

博士論文

視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタ  
—画像鮮鋭化と移動物体の見え方予測への応用—

(Digital Filters Based on Impulse Response Characteristics of Vision  
—Applications to Image Sharpening and Estimation of  
the Perceived Appearance of Moving Objects—)

2025 年 9 月

大 高 洸 輝

山口大学大学院創成科学研究科

# 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 視覚におけるインパルス応答特性 .....	2
1.3 研究目的.....	3
1.4 本論文の構成 .....	4
第2章 関連研究 .....	5
2.1 はじめに.....	5
2.2 動く物体の見え方に関する研究.....	5
2.3 画像鮮鋭化に関する研究 .....	7
2.4 視知覚のシミュレーションに関する研究 .....	7
2.5 まとめ .....	8
第3章 画像鮮鋭化手法の提案 .....	9
3.1 はじめに.....	9
3.2 ヒトの視覚特性を模擬した画質改善.....	9
3.3 視覚のインパルス応答における時間差を導入した画像鮮鋭化手法 .....	10
3.3.1 従来法.....	10
3.3.2 興奮性と抑制性の応答の時間差を導入した画像鮮鋭化手法 .....	12
3.3.3 シミュレーション動画像を用いた時間周波数特性の分析 .....	12
3.3.4 シミュレーション動画像を用いたコントラスト上昇特性と S/N 比の分析 .....	15
3.3.5 実際の動画像への適用 .....	19
3.4 視覚のインパルス応答に基づく画像鮮鋭化手法における画像品質の改善... 23	
3.4.1 視覚のインパルス応答に基づく画像鮮鋭化手法の欠点.....	23
3.4.2 鮮鋭化処理の効率化手法 .....	23
3.4.3 鮮鋭化画像の安定化手法 .....	25

3.4.4	鮮鋭化処理の効率化効果 .....	27
3.4.5	鮮鋭化画像の安定化効果 .....	29
3.4.6	内視鏡動画像への適用 .....	30
3.4.7	飛行する鳥のトラッキング動画像への適用 .....	33
3.5	鮮鋭感の評価実験 .....	35
3.5.1	評価対象 .....	35
3.5.2	実験環境および実験手続き .....	35
3.5.3	実験結果 .....	35
3.6	考察 .....	37
3.7	まとめ .....	37
第4章	移動物体の見え方予測への応用 .....	39
4.1	はじめに .....	39
4.2	移動物体と静止物体の見え方の違い .....	39
4.3	等速直線運動する図形に対する手法 .....	40
4.4	回転運動する図形に対する手法 .....	43
4.5	回転運動する図形に対する画像生成結果 .....	44
4.6	回転運動する物体の見え方予測（順変換）の評価実験 .....	46
4.6.1	予備観察 .....	46
4.6.2	刺激 .....	46
4.6.3	実験環境 .....	47
4.6.4	実験手続き .....	47
4.6.5	実験結果と考察 .....	48
4.7	回転運動時の見え方を想定した図形生成（逆変換）の評価実験 .....	51
4.7.1	予備観察 .....	51
4.7.2	刺激 .....	51
4.7.3	実験環境および実験手続き .....	51
4.7.4	実験結果と考察 .....	53

4.8 平行移動する対象の視覚状況を考慮した評価実験.....	56
4.8.1 実験目的.....	56
4.8.2 刺激.....	56
4.8.3 実験環境および実験手続き.....	56
4.8.4 実験結果と考察.....	59
4.9 総合考察.....	61
4.10 まとめ.....	61
第5章 結論.....	63
謝辞.....	64
参考文献.....	65



# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

ヒトの視覚特性に基づいたデジタルフィルタは、多くの画像処理技術において、なくてはならない有用なツールとして活用されている。これには、ヒトが観察する画像である場合、ヒトの視覚特性に基づいたものであることが有効であるという側面がある。また、ヒトが視知覚を進化の過程において獲得するにあたり、その獲得された視知覚の合理性を画像処理においても活用している側面もある。一方で、ヒトの視知覚のシミュレーションとして用いられることもある。

Gabor フィルタ[1]は、一次視覚野における単純型細胞の働きをモデル化できることが知られており[2]、顔認証システムに向けた顔画像の特徴量検出[3,4]やトンネル内の見えやすさ（明視性）を評価するためのエッジ検出[5]など、様々な画像における特徴抽出に応用されている。画像圧縮の際に発生するブロック歪みを除去するフィルタでは、ヒトの視覚特性として直線的なエッジは画素値の差が小さくてもよく目立つので、圧縮処理を行う矩形領域（ブロック）の境界の直線性をランダムに乱すことでブロック歪みを除去している[6]。ODOG（Oriented Difference of Gaussians）モデル[7]に基づくフィルタは、ヒトの知覚する明るさを予測することができ[8]、対象画像から重要度の高い領域を検出する際、検出アルゴリズムにかける前処理として用いることで検出精度を向上させることが示されている[9]。初期視覚野の細胞における神経活動をよく説明する運動エネルギーモデルにおいて、空間的には Gabor 関数、時間的には双極性インパルス応答関数を用いて時空間平面における傾き検出フィルタが構成されており[10]、動画を見た時の脳活動を高精度に予測することが示されている[11]。また、物体の境界を鮮明に観察させる鮮鋭化処理としてよく用いられるアンシャープマスキングフィルタ[12]は、視覚における側抑制機構を模している。このように、様々な分野において、視覚特性に基づくデジタルフィルタの有効性が報告されている。

本論文では、視覚のインパルス応答に基づくデジタルフィルタに着目する。次節において詳細を述べるが、視覚のインパルス応答とは視覚系における輝度インパルス光に対する時間応答特性を指す。

ヒトの視覚では、移動する物体の見え方は、その静止状態における見え方と異なることが知られており、対象が静止しているときよりも、動いているときを観察した方が物体境界を鮮明に知覚するモーションシャープニング現象[13]や、動きによって対象がぼやけて見えるモーションブラー現象[14]が報告されている。視覚のインパルス

応答は、モーションシャープニング現象およびモーションブラー現象を説明できると言われている[15]。この視覚特性に基づくデジタルフィルタを開発することで、動く物体を対象とした見やすさや見え方に関して様々な応用が期待できる。

これまでに、視覚のインパルス応答特性に着想を受けたデジタルフィルタリング処理によって動画像を鮮鋭化する手法[16]が提案されており、画像鮮鋭化技術へ応用することの有効性が示唆されている。しかしながら、この手法[16]では、視覚のインパルス応答特性を模擬しているわけではなく、それに着想を得てフィルタを設計しているために視覚特性とは大きく異なる。視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタの有効性を議論するためには、視覚特性に近づけた形でフィルタを設計し、その効果について調べる必要がある。

視覚のインパルス応答に基づくデジタルフィルタには別の応用も考えることができる。モーションシャープニング現象の予測[17]である。この予測[17]では、対象の移動速度が比較的低速な範囲に限られており、扱える運動の種類も平行移動のみであるものの、視覚のシミュレーション技術としての応用可能性が示唆されている。視覚のインパルス応答に基づくデジタルフィルタを視覚のシミュレーション技術として応用する有効性を議論するためには、扱える運動の種類を増やし、現実空間でより高速に移動する物体を対象として見え方の予測精度を調べる必要がある。ヒトの視覚を再現する試みとして、予測符号化理論[18]に基づいた深層学習モデル PredNet[19]を用いて、自動車の運転時における走行環境の予測[20]や動く錯視の再現[21]、フラッシュラグ錯視などの位置の錯視を再現[22]することが報告されているが、視覚のインパルス応答に基づいた手法は報告されていない。

## 1.2 視覚におけるインパルス応答特性

視覚におけるインパルス応答とは、瞬間提示された視覚刺激（いわゆるインパルス刺激やフラッシュ光）に対する応答である。

視覚系の輝度インパルス刺激に対する応答は、刺激発生時および背景輝度をゼロと考えた場合、基準から輝度の正方向へゆっくりと立ち上がって最大振幅に達し、それから応答が負となり輝度ゼロへ向かい、ゼロを過ぎて負の最大振幅に達し、最後は応答がなくなる（ゼロになる）[23]。応答全体の持続時間は、輝度インパルス応答の場合、およそ 100 ms 程度である[23]。また、応答の立ち上がりまでの時間は視野や皮質階層によって異なる。霊長類の神経節細胞におけるインパルス応答では、中心視より周辺視の方が応答の立ち上がりが早い[24]が、ヒトの一次視覚野ではより遅くなる[25]。

視覚におけるインパルス応答は、対象の空間周波数特性と数学的に密接に関係して

いる[26]. これは、時間的なコントラスト感度の特性を表す関数とも、数学的に同様な操作で関連付けることができる[27].

視覚のインパルス応答の測定方法として用いられるのは、二刺激光法[18]および時間コントラスト感度関数の計測[27]である.

二刺激光法とは、刺激光を短い時間に 2 回呈示し、その明るさの検出閾値を測定する方法である. 呈示時間の間隔を変えたときの閾値の変動を測定することによって、インパルス応答関数の形状を導出している[23].

時間コントラスト感度関数の計測例として、Kelly[28]は、円形で一様なパターンの明滅する刺激を用いて、この明滅を検出できる輝度コントラストの閾値を測定した. この逆数をコントラスト感度と定義し、明滅の時間周波数との関係を計測し、関数化した[28]. 平均輝度を高くすると、コントラスト感度のピークは高周波数へ移動し、低周波数に対するコントラスト感度は徐々に減衰することが示された[28]. ここでは、刺激の明るさを表す指標として網膜照度（単位：[td]）が用いられている. 網膜照度は瞳孔面積（単位：[mm<sup>2</sup>]）と輝度（単位：[cd/m<sup>2</sup>]）の積で表される[29].

時間コントラスト感度関数という時間周波数領域の特性は、時間領域ではインパルス応答関数に対応する[30,31]が、網膜照度が高いほどインパルス応答における負の応答成分（抑制成分）が強くなり、2相性となることが示されている[32,33].

### 1.3 研究目的

インパルス応答の活用は工学における基本の一つであり、インパルス応答によって扱う対象の状態が把握でき、またその対象を制御することも可能となる. しかしながら、これまで述べたように、視覚特性に基づいたデジタルフィルタを用いて視覚のインパルス応答を活用する試みは、いくつか見られるものの、その性能や実用可能性についての評価は十分ではなく、広く活用されている状況ではない.

本論文では、ヒトの視覚特性を理解し効果的に応用することを動機として、視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタリング処理を、画像鮮鋭化として応用することと移動物体の見え方予測として応用することを目的とする. 具体的には、以下の技術を提案する.

1. 視覚のインパルス応答を定性的に模擬したデジタルフィルタによる画像鮮鋭化技術
2. 視覚のインパルス応答を定量的に模擬したデジタルフィルタによって移動物体の見え方を予測する技術

これらを通じて、これまで着目されてこなかった視覚の動的特性をデジタルフィルタとして活用することによって得られる利点や有効性について述べる.

