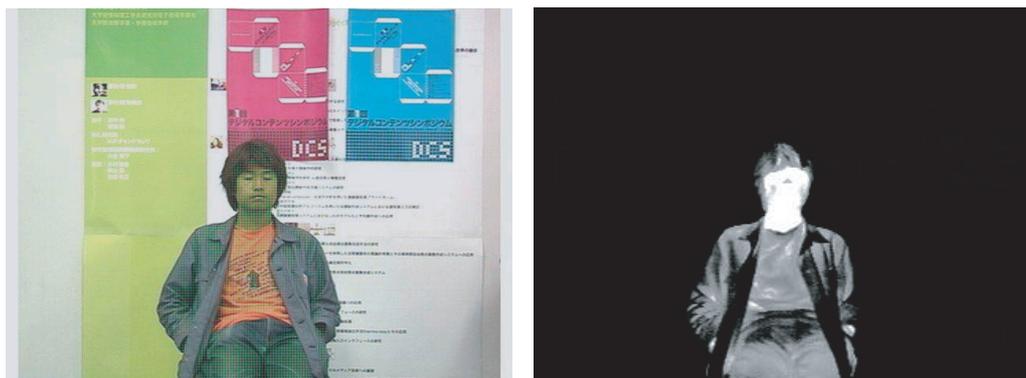


図 3.18: (手法 4) 差分を計算して値をずらす手法による埋め込み結果 (左) とその画像から抽出した温度画像 (右)。

に温度情報を 1 つずつ埋め込む方式を考える。これにより、条件「画像の一部を切り取っても、その部分の温度情報が失われないこと。」を考慮したことになる。

また、符号化耐性を考えるとき、符号化時にはピクセルの輝度値が変化するので、それに耐性のある手法を考える必要がある。輝度列中のある特定のビットを入れ替える手法は、符号化に対する耐性がないので採用できない。

そこで、空間領域に埋め込む手法で、上記のものを考慮するものとして、剰余を利用した画素単位の処理方式を提案する。具体的には、以下の通りである。

カラー原画像の 4 つのピクセルの RGB 値を、合計 12 Bytes の情報として $C_i (i = 1, 2, 3, \dots, 12)$ と表記する。ここで、法を A とする剰余を考え、次のように新たな数 M を考える。ここでは、 $A = 256$ とする。

$$M = \left\{ \sum_{i=1}^{12} C_i \right\} \bmod A \quad (3.2)$$

これに対して、埋め込みたい温度情報を T として、

$$M = \left\{ \sum_{i=1}^{12} C'_i \right\} \bmod A \quad (3.3)$$

となるように C_i の値、すなわちカラーを変更する。簡単のため、本稿では、 $E = T - M$ と置いて、 $\frac{E}{12}$ ずつ均等に C_i に加算する。12 で割ったときの剰余についても、その値に応じてカラーチャンネルに 1 ずつ加算することで反映させる。カラーの変更を各画素・各色成分に分散することで目立たなくさせることを期待しているが、より適切な分配方式については今後の課題である。変更後のカラー情報からは、式 3.3 を利用して温度情報を復元することが可能となっている。

カラー画像を圧縮した場合に、各画素・各色成分に生じる誤差は、統計的にはゼロを中心とした分布になると考えれば、12 Bytes の情報を足し合わせる本手法は、各画素・各色成分の誤差が相殺しあうことで、誤差の影響を受け難い手法と考えることができる。しかし、剰余の性質上、例えば剰余 0 に誤差 -1 がのると、剰余は $A - 1$ (ここでは 255) という大きな値に突然変化してしまうという問題がある。そこで、式 3.4 のように 8bit の温度情報を 7bit に丸めて埋め込むことにする。この丸め処理によって、埋め込む値が 64 から 191 という範囲に限定され、先に述べたような大きな誤差を防ぐことができる。

$$T' = \frac{T}{2} + 64 (0 \leq T \leq 255 \rightarrow 64 \leq T' \leq 191) \quad (3.4)$$

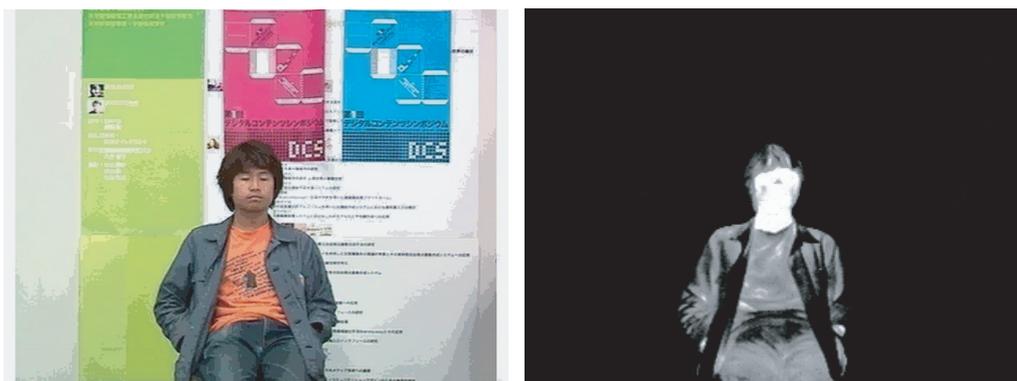


図 3.19: 剰余を利用した手法の埋め込みの結果のカラー画像（左）ととその画像（無圧縮）から抽出した温度画像（右）。

このアルゴリズムを元の実験を行った結果を図 3.19 に示す。ここで、情報圧縮への耐性を調べるため、図 3.19(左)のカラー画像を JPEG 符号化し、圧縮されたカラー画像から温度画像を復元した結果を図 3.20 に示す。提案手法は、温度に応じてカラー情報を量子化する方法と捉えることができる。このため、図 3.19(左)の結果画像では、このような量子化の影響を見て取ることができる。また図 3.20 より、画像圧縮に対する耐性としては、例えば $\frac{1}{10}$ に圧縮されたカラー画像からでも、充分に利用可能な温度情報を復元できるという感触が得られた。

圧縮耐性を維持しつつ埋め込み後カラー画像の品質の改善を行うために、温度画像の色深度や解像度を落とすことを考える。たとえば、埋め込む温度画像を 160×120 にすることや、色深度を落とす上では、温度画像を 2 値画像や $2bit$ の色深度にして埋め込むことが考えられる。解像度を落とせば、埋め込み前と埋め込み後のカラー画像の輝度変化が少なくなり、高画質を維持できると思われるが、圧縮による輝度変化には弱くなる。同様に、色深度にしても、式 3.4 を改良して、圧縮による輝度変化に対応する必要がある。ここでは、先のウェーブレット変換の場合と異なり、局所的な抽出、圧縮耐性の両立のために、温度画像の情報量と埋め込み後カラー画質、そして、圧縮耐性の関係を検討する。

まず、温度画像の解像度を落とし、 160×120 にして、埋め込むことを検討した。実験結果を図 3.21 に示す。埋め込み後カラー画像の品質については向上しているが、図 3.22 より、 $\frac{1}{5}$ に圧縮したカラー画像からの抽出（圧縮耐性）に難があることが確認できる。

一方、温度画像の色深度を落とす手法を考える。このとき、たとえば、温度情報を 0 と 1 の $1bit$ の情報にして考えるとき、圧縮耐性を考慮すると、剰余を 0,1 として考えることはできない。圧縮耐性を維持するため温度が 0 といっても、剰余は、ある程度バンド幅を持っている必要があるといえる。また、thermo-key システムでは、2 値的な ($1bit$) 閾値処理よりも、多値的な ($2bit$ 以上) 処理が望まれていることを考慮する (2.2.3 参照) とバンド幅を大きく取れる $2bit$ の情報を持つ温度画像の埋め込みの検討を実験的に行う。

$2bit$ の埋め込みを行うとき、図 3.23 のように、剰余に応じた温度情報のマップを考える必要がある。ここで、 α はオーバーフローのための予約領域の大きさであり、そして、 β は符号化時のずれの許容範囲の大きさである。式 3.4 は、 α が 64、 β が 0 の場合であるといえる。ここでは、基礎検討として、 $\alpha = \beta = 32$ の場合を検討する。埋め込む温度画像の大きさは QVGA とした。実験結果のカラー画像を図 3.24 に示す。埋め込み後のカラー画像の品質がよくないことが確認できる。

そこで、上記の二つのアプローチである、「温度画像の解像度を半分にする」と、「温度画像の色深度を下げる」ことを複合的に利用することを考える。温度画像の解像度を下げることで埋め込み後カラー画像の画質を維持しつつ、温度画像の色深度をバンド幅を考慮して下げることで圧縮耐性を持たせることを



図 3.20: 符号化後のカラー画像から復元した温度画像 (カラー画像の圧縮率 左上: $\frac{1}{5}$ に圧縮, 右上: $\frac{1}{10}$ に圧縮, 左下: $\frac{1}{20}$ に圧縮, 右下: $\frac{1}{45}$ に圧縮).

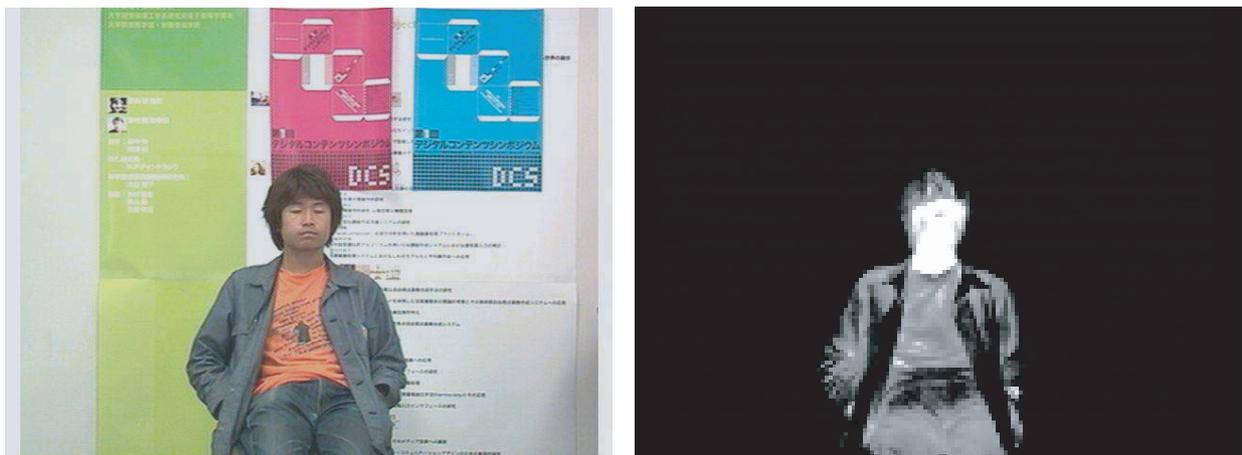


図 3.21: 温度画像の解像度を半分 (160×120) にして埋め込み (埋め込み後カラー画像 (左) とこの画像から抽出した温度画像 (右)).

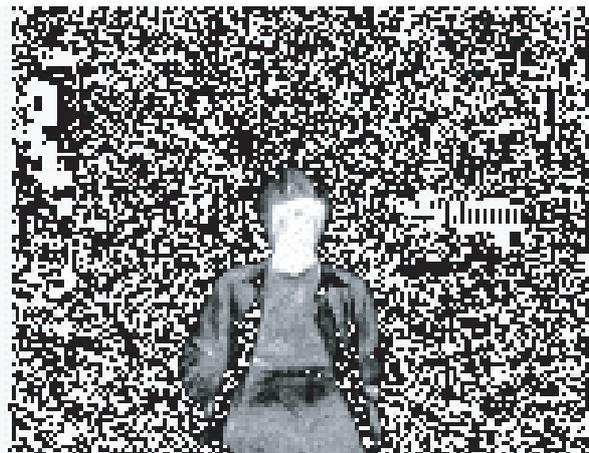


図 3.22: 図 3.21 のカラー画像を 5 分の 1 の容量に圧縮したもから温度画像を抽出した結果

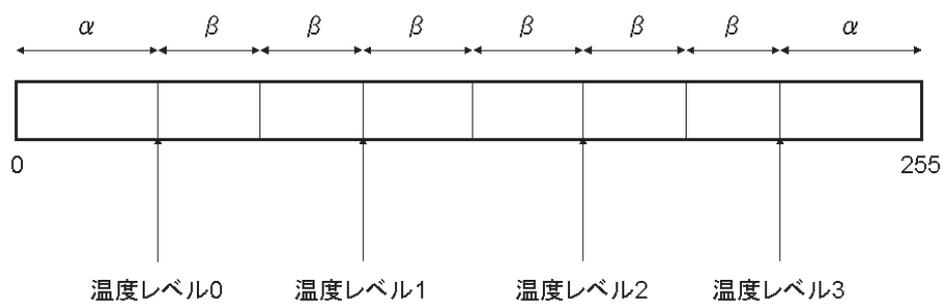


図 3.23: 温度レベルと設定する剰余の場所のモデル

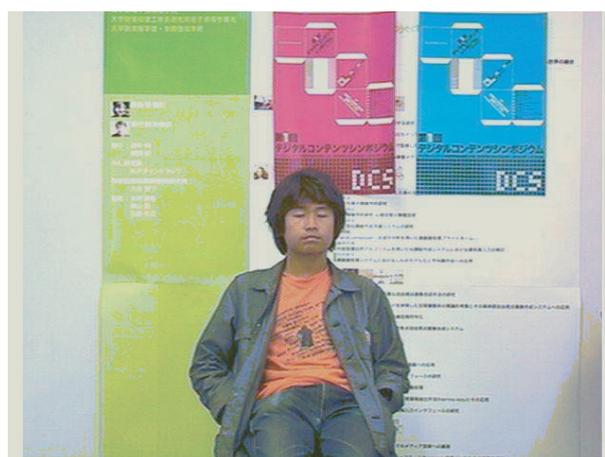


図 3.24: 温度画像の色深度を 2bit に落として埋め込んだ結果のカラー画像.