## 1.4 本論文の構成

本論文は，第 1 章で研究背景，目的，論文構成を述べ，第 2 章で，関連研究について概要を述べる．第 3 章において，視覚のインパルス応答に基づいたデジタルフィルタリング処理の画像鮮鋭化への応用について述べる．第 4 章において，移動物体の見え方予測への応用について議論する．第 5 章では，第 3 章と第 4 章を通じて得られた知見をまとめ，視覚のインパルス応答モデルに基づくデジタルフィルタリング処理の有用性と適用範囲について記述し，今後の課題について述べる．

## 第 2 章 関連研究

### 2.1 はじめに

本章では，本論文に関連する研究について概要を述べる．第 3 章と第 4 章の両方に関連する研究として，動く物体の見え方に関する研究について 2.2 節で述べる．2.3 節では，画像鮮鋭化に関する研究について述べる．これは主に第 3 章に関連する研究である．2.4 節において，第 4 章に関連する研究として，視知覚のシミュレーションに関する研究について述べる．

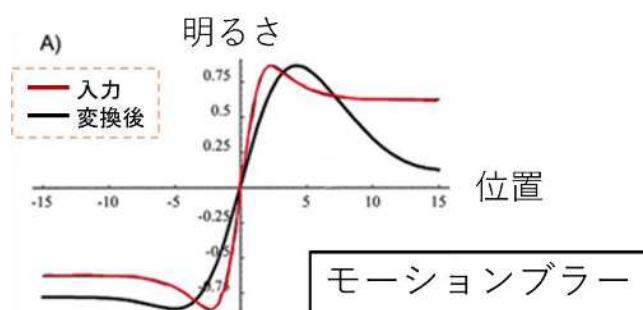
### 2.2 動く物体の見え方に関する研究

ヒトの視覚では，対象が移動している状態を観察した場合，その静止状態の見え方とは異なることが知られている．動きによって対象がぼやけて見えるモーションブラー現象や[14]，対象が動いているときの方が鮮明に見えるモーションシャープニング現象[13]が報告されている．

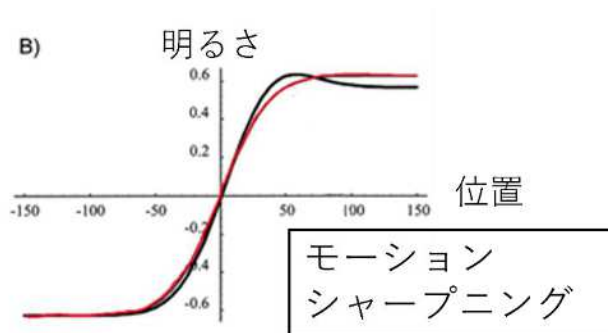
光の明滅周波数が高くなるとその明滅を知覚できなくなる[34,35]ことから，視覚は積分的な処理をしていると言える．これは，光学カメラにおける露光時間と対応しており，移動する対象を観察するとモーションブラー現象[14]を生じる．

モーションシャープニング現象[13]については，現象を説明する仮説やモデルがいくつか提唱されている．動きによって像がぼやけるため，ぼやけた対象はシャープになるように修正しているという仮説である[14,36,37]．しかしながら，これらの研究では，どのように修正しているのかについては指摘していない．また，Burr らは，高速で移動している対象は，視覚における周波数チャンネルで検出できないが，そういうところは，物体境界は鋭いものだとしているという仮説を提唱した[38]．ただし，根拠は示されていない．Pääkkönen らは視覚のインパルス応答が興奮性の応答と抑制性の応答を重ねあわせた形になっており，この応答特性によってモーションシャープニング現象もモーションブラー現象も説明可能であることを示した[15]．図 1 に例を示す．縦軸は明るさを表し，横軸は位置を表す．入力（赤線）は，出力（黒線）で示されている．図 1(a)の例において，入力は左側が暗く右側が明るいことを意味する．また，その明るさの勾配は急である．このような入力（赤線）が移動する場合，明るさの勾配が入力よりも緩やかになり，モーションブラーが生じることを説明している．図 1(b)の例では，明るさの勾配が緩やかな入力（赤線）が移動する場合，明るさの勾配が入力よりも急にな

っており、モーションシャープニングが生じることを示している。これは、モーションシャープニングの実験結果をすべて説明できるわけではないことが指摘されている[39]ものの、単純な線形モデルで表されていることが特徴である。Hammett らは、網膜皮質経路における細胞群の働きによってモーションシャープニング現象が生じると説明している[40]。網膜皮質経路には、M セル (Magnocellular cells) と P セル (Parvocellular cells) と呼ばれる細胞群が存在している。これらのうち、M セルは P セルに比べて応答速度は速いがダイナミックレンジは低い（より低いコントラストで反応が飽和してしまう）ことが原因ではないかと述べている[40]。



(a)



(b)

図1 モーションブラーとモーションシャープニングの例  
(Pääkkönen ら[15]より引用)

## 2.3 画像鮮鋭化に関する研究

画像処理の分野における鮮鋭化とは、物体境界を鮮明に知覚させる処理を指す。アンシャープマスキング[12]と呼ばれる手法はその一例である。入力画像に対して平滑化処理を施し、入力画像から引くことで画像内における物体境界を抽出する。これを入力画像に足し合わせることで、画像内の物体境界が強調された画像が得られる[12]。抽出した物体境界を入力画像に足し合わせる際に係数をかけることで、物体境界の強調具合をコントロールできる[12]。アンシャープマスキングの処理過程における平滑化処理では、平均化フィルタやガウシアンフィルタなど、様々な平滑化フィルタを用いることができる[12]。また、近年では深層ニューラルネットワークの導入によって技術の高度化が進んでいる。Kupyn ら[41]は、敵対的生成ネットワーク[42]に基づいて、画像のボケやブレを除去する手法を提案している。敵対的生成ネットワークでは「生成器」と「識別器」と呼ばれる 2 つのネットワークを敵対的に学習させることが行われる[42]。Kupyn らの手法では、生成器は入力されたぼやけ画像からボケを除去した画像（偽画像）を生成する。識別器は、生成器によって生成されたボケ除去画像と正解である鮮明な画像（本物画像）を入力として受け取り、偽物と本物を識別する。生成器は識別器に本物と判定される偽画像を生成するように学習し、識別器は本物と偽物を正しく判定できるように学習される[41]。この手法では、画像におけるボケやブレの特徴を学習し、入力画像からその特徴を取り除くことが行われる[41]。これによって、競合手法よりも、視覚的品質でも数値的評価でも競合手法よりも優れた性能を発揮することが報告されている[41]。Zhang らは 2 つの敵対的生成ネットワークから構成されるニューラルネットワークを用いて、画像のボケやブレを除去する手法を提案している[43]。一つは、鮮明な画像を入力として現実的なボケ画像を出力するためのネットワークで、もう一つは、ぼやけた画像を入力として鮮明に復元された画像を出力するためのネットワークである[43]。競合手法よりも優れた性能を示したことが報告された[43]。以上のように様々な鮮鋭化手法が提案されている。これらは、ヒトの視覚におけるモーションシャープニング現象のように動いている対象であるからこそ鮮明に知覚されるという視覚の特性を取り入れた手法ではない。

## 2.4 視知覚のシミュレーションに関する研究

予測符号化理論[18]は、大脳の視覚情報処理を説明する理論の一つである。これは、大脳の基本的な働きは予測にあるという考え方に基づいている。ヒトの感覚器から入力される情報は、実世界における膨大な情報のうちのごく一部にすぎないので、時々刻々と変化する現実世界においてリアルタイムで行動できるためには、予測によって

神経細胞の処理速度の遅延を補っているという考え方である。この予測符号化理論[18]に基づいた深層ニューラルネットワーク[19]を用いて、江村らは、走行中の車載カメラの前方映像から、運転者が走行環境をどのように認知しているか再現し、ヒヤリハットにつながる予兆を見出すことを試みている[20]。予測モデルを構築し、車載カメラが記録する急ブレーキ前後の動画を予測させることで、運転者の視覚が走行環境をどのように予測しているか可視化し、急ブレーキにつながる要因との関係进行分析している[20]。これは、運転時における人工的な視覚を作成し、注意を向けるべき領域を予測しようとするものである。また、予測符号化に基づく深層ニューラルネットワーク[19]は、動く錯視を再現することが報告されている[44]。動く錯視のテストデータセットを作成し、符号化理論に基づく深層ニューラルネットワークに入力し、生成される予測画像からオブティカルフローを計算したところ、ヒトの知覚と一致する並進運動が検出されたと報告している[44]。これは、静止画像を観察した際に動いているように見える現象を再現する試みであり、「動く物体がどのように見えるか」という予測をしているわけではない。

## 2.5 まとめ

本章では、本論文の位置づけを明確にするために、動く物体の見え方に関する研究、画像鮮鋭化に関する研究、視知覚のシミュレーションに関する研究について概要を紹介した。2.2節では第3章と第4章の両方に関わる研究について述べた。視覚のインパルス応答はモーションシャープニング現象の実験結果のすべてを説明できるわけではないものの、単純な線形モデルで示されており画像処理アルゴリズム化に適している。また、ヒトの視覚における特徴的な動的特性であるモーションシャープニング現象とモーションブラー現象の両方を説明できるため、動く物体の見え方に関して様々な応用が期待できる。2.3節では第3章に関わる研究について述べた。画像処理の分野において、様々な鮮鋭化手法が存在するが、視覚の動的特性を取り入れた手法は存在しない。2.4節では、第4章に関わる研究について述べた。視知覚のシミュレーションに関する研究では、視覚のインパルス応答に基づくデジタルフィルタリングによって移動物体の見え方を予測するものは存在しない。



## 第 3 章 画像鮮鋭化手法の提案

### 3.1 はじめに

本章では，視覚におけるインパルス応答モデルに基づくデジタルフィルタリング処理の画像処理としての応用方法について述べる．視覚のインパルス応答における興奮性応答と抑制性応答の時間差を導入した画像鮮鋭化手法を提案し，その有効性を検証する．また，提案手法による鮮鋭化処理によって生じる不自然な像や擬似輪郭を低減する手法も提案する．なお，提案手法は動画像を入力とし，そこから鮮鋭化された静止画を切り出すことを可能とする．

### 3.2 ヒトの視覚特性を模擬した画質改善

画像や映像の情報を伝達する際には，その出力画像について，自然さや視知覚の印象に近いものであることが要求される場合がある．そのため，ヒトの視覚特性を理解し，映像情報伝達技術へ応用することが以前から行われてきた．デジタルカメラやデジタルビデオでは，ヒトの視覚における明るさの恒常性を模擬した画像処理によって画像の階調特性を制御することで画質改善が行われたり[45]，ヒトの視覚における色の恒常性を模した画像処理によってホワイトバランス調整されたりする場合がある[46]．また，画像中の物体境界を鮮明に観察させる鮮鋭化処理としてよく用いられるアンシャープマスキング (Unsharp Masking, 以下 USM) は，ヒトの視覚において，物体の境界部分を強調する効果をもたらす側抑制機構を模擬した画像処理手法である．いずれも，比較的簡単な手法で，画像や映像の画質改善において有効性が示されている．

著者らは，これまでに，ヒトの視覚におけるモーションシャープニング現象を模擬した動画像鮮鋭化手法を開発している[47]．モーションシャープニングとは，注目対象が静止した状態を観察するよりも，動いている状態を観察した方が鮮明に見えることがあるという現象である．モーションシャープニング現象は，Ramachandran らによって報告され[13]，以降，これまでにいくつかの視覚メカニズムが仮説として説明されている[13,15,48,49]．著者らの開発した動画像鮮鋭化手法では，これらの仮説のうち，画像処理に適している Pääkkönen らによる視覚のインパルス応答モデル[15]を選択し，それを簡略化してモーションシャープニングを再現した[47]．この手法によって，動画像では視覚特性によって鮮鋭化されて観察されていた対象が，静止画像に

においても不明瞭になることを防ぎ、モーションシャープニングを再現することが可能になった。また、計算コストが低いこともこの手法の特徴の一つである。この類似の手法は特許化もされている[50]。著者らは、内視鏡動画像を対象に、カラー画像処理への拡張手法の提案および、その効果について検討し、胃内部の粘膜における毛細血管構造の鮮鋭化に成功している[51]。