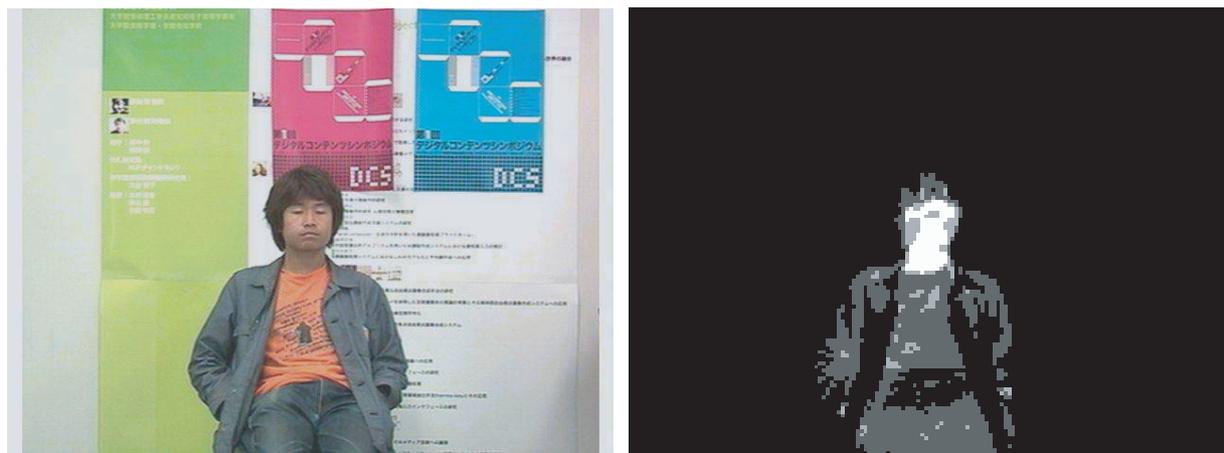


図 3.25: 温度画像の解像度と色深度を下げた埋め込み（埋め込み後カラー画像（左）とこの画像から抽出した温度画像（右））。

狙う。

実験の条件は次のとおりである。埋め込む温度画像の解像度は 160×120 、色深度は $2bit$ である。実験結果を図 3.25 に示す。

次に、図 3.25（左）のカラー画像を JPEG 圧縮して温度画像を抽出することで、提案手法の圧縮耐性を調べる。圧縮耐性実験の結果を図 3.26 に示す。図 3.20 のときでは、圧縮率が 10 倍のときにも対応できるが、提案手法は、約 $\frac{1}{5}$ まで対応できることが確認できる。

温度画像の解像度と色深度を両方下げて埋め込む手法により、埋め込み温度画像の解像度を下げることによって「埋め込み後カラー画像の品質」を維持しつつ、埋め込み温度画像の色深度を下げることで「圧縮耐性」を持たせることができた、といえる。

この図 3.26 で利用した手法を別の画像に対して適用した結果を図 3.27 に示す。図 3.27 より確認できることは、2 値的溫度画像の輝度分布にノイズがのっていることである。thermo-key における抽出において大きな影響を与えるものではないが、検討課題であるといえる。また、圧縮耐性に関しては、 $\frac{1}{10}$ に圧縮したカラー画像から抽出した温度画像まで、良好に温度画像が抽出できていることが確認できる。

以上をまとめると、空間領域における埋め込みにおいて、温度画像の解像度と色深度を両方下げて埋め込む手法を利用することで一定の実用的な結果を得たと考える。

映像保存フォーマットに関するまとめ

ここでは、カラーと温度を同時に扱う上での映像保存フォーマットとして、カラーに対する温度の埋め込みの基礎検討を行った。具体的には、周波数領域と空間領域について埋め込みを検討した。本項では、いくつかの条件を考え、それに対する手法を検討することにしたが、周波数領域に対する埋め込みでは、基本的には圧縮に対する堅牢性、埋め込み場所の局所性に関しては考慮していない。これに対し、設定した条件をすべて考慮した手法として空間領域に対する埋め込みを検討した。空間領域への埋め込みに付いて、現時点では、理論的な考察を加えるまでにはいたっていない。さまざまな状況の画像に対する堅牢性を考える上で、理論的考察が課題となると考えている。

また、この保存形式に関しては必ずしも温度画像専用というわけではないことを付記したい。たとえば、カラー画像に対して距離画像を埋め込むことも可能であると考えられる。さらに、1つのカラー画像に対して距離画像と温度画像の2つを埋め込む、ということも将来的に可能にすることも課題であると考えている。

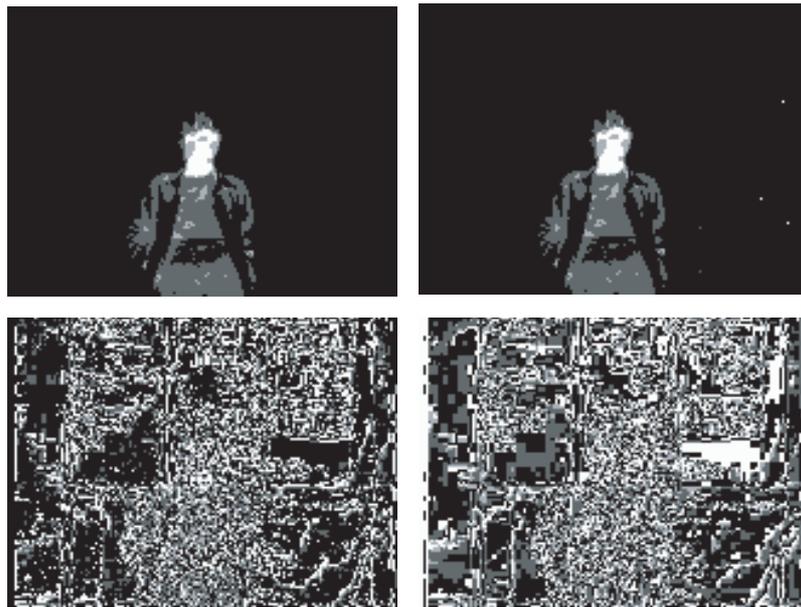


図 3.26: 温度画像の解像度と色深度を両方下げて埋め込む手法の圧縮耐性 (カラー画像の圧縮率 左上: $\frac{1}{5}$ に圧縮, 右上: $\frac{1}{10}$ に圧縮, 左下: $\frac{1}{20}$ に圧縮, 右下: $\frac{1}{45}$ に圧縮).

3.3 まとめ

本章では, thermo-key における基盤技術の整備について述べた. 新システム (可搬型システム) になり, ハードウェア部分の刷新, アプリケーションの開発を行ったことについて述べた. そして, 基礎研究として, 映像保存フォーマットに関する基礎検討を行った.

特に, 埋め込み技術を利用した映像保存フォーマットの研究は, 温度情報と色情報を統合的に扱うことができる意味でさらなる検討が期待されると考える.

第4章, 第5章では, thermo-key における映像表現に関して述べる.

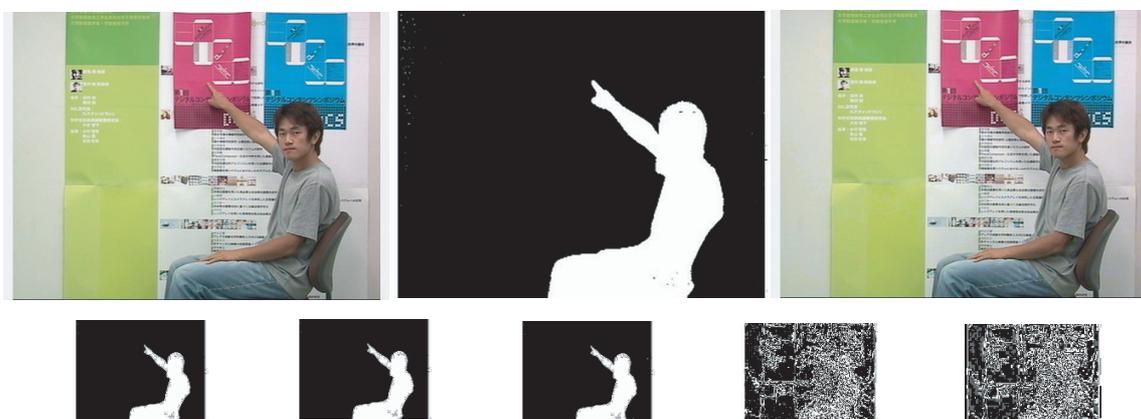


図 3.27: 2 値的な温度画像を持つ場合の例 (上段左: 入力カラー画像, 上段中央: 入力温度画像, 上段右: 埋め込み後カラー画像, 下段左から圧縮後カラー画像から抽出した温度画像: 無圧縮, $\frac{1}{5}$ に圧縮, $\frac{1}{10}$ に圧縮, $\frac{1}{20}$ に圧縮, $\frac{1}{45}$ に圧縮)

第4章

Thermo-key を利用した デジタルコンテンツの制作

4.1 はじめに

Thermo-key を利用すれば、さまざまな映像表現が可能であり、そして、それをリアルタイムに閲覧することができる。これは、エンタテインメント、放送など、さまざまな応用が可能であるといえる。本章では、この特性を活かしたデジタルコンテンツである Thermo-NINJA、透明人間の世界という2つのコンテンツの紹介を行う。

4.2 Thermo-key における映像効果

Thermo-key のプログラムでは、実時間でカラー画像と温度画像（これを現在のカラー画像、温度画像と呼ぶことにする）を取得していると共に、数フレーム前までの過去のカラー画像、温度画像と、背景用のフレーム、そして、適宜テキストを保持している。これらの情報を利用して実現される映像効果についてアプリケーション側から説明をする。

Thermo-key における映像効果は、仮想背景モードと、実背景モードの2タイプに分類できる。仮想背景型とは、背景用のフレーム情報を利用し、実背景型とは、現在のカラー画像を利用するものである。なお、温度画像やカラー画像に適宜フィルタをかけることも考えられる。

仮想背景モードでは、仮想背景の上に、人物領域を重畳する chroma-key のような効果が実現可能である。さらに、人がいない状態であらかじめ取得しておいたその場の背景画像を仮想背景として用いれば、透明で熱を遮断するシートなどを利用することで、透明人間アプリケーションが可能である。しかし、人物領域の抽出精度が低下すると、ノイズが目立つという欠点がある。原理的に、背景が固定されてしまう（まったく変化しない）という特性を持つ。

一方、実背景モードは、現在のカラー画像に、温度画像を利用して映像効果を付加するものである。人物領域または、背景領域だけモノクロにするなど、色を変化させる効果が可能である。また、第5章で詳しく述べるが、人物領域にモザイクをかけることも、現在のカラー画像に温度画像を利用して局所的に映像効果を付加するものであり、実背景モードに分類できる。

これらの映像効果を一般化し、式で表すことを試みる。式で表すことにより、映像効果そのものの種類の把握が可能となり、体系的に整理することが可能であると考えられる。さらに、新しい映像効果を実装するときにもわかりやすいものとなると期待される。

まず、パラメータの説明をする。人がいないところで取得しておく背景用のフレーム情報（仮想背景）を $ImgBack$ 、現在のカラー画像を $ImgR$ 、現在の温度画像を $ImgT$ 、必要に応じて読み込んでおくテキスト画像（これを背景として用いる場合も仮想背景モードとなる）を $ImgTex$ とする。そして、8bit 画像として $Img(t)$ を、24bit 画像として $Img(r, g, b)$ を、すべての輝度が、 t または、 (r, g, b) となる画像とする。 t, r, g, b の定義域は0から255である。

次に、演算として以下の2つを定義する。 $A \oplus B_C$ を、 A という画像と B という画像を C という α 画像を用いて α ブレンディングすることと定義する。 α ブレンディングとは、輝度の内分計算を行うことである。たとえば、 A の画像の輝度がすべて255で、 B の画像の輝度がすべて0、そして、 α 画像 C の輝度がすべて200の場合、実際に出力される画像は、輝度がすべて $\frac{255 \times (255 - 200) + 0 \times 200}{255}$ の画像となる。内分計算ではなく、2値的な閾値処理を行う場合には、 $A \oplus B_{Cbinary}$ と書くことにする。この場合は、閾値 Th を設け、画像 C 中の輝度が Th 以上の部分の α 値を MAX である 255、そうでないところの α 値を0として α ブレンディングを行う。画素の混合が行われるわけではなく、ただの領域貼り付け処理となる。また、 $A \times c$ を、 A という画像のすべてのピクセルの輝度を c 倍することとする。わかりやすさのために、表4.1に、主なパラメータを整理する。

また、ある画像にフィルタをかけたい場合、これを A^{Filter} （画像 A に $Filter$ というフィルタをかけること）と定義する。

表 4.1: 主なパラメータ

現在のカラー画像	$ImgR$
現在の温度画像	$ImgT$
あらかじめとっておいたその場の背景画像	$ImgBack$
テクスチャ画像	$ImgTex$
赤色画像 (マット)	$Img(255, 0, 0)$
すべての画素で RGB 値が r, g, b である画像	$Img(r, g, b)$

これを利用して chroma-key 的に、仮想空間内に人物領域を提示するアプリケーションを表すならば

$$Dst = ImgTex \oplus ImgR_{ImgT} \quad (4.1)$$

となる。

これを利用して従来の thermo-key の映像効果を説明する。

1. 透明で熱を遮断するオブジェクトを利用した透明人間のための人物領域貼り付け効果.

$$Dst = ImgBack \oplus ImgR_{ImgT}$$

2. 透過度を制御して半透明人間を演出する効果.

$$Dst = ImgBack \oplus ImgR_{(ImgT \times s)} \quad 0 \leq s \leq 1$$

3. テクスチャ人間. (人物領域にあらかじめきめておいたテクスチャを表示する.)