なお、著者らの開発した動画像鮮鋭化手法[47,51]では、動画像中で動きのある対象に鮮鋭化効果が生じるという特徴がある。

本章では、これまでに開発した視覚のインパルス応答モデルに基づく動画像鮮鋭化手法を拡張し、より大きな鮮鋭化効果を得られる手法を提案する。

### 3.3 視覚のインパルス応答における時間差を導入した画像鮮鋭化手法

#### 3.3.1 従来法

視覚におけるインパルス応答は、興奮性応答と抑制性応答を重ね合わせた形になっており、この応答特性によってモーションシャープニングが説明可能であることが Pääkkönen らによって報告されている[15]。モーションシャープニングの実験結果をすべて説明できるわけではないことが指摘されている[36]ものの、視覚のインパルス応答モデルは単純な線形モデルで表されており、画像処理アルゴリズムとして実現しやすい。そのため、著者らは、視覚のインパルス応答モデルに基づいて、動画像鮮鋭化手法をデジタルフィルタリング処理として開発した[47]。この手法では、興奮性応答として正のガウス関数を、抑制性応答として負のガウス関数を用いて、それらを重ね合わせた曲線を近似特性として計算している。図 2 に視覚のインパルス応答とその近似特性を示す。図 2(a)において、黒い実線は Pääkkönen ら[15]によって示された視覚のインパルス応答特性である。赤い実線で示されたのは興奮性応答を表す正のガウス関数、青い実線で示されたのは抑制性応答を表す負のガウス関数である。

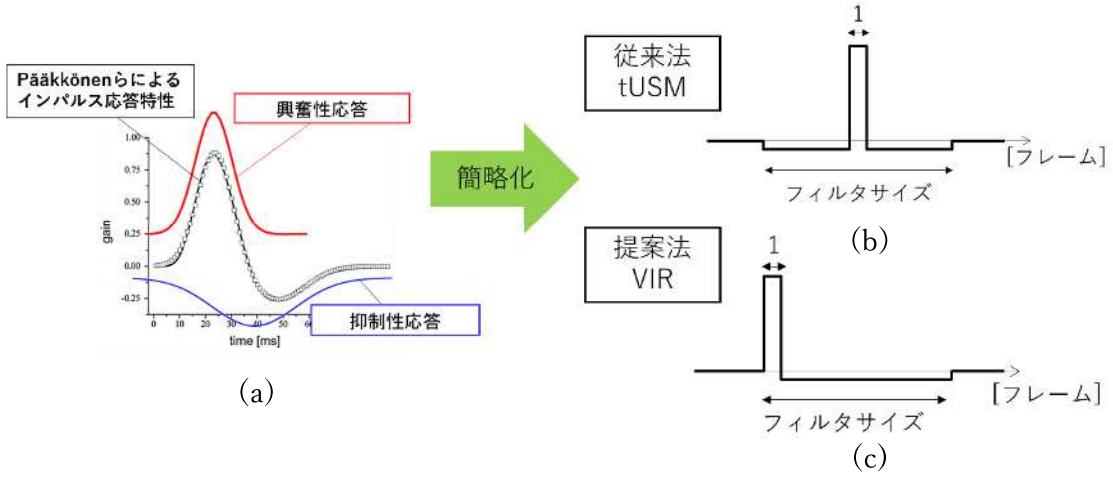


図2 視覚のインパルス応答特性と近似特性(一部 Pääkkönen ら[15]より引用)

計算方法を以下に示す.

入力画像を  $f(x, y, t)$  とする. 式(1)によってフィルタリング後の画像  $f_{tUSM}(x, y, t)$  を算出する. 式(1)において,  $\alpha$  は鮮鋭化度合いを表すパラメータである. 右辺第 1 項が正のガウシアンフィルタを簡略化した処理に相当し, 時間的な広がり は 1 フレームである. 右辺第 2 項は負のガウシアンフィルタを簡略化した処理に相当する. この簡略化処理の特性は図 2(b)に示した. ここでは, 正のガウス関数の最大値までの時間と, 負のガウス関数の最小値までの時間のずれは考慮していない. この計算方法は, USM を時間方向のフィルタリング処理へと拡張した手法と考えることができるため, この手法を Temporal Unsharp Masking と呼び, 以降, tUSM と表記する.

$$f_{tUSM}(x, y, t) = (1 + \alpha)f(x, y, t) - \alpha f_{tAV1}(x, y, t) \quad (1)$$

ここで,  $f_{tAV1}(x, y, t)$  は式(2)で与えられる. 注目する時刻  $t$  を中心とする局所的な時間窓  $\delta T + 1$  の間の平均値を表す. この平均値の算出では,  $\delta T + 1$  フレームがフィルタの時間的な広がりを表す.

$$f_{tAV1}(x, y, t) = \frac{1}{\delta T + 1} \sum_{j=-\delta T/2}^{\delta T/2} f(x, y, t + j) \quad (2)$$

### 3.3.2 興奮性と抑制性の応答の時間差を導入した画像鮮鋭化手法

従来法では、式(1)における平均値の算出において、時刻 $t$ を中心とした $\delta T+1$ フレームの時間的な広がりをもつ局所時間窓を用いていた。これは、USMによる画像鮮鋭化において、上下や左右で異方性を持たせることはないのと同様の考えによるものである。この計算方法では、図 2(a)における視覚のインパルス応答の興奮性応答と抑制性応答の時間差を考慮していない。これまで、この時間差が画像鮮鋭化において、どのような効果をもたらすのかについては議論されてこなかった。

本章では、従来法[47]を次のように拡張した手法を提案する。

入力画像を $f(x, y, t)$ として、式(3)によってフィルタリング後の画像 $f_{VIR}(x, y, t)$ を求める。式(3)において、 $\alpha$ は鮮鋭化度合いを表すパラメータである。ここで、右辺第 1 項が正のガウシアンフィルタを簡略化した処理に相当し、時間的な広がり は 1 フレームである。右辺第 2 項は負のガウシアンフィルタを簡略化した処理に相当する。この手法では、視覚のインパルス応答特性における興奮性の応答と抑制性の応答の時間差が導入されている。式(3)における $\Sigma$ の上限を 0 とすることで、この時間差が大きい条件でその効果を調べる。簡略化されたフィルタの概形は図 2(c)に示した。この手法を Vision Impulse Response filter と称し、以降、VIR と表記する。

$$f_{VIR}(x, y, t) = (1 + \alpha)f(x, y, t) - \alpha f_{tAV2}(x, y, t) \quad (3)$$

ここで、 $f_{tAV2}(x, y, t)$ は式(4)で与えられる。注目する時刻 $t$ から遡って局所的な時間窓 $\delta T+1$ の間の平均値を表す。

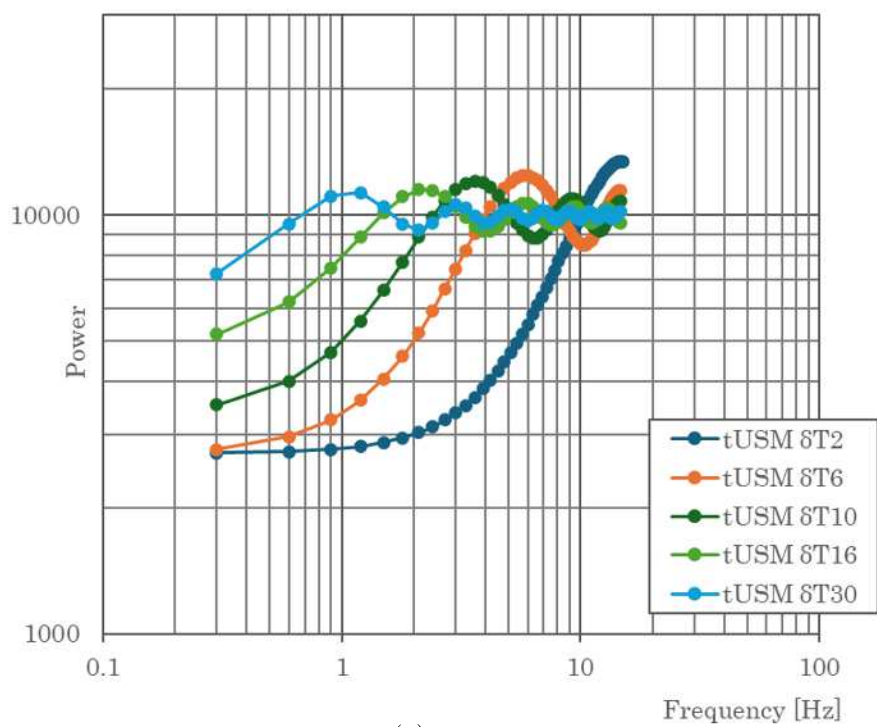
$$f_{tAV2}(x, y, t) = \frac{1}{\delta T + 1} \sum_{j=-\delta T}^0 f(x, y, t + j) \quad (4)$$

### 3.3.3 シミュレーション動画像を用いた時間周波数特性の分析

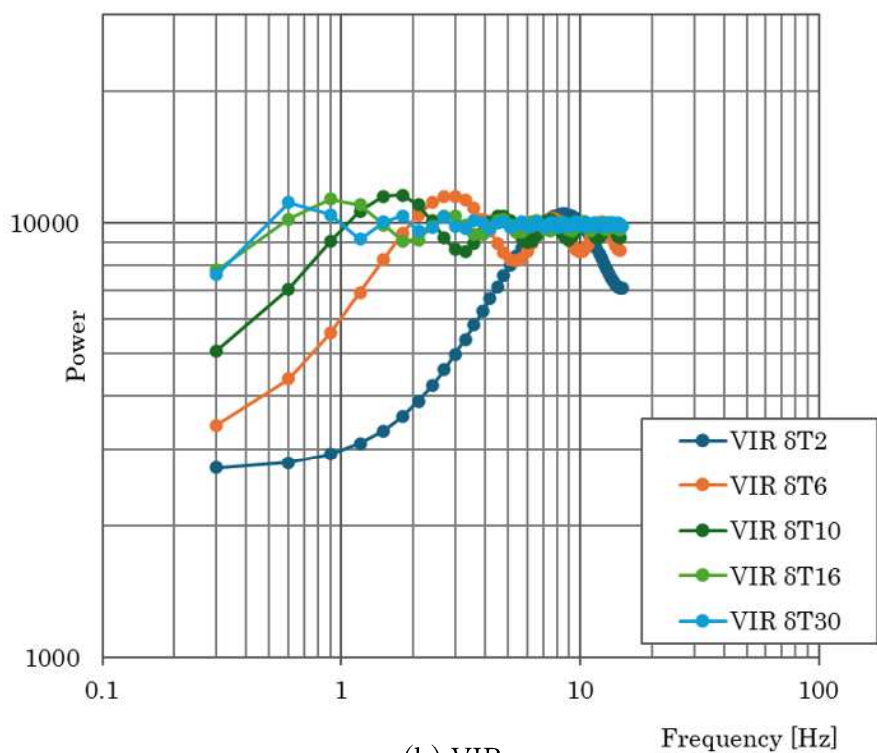
従来法である tUSM と提案手法である VIR の特性の違いを調べるために、シミュレーション動画像を用いて各手法における時間周波数特性を分析した。シミュレーション動画像では、インパルス刺激を次のように模擬した。動画像中のある 1 フレームのみ明るくなる（濃淡値が基準値よりも高くなる）ものとした。8[bit]グレースケールに

おける濃淡値 100 を基準とし、明るくなったときの濃淡値は 150 であった。フレームレート 30[fps]の動画像を想定した。数値的な分析を行うため、1[pixel]の濃淡値が変化する動画像とした。

シミュレーション動画像に対して、tUSM および VIR による鮮鋭化処理をした後、FFT を用いてパワースペクトルを求めた。このとき、鮮鋭化度合いを表すパラメータ  $\alpha$  はすべて 1 であった。結果を図 3 に示す。図 3(a)には、フィルタの時間的な広がりを表す  $\delta T$  を変化させた際の tUSM の時間周波数特性が、図 3(b)には、同様に  $\delta T$  を変化させた際の VIR の時間周波数特性が示されている。図 2(b)や(c)に示したように、tUSM および VIR は、フィルタ特性として与えた概形が矩形であるため、フーリエ変換によってパワースペクトルに振動が現れるものの、いずれの手法においても、ある周波数にピークをもつバンドパス特性を有していた。そして、いずれの手法も  $\delta T$  が大きくなるほど、パワー最大のピークが低周波数側に移動する特性を示した。このピーク周波数が移動するバンドパス特性は、Kelly による視覚の時間周波数特性[22]に見られる特徴の一つである。tUSM および VIR において、同じ  $\delta T$  に対するピーク周波数を比べると、VIR の方が tUSM よりも 2 倍から 3 倍程度低くなることが分かった。これは、VIR と tUSM が、同じフィルタサイズであっても異なる周波数帯域を鮮鋭化することを意味する。



(a) tUSM



(b) VIR

図3 時間周波数特性

### 3.3.4 シミュレーション動画像を用いたコントラスト上昇特性と S/N 比の分析

平行移動する物体を再現したシミュレーション動画像を用いて、tUSM（従来法）および VIR（提案手法）の鮮鋭化効果を比較した。ここでは、コントラスト上昇効果について比較する。シミュレーション動画像では、 $432 \times 320$ [pixel]の 8[bit]グレースケール画像において、濃淡値 100 の背景の中を濃淡値 150 で描画された矩形を、画面向かって左から右へ等速で平行移動させた。矩形の大きさは  $50 \times 50$ [pixel]であった。矩形の移動速度は  $1$ [pixel/frame]であった。図 4(a)にシミュレーション動画像におけるある 1 フレームを抽出して示した。この画像の中心線となるピクセル行に着目し、 $x$  軸方向の濃淡値変化をプロットすると、ステップ状の変化となっている。プロット結果は図 4(b)に示した。図 4(a)に示したフレームを原画像として、その濃淡値プロットを赤線で示している。

この動画像に対し、tUSM を適用した結果を図 4(c)に、VIR を適用した結果を図 4(d)に示す。いずれも、鮮鋭化処理後、図 4(a)と同じフレームの画像を抽出し、原画像と同じピクセル行における濃淡値変化をプロットした。鮮鋭化効果が分かりやすいように、原画像の濃淡値プロットを示す赤線の上に重ねて示している。条件を同じにするために、鮮鋭化度合いを表すパラメータ  $\alpha$  はすべて 1 とし、フィルタサイズを表す  $\delta T$  はいずれも 10 とした。

図 4(c)より、tUSM では、動画像において動きのある物体について、その物体境界の両側に対称な鮮鋭化効果を生じた。図 4(d)より、VIR では、動画像中で動きのある物体の境界部において、その両側に非対称な鮮鋭化効果を生じた。物体境界に生じた鮮鋭化効果を局所的に見た場合（本シミュレーション画像における進行方向の前後部分を別々に見る場合）、濃淡値の最大値と最小値の差は、tUSM も VIR もほぼ等しいが、画像全体で見ると、VIR の方がその差は大きかった。

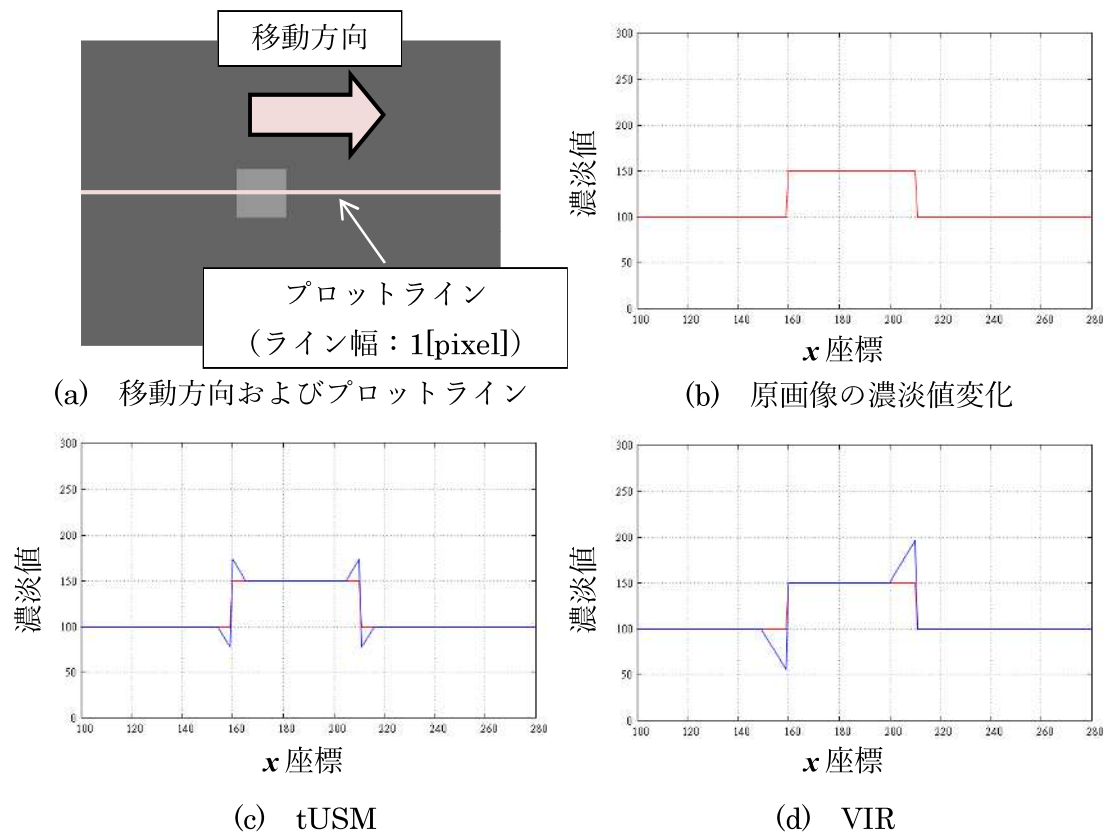


図4 シミュレーション動画像の鮮鋭化結果

表1 各 $\delta T$ におけるコントラスト値

局所時間窓 $\delta T$ [フレーム]	コントラスト [%]	
	tUSM	VIR
2	33.1	46.6
6	37.1	53.8
10	37.8	56.2
16	38.6	57.8
30	39.4	58.6



式(5)によって、各画像におけるマイケルソンコントラストを求めた。ここで、コントラスト  $C$ 、濃淡値の最大値  $I_{max}$ 、濃淡値の最小値  $I_{min}$  とする。

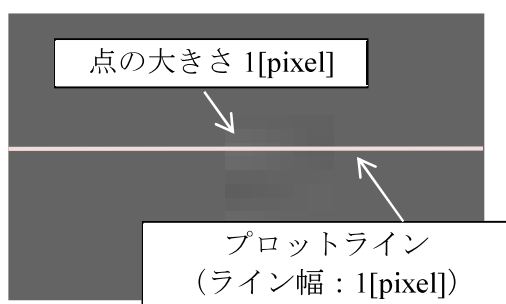
$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100 \quad (5)$$

各  $\delta T$  におけるコントラスト値を表 1 に示す。  $\delta T$  が 10 の場合において、tUSM のコントラスト値は 37.8%であるのに対し、VIR のコントラスト値は 56.2%であった。いずれの手法も、  $\delta T$  が大きくなるにつれコントラスト値も大きくなる傾向があった。同じ  $\delta T$  であれば、VIR の方が tUSM より約 1.5 倍のコントラスト上昇効果があることが分かった。VIR における平均値算出処理のように、視覚のインパルス応答における興奮性応答と抑制性応答の時間差を導入することによって、物体全体のように広い領域で見た場合、コントラストがより上昇することが分かった。

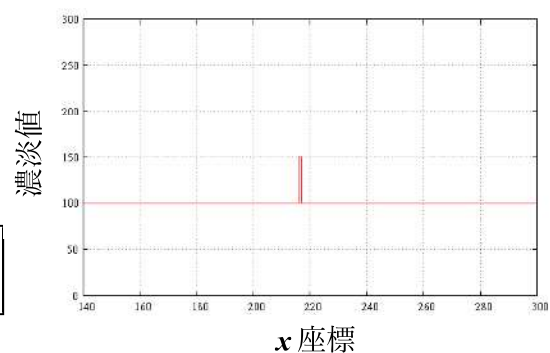
一方で、ごま塩ノイズを再現したシミュレーション動画像を用いて、tUSM および VIR による画像鮮鋭化におけるコントラスト値の変化を調べた。シミュレーション動画像では、背景を濃淡値 100 とし、大きさ 1[pixel]で濃淡値 150 の点が動画像中のある 1 フレームにのみ現れるようにした。図 5(a)に、濃淡値 150 の点が現れた瞬間のフレームを抽出して示した。矩形が平行移動するシミュレーション動画像のときと同様に、この画像を原画像とし、画像の中心線となるピクセル行における  $x$  軸方向の濃淡値変化をプロットして赤線で示したものが図 5(b)である。シミュレーション動画像に対して tUSM を適用し、図 5(a)と同じフレームを抽出した画像の中心線となるピクセル行の濃淡値変化を青線でプロットした結果を図 5(c)へ示した。原画像の濃淡値変化に重ねてプロットしている。同様に、VIR を適用し、濃淡値変化をプロットした結果を図 5(d)に示した。また、各画像について、式(5)を用いてマイケルソンコントラストを求めた結果を表 2 に示す。この結果より、同じ  $\delta T$  であれば、ごま塩ノイズを模した動画像に対するコントラスト上昇は、tUSM と VIR で同じであることが分かった。

矩形対象の移動シミュレーション動画像に対する tUSM および VIR の鮮鋭化結果では、VIR の方が tUSM よりも大きなコントラスト上昇効果を得られていたため、ごま塩ノイズの場合、VIR は tUSM に比べ S/N 比を大きくする鮮鋭化が可能であることを意味する。図 4(a)に示した平行移動する矩形のシミュレーション画像に対して、S/N 比 20[dB]でノイズを付加した画像を対象として、tUSM および VIR を適用した際の S/N 比を表 3 に示す。S/N 比は式(6)によって求めた。

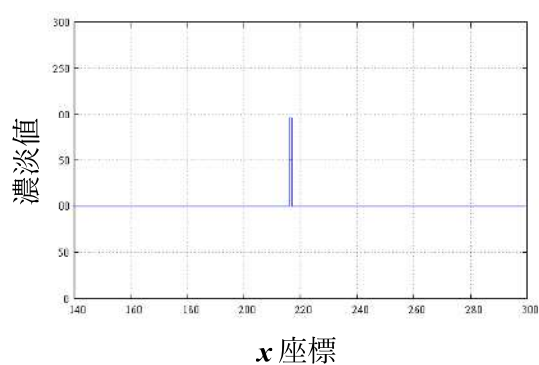
$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_s^2}{MSE} \right) \quad (6)$$