$$Dst = ImgR \oplus ImgTex_{ImgT}$$

4. テクスチャ背景. (chroma-key 的な効果.)

$$Dst = ImgTex \oplus ImgR_{ImgT}$$

5. モノクロ人間. (人物領域のみがモノクロになる処理. より一般的に色を変えることも可能である.)

$$Dst = ImgR \oplus (ImgR^{mono-effect})_{ImgT}$$

6. モノクロ背景. (背景領域のみがモノクロになる処理.)

$$Dst = ImgR^{mono-effect} \oplus ImgR_{ImgT}$$

7. シルエット人間. (人物領域の部分に色の着いたシルエットを表示する. 例として紫色 (赤+青) シルエットの場合を示す.)

$$Dst = ImgBack \oplus Img(150, 0, 150)_{ImgT}$$

以上、映像効果を処理に応じて分類した。ここで、 \oplus の左右に同じ画像を利用するとノイズが目立ちにくく、別の画像、たとえば $ImgBack$ と $ImgR$ の組み合わせなどを用いると、温度画像で人物領域が十分に抽出されていないとノイズが目立ちやすくなる傾向がある。図 4.1, 図 4.2, 図 4.3, 図 4.4, 図 4.5, 図 4.6, 図 4.7 に、従来の映像効果の具体例を示す。

次項からは、これらの数式での表現を使いながら、実際に展示を行ったときの、新しい映像効果や展示の工夫、得られた知見などについて述べていく。

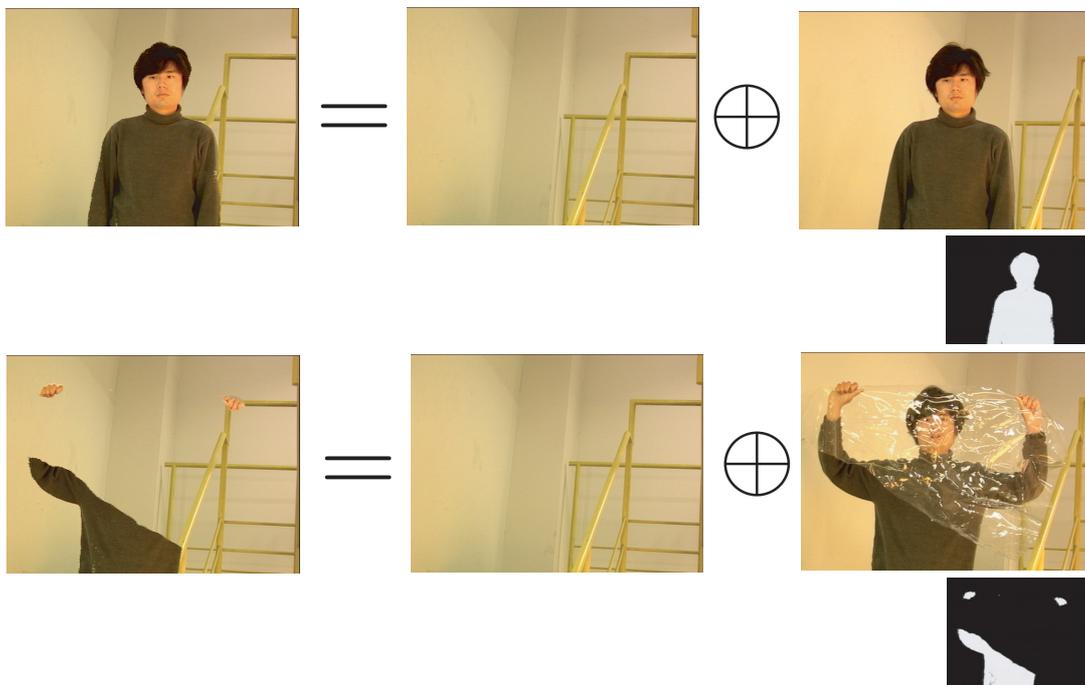


図 4.1: インタラクティブな透明人間 ($Dst = ImgBack \oplus ImgR_{ImgT}$) の例 (上: 貼り付け後, 下: 透明なシート利用時).

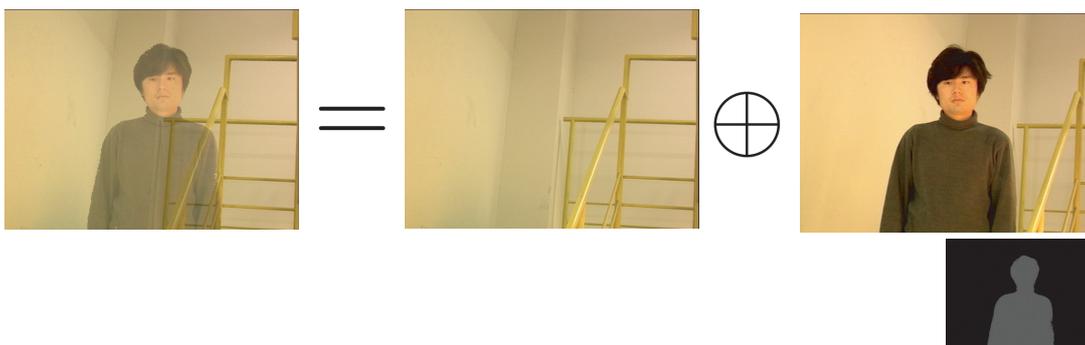


図 4.2: 半透明人間 ($Dst = ImgBack \oplus ImgR_{(ImgT \times s)} \quad s = 0.5$) の例.

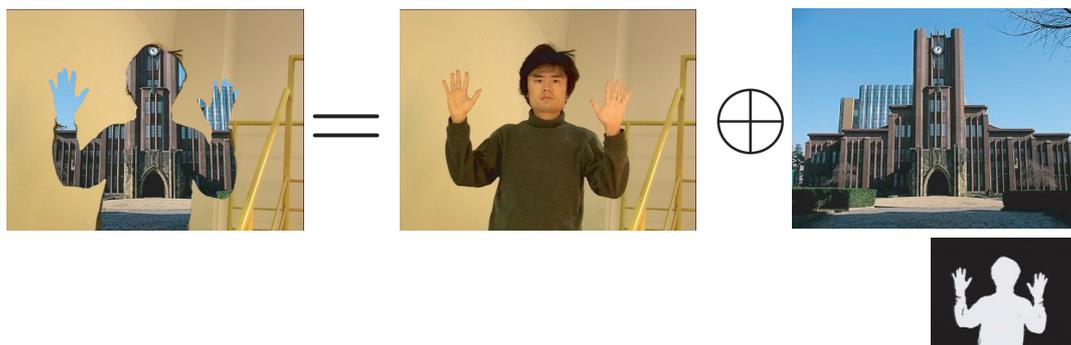


図 4.3: テクスチャ人間 ($Dst = ImgR \oplus ImgTex_{ImgT}$ の例)



図 4.4: テクスチャ背景 ($Dst = ImgTex \oplus ImgR_{ImgT}$ の例)



図 4.5: モノクロ人間 ($Dst = ImgR \oplus (ImgR^{mono-effect})_{ImgT}$) の例.

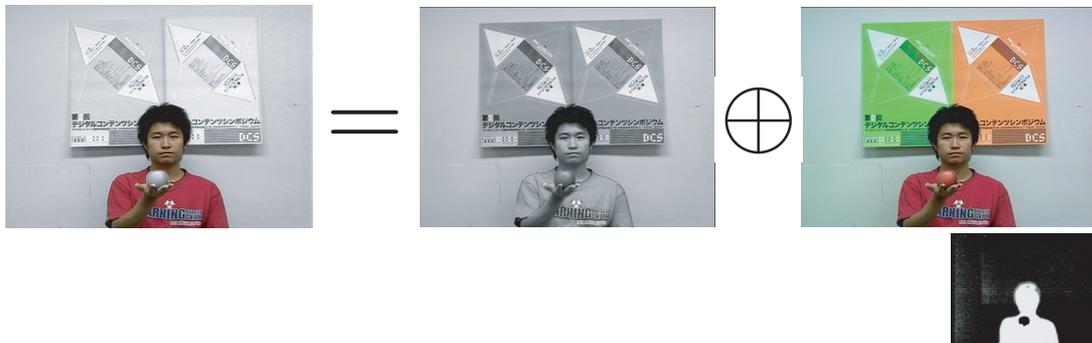


図 4.6: モノクロ背景 ($Dst = ImgR^{mono_effect} \oplus ImgR_{ImgT}$) の例.

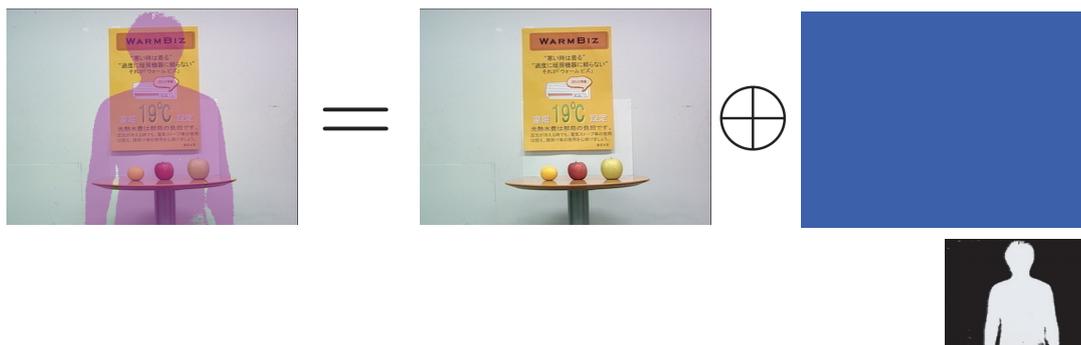


図 4.7: 紫色のシルエット人間 ($Dst = ImgBack \oplus Img(150, 0, 150)_{ImgT}$) の例.

4.3 Thermo-NINJA

Thermo-NINJA とは、子供たち向けに制作した thermo-key のアプリケーションである。SIGGRAPH2003[9] で公開されたデモに加え、数個の映像効果を加えて展示を行った [38].

展示におけるコンセプトは、忍者の術を thermo-key で体験してもらうことである。展示内容は、以下の3つである。

1. 隠れ蓑の術
2. 透明人間の術
3. ゆらゆらの術

という3種類のアプリケーションを実装した。

すべてのアプリケーションは、あらかじめ撮影しておいた背景画像に対して、 α ブレンディングを利用して人物、あるいは、加工した画像を貼り付ける処理、すなわち、仮想背景モードとして実装した。よって、人物領域全体をきれいに切り抜かないと、欠けなどが生じる恐れがあることになる。そこで、現場では、ハロゲンヒーターなどを使って、服を温めてもらうといった工夫をした。また、背景として、温度がそれほど高くない竹を用意してもらったほか、背景オブジェクトが動かないようにしてもらった配慮もした。

以下、各種アプリケーションの実装の説明をする。

隠れ蓑の術は、

$$Dst = ImgBack \oplus ImgR_{ImgT} \quad (4.2)$$

と表される。SIGGRAPH2003[9] で公開されたデモと同じで、透明で熱を遮断するシート、プレートを利用することで、体を擬似的に透明に見せるものである (図 4.1 参照)。

透明人間の術は、

$$Dst = ImgBack \oplus ImgR_{(ImgT \times s)} \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (4.3)$$

と表される。人物領域を貼り付けるときの α 値を制御すれば半透明にしたり不透明にしたりと透過度制御が可能であるがそれを時間変化させるものである。つまり、 s が時刻に応じて変化する効果である。何のアイテムも使わないのに映像が変化する様子を楽しむことができる (図 4.2 参照)。

以上の2つは、4.2 でも紹介されており、従来とほぼ同じである。

一方、ゆらゆらの術は、背景画像をそのまま表示するのだが、温度の高い部分だけサインカーブをかけて画像を揺らす効果である。式で表すと、

$$Dst = ImgBack \oplus (ImgBack^{sin-effect})_{ImgT} \quad (4.4)$$

となる。 $ImgBack$ と $ImgT$ だけを使った映像効果である。参加者は「隠れているつもり」なのに、自分のいるところだけが“ゆらゆら”ゆれていて、隠れきることができないもどかしさを演出したものである。

それぞれの術の実装結果と実際に展示を楽しんでもらっている様子を図 4.8 に示す。

デモ自体は SkipCity の方が行ってくれたが、抽出率調整や、モード変更時に、GUI でなかった当時のインタフェースは難解であるとの評価をいただいた。この評価が、現在の GUI インタフェースを作る契機となったといえる。



図 4.8: Thermo-NINJA : 左上のように透明なシートをかざすと、右上のようにシートの部分だけ隠れる(隠れ蓑の術)。左中央は、隠れ蓑の術を楽しんでもらっている様子。右中央は、透明人間の術により、半透明になっている子供たち。左下は、人物の部分に sin 波イフェクトをかけるゆらゆらの術。右下は、あらかじめ取得しておいた静止画。



図 4.9: 黒子の要らない人形劇 (左: カラー, 中央: 温度, 右: 結果画像)

4.4 透明人間の世界の構築

4.4.1 機能の説明

本章では、デジタル作品として、透明人間の世界を構築することについて述べる。第2章で紹介した光学迷彩 [21] では、再帰性反射材という特殊な素材を着る必要があった。さらに、特殊な素材を着る必要があるため、顔部分などの素肌が現れる部分の透明化は不可能である。これに対し、被写体側に制約をなくした状態で透明人間を実現することを考える。

Thermo-NINJA における透明人間の術では、あらかじめ撮影しておいた静止背景画像を利用しているため、映像中に人物が冷たいものを飲んだり、物を動かしたりするとそれが反映されないという欠点があった。