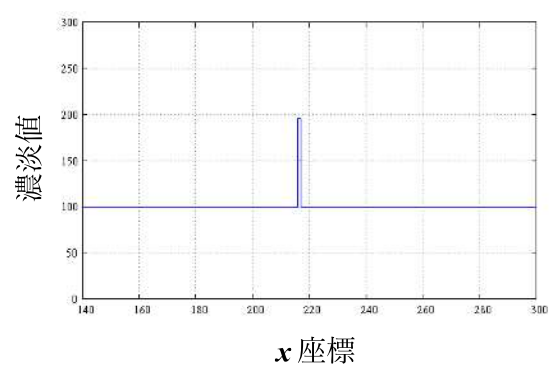
(a) 点の部分の拡大図



(b) 原画像の濃淡値変化



(c) tUSM



(d) VIR

図5 ごま塩ノイズシミュレーション動画像の鮮鋭化結果

表2 ごま塩ノイズ画像鮮鋭化におけるコントラスト値

局所時間窓 $\delta T$ [フレーム]	コントラスト [%]	
	tUSM	VIR
2	29.6	29.6
6	31.7	31.7
10	32.4	32.4
16	32.9	32.9
30	33.1	33.1

表 3 tUSM および VIR による鮮鋭化処理の S/N 比の比較

鮮鋭化度合いを表すパラメータ $\alpha$	tUSM	VIR (提案手法)
	S/N比 [dB]	S/N比 [dB]
1	8.04	10.0
1.5	7.65	10.3
2	7.41	10.5

式(6)において、 $\sigma_s^2$  は、tUSM や VIR によって鮮鋭化された（ノイズを含まない）矩形のシミュレーション画像における濃淡値の分散を表す。また、MSE は平均 2 乗誤差を表す。tUSM および VIR とともに、 $\delta T$  は 10 とした。表 3 より、鮮鋭化度合いを表す  $\alpha$  を変化させた場合においても、VIR の方が tUSM よりも大きくなることを確認した。VIR のように、視覚のインパルス応答における興奮性と抑制性の応答の時間差を考慮することで、S/N 比が改善されることが分かった。

### 3.3.5 実際の動画像への適用

化学反応動画像：

化学反応の様子を撮影した動画像を対象として、tUSM および VIR による鮮鋭化結果を比較した。図 6 に結果を示す。対象の動画像では、ペローゾフ・ジャボチンスキー反応の様子が撮影されており、化学反応によって形成される時空間パターン[52]を、シャーレ上部から観察している。動画像中のある 1 フレームを抽出した画像を図 6(a) に示した。解像度は  $550 \times 480$  [pixel] であり、8[bit] グレースケール画像であった。動画像中には、2 種類の動的パターンが含まれていた。一つは、短い空間波長の周期的な酸化還元の位相波（図 6 における細い縞模様の部分）がゆっくりとシャーレ中心から外へ向かって同心円状に伝搬するパターンであった。このパターンを、以降、酸化

還元波と呼ぶ。酸化還元波の空間波長は約 4[pixel]であり、伝搬速度は約 1[pixel/frame]であった。もう一つは、長い空間波長のらせん状濃淡が高速に右回転するように観測されるパターンであった。以降、対流波と呼ぶ。図 6(a)において注目対象として示している部分である。これは、溶液内に発生した対流が酸化還元波に明るさの変調をもたらし、それが観測されている[52]。対流波の空間波長は約 91[pixel]であり、移動速度は約 18[pixel/frame]であった。この動画像においては、30[frame/s]で再生していると、対流波が回転している様子が目視で明瞭に観察できるが、再生を停止すると、図 6(a)のように、対流波として見えていた濃淡の境界が不明瞭になる。この動画像は、ヒトの視覚におけるモーションシャープニング現象が顕著に観測される例である。

この動画像を対象に、鮮鋭化処理としてよく用いられる USM を図 6(a)と同一フレームへ適用した結果を図 6(b)に示す。そして、tUSM と VIR を適用し、図 6(a)と同じフレームを抽出した画像を図 6(c)と図 6(d)に示す。比較しやすくするために、USM には図 7 のカーネル値を用いた。tUSM および VIR では、 $\delta T$  を 16 とした。この値は、2 から 30 の間の整数値で変化させた際に、両手法において最も対流波の視認性が高かった値として採用した。また、観察しやすくするために、両手法とも  $\alpha$  は 2 とした。

図 6(b)から分かるように、USM による鮮鋭化では酸化還元波の縞模様は鮮鋭化されるものの、対流波の鮮鋭化効果は得られなかった。これは、USM における鮮鋭化度合いをさらに高くしても変わらなかった。一方、図 6(c)と(d)のように、tUSM および VIR では、酸化還元波の縞模様だけでなく、注目対象である対流波の鮮鋭化に成功している。また、シミュレーション動画像で確認したように、同じ  $\delta T$  であれば、VIR は tUSM よりも大きなコントラスト上昇効果が得られることを実画像においても確認した。

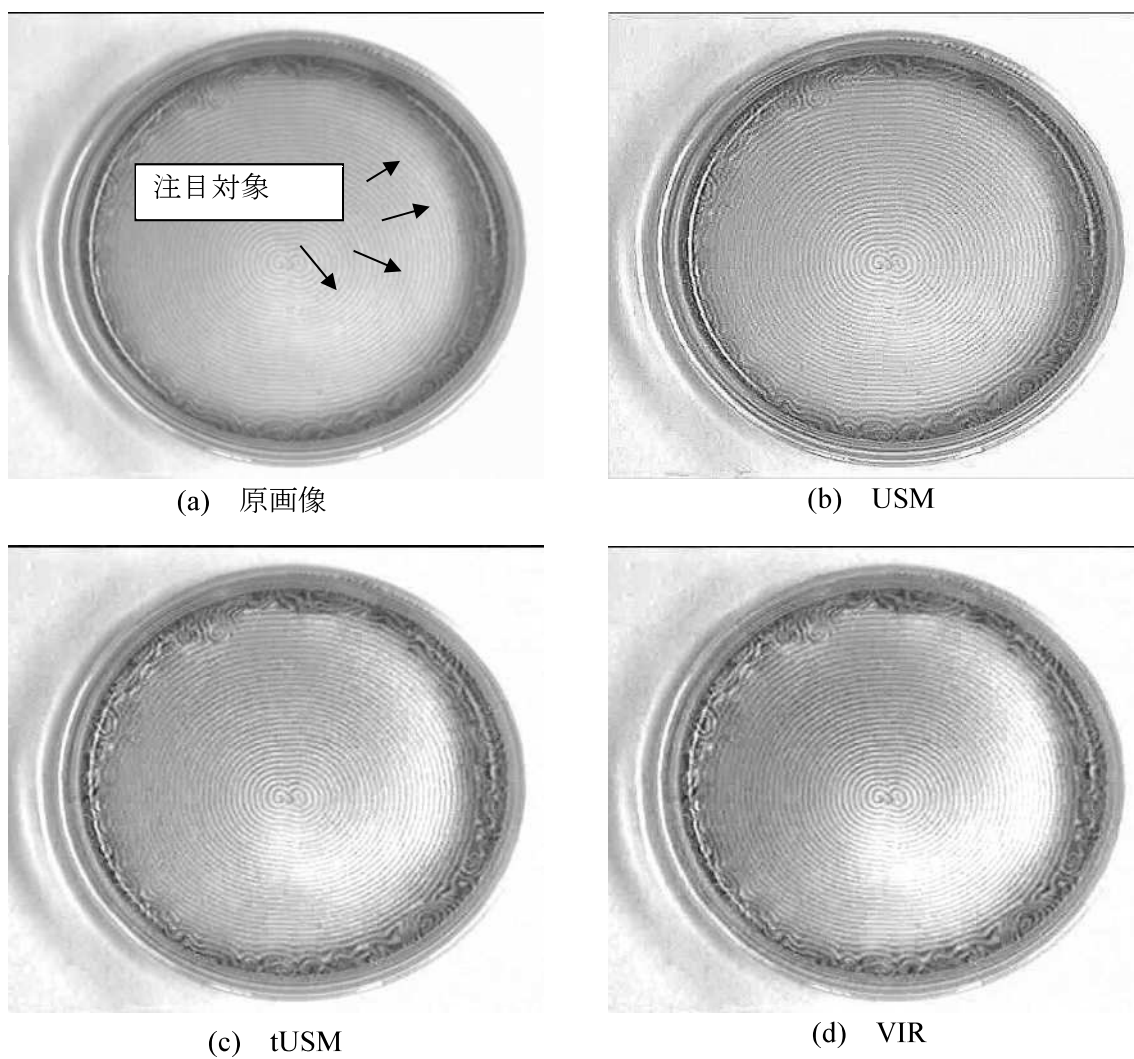


図6 化学反応動画像の鮮鋭化結果

0	-2	0
-2	9	-2
0	-2	0

図7 USM フィルタのコンボリューションカーネル

振動するろうソク火炎上空の対流構造可視化動画像：

振動するろうソク火炎上空の対流をシャドーグラフ法によって可視化した動画像を対象に，tUSM および VIR による鮮鋭化結果を比較した．動画像の撮影は，高速度カメラ（CASIO EXILIM EX-ZR100, 240[fps]）によって行われた．動画像中のある 1 フレームを抽出した画像を図 8(a)に示す．解像度は  $320 \times 432$ [pixel]であり，8[bit]グレースケール画像であった．

この動画像に対し，tUSM および VIR を適用し，図 8(a)と同一フレームに対応する結果を図 8(b)と図 8(c)に示す．両手法とも， $\delta T$  は 10 とした．この値は，2 から 30 の間の整数値で変化させた際，両手法において最も対流構造の視認性が高かった値として採用した．また，観察しやすくするために，両手法とも  $\alpha$  は 2 とした．

図 8 より，両手法とも原画像より対流構造の視認性が向上している．式(5)を用いて求めたコントラスト値は，原画像が 26.9%であるのに対して，tUSM は 54.3%であり，VIR は 62.0%であった．VIR において，特にコントラストが改善されていることが分かった．さらに，対流構造が特に不明瞭な画像上半分の領域において，tUSM よりも VIR において視認性が改善された．シミュレーション動画像を用いた鮮鋭化効果の比較で確認したように，VIR は tUSM と比べ S/N 比を大きくする鮮鋭化が可能であることを実画像においても確認した．

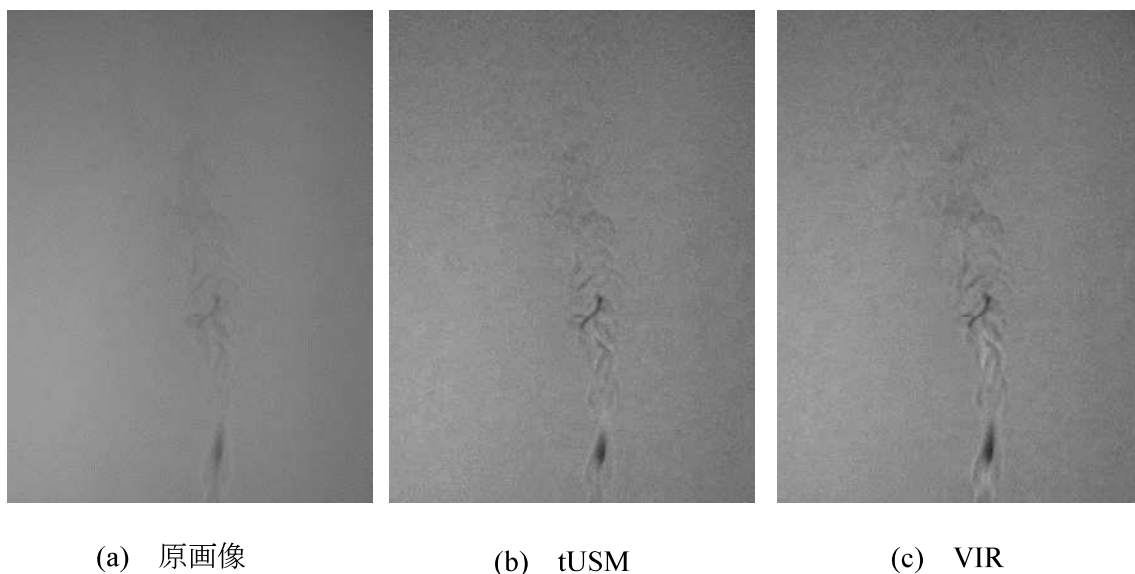


図 8 ろうソク火炎上空の対流動画像の鮮鋭化結果

## 3.4 視覚のインパルス応答に基づく画像鮮鋭化手法における画像品質の改善

### 3.4.1 視覚のインパルス応答に基づく画像鮮鋭化手法の欠点

tUSM では、急速に移動する物体の場合、フレーム間の移動距離が大きくなり、そのため、鮮鋭化処理によって擬似輪郭が出現するという欠点が報告されている[47]. 視覚のインパルス応答モデルにおける興奮性と抑制性の応答の時間差を導入した場合、より大きな鮮鋭化効果を得られる分、この擬似的な像もより鮮鋭化された.