それを克服し、人物領域のみ透明（向こう側が透けて見える）状態、かつ人物以外の物体の動きも反映させる処理すなわち、透明人間の世界（「人は見えないで、ものの動きは反映される。」世界）を演出する処理、を提案する。これにより、従来の静止画の上に人物領域を貼り付ける処理と異なり、画像内の人物以外の物体とのインタラクションを不思議な映像として楽しむことができる。

この処理の応用先としては、黒子の要らない人形劇などの映像制作への応用が期待できるほか、第2章で紹介したマシュマロスコープのように、街角でのディスプレイとして利用することでパブリックスペースを楽しいメディア空間にできると考えている。

本項では、実装と追加イフェクトについて、上記の応用を考慮しつつ述べていく。

1. 人がいない状態で背景画像（この画像を変更し、表示していく）を撮影する。（この処理は必ずしも必要ではないが、初期状態を綺麗な画像とするために入れてある。）
2. 閾値を設け、閾値よりも輝度が小さい部分、すなわち低温部（人物領域でない部分）のピクセルをリアルタイムに更新する。

「更新」とは、現在カラーカメラに写っている画素情報で上書きすることと定義する。式で表すと、

$$Dst(\text{present frame}) = Dst(\text{previous frame}) \oplus \text{ImgR}_{(\text{Img}(255) - \text{ImgT})^{\text{binary}}} \quad (4.5)$$

$Dst(\text{previous frame})$ は直前の透明人間画像のことである。

これを利用し、黒子の要らない人形劇を演出している様子を図 4.9 に示す。

さらに、この状態の映像に、映像効果を付加することも可能である。現在はエッジ人間とシルエット人間という2種類の映像効果を実装してある。双方とも、気配を写し出すという点で共通している。

エッジ人間は、第3章で述べたバンドパスフィルタを利用し、人物領域のエッジを貼り付けることで可能となる。この場合は、「人物のエッジと、実物体が動く世界」が演出されることになる。エッジ人間の処理は、4.5の $Dst(\text{present frame})$ を Src と置き換えれば、4.6のように表される。 r, g, b は、エッジの色



図 4.10: エッジ人間と冷たい物体（左上：入力カラー，右上：温度，左下：エッジ抽出，右下：出力

を決める RGB 値である。

$$Dst = Src \oplus Img(r, g, b)_{ImgT^{bandpass}} \quad (4.6)$$

出力例を図 4.10 に示す。

また、シルエット人間の場合もエッジ人間の場合と同様にして、

$$Dst = Src \oplus Img(150, 0, 150)_{ImgT} \quad (4.7)$$

とすればよい。出力例を図 4.11 に示す。ここで、従来のシルエット人間との違いを示すために、物体を持っている様子も併載する。図 4.11（下）では、レモン（低温）の画像が結果画像に反映されていないが、図 4.11（上）ではレモン（低温）の動きが反映されていることが確認できる。

4.4.2 技術的な課題

「背景の変化を反映しつつ、人物を消す」という処理の技術的な課題としては、エッジ付近にのるノイズの問題がある。ノイズの例を、図 4.12 に示す。図 4.12 では、人物のエッジ部分が画像内に残ってしまっている問題が確認できる。この原因は、第 3 章のシステムの項で述べた「2つのカメラの時間軸上の同期をとっていないこと」であると考えている。最大 1 フレーム分 (1/30 秒) カラーカメラと温度カメラのキャプチャのタイミングがずれることにより、激しく動くと、人物領域の端の部分が見え、さらに残ってしまうといった汚い映像になってしまうことがある。同期というハードウェア技術の問題を完全に克服することは現時点では難しいので、ソフトウェアでの映像の汚さの低減を試みる。

用いる手法としては、温度画像中の人物領域の膨張処理があげられる。この場合、膨張処理が 2 種類考えられる。すなわち、空間方向への膨張処理（ディレイション）と、時間方向への膨張処理である。

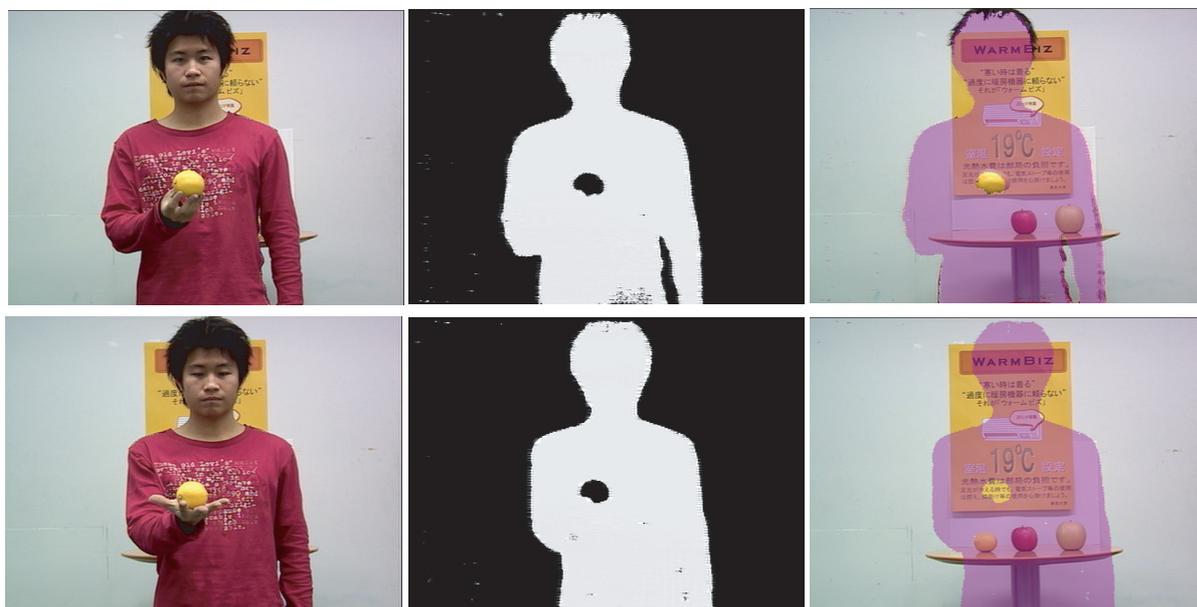


図 4.11: シルエット人間（上段は背景の変化を反映している．下段は固定背景．左からカラー，温度，結果画像



図 4.12: エッジ付近にのるノイズの問題



図 4.13: DPA での展示の様子 (左: 透明人間 [人物が透明でペンが見えている様子.], 右: エッジ人間 [人物のエッジを表示する. 人物が重なっている場合は, 統合された領域のエッジが表示される.]).

空間方向に対する膨張処理を利用すれば, 温度情報から得られる人物領域が完全に色画像中での人物領域をを覆う形となり, 単純に, 動きに対する耐性を向上させることができる. しかし, 人物が手に持っている物体など, 人物領域付近に存在するものを映像中に反映しにくくなるという副作用がある. 実装上は, 空間方向の膨張処理は, OpenCV の `cvDilate` 関数によって実現される. `cvDilate` 関数は, あるピクセルの近傍 8 点を走査し, 基準となるピクセルよりも値が小さい場合に基準ピクセルの輝度で上書きする, という処理を行う. この関数は, 繰り返し回数を指定することができる.

上記のものと比較して, 時間方向の膨張処理も考えられる. これは, 時間方向の温度画像中の人物領域の和領域を膨張した人物領域とみなすものである. この場合, 人物が動かなければ実際に膨張は行われないうことになり, 動きがある場合はそれに応じた膨張が行われる. しかし, この手法で問題となる部分は, 過去のフレーム情報を得ることはできても, 未来のフレーム情報を得られないことになる. これを解決するために, 実際に表示するフレームを約 5 フレーム前のものとし, そのフレームを基準として前後 5 フレームの情報を利用して対応するという工夫が考えられる. このテクニックを 4.4.3 で述べる DPA での展示で使った.

4.4.3 DPA での展示

実際にこの作品を第 1 回 CREST・デジタルパブリックアートシンポジウム (DPA) [39] に出展したときの様子を図 4.13 に示す. DPA とは, 独立行政法人科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) の研究プロジェクトである「デジタルパブリックアートを創出する技術」プロジェクトである. このプロジェクトでは, パブリックアートの領域 (たとえば上野の西郷隆盛像のようなパブリック空間におけるアート) に, さらに高度なメディア技術を持ち込み, より豊かな表現の可能性を求めることによって, 「デジタルパブリックアート」とでも呼べる新しいメディアアートのジャンルを確立することを目的とし, さらにその基盤となるような技術を開発することを目指している. このプロジェクトでは, 次の 3 つ, 空間 (Dimension), 自己参加 (Participation), 実体性 (Actuality) に重点を置いて研究を行っている. 「空間」における研究では, 実世界の空間を利用して現実の空間的な広がりを経験しつつ, 人工的な表現を行おうとしている. 「自己参加」における研究では, 自分の情報をメディアに表現することで, 単なる受動的メディアからの脱却を図ろうとしている. 「実体性」における研究では, 実物体の質感, 材質感を持つことで, 本物のモノを利用した情報提示を行うことを目的としている. Thermo-key は, 特に, 「自己参加」における研究の一つである. 「透明人間の世界」は, 自己参加型であり, 自分自身の情報をそれとなくディスプレイに示すアプリケーションである, ということができる.

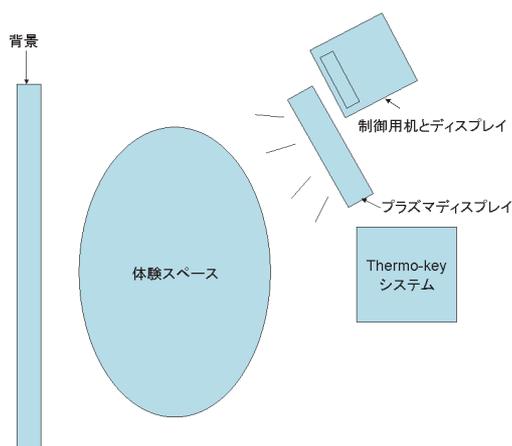


図 4.14: Thermo-NINJA における機器の配置図.

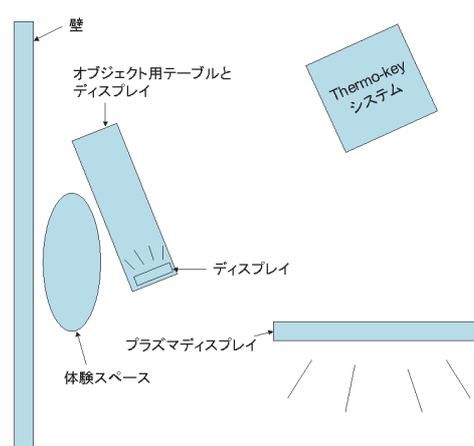


図 4.15: DPA における機器の配置図.

展示では、カメラの視野を、テーブルの上のオブジェクトと立っている人の顔が映る領域に設定することで、インタラクションをわかりやすく体験できるよう、工夫をした。オブジェクトとしては、木でできたボーリングのピンやボール、紙風船などを用意した。木でできたものは、「握り続ける」ことで徐々に温度が変化していく。すなわち、握り続けて手を離すと、今まではオブジェクトそのものが映っていたのに、突然、オブジェクトのエッジのみが見える状態となる。一方、紙風船は、息を吹き込むことで一時的に温度が上がる。これは、息を吹き込むことで、オブジェクトのエッジのみになり、だんだんと物体そのものが見えてくる。このようなインタラクションを可能にしたので、多くの人が好感触を持ってくれた。

4.5 まとめ

Thermo-key を利用したデジタルコンテンツの特徴としては、自分自身がモニタ中に写りこみ、かつ楽しい映像効果が付加されている画像を実時間で体験することができることが挙げられる。この体験は新鮮であり、体験者の人たちも楽しんでくれている。また、様々なポーズをとることで自分なりの楽しみ方を見つける体験者の人が多い。これは、エンタテインメント基盤としての技術だけでなく、実際に体験してもらうことで新しい楽しさが見つかっていくことを示している。また、第2章で紹介した、EffecTVの見せ方は、thermo-key を見せる上でも十分に参考になるものであると考えている。これからは、コンテンツの見せ方、という要素も検討していく必要があるといえる。

たとえば、図 4.14 は、Thermo-NINJA の展示における機器の配置図を示し、図 4.15 は、DPA の展示における機器の配置図を示す。二つともプラズマディスプレイを用いているが、Thermo-NINJA では、体験者が自分を見るために、DPA では、外の人々が体験者と出力を同時に見るために使われている。さらに、DPA ではテーブルの上に小型ディスプレイを置くことで、体験者に近いところで体験者自身が映像効果を感じることができる。

結局、数回の展示によって、ディスプレイは、制御用、体験者用の二つのディスプレイと、体験している人や結果画像を同時に見られる位置にプラズマディスプレイを配置することで、多くの人に楽しんでもらえる、という知見を得ている。

本章では、デジタルコンテンツの制作として、エンタテインメント志向のアプリケーションの紹介をした。ここで、人物領域に映像効果の一つとしてモザイクをかけることを考えれば、生放送などに応用できるプライバシー保護アプリケーションが可能であると考えられる。プライバシー保護のためには、しっかりと

人物領域を隠す必要があるので、エンタテインメントアプリケーションの構築上はさまざまな検討事項が生まれてくる。この点に関して、章を分けて、プライバシー保護アプリケーションとしての自動モザイク（ぼかし）処理である Thermosaic の研究について第5章で述べる。

第5章

Thermosaic : 映像中の人物領域または背景領域を 自動的に隠す処理

5.1 はじめに

本章では、映像中の人物領域、または背景領域を自動的に隠す処理である Thermosaic[31, 32, 33, 34, 35]の研究について述べる。物体を隠す画像処理としては、モザイク処理や、ぼかし（空間方向ブラー）処理が知られており、これらは、放送、レタッチソフトなどで幅広く利用されている。