ここでは、鮮鋭化処理によって生じる擬似的な像を低減し、出力画像の品質を改善する手法を提案する. その際、鮮鋭化処理を効率的に行うために、計算コストをより低減した手法として提案する.

### 3.4.2 鮮鋭化処理の効率化手法

VIR では、処理対象とする現在フレームの他に、鮮鋭化処理対象となるフレームから遡った  $\delta T$  で指定する枚数の過去フレームを用いて時間平均画像を算出する. この処理自体は各画素で独立であり大幅な計算コストを必要とするものではないが、次節で提案する鮮鋭化画像の安定化手法では、過去フレームほど空間的に平滑化された画像情報を要求するため、平滑化処理に計算コストの大幅な増加が生じる. そこで、現在フレームと平均画像フレームの 2 枚のみを使用して、VIR に類似した結果を得ることを試みる. これによって、計算コストが削減できるだけでなく、鮮鋭化処理で必要とする計算資源（ここでは、メインメモリを想定）も削減することが可能である. 処理手順を以下に示す.

- ① 処理開始時においては、鮮鋭化処理対象のフレーム  $f(x, y, t)$  の 1 フレーム前の  $f(x, y, t-1)$  を、そのまま平均画像フレーム  $f_{tAV3}(x, y, t)$  に格納する.
- ② 式(7)により鮮鋭化画像  $f_{VIR2}(x, y, t)$  を求める.

$$f_{VIR2} = (1 + \alpha)f(x, y, t) - \alpha f_{tAV3}(x, y, t) \quad (7)$$

- ③ 式(8)により、次回の処理で用いる平均画像フレーム  $f_{tAV3}(x, y, t+1)$  を求める.

$$f_{tAV3}(x, y, t+1) = \frac{wf(x, y, t) + f_{tAV3}(x, y, t)}{w + 1} \quad (8)$$

- ④ 鮮鋭化処理対象時刻を 1 フレーム後ろに移す. そして処理②～④を繰り返す.

式(7)の右辺第 1 項が興奮性応答を簡略化した処理であり、第 2 項が抑制性応答を簡略化した処理である。ただし、抑制性応答として十分な効果を発揮するためには、処理開始後に十分な平均をとる必要がある。このフィルタの特性は図 9 に示す。

ここで重み  $w$  は、VIR において、抑制性応答の特性を操作するパラメータ  $\delta T$  に類似する働きをもつ。あるフレームの画像データは、式(9)により  $n$  フレーム後の平均画像フレームにおける寄与率が求まる。

$$\frac{w}{w+1} \left( \frac{1}{w+1} \right)^{n-1} \quad (9)$$

すなわち、 $w$  が大きいほど  $n$  の増加量に対する情報の減少が大きいことを意味する。これは、VIR において平均化する過去が短い ( $\delta T$  が小さい) 場合に相当する。逆に、 $w$  を小さくすると  $\delta T$  が大きい場合に相当する。

例えば、 $w$  が 2 のとき、 $n = 4$  の平均画像フレームにおいて、あるフレームにおける情報の寄与率は約 2% になる。一方、 $w$  を 0.2 にすると、あるフレームにおける情報の寄与率が 2% まで低下するには  $n = 12$  が必要となる。

本論文では、この手法を「VIR2」と呼ぶことにする。

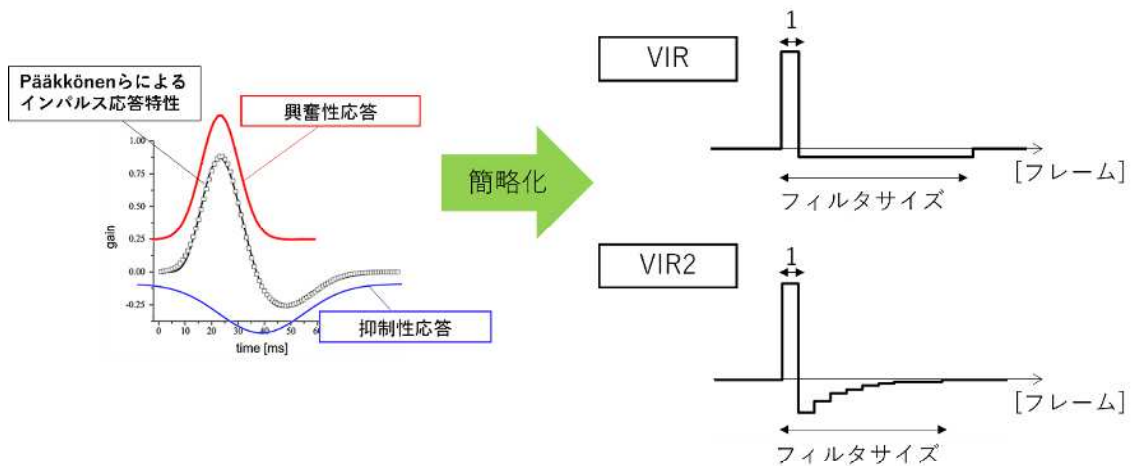


図 9 VIR の概略および VIR2 の概形(一部 Pääkkönen ら[15]より引用)



### 3.4.3 鮮鋭化画像の安定化手法

VIR では、被写体の移動速度が大きく、フレーム間の同一位置における明度の時間変化が大きい場合、その位置での鮮鋭化画像が不自然に見えることがある。例えば、明度差が大きい物体同士がオクルージョンの関係を持っており、それらが高速で見え隠れした場合に擬似輪郭が発生する。

図 10 は、内視鏡動画像を対象としたときの、VIR による不自然な鮮鋭化の例である。内視鏡が移動した際に、手前にある明るく照らされた胃壁が、奥の暗い胃壁の前を急激に横切ったあるフレームを示している。VIR の適用により、明るい部分はより明るく、暗い部分はより暗くなり、画像の鮮鋭化効果が期待できる。しかしながら、図 10(b)では、鮮鋭化によって暗くなった部位に擬似輪郭を発生させており、観察者に鮮鋭化された本来の輪郭とは別の位置に、黒い模様を認識させてしまう可能性がある。逆に、明るい物体の上を、暗い物体が通過した場合には、1 フレームあたりの移動が大きいと、より明るい擬似輪郭が現れるため、観察者に明るい模様を認識させてしまうかもしれない。

Pääkkönen らによる視覚のインパルス応答モデル[15]では、この不自然さを緩和させる方法について何も説明できない。一方で、網膜から始まる視覚情報処理において、視細胞で得られた情報は受容野として空間的に束ねる処理が階層性を持って行われていることが分かっている[53]。そこで、視覚にそのような機構が備わっていることを示す証拠はないが、過去の情報ほど空間的な視覚情報が拡散する（ぼやける）という

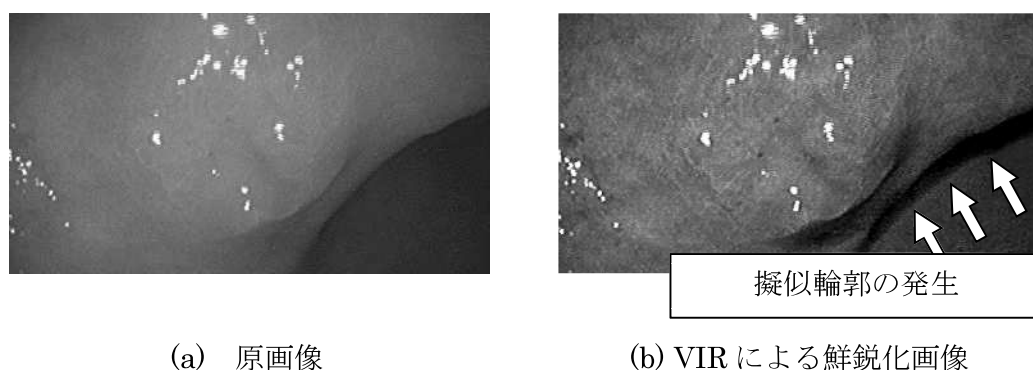


図 10 鮮鋭化処理に伴う不具合

処理を、視覚におけるインパルス応答モデルに付与することを考える。つまり、過去の画像データほど空間的平滑化が起こっているという処理を、VIR2 に追加した手法を提案する。処理手順を以下に示す。

- ① 開始時においては、鮮鋭化処理対象のフレーム  $f(x, y, t)$  の 1 フレーム前の  $f(x, y, t-1)$  を、平均画像フレーム  $f_{stAV4}(x, y, t)$  に格納する。
- ② 式(10)によって鮮鋭化画像  $f_{VIR2b}(x, y, t)$  を求める。

$$f_{VIR2b}(x, y, t) = (1 + \alpha)f(x, y, t) - \alpha f_{stAV4}(x, y, t) \quad (10)$$

- ③ 式(11)により次回の処理で用いる平均画像フレーム  $f_{stAV4}(x, y, t+1)$  を求める。

$$f_{stAV4}(x, y, t+1) = \frac{wf(x, y, t) + f_{stAV4}(x, y, t)}{w+1} \quad (11)$$

- ④  $f_{stAV4}(x, y, t+1)$  に対して、空間的な平滑化処理をかける。空間的平滑化処理として、例えば、空間的に平均フィルタを重畳する。
- ⑤ 鮮鋭化処理対象時刻を 1 フレーム後に移し、②～⑤を繰り返す。

平均画像フレームに空間的平滑化処理を入れるため、対象画像が平滑化されるわけではない。鮮鋭化画像における擬似輪郭は、過去情報を納めた平均画像フレームにおける明度境界で起こりうる。VIR2 における過去の情報をもつ平均画像フレームを空間的に平滑化することによって、この境界をぼかすことを意図している。この処理によって、画像の鮮鋭化効果と、急速な移動物体の鮮鋭化部分に生じる擬似輪郭を低減する効果の両立が期待できる。

空間的な平滑化処理は、計算ステップの度に平均画像フレームへ行われるため、平均画像フレームに含まれるより過去の画像データは、より多くの回数にわたって平滑化処理を受けることを意味する。すなわち、過去の画像情報ほど平滑化されるということの意味する。過去ほど強い平滑化を施すという処理を VIR に適用するには、過去フレームを格納するすべてのバッファに対して平滑化処理をする必要があるため、時間平均の長さ  $\delta T$  にあわせて増加していく。一方、本手法の方は、VIR2 を元に行っているため、 $w$  の値による計算コストの増加はない。例えば、提案手法における平均画像フレームの算出コストを 1 とし、過去平滑化処理には  $3 \times 3$  [pixel] の空間平均フィルタを用いる場合、過去の情報が 10 フレーム程度まで増えると  $1/130$  程度計算コストが削減される。

本論文では、この手法を「VIR2+過去平滑化」と表す。この平滑化処理は鮮鋭化画

像におけるノイズの影響を低減することを意図した処理ではない。過去の情報をもつ平均画像フレームに平滑化処理を入れるため、現在フレーム（鮮鋭化対象画像）で発生するノイズの低減には寄与しない。ただし、VIR を基にしているため、物体に比べてノイズの鮮鋭化は小さく抑えられる。