現在、人物にモザイクをかけるという処理は、自動的に行われていたのではなく、事後処理として手動で行われている。しかし、これは、生放送に応用できないだけでなく、処理の負担が大きいことで知られている。そこで、自動的に人物領域のみにモザイクをかける処理として thermo-key を利用するものを提案する。人物領域抽出に温度情報を用いて、それに基づき、カラー画像に対してぼかしやモザイクをかけるものとなる。自動でプライバシーを保護できるため、監視カメラなどにおけるプライバシー問題 [24] の解決に寄与することが期待されるものでもある。

温度が高い領域にぼかしやモザイクを自動的にかければ、人物領域のみが不鮮明な画像となり、生放送におけるプライバシー保護などに応用できると考えられる。また、温度が低い領域にぼかしをかけることで、場所や物の情報を隠しつつ人物を見せたり、背景をぼかすことによる人物領域を強調する処理が可能であると考えられる。そして、顔以外の部分をぼかすことで、顔部分の画質を維持したまま、高効率の画像圧縮が可能となる [37]。

また、モザイクがかかった画像からモザイクをはずし、再利用したいという要望があると考え、セキュリティを意識しつつ原画像を復元する手法も検討する。

5.2 からは、映像中の情報を隠す処理に関する関連研究と Thermosaic の比較、Thermosaic の実装、そして、原画像復元法について述べていく。

5.2 関連研究との比較

第2章で触れたものも含めて関連研究について整理する。ここでは、自動的に映像中の情報を隠す処理に関する研究について紹介する。このカテゴリに属するものとして、MosaicTV（図 5.1）、Stealth Vision[25]（図 5.2）が提案されている。

MosaicTV とは、第2章でも触れた、実時間映像イフェクタである EffecTV[18] の一つのアプリケーションである。EffecTV[18] とは、カラーカメラとディスプレイからなる映像装置であり、背景差分（オブジェクト検出）、フレーム間差分（動き検出）の2つの画像センシングを行うことで、数々の実時間映像効果を可能にしている。プログラム自体はオープンソースであり、WWW に公開されているので誰でも簡単に利用することができる。この中で、MosaicTV は、背景差分とモザイク効果のくみあわせで実装されている。あらかじめ撮影しておいた背景画像と異なる部分に自動的にモザイクがかかる。背景差分を利用しているので、何を画角内に持ち込んでもモザイクがかかるため、人物に特化したアルゴリズムではないといえる。

Stealth Vision[25] は、あらかじめ3次元空間上にプライバシー保護領域を設定しておき、カメラで撮影された映像中のどの画素にこの保護領域が写りこんでいるかを推定し、モザイク処理を施す手法である。Stealth Vision のコンセプト図を図 5.2 に示す。カメラのキャリブレーション技術が基盤となるアプローチであり、この3次元保護領域に侵入したものすべてにモザイク処理を施す。すなわち、特定の位置に特化しており、この手法は必ずしも人物に特化したものではない。

一方、Thermo-key はロバストな人物領域抽出が可能なので、人物、あるいは背景を隠す処理に使うときに信頼性が高いと考えられる。ガラス越しなど、透明で遠赤外線が透過しないものでは機能しないので気をつける必要がある。しかし、これを逆手に取ることもできる。たとえば、自分はモザイクがかからなくてよい、というリポーターなどのアイテムとして透明で温度を通さないプレートを前において使うことで、インタラクティブにモザイクのオン、オフ切り替えが可能となる。



図 5.1: MosaicTV (色背景差分を利用)

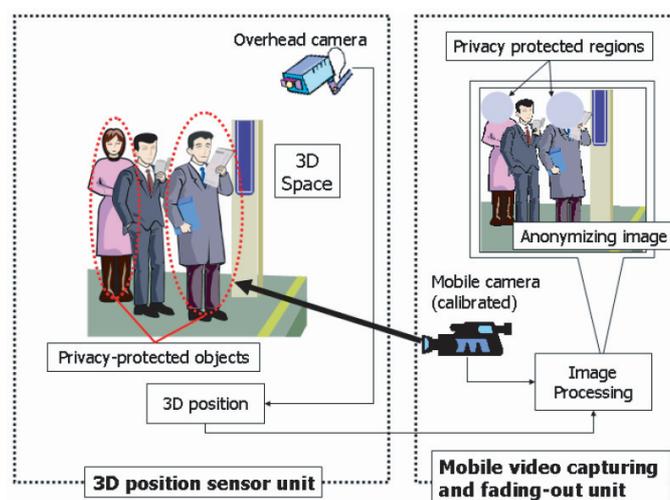


図 5.2: Stealth Vision

また、特に人物領域を隠すことに限っていえば、全身にモザイク処理ができるだけでなく、顔だけにモザイク処理をするなどの領域設定も必要となってくる。温度カメラは、温度分解能が高い（規格では最高で 0.02°C ）ため、多くの状況下で、顔や手といった肌が露出している部分の温度と、服などの皮膚の温度が伝導して温かくなっている部分の温度との領域分割が可能である。これを利用することで、顔だけにモザイクをかけたり、全身にモザイクをかけたりといった設定変更が可能である。

それゆえ、温度情報は、人物領域に特化したものであるといえる。本章では、この温度情報を用いたプライバシー保護のための、領域隠蔽処理（人物を隠す、背景を隠す）についてまとめる。次項では、ぼかし処理（ブラー）とモザイク処理についての実装を述べる。

5.3 Thermosaicの実装

5.3.1 ぼかし処理とモザイク処理の分類

Thermosaicの実装において、まず、隠す処理について分析する。



図 5.3: マニュアルで効果を加えたもの（左：原画像 [カラー]，中央：顔の周りを矩形で囲んでモザイク処理，右：顔の周りを矩形で囲んでぼかし処理）

隠す処理について一般によく知られていると考えられるのは、モザイク処理とぼかし処理（ブラー）であるとする。モザイク処理や、ぼかし処理のイメージをつかむために、Photoshop を利用してマニュアルでこれらの処理を加えた例を図 5.3 に示す。

ここで、ぼかし処理とモザイク処理を区別して扱うことにする。モザイク処理は矩形を利用するため、隠したい領域の輪郭線を含めて見えなくなるが、ぼかし処理は、それが残るという点に違いがある。人物領域を隠す場合を考えると、輪郭線の残っていないモザイク処理のほうが個人の同定がさらに困難になると考えているが、ぼかし処理もプライバシー保護処理としては使われている。また、ぼかし処理の場合、人物を残し、背景をぼかすことは、人物を強調表示することになると同時に、背景の符号量を落とすことになっている。これを利用して、人物領域のビットレート（1 ピクセルあたりの情報量）を維持しつつ、背景のビットレートを落とすことで、高効率の画像圧縮ができる [37]。

そこで、次からは、ぼかし処理とモザイク処理について、人物を隠す場合と背景を隠す場合に分けて述べていく。

5.3.2 ぼかし処理の実装

ここでは、ぼかし処理とは、空間方向のブラーのことと定義する。そのとき、実装方法としては、一旦縮小した画像を線形補間などのアルゴリズムで拡大する手法や、平滑化フィルタを重ねがけする方法が考えられる。

前者は、縮小率と補間アルゴリズムにおいて自由度があり、高速処理が可能である。後者は、カーネル内の各ピクセルに乗算する係数、カーネルの大きさ、重ねがけする回数において自由度があり、前者に比べると計算量が多いのが特徴である。

ここではまず、高速処理を優先したぼかし処理として、縮小の後に線形補間を利用して拡大してぼかすという処理を示し、そして、画質を優先したぼかし処理として、平滑化フィルタを提案し、実装結果を示す。

線形補間によるぼかし処理

線形補間によるぼかし処理では、カラー画像 I_C を一旦縮小し、再度同じ倍率だけ拡大した画像をぼかし画像 I_B として用いる。そして、温度閾値 T_h を利用して、各ピクセルの輝度において、カラー画像 I_C を採用するか、ぼかし画像 I_B を採用するか決める。あるピクセルの温度の輝度を $I_T(x, y)$ として、 $I_T(x, y) \geq T_h$ のときに、 I_B を、そうでないときに I_C を採用すれば、人物をぼかす処理となり、逆に、 $I_T(x, y) \leq T_h$ のときに、 I_B を、そうでないときに I_C を採用すれば、背景をぼかす処理となる。このアルゴリズムの実験を行った。入力カラー画像と、入力温度画像を図 5.4 に示す。そして、このアルゴリズムを適用した結果



図 5.4: 入力画像（左：カラー，右：温度）.



図 5.5: 線形補間によるぼかし処理（左：人物をぼかす，右：背景をぼかす）.

を図 5.5 に示す．縮小率は，16 倍とした．

ここで，図 5.5 の結果から次のような問題点を指摘することができる．

- 人物領域の輪郭線が明確に残っている（図 5.5（左））．
- 背景に人物領域の色がにじみこんでいる（図 5.5（右））．

前者については，2 値的な閾値処理のために，どこがぼかした領域なのかわかってしまう明確な輪郭線が残っている．後者においては，本項では，「にじみ」と呼ぶことにする．この「にじみ」の問題は，図 5.5（右）の人物の髪の毛がにじんで，背景の一部が黒くなる形で現れている．同様に，図 5.5（左）では，特に人物の顔領域の左側部分に背景の白い部分の色が入り込んで人物領域自体が細くなってしまっている．

本項では，これらの問題を解決するために，平滑化フィルタの反復処理について検討する．具体的には次から述べる平滑化フィルタの提案をする．

平滑化フィルタの提案

ぼかし処理における先述した問題点を解消するフィルタとして2つの平滑化フィルタを考える。

(1) カーネルサイズ可変フィルタ

カラーを平滑化するカーネルのサイズを、温度に応じて変えるフィルタである。式で書くと、

$$m[x][y] = \frac{I_T[x][y]}{M} \quad (5.1)$$

とにおいて、

$$I_O[x][y] = \frac{\sum_{i=x-m[x][y]}^{x+m[x][y]} \sum_{j=y-m[x][y]}^{y+m[x][y]} I_C[i][j]}{(2m[x][y] + 1)^2} \quad (5.2)$$

のように画像 I_O を合成する。 x, y, i, j はピクセル座標、 $I_C[i][j]$ は RGB の輝度値、 $I_T[i][j]$ は温度画像の輝度値である。 $m[x][y]$ は 0 以上の整数であり、(カーネルサイズ) = $2m[x][y] + 1$ という関係がある。今回の実験では経験的に $M = 50$ とした。 M が小さいほどカーネルサイズが階層が深くなり、計算量が増大する。

このフィルタによって、ぼかし方が多段階になる。図 5.5 のような 2 段階処理に比べて、ぼかし領域の輪郭線が見えなくなる効果が期待される。

(2) 加重平均フィルタ

温度を加重値として、カラーの加重平均を取るフィルタである。定数 s を用いてカーネルサイズが $2s + 1$ の場合を式で書くと、

$$I_O[x][y] = \frac{\sum_{i=x-s}^{x+s} \sum_{j=y-s}^{y+s} I_C[i][j] \times T[i][j]}{\sum_{i=x-s}^{x+s} \sum_{j=y-s}^{y+s} T[i][j]} \quad (5.3)$$

ただし、人物をぼかす場合は、 $T[i][j] = I_T[i][j]$ 、背景をぼかす場合は $T[i][j] = 255 - I_T[i][j]$ とする。このフィルタによって、温度の異なる領域間での色のにじみ込みが低減されるものと期待される。

(3) 統合型フィルタと実験結果

上記 2 つのフィルタは、

$$s = m[x][y] \quad (5.4)$$

とおくことにより、両者の特性を併せ持ったフィルタを定義することができる。フィルタを 10 回、反復的に適用した場合の実験結果を図 5.6 に示す。図 5.5 で見られた人物の輪郭線の問題、にじみの問題が解消されていることがわかる。

ぼかし処理のまとめ

ぼかし処理として、線形補間を利用した縮小拡大法と、平滑化フィルタという 2 種類の手法の検討を行った。これらの処理は、処理速度の面から大きな差が出る。処理速度に関しては、表 5.1 のようになる。

表 5.1: Thermosaic の各々の処理の処理時間。

手法	処理時間 (s)	fps
線形補間	0.03	30 以上
平滑化フィルタ	10 (10 回反復)	0.1 以下



図 5.6: 提案平滑化フィルタの適用結果 (左: 人物をぼかす, 右: 背景をぼかす)。

表 5.1 に示すデータは, CPU Pentium M 1.7Ghz, Memory 512MB の標準的な PC 上で行った実験の結果である. 1 枚の画像を処理するのにかかる時間を示している. 用いた画像の解像度は VGA(640 × 480) である. 表 5.1 より, 線形補間法による処理については実時間で動作可能といえるが, 統合型ぼかしフィルタは実時間動作させることが今後の課題であるといえる. また, 提案したぼかしフィルタの中でもカーネルサイズ可変フィルタの要素では, 温度画像中の輝度分布に応じて計算量が極めて大きく (カーネルサイズの 2 乗に比例) するので, ロバストな高速化手法を考えることも課題である.

一方, ぼかし度合いを調節できる手法を考える場合, 良質なぼかし画像を作るうえで適している手法が, 平滑化フィルタであるといえる. 人物領域を強調表示して, 背景をぼかした絵を作りたい場合などに適していると考えられる. この考え方にたてば, 線形補間の利用は, 次から述べるモザイク処理に類したイフェクトとして, 実時間処理が要求される場合に適用されるものであるといえる.

5.3.3 モザイク処理の実装

本項ではモザイク処理を, ある矩形領域を同じ色で塗りつぶすことと, 定義する. モザイク処理は, ぼかし処理と比較すると, モザイクブロックが人物の輪郭線情報を破壊するため, より人物の同定が困難になると推定される. 同時に, プライバシー保護処理として最もよく使われる処理でもある. 一方, プライバシー保護処理としての用途が主であり, 輪郭線を破壊するという理由により, ぼかし処理のような人物領域の強調表示などには向いていない.