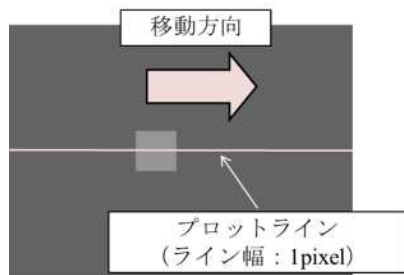
#### 3.4.4 鮮鋭化処理の効率化効果

シミュレーション動画像を用いて、VIR と VIR2 によるコントラスト上昇効果を比較した。シミュレーション動画像では、濃淡値 100 の背景の中、濃淡値 150 で描画された矩形を画面向かって左から右へ平行移動させた。動画中のある 1 フレームを抽出した画像を図 11(a)に示す。画像の解像度は  $640 \times 360$  [pixel]であり、8[bit]グレースケール画像であった。また、矩形の大きさは  $50 \times 50$  [pixel]とし、矩形の移動速度は  $1$  [pixel/frame]であった。図 11(a)に示したフレームにおける画像の中心線となるピクセル行に着目し、 $x$  軸方向の濃淡値変化をプロットすると、図 11(b)のようにステップ状の変化となっていた。ここでは、図 11(a)を原画像とし、原画像の濃淡値変化は赤線で示している。

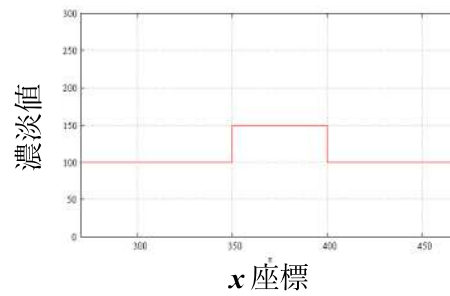
この動画像に対して VIR を適用し、原画像と同一フレームにおける濃淡値変化をプロットした結果を図 11(c)に示した。同様に、VIR2 を適用し、濃淡値変化をプロットした結果を図 11(d)に示した。鮮鋭化画像の濃淡値変化は青線で示し、比較しやすいように原画像の濃淡値変化を重ねて示している。鮮鋭化度合いを表すパラメータ  $\alpha$  は、いずれも 1 とし、VIR においては、 $\delta T$  が 2, 10, 30 の場合を、VIR2 では、 $w$  が 10, 0.5, 0.05 の場合を示した。

VIR および VIR2 とともに、図 11 のように、動画像中で動いている物体の境界部において、その物体境界の両側（シミュレーション動画像における進行方向の前後）で非対称な鮮鋭化効果が生じた。また、濃淡値の最大値と最小値の差も、両手法とも同程度であった。図 11(c)のように VIR では、 $\delta T$  が大きいほどより過去の情報も使用するため、鮮鋭化範囲が広がる。図 11(d)のように VIR2 では、 $w$  が小さくなるほど過去の情報を使用し、鮮鋭化範囲が広がっていた。VIR と類似した鮮鋭化効果を得られることが確認できた。

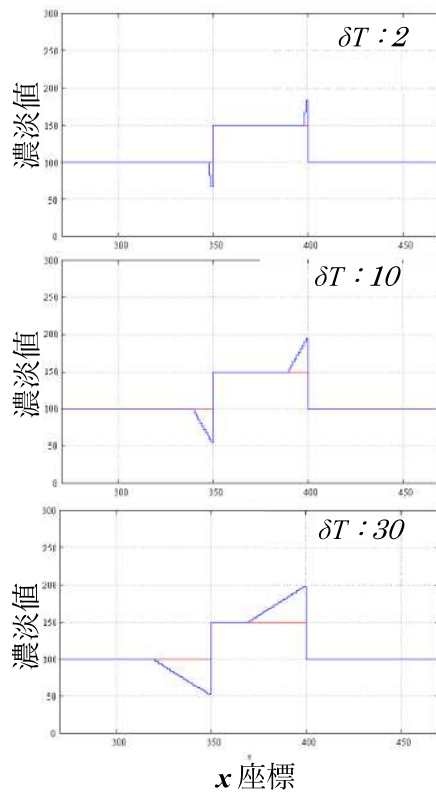
式(5)によって、各手法におけるコントラスト値を求めた結果を表 4 に示す。VIR では、図 11(c)に示した各  $\delta T$  におけるコントラスト値を、VIR2 においては、図 11(d)で示した各  $w$  におけるコントラスト値を示している。表 4 より、VIR では  $\delta T$  によってコントラスト値が変化するが、VIR2 では  $w$  によらずコントラスト値は同じであった。また、VIR と VIR2 の各パラメータにおけるコントラスト値に大きな差はなく、VIR2 は VIR と同等の鮮鋭感が得られることが分かった。



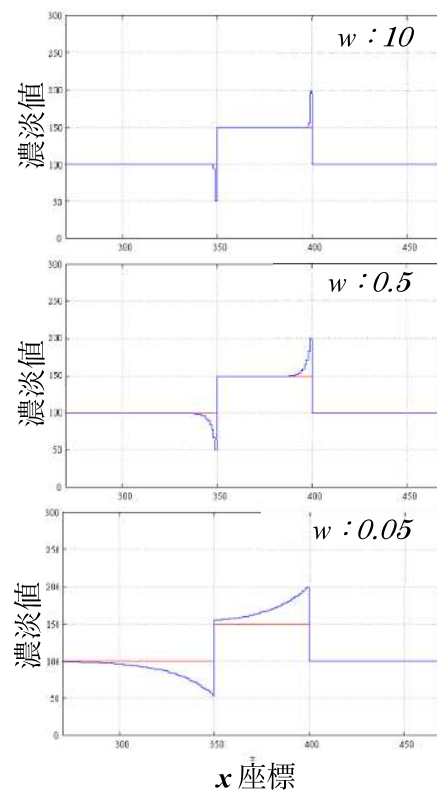
(a) 移動方向とプロット部位



(b) 原画像のプロファイル



(c) VIR



(d) VIR2

図 11 シミュレーション動画像の鮮鋭化結果

表 4 各パラメータにおけるコントラスト値

VIR		VIR2	
局所時間窓 $\delta T$ [フレーム]	コントラスト [%]	パラメータ $w$ [-]	コントラスト [%]
2	46.4	0.05	57.5
10	56.0	0.5	60.0
30	58.4	10	60.0

#### 3.4.5 鮮鋭化画像の安定化効果

フレーム間における物体の移動速度が大きい場合のシミュレーション例として、図 11(a)のシミュレーション動画像における矩形の移動速度を 20[pixel/frame]とした動画像を用いて、鮮鋭化処理による濃淡値の変化を調べた。

VIR および VIR2 による鮮鋭化画像の濃淡値プロット結果を図 12(a)、図 12(b)に示した。また、図 12(c)、図 12(d)には、VIR2+過去平滑化を適用した結果を示した。ここで、濃淡値プロット方法および図中の赤線および青線は、図 11 と同様である。鮮鋭化度合いを表すパラメータ  $\alpha$  はどれも 1 とし、VIR では  $\delta T$  が 10 の場合を、VIR2 および VIR2+過去平滑化においては、 $w$  が 0.2 の場合を示した。また、VIR2+過去平滑化における平均画像フレーム平滑化処理として、空間的に平均フィルタを重畳した。平均フィルタのサイズは、図 12(c)では  $7 \times 7$ [pixel]とし、図 12(d)では  $15 \times 15$ [pixel]とした。

VIR と VIR2 を適用した場合、図 12(a)および(b)のように、矩形の移動方向の後部において、鮮鋭化によって明度値が矩形波様に明るくなったり暗くなったりしているのが分かる。この矩形波様のギャップが大きい場合、擬似輪郭として知覚される可能性が高くなる。一方、図 12(c)と(d)のように VIR2+過去平滑化による鮮鋭化では、矩形波様のギャップが低減された。また、平均フィルタのサイズが大きいほどなめらかになった。このように、VIR2+過去平滑化によって、移動している矩形の輪郭がなめらかになることはなく、鮮鋭化効果のみをなめらかにする効果を確認できた。

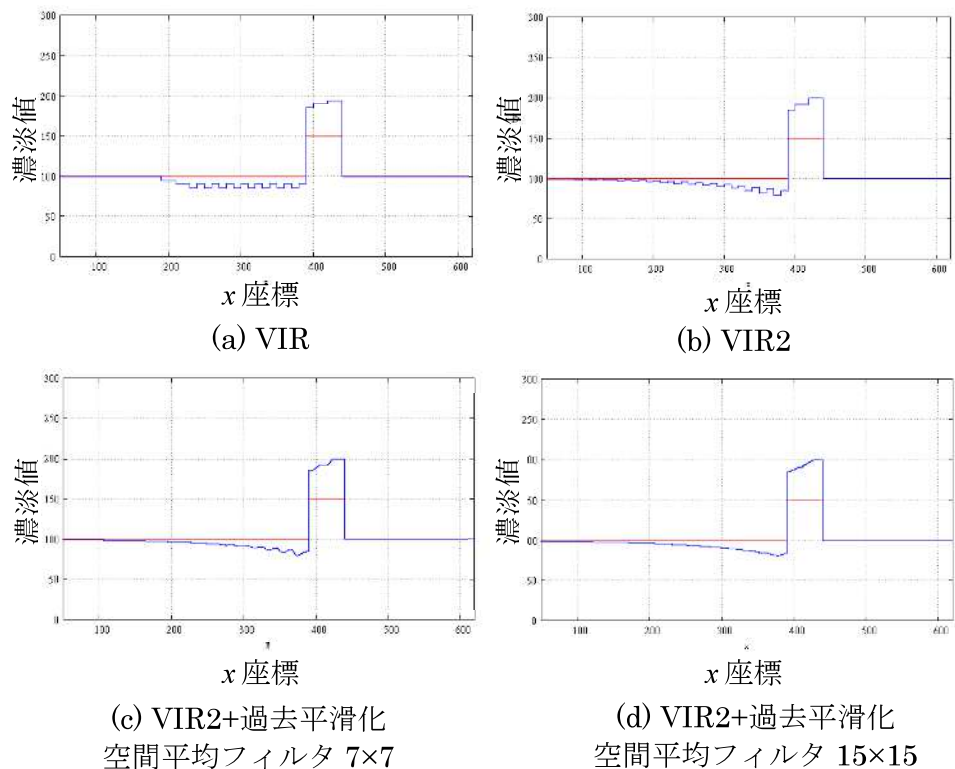


図 12 シミュレーション動画像（高速）の鮮鋭化結果

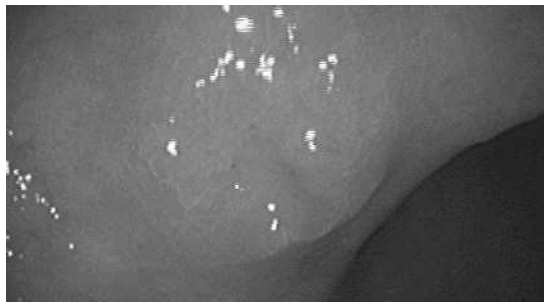
### 3.4.6 内視鏡動画像への適用

内視鏡動画像を用いて、各手法の鮮鋭化効果および VIR2+過去平滑化による擬似輪郭の低減効果を比較した。使用した内視鏡動画像は、胃内部の粘膜の様子を撮影した動画像である。医師は内視鏡を用いた診察の際、病変部位の診断の手がかりとして、粘膜の異常な凹凸や色の変化、表層部の毛細血管構造などを詳しく観察する。その際、病変と疑われる部位については、静止画像を撮影してより詳細な観察を行う。静止画像による観察において、動画像による観察時の鮮鋭感が損なわれる場合があるため、本手法の適用が有効であると考えられる。その観察の様子が撮影された動画像のうち、胃内部の粘膜において、病変が疑われる凹凸部位を観察しているシーンを 80 フレーム抽出し、鮮鋭化処理対象とした。このとき、 $720 \times 480$  [pixel] の 24 [bit] カラー画像から 8 [bit] グレースケール画像へ変換し、濃淡値画像として効果を比較した。動画像中のあ

る 1 フレームを抽出した画像を図 13(a)に示す.