ここでは, 隠す対象に応じて分類し, 実用的なモザイク処理を行うためにいくつかの手法を検討する.

(1) 人物領域に対するモザイク処理

まず, 人物領域に対するモザイク処理について検討する. モザイク処理では, 先述した線形補間法を利用するぼかし効果と同じく, 一回モザイクブロックの大きさ分だけ縮小し, それを補間処理をしないで拡大して表現する. さらに, 温度画像にも同様の縮小拡大処理をし, 温度モザイク画像を得る. そして, 温度モザイク画像 (温度の値は平均化されている) に対して閾値処理を行うことで, 人物領域の輪郭線を破壊したモザイク処理を行う. ここで, 通常の温度画像に対して閾値処理を行えば, 人物領域の輪郭線を維持したモザイク処理となる.

結果画像の例を図 5.7 に示す.

ここで, 人物領域に対するモザイク処理では, 人物を覆う形でのモザイク処理ができることが必要であると同時に, 顔だけにモザイク, 全身にモザイクなど用途に応じてモザイク領域の大きさを切り替えられ

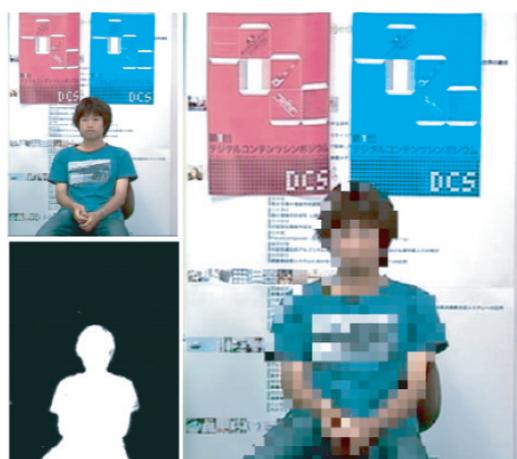


図 5.7: 全身にモザイク (左上：カラー，左下：温度，右：モザイク画像)。



図 5.8: メガネが欠けて顔を覆うモザイクに失敗した例 (上段：カラー，中段：温度，下段：モザイク)。

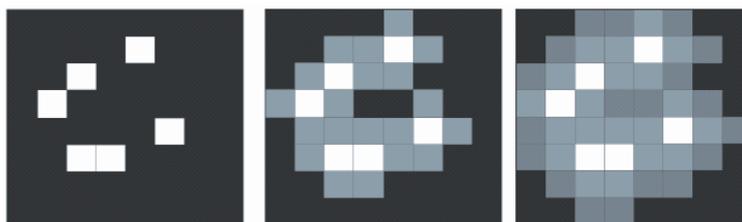


図 5.9: ディレイション処理の模式図 (左：初期状態, 中央：1 回処理, 右：2 回処理)。



図 5.10: ディレイションの例 (上段：温度, 中段：ディレイション無し, 下段：ディレイション後)。

表 5.2: 人物-カメラ間の距離と必要なディレイション回数の関係。

number of dilation	distance(m)
3	0.5 - 0.7
2	0.7 - 1.25
1	1.25 -

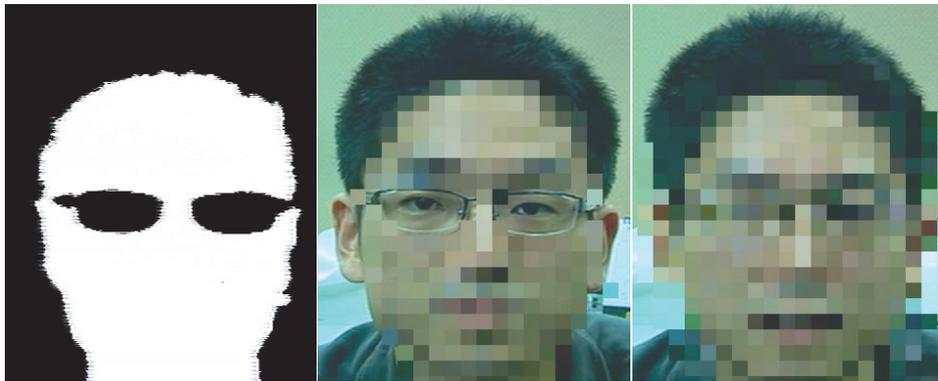


図 5.11: 顔のアップに対するディレイション処理（左：温度，中央：ディレイション無し，右：ディレイション後）。



図 5.12: ディレイション回数を上げていく様子（左上：ディレイション無し，右上：1回ディレイション，左下：2回ディレイション，右下：3回ディレイション）

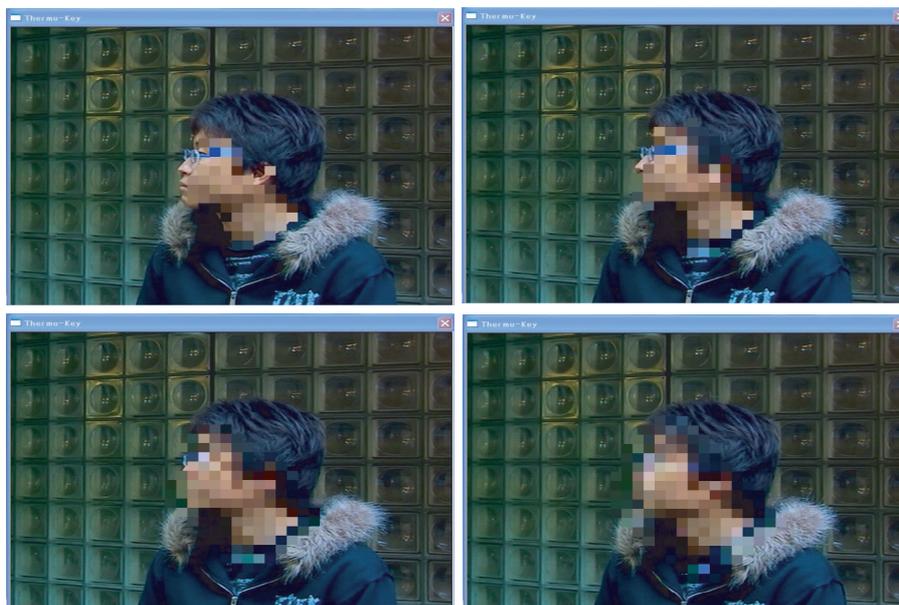


図 5.13: 横向き顔に対するディレイションの適用（左上：ディレイション無し，右上：1回ディレイション，左下：2回ディレイション，右下：3回ディレイション）



図 5.14: 顔の一部が隠れている場合のディレイションの適用（左上：ディレイション無し，右上：1回ディレイション，左下：2回ディレイション，右下：3回ディレイション）

る仕様が望まれていると考える。一般に顔などの皮膚露出部分のほうが、服などの体温が伝導して温かくなっている物体よりも温度が高いため、温度カメラで切り分けることは可能である。しかし、閾値をあげて顔だけを抽出したい場合に、メガネなどの熱を遮断する物体の存在が問題となる。具体例を図5.8に示す。

図5.8（下段）のモザイク効果では、プライバシー保護を実現できない。この問題を、thermo-key（Thermosaic）の持つロバスト性を失わずに解決する提案として、モザイク領域のディレイション処理（膨張処理）を提案する。ディレイション処理とは、モザイクの上下左右の場所に新たなモザイクを追加するというものであり、その処理フローは、図5.9で示される。この処理によって、メガネ部分にモザイクをかけることを可能にする。一方、外側へのモザイク領域の拡張は、人物領域を完全に含むモザイクを実現する意味で、必ずしも不要なものではないといえる。また、ディレイション処理は、軽い処理で、他の処理の上に追加実装しても実時間性を失わず、さらに、反復回数を設定することで適切なレベルの膨張が可能という点で、即効性があり、実用的なものであるといえる。

この処理を図5.8に対して適用した結果を、図5.10に示す。また、顔のアップに対する適用結果も、図5.11に示す。ディレイション処理によって、顔の全体を覆うモザイクが可能になったことを確認できる。

ここで、実用化を考える上で、一般にディレイション回数を何回に設定すれば充分であるか、という問いに対する検討を行う。必要なディレイション回数というのは、人物とカメラ間の距離に依存すると考えられるので、メガネをかけている人物に対し、「人物 - カメラ間の距離」を変えながら、「必要なディレイション回数」の調査を行う。モザイクがかかった状態で顔の向きや移動を行ってもらい、充分なディレイションが行われているか判定を行う。判定自体は目視で行うものとする。定量的な実験を、次のような環境下で行った。カメラ画角は水平24.6°、垂直16.4°、メガネのサイズを140mm×28mmという条件で、モザイクのサイズを16×16とした。顔の角度の状況は、正面顔とした。実験結果を表5.2に示す。表5.2より、顔を覆うモザイクを作るためには、3回というディレイション回数が充分であると考えられる。ディレイション回数を変えていく様子を図5.12に示す。また、顔が横を向いている場合に対するディレイションの適用についても図5.13に示す。さらに、顔の一部が隠れている場合についてもディレイションが効果的である様子も図5.14に示す。これらより、ディレイション処理は様々な状況に対応する可能性を示せたと考えている。

もっとも、さらに安全なプライバシー保護のためには、カメラとの距離50cm以内に人物が近づいた場合には、顔の面積が大きくなるため、モザイクの大きさを変えるなどの手法の実装が必要である。したがって、プライバシー保護のためには、ディレイションの回数だけでなく、モザイクの大きさに関する理論的な検討がこれからの課題となる。

（2）背景領域に対するモザイク処理

背景領域に対するモザイク処理では、人物全体がはっきりと見え、かつ、背景領域が隠されていることが望ましいと考える。これは、主に、放送などに使われる場合、顔だけはっきり見えてそれ以外の部分にモザイクをかけるという状況を考えずらいことに因る。そのため、各モザイクブロックを作ってから高温領域にモザイクをかける処理（人物領域に対するモザイク処理）の逆である、低温領域にモザイクをかける処理では、次のような問題が起こる。具体的には、図5.15（左）に問題がある画像を示す。

- モザイクが人物領域に侵食し、人物領域がわかりにくくなっている。

したがって、モザイクは人物をよけるように付加する必要がある。そこで、thermo-keyで得られるピクセル単位での人物領域であるか否かの情報を利用して実装を行う。実装は次のようになる。

1. すべてモザイクの画像を作る。
2. すべてモザイクの画像のうえに、thermo-keyを利用して切り抜いた人物領域を貼り付ける。

この手法により生成された画像を、図5.15（右）に示す。ごく簡単な処理で、人物領域が鮮明で、かつ、



図 5.15: 背景領域に対するモザイク処理（左：ブロックごとにモザイクにするか否かを指定，右：モザイク画像に人物領域を貼り付け）。

背景領域が十分に隠されている画像を作ることができる。この手法は，thermo-key の抽出精度に依存する手法であるといえ，人物を鮮明に見せるためにも，thermo-key の抽出精度改善は課題となる。

5.3.4 Thermosaic のまとめ

以上，ぼかし処理とモザイク処理について述べてきた。ぼかし処理では，高品質の画像を得るための手法の提案を行い，モザイク処理では，プライバシー保護に向けた実用的な手法の提案を重視して，検討を行った。

今後も新たな課題を考えてそれに対処していく必要があると認識している。特に，Thermosaic では，プライバシーが守られつつ，提示できる情報は提示していくというスタンスを採用しているが，そのときに，プライバシーがしっかり保護されているかどうかの評価が目下の課題である。

参考文献 [26] では，画面全体をプライバシー保護領域とみなし，アンケートなどを利用してモザイク処理，ぼかし処理をかけた上での評価をしている。図 5.16 に示すように，複数のレベルで処理を行い，画像に応じて様々な視点からプライバシー保護の評価を行っている。被写体の識別に始まり，性別の認識，映像中の場の雰囲気など様々な情報を得ることができるか，という問題を調査している。一方，Thermosaic では，個人情報レベルを，性別などのレベルではなく，生放送で問題のでない程度の定性的なレベルに留めている。すなわち，個人特定はできないが，性別の特定などはその場に応じて対処していけばよいというものである。とはいえ，Thermosaic ではまだ参考文献 [26] のような定量的な評価，検討を行っていないので，今後は，このような評価フェーズに入っていくべきであると考えている。

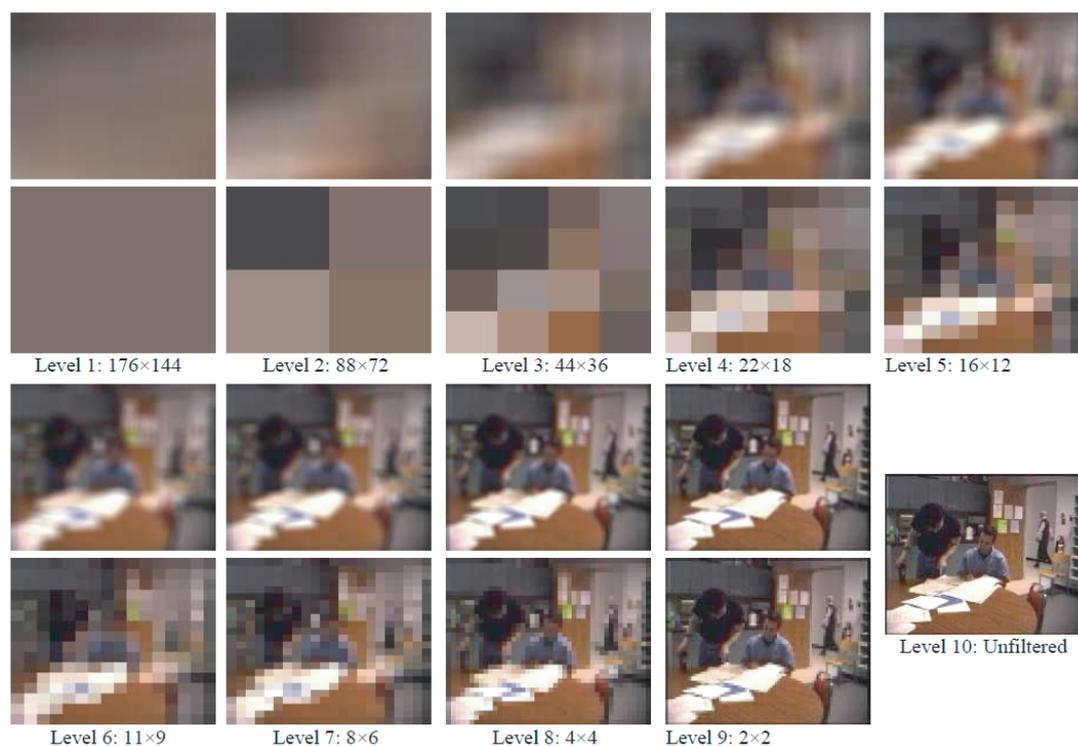


図 5.16: 様々なレベルでモザイク処理，ぼかし処理をかけている様子（関連研究によるプライバシー保護の評価実験）

5.4 モザイク付き画像から原画像を復元する埋め込み技術の検討

Thermosaic におけるモザイク処理では，モザイク処理は実時間でかけられ，結果画像をライブで閲覧することができる．もちろん，モザイク画像のシーケンスを保存することもできる．ここで，ライブでの画像提示の段階では，自動的にすべてモザイクがかかっていたとしても，後で部分的にモザイクを解除して再利用したいというニーズが考えられる．プライバシーに関わる情報であるため，誰でも簡単にできる技術である必要はないが，一度かかったモザイクが二度とはずれないというままでは，利用に限界がある．

社会的に，簡単にモザイクをはずせる場合には，次のような判例がある．判例はわいせつ画を対象としているが，情報を隠す必要性の是非に関しては，考え方の指針を提供している意味で意義がある．

「WWW 上のモザイクつき画像の陳列に対する判決 [27]」

要旨：情報通信機器が飛躍的に進歩した現在，わいせつ図画を有体物に限定する根拠はない．修正をその場で直ちに，容易に外せる場合は，修正がない図画と同じとみてよい．

画像処理とプライバシー保護を考える上では，セキュリティの確保の要請があることがわかる．少なくとも，“簡単にはずせるモザイク”では，セキュリティは確保されないことになる．

一方，技術的には，参考文献 [28] では，電子透かしの技術を用いて，JPEG 符号化時の中間周波数領域に，隠すべき情報を埋め込む手法が提案されている．

本項では，原画像の画質を損なうことなく，拡張領域を利用した埋め込みを行う．また，写真つき画像などを配信する上で，特定の人以外には人物の顔などを見られたくない場合もある．この場合，配信する

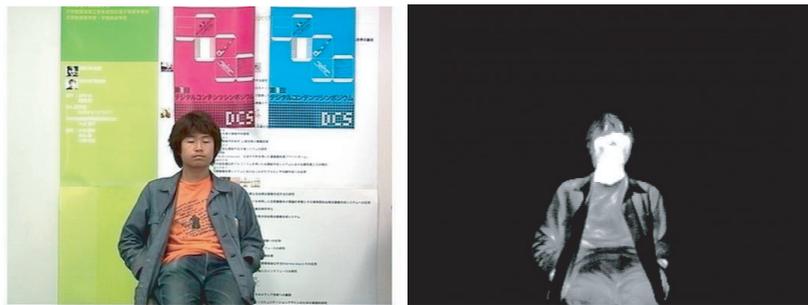


図 5.17: 実験で使用した画像（左：カラー，右：温度）。

画像にプライバシー保護処理をし、パスワードを入れるなど認証を行うことで原画像を復元できれば、上記の問題を解決できると考える。実装時には、実用化しやすい手法を考えると共に、上記にあげた社会的な要請も踏まえ、以下のような条件を課すことにする。

「条件」

1. 復元情報の存在は隠されており、かつ必要に応じて暗号化されている。隠されているとは、容量が十分に小さく、また画面上にそれと分かる劣化がないことを意味する。（自然画像にしては明らかな劣化がある場合に、何らかのデータが隠されていると疑われる可能性がある。）
2. 埋め込み情報は編集加工に対して頑健である必要はないものとする。すなわち、簡単に読み出せず、かつ簡単に壊れてしまう方法によってプライバシー保護の役割を果たすものとする。
3. モザイクに限らず、ぼかしなど、各種の映像効果に対応できる方式であること。

提案手法 [36]

まず、モザイク付き画像の保存方法としては、動画への拡張も可能な JPEG 圧縮を採用する。そして、JPEG のアプリケーション拡張領域に復元情報を埋め込む。これにより、条件 1 から 3 を満たすことが可能となる。一方、復元情報としては、効率の良い圧縮を実現するために、原画像とモザイク付き画像の差分画像を利用する。具体的には以下のような実装を考える。

- (1) BMP 形式で与えられるカラー原画像と温度画像から、映像効果付き画像を作成する。
- (2) 原画像と映像効果付き画像を JPEG 符号化する。
- (3) 差分を取って復元情報を生成し、圧縮して暗号化する。（可逆圧縮は zlib[29]，非可逆圧縮は JPEG 圧縮，暗号化は blowfish[30] を用いた。）
- (4) 映像効果付き JPEG 画像と、圧縮され暗号化された差分画像を結合して JPEG ファイルを作成する。

実験

実験では、図 5.17 のカラー画像、温度画像のセットを用いて、復元後の画質制御を、復元情報の圧縮法、圧縮パラメータを変化させて調べる。まず、閾値によって、モザイクの領域を変化させられる様子、そして、それぞれにおける差分画像を図 5.18 に示す。また、他の映像効果の場合を図 5.19 に示す。差分画像を圧縮して保存すればよいので、処理も同じものとなる。

図 5.18 中の全画面モザイクに対して、差分情報を様々に圧縮して保持し、カラー原画像を復元した結果を図 5.20 に示す。表 5.3 に PSNR による定量的な評価結果をまとめる。JPEG 圧縮によって、差分画像が

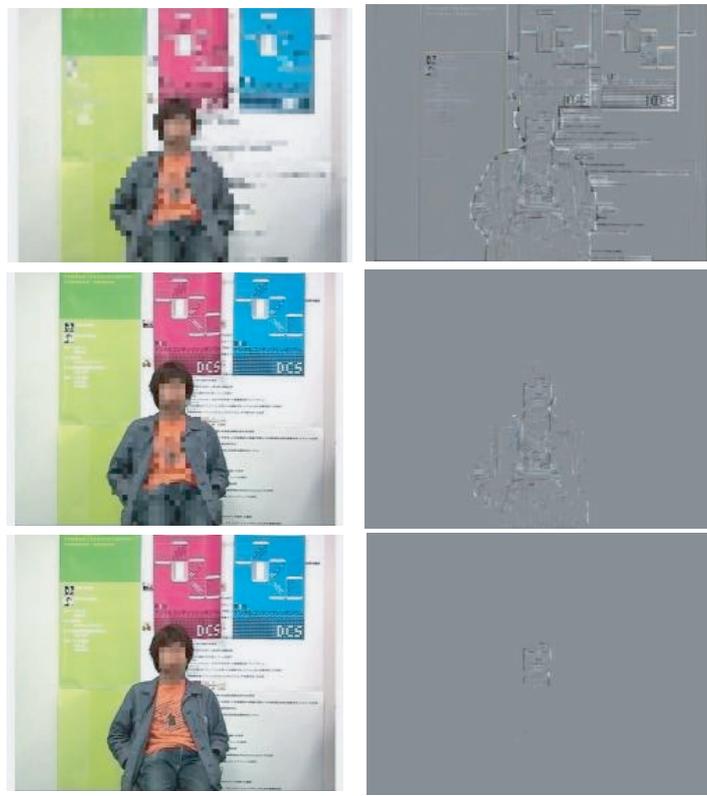


図 5.18: モザイク領域の変化と差分画像. (左側がモザイク画像, 右側が差分画像, 上段が画像全体にモザイク, 中段が体全体にモザイク, 下段が顔部分にモザイク.)

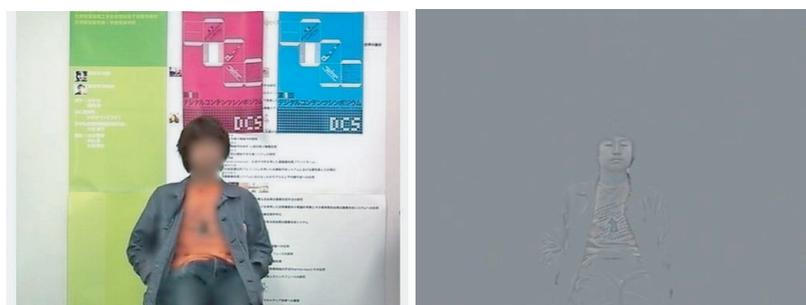


図 5.19: ぼかし効果 (左) と差分画像 (右).



図 5.20: 復元した画像 (差分画像の圧縮後の容量 左: JPEG [9kB], 中央: JPEG [70kB]: 右:zlib[250kB]).

表 5.3: 復元情報の圧縮法と復元後画像の画質 (PSNR) の関係.

復元情報	復元後の容量 (kB)	PSNR
zlib 可逆圧縮	250	52.96
JPEG 低圧縮	70	47.97
JPEG 高圧縮	9	30.52

効率的に符号化されていることが分かる。モザイク画像そのものの情報量と、差分画像の情報量、および要求される復元画質の関係については、今後の課題である。

5.5 まとめ

本章では、映像中の人物領域、または背景領域を隠す、という処理である Thermosaic (thermo-key の応用研究という位置づけである) の研究と、モザイク効果やぼかし効果付き画像から原画像を復元する手法について検討した。本章の研究は、21 世紀における放送、マルチメディア通信などにおいて、必要となることを予測、実装、検討したという意味で、エンドユーザに最も近い応用研究ということができる。そのため、新しい課題が、社会問題から与えられることも多く、これについては、常に考えていかなくてはならないものであるもいえる。

取材協力、報道関係、雑誌執筆などの論文外の成果として、[40, 41, 42, 43, 44, 45] がある。今後の課題としては、手法をより実用的にすることで社会に役立てていくということが大きなテーマであると考えている。

第6章

結論

6.1 結論

本論文では、可搬型 thermo-key システムの開発と、それに伴うシステム面の洗練、そして、コンテンツ製作基盤技術としての thermo-key のいくつかの応用について述べた。

第3章では、新システムの開発と、それに伴うアプリケーションの構築、機能の追加などについて述べた。GUIにしたことにより、誰でも簡単に扱うことができるようになったといえる。

第4章では、主に展示を意図した thermo-key におけるデジタルコンテンツの製作について述べた。

複数の機会で展示などを行うことにより、thermo-key という手法の実用性において一定の成果を社会に対して発信することができたと考えている。Thermo-key は、chroma-key といった既存のシステムにとって代わるべきものではなく、chroma-key 的な用途以外にも、温度情報を利用することで可能になる個性的なアプリケーションを提案する基盤となるものであると考える。筆者を含め、Thermo-key を研究している研究者達は、人物領域を切り抜いて仮想空間内に提示するいわゆる chroma-key 的な使い方よりも、むしろ、実世界の背景をそのまま用いることで、実世界の空間に複合現実的効果を与えることを主眼として研究をしてきている。これにより、thermo-key の表現における個性を示すことができたと考えている。

一方、thermo-key では、抽出精度や、さまざまな場所で使用することを考えてのロバスト性の検証も重要な研究テーマとして考えられる。これは、主に、4年生の岩田 啓氏が取り組んでいるテーマである。可搬型システムならではのものとしては、岩田氏が取り組んでいる屋外でのロバスト性に関する検証は避けては通れないものであり、これからの課題としても大きな意味を持つといえる。岩田氏は、屋外だけでなく、屋内における蛍光灯除去（温度が高い物体）をロバストに行う手法についても検討を行っており、将来的に thermo-key が実用化される場合、ワンタッチで蛍光灯除去モードなどを切り替えることができるインタフェースの提案を行っている。

6.2 今後の課題

今後の課題としては、thermo-key のロバスト性の向上を追求していくことが第一であると考えている。特に、屋外で撮影することができるので、多くのサンプルを得ることができ、それを元の実験を行うことが急務であろう。しかし、現状では、アプリケーションの起動には専用のフレームグラバを利用したデスクトップPCが必要となる。これを改善し、ノートPCで動かすことができるようになれば、さらにいろいろな場所で撮影することが可能になる。したがって、まずは、ハードウェア構成を再整備することが課題となり、その後に多くのサンプルを集める、というフェーズになっていくと考えられる。これを行うことで今までのアプリケーションがどんな状況で、どの程度動くかの目安を知ることができるだろう。これは実用化へのステップとなる。

同時に、DPA（デジタルパブリックアート）のように、thermo-key における表現をエンタテインメント、アート両側面から突き詰めていくことも課題である。画像処理システムにおける映像表現は、他のシステムと同様のものが生じやすい。その中で、温度メタファ（熱い、暑い、寒い、冷たい、温かいといった言葉に関連付けられる）を利用した映像効果や、その他、thermo-key を使わないと実現しないものを構築していくことはチャレンジングであるがやりがいのある課題である。多くの人に thermo-key の面白さ、有用性をアピールすることができるだろう。

また、Thermo-NINJA[38]、DPA[39]、そして、メディア芸術祭[46]での展示をはじめとして、より多くの方に thermo-key の体験をしてもらう努力も継続していくことが望ましい。