この動画像に対して, VIR および VIR2 を適用した結果のうち, 図 13(a)と同じフレームの結果を図 13(b), 図 13(c)に示す. VIR では,  $\delta T$  を 10 とした. これは, 2~30 の整数値で変化させた際, 胃粘膜の毛細血管構造および凹凸の視認性が最も高かった値として採用した. VIR2 では,  $w$  を 0.2 とした. この値は, 0.05~10.0 の実数値で変化させた場合における, 毛細血管構造, 凹凸の視認性が高かった値として採用した. また, VIR2+過去平滑化による鮮鋭化画像を図 13(d)に示す. 他の手法と同様の理由で  $w$  を 0.2 とし, 空間的平滑化処理として,  $15 \times 15$ [pixel]の大きさの空間平均フィルタを重畳した. 観察しやすくするために, すべての手法において  $\alpha$  は 2 とした.

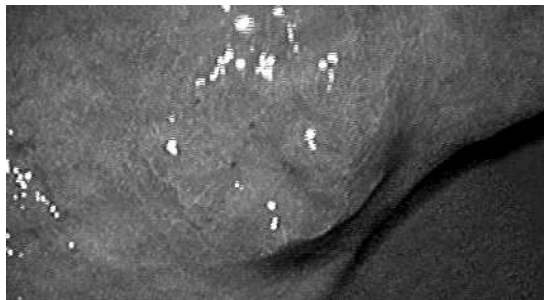
図 13 より, VIR および VIR2 とともに原画像に比べ, 粘膜のコントラストが上昇し, 毛細血管構造および凹凸の視認性が向上した. また, VIR と VIR2 の鮮鋭化効果はほぼ同等であった. シミュレーション動画像で確認したように, VIR と VIR2 で同程度の鮮鋭感が得られることを内視鏡動画像においても確認した. 一方, 動画像において胃壁の急激な移動が生じたため, VIR (図 13(b)) および VIR2 (図 13(c)) による鮮鋭化画像には, 急激な明るさの変化が起こったその境界に, 鮮鋭化処理によって黒い不自然な像を生じた. 鮮鋭化部分には擬似輪郭が発生し, 画像の不自然さが強調された. 対して VIR2+過去平滑化を適用した結果 (図 13(d)) では, 他の手法において鮮鋭化部分に発生した擬似輪郭線が低減された. VIR2+過去平滑化によって, VIR や VIR2 による鮮鋭化処理で発生する不具合を緩和できることを確認した.



(a) 原画像



(b) VIR



(c) VIR2



(d) VIR2+過去平滑化

図 13 内視鏡動画像の鮮鋭化結果



### 3.4.7 飛行する鳥のトラッキング動画画像への適用

海上を飛ぶカモメの群れに並走する船から撮影された動画画像を使用して、各手法の効果を比較した。このとき、 $640 \times 360$ [pixel]の24[bit]カラー画像から8[bit]グレースケール画像へ変換し、濃淡値画像として効果を比較した。変換後の動画画像からある1フレームを抽出した画像を図14(a)に示す。

この動画画像に対して、VIRおよびVIR2を適用した結果を図14(b)，図14(c)に示す。また、VIR2+過去平滑化による鮮鋭化画像を図14(d)に示す。VIRでは $\delta T$ を10とした。VIR2およびVIR2+過去平滑化では、 $w$ を0.2とした。これらの値は、3.4.6節で述べたのと同様な理由で採用した。VIR2+過去平滑化における空間的平滑化処理として、 $15 \times 15$ [pixel]の大きさの空間平均フィルタを重畳した。フィルタリングにおける画像周辺部の計算不可領域は処理後の画像から切り取った。すべての手法において $\alpha$ は1とした。

図14より、VIRおよびVIR2では、原画像に比べコントラストが上昇し、カモメの群れや海面の波の様子などが鮮鋭化された。両手法の鮮鋭化効果はシミュレーション動画画像で確認したように、ほぼ同等であった。一方、カモメの羽ばたきによって、翼部では急激な濃淡値変化が起こっており、VIRおよびVIR2による鮮鋭化画像では、カモメの翼部周辺に鮮鋭化処理によって白い不自然な像を生じた。対して、VIR2+過去平滑化による鮮鋭化画像では、他の2手法による鮮鋭化処理で発生した不自然な像が低減された(図14枠線部BおよびC)。また、VIRおよびVIR2では、画面左上のロゴマークや雲のようにほとんど動きのない対象(図14枠線部A)には鮮鋭化効果は生じないが、VIR2+過去平滑化では、動いている物体だけでなく、これらの部分も鮮鋭化されていた。これは、VIRおよびVIR2は、濃淡値の時間変化を増幅するため、動画画像において動いている物体のみ鮮鋭化されるが、VIR2+過去平滑化は、過去の画像データに空間的平滑化処理をかけることによって、時空間的な濃淡値の増幅が起こっているためである。また、図15に示したように、パラメータ $w$ を小さくし、より過去の情報を使用するほど、過去平滑化量は増えるため動きのない部分に対する鮮鋭化効果は大きくなる。なお、図15では、空間的平滑化処理として $3 \times 3$ [pixel]の空間平均フィルタを用いた。VIR2+過去平滑化によって、飛行する鳥の羽ばたきのように急激な濃淡変化が頻繁に発生する場合においても、鮮鋭感を残しつつ、VIRやVIR2による鮮鋭化処理の不具合を緩和できること、ロゴマークや雲のようにほとんど動かない対象にも鮮鋭化効果を得られることが分かった。

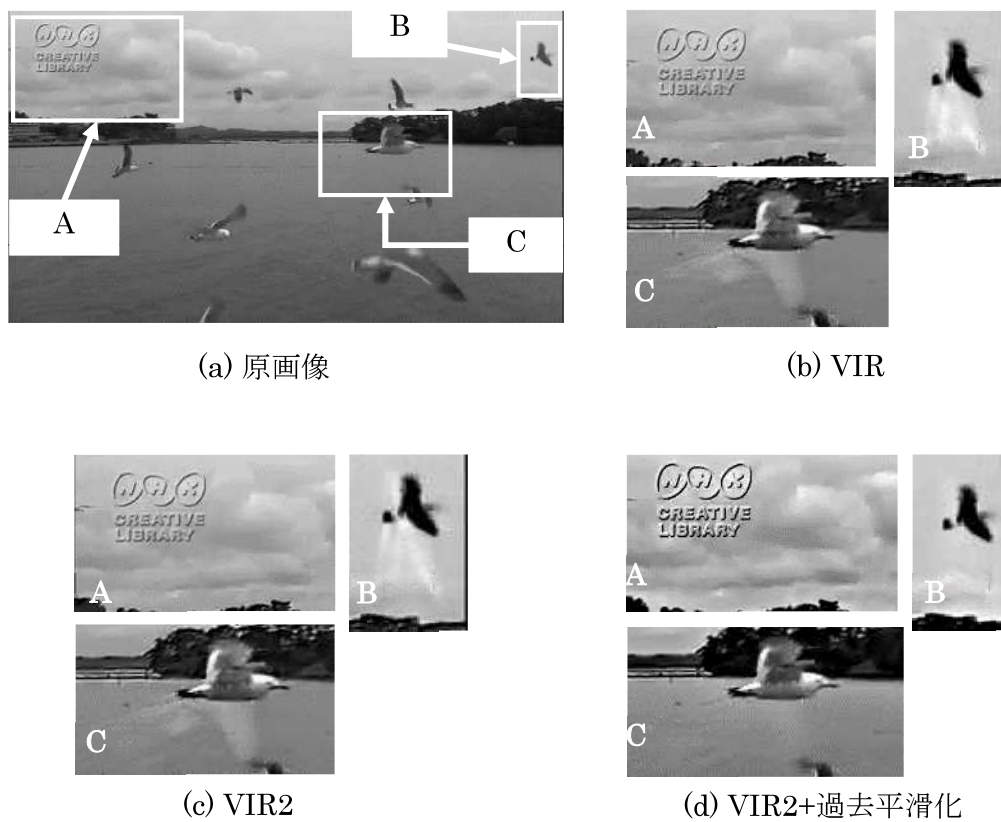


図 14 飛行する鳥の群れ動画像の鮮鋭化結果



図 15 動きのない部分に対する鮮鋭化効果

## 3.5 鮮鋭感の評価実験

### 3.5.1 評価対象

VIR と VIR2 における鮮鋭化画像の鮮鋭感が同程度であること、パラメータ  $w$  と鮮鋭感の関係について調べるために、Thurstone の一対比較法[54]による主観評価実験を行った。

本実験では、評価用の動画画像として、3.4.7 節で使用したカモメの群れが撮影された動画画像を使用した。カモメなどの高速で移動する対象から、背景の雲や波など比較的ゆっくりと移動する対象まで含まれていたため評価用動画画像に選定した。動画画像の解像度は  $640 \times 360$ [pixel]であり、dot-by-dot でモニタに提示した。提示する動画画像は、原画像、VIR におけるパラメータ  $\delta T$  が 10 の鮮鋭化画像、VIR2 のパラメータ  $w$  を 0.2, 2, 50 とした鮮鋭化画像の 5 種類とした。なお、すべての手法において  $\alpha$  は 1 とした。

### 3.5.2 実験環境および実験手続き

動画画像の提示には液晶モニタ (EIZO FlexScan EV2451, 23.8 型) を使用した。モニタの解像度は  $1920 \times 1080$ [pixel]とし、sRGB モードに設定した。実験参加者は、図 16 のように、モニタから 93[cm] (画面高の 3 倍) 離れた位置に設置されたあご台によって顔を固定された状態で動画画像を観察した。

実験参加者は学生 13 名 (17~24 歳, 男性: 5 名, 女性: 8 名) であった。実験中、参加者は、モニタ画面の左右に表示された 2 枚の動画画像を比較し、「鮮鋭感の高い方」を選択した。鮮鋭感については、観察前に教示し、練習を行ったうえで評価を開始した。また、カモメの翼部に生じる不自然な像は無視して評価するように教示した。なお、参加者は、動画画像 5 種類すべての組み合わせと、それらの左右を入れ替えたものの計 20 回評価を行った。

### 3.5.3 実験結果

一対比較の結果を表 5 に示す。表中の数値は、例えば行列[A, B]に注目すると、「原画像が VIR の鮮鋭化画像よりも鮮鋭感が高い」と答えた参加者の数を表す。ここで、値が実数となっているのは、各動画画像の組み合わせに対して、左右を入れ替えた場合の評価も行ったためである。表 5 より、VIR および VIR2 は原画像より明らかに鮮鋭感が高いと分かった。この結果から鮮鋭感の心理尺度値を求めたものを図 17 に示す。ここでは、VIR および VIR2 による鮮鋭化画像は、原画像より鮮鋭感が高いことが明らか

であるため，原画像を除外して心理尺度値を示している．図 17 より，VIR ( $\delta T=10$ ) と VIR2 ( $w=0.2$ ) はどちらも鮮鋭感が高く，同等な鮮鋭化効果を得られることが分かった．また，VIR2 のパラメータ  $w$  の値が小さくなるにつれ，鮮鋭感が高くなることが分かった