以上、ロバスト性の向上と、表現という2つの大きなテーマと、これを積極的に社会へ還元していくことが課題としてあるといえる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、これまで適切なご指導をいただき、貴重な研究の機会を提供してくださった原島博教授、苗村健助教授に厚く御礼申し上げます。原島教授には、研究活動全般に渡って、幅広い視野からの的確なアドバイスをいただきました。また、苗村助教授には、研究の進め方に関して様々なご助言をいただきました。さらに、長時間のミーティングや、実際に装置を見ていただいたり、ビデオ撮影をするときのアドバイスなど、実地でも親身になって支えていただきました。また、論文の共著になっていた飯田 誠助手には、論文の手直しなど、非常に有益なアドバイスをもらうことが多数ありました。深く感謝致します。

そして、本研究に欠かすことのできないシステムを共同開発していただいた NEC 三栄（株）様、特に、何度も研究室に足を運んでいただいた海瀬様、そして、実際にシステムの開発を行ってくれた山本様のグループには大変感謝いたします。このような形でのご協力は筆者の想像をはるかに上回るものであり、最高の環境を得ることができました。

原島・苗村研究室の皆様にも大変お世話になりました。特に、修士課程2年の時の、SIGDC チームの皆様には大変お世話になりました。博士課程3年 柿本 正憲氏には、グラフィックスに関する高度なノウハウを教えていただき、貴重な体験ができたこと感謝しております。修士課程2年の蓑毛 雄吾氏には、研究に関するブレインストーミングはもちろんのこと研究室生活を楽しくしてくれた意味でも非常に感謝しております。同じく、修士課程2年のチェン ドミニク氏には、私が保持していない高度なアートの知識など多数の有用な知識をご教授いただきました。感謝いたします。また、修士課程1年の北村 匡彦氏、川上 翔治氏の両氏には、研究室での研究環境を整えていただき、スムーズに研究を行うことができましたので、感謝しております。最後に、学部4年の岩田 啓氏とは、thermo-key の研究を共に行ったということもあり、同氏がいなければできなかったことが多数あることが容易に想像できる今、感謝の言葉もありません。

研究室 OB の牛田 啓太氏には、研究の楽しさという本質的なものを多様な観点から学ぶことができ、とても勉強になりました。また、同じ OB の伊藤 泉氏、井澤 克俊氏、安田 和隆氏の3氏にはしばしば励ましの言葉をいただきました。感謝いたします。博士課程3年の高橋 圭太氏には、高い視点から研究の行く末を見つめるということの重要性を学びました。また、細かいブレインストーミングなどにも付き合ってください、とても感謝しております。同じく博士課程3年の森村 久美子氏には、研究室の母として研究生生活全体を盛り上げていただきました。精神的に健康な状態で過ごせました。同氏のいない研究室が想像できないほどです。感謝いたします。博士課程2年の筧 康明氏にも研究のアドバイスをもらうことがございました。また、同氏の高い業績は常に私にとって刺激、奮起剤となるため、同氏には感謝しております。また、修士課程2年の中洲 俊信氏、田口 裕一氏、松岡 薫氏、そして、修士課程1年河 宗玄氏には、研究に関する議論だけでなく、研究生生活全体を盛り上げていただきました。特に松岡氏は、筆者の持ち合わせていない高度なプログラミングの知識をもって筆者の手助けをしていただきました。この場をお借りしまして心から御礼申し上げます。さらに、筧氏、チェン氏には、メディア芸術祭での展示におきまして、精緻なアドバイスをいただきました。大変感謝いたします。

最後に、研究のみならず私生活の面でも筆者を支えてくださった友人、そして家族への感謝の言葉をもって本論文の結びとさせていただきます。

2006年2月3日 西貝 吉晃

参考文献

- [1] 園田 頼信, 緒方 敏博, 松野 洋輔, “監視画像における対象物と影の分離 - カラー情報の利用-”, 信学技報, PRMU99-19 pp.1 – 6, (1999).
- [2] 松山 隆司, 和田 俊和, 波部 斉, 棚橋 和也 : “照明変化に頑健な背景差分”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.10, pp.2201 – 2211, (2001.10).
- [3] Y. Raja, S. J. McKenna, and S. Gong : “Tracking and segmenting people in varying lighting conditions using colour”, IEEE International Conference on Face & Gesture Recognition, pp.228 – 233, Nara, Japan, (1998).
- [4] 松橋, 藤本 他 : “顔領域抽出に有効な修正 HSV 表色系の提案”, テレビジョン学会誌, Vol.49, No.6, (1995.6).
- [5] Ivanov,Y.,Bobick,A. and Liu,J. : “Fast Lighting Independent Background Subtraction”, IJCV , Vol.37, No.2, pp.199 – 207, (2000).
- [6] R. Zahib and J. Woodfill : “Non-parametric local transforms for computing visual correspondence”, Proc. ECCV94, (1994).
- [7] Darrell,T.J.,Demirdjian,D.,Checka,N. and Felzenswalb,P.F. : “Plan-View Trajectory Estimation with Dense Stereo Background Models”, ICCV01, Vol.II, pp.628 – 635, (2001).
- [8] M. Kawakita, K. Iizuka, H. Nakamura, I. Mizuno, T. Kurita, T. Aida, Y. Yamanouchi, H. Mitsumine, T. Fukaya, H. Kikuchi, and F. Sato, et al: “High-definition real-time depth-mapping TV camera: HDTV Axi-Vision Camera”, Optics Express, Vol.12, No.12, pp.2781 – 2794, (2004).
- [9] Kazutaka Yasuda, Takeshi Naemura, Hiroshi Harashima : “Thermo-Key: Human Region Segmentation from Video Using Thermal Information”, ACM SIGGRAPH 2003 Emerging Technologies, Booth No. 40, San Diego, (2003.7).
- [10] Kazutaka Yasuda, Takeshi Naemura and Hiroshi Harashima : “Thermo-Key: Human Region Segmentation from Video,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 24, no. 1, pp. 26 – 30, (2004.1).
- [11] James W.Davis, and Vinay Sharma : “Robust Background-Subtraction for Person Detection in Thermal Imagery”, IEEE International Workshop on Object Tracking and Classification Beyond the Visible Spectrum, (2004).
- [12] インテリジェントナイトビジョンシステム : “歩行者の存在を知らせ, 注意喚起する世界初のシステム”, [自動車] レジェンドのオプション, 本田技研工業, (2004).
- [13] 川原 圭博, 松下 剛士, 新田 拓哉, 苗村 健, 原島 博 : “透過型ビデオアバタの提案と熱画像を利用した実時間システムの実装”, 映情学誌, 55, 5, pp. 746 – 750, (2001.5).

- [14] 松下剛士, 新田 拓哉, 苗村 健, 原島 博 : “空間共有通信における透過型ビデオアバタ”, 3次元画像コンファレンス 2001, pp. 29 – 32, (2001.7).
- [15] 安田 和隆, 飯田 誠, 苗村 健 : “温度情報と色情報を併用した実画像からの人物領域抽出”, 信学技報 PRMU2003-175, (2003.12).
- [16] Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork : “Pattern Classification 2nd edition”, Wiley-Interscience Publication, ISBN 0-471-05669-3, (2001).
- [17] Daisuke Iwai and Kosuke Sato : “Heat Sensation in Image Creation with Thermal Vision”, ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE2005), pp.213 – 216, (2005.6).
- [18] Kentaro Fukuchi, Sam Mertens, Ed Tannenbaum : “EffecTV: a real-time software video effect processor for entertainment”, Entertainment Computing - ICEC 2004 (LNCS 3166), pp.602 – 605, (2004.9).
- [19] Go Fujimoto, Masahiro Kawakita, Masa Inakage : “ZECTO” Cinematography for Depth-based Live-Action Imaging”, ACM SIGGRAPH2005 Sketches, (2005.8).
- [20] 岩井 俊雄 : “Another Time, Another Space in Marunouchi ～マシュマロスコープ”, (2002).
- [21] 川上 直樹, 稲見 昌彦, 柳田 康幸, 前田 太郎, 舘 : “現実感融合の研究 (第2報) Reality Fusion における光学迷彩技術の提案と実装”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.3, (1998.8).
- [22] “Open Source Computer Vision Library”, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>
- [23] de Queiroz, R.L., Braun, K.M. : “Color Embedding Into Gray Images”, ICIP 2005. IEEE International Conference on Image Processing 2005, Vol.3, 11-14, pp.944 –947, (2005.9).
- [24] 花木 真一, タンスリヤボンスリヨン : “状況映像におけるプライバシー保護”, 画像ラボ 2003年11月号, pp.40 – 44, (2003).
- [25] Itaru Kitahara, Kiyoshi Kogure, Norihiro Hagita : “Stealth Vision for Protecting Privacy”, Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2004), Vol.4, pp.404 – 407, (2004).
- [26] Michael Boyle, Christopher Edwards, and Saul Greenberg : “The Effects of Filtered Video on Awareness and Privacy”, Proceedings of the CSCW’00 Conference on Computer Supported Cooperative Work, ACM Press, (2000).
- [27] 岡山 F L M A S K 事件 (岡山地方裁判所平成9年12月15日) (確定) 判例時報 1641号 158頁, 判例タイムズ 972号 280頁, (1998).
- [28] 藪田 顕一, 北澤 仁志, 田中聡久 : “プライバシー保護と被写体の識別を両立させる固定モニタカメラ映像処理手法”, IE2005 SIP2005, pp.13–18, (2005.4).
- [29] “zlib”, 圧縮方式 <http://www.zlib.net/>
- [30] “blowfish”, ブロック暗号 <http://www.schneier.com/blowfish.html>

発表文献

- [31] Yoshiaki Nishigai, Makoto Iida and Takeshi Naemura : “Thermosaic: Automatic Obscure Effects Using Thermal Information”, International Workshop on Advanced Image Technology IWAIT2006, S08-1, (2006.1).
- [32] 西貝 吉晃, 飯田 誠, 苗村 健 : “Thermosaic: 温度情報を利用した自動モザイク処理”, 映情学誌, Vol.59, No.3, pp.422 – 426, (2005.3).
- [33] 西貝 吉晃, 飯田 誠, 苗村 健 : “Thermosaic におけるプライバシー保護のためのモザイク領域拡張法”, 映像情報メディア学会冬季大会, 1-8, (2005.12).
- [34] 西貝 吉晃, 飯田 誠, 苗村 健 : “Thermosaic: ライブ映像の自動モザイク処理”, 日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会, 1A2-1, pp.59 – 62, (2004.9).
- [35] 西貝 吉晃, 安田 和隆, 苗村 健 : “Thermo-key を利用したプライバシー保護のための実時間モザイク処理”, インタラクシオン 2004, pp.23 – 24, (2004.3).
- [36] 西貝 吉晃, 飯田 誠, 苗村 健 : “Thermo-key における情報埋め込み技術の応用”, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会, (2005.9).
- [37] 西貝 吉晃, 安田 和隆, 苗村 健 : “人物領域を重視した高圧縮画像符号化の検討”, 電子情報通信学会 2004 年総合大会, D-11-62, (2004.3).
- [38] 西貝 吉晃, 飯田 誠, 苗村 健 : “異次元へワープ!? ポストクロマキー・合成技術の新時代展 サーモキー”, SKIP CITY 彩の国ビジュアルプラザ 画像ミュージアム 未来画像ゾーン企画展, (2004.10.15 – 2005.1.30).
- [39] 西貝 吉晃, 岩田 啓, 飯田 誠, 苗村 健 : “第 1 回 CREST・デジタルパブリックアートシンポジウム”, デモ・ポスター発表, (2005.12).
- [40] 新聞報道 : “生中継、人物にぼかし 温度カメラ使い自動処理”, 日経産業新聞, 2004 年 2 月 16 日朝刊 8 面記事.
- [41] メールマガジン : “人物だけにモザイク、熱画像を利用した手法を苗村助教授らが提案”, 情報理工 ARA プログラム メールマガジン 第 22 号 2004.3.10.
- [42] メールマガジン : “人物背景をぼかして圧縮率を向上 – 苗村助教授らが手法を提案”, 情報理工 ARA プログラム メールマガジン 第 25 号 2004.4.21.
- [43] 取材協力 : “特集 2 最先端テクノロジーを行く 「サーモキー／サーモザイク」「LIFLET」「ルミサイトテーブル」”, AXIS 誌, Vol.110, pp. 58 – 59, (2004.7).
- [44] 西貝 吉晃, 飯田 誠, 苗村 健 : “サーモザイク : 温度情報を利用した自動モザイク処理”, 画像ラボ, Vol.16, No.11, pp.15 – 20, 日本工業出版, (2005.11).

- [45] 取材協力：“サーモで特殊映像”，テレビ東京 ワールドビジネスサテライト トレンドたまご, (2005.11.2).
- [46] 西貝 吉晃, 岩田 啓, 飯田 誠, 苗村 健：“先端技術ショーケース 未来のアート表現のために”，文化庁メディア芸術祭, 東京都写真美術館, (2006.02.24 – 2006.03.05).
- [47] 西貝 吉晃, ドミニク チェン：“NHK 放送博物館”，映像情報メディア学会誌 10月号, Vol.58, No.10, pp.42-45, (2004.10).
- [48] 西貝 吉晃, 蓑毛 雄吾：“本郷リサーチセンター”，映像情報メディア学会誌 2月号, Vol.59, No.2, pp.48-50, (2005.2).
- [49] 塚本 敏弘, 西貝 吉晃, 苗村 健：“Anisotropic diffusion を応用した thermo-key の抽出精度改善”，映像メディア処理シンポジウム (IMPS2004), pp.99-100, I-4.19, (2004.11).
- [50] 塚本 敏弘, 西貝 吉晃, 苗村 健：“非等方性最大値フィルタを用いた thermo-key の抽出精度改善”，映像情報メディア学会冬季大会, 13-10, (2004.12).
- [51] 塚本 敏弘, 西貝 吉晃, 苗村 健：“エッジ保存平滑化フィルタを用いた Thermo-key の抽出精度改善”，電子情報通信学会技術研究報告 PRMU2004-161, (2005.1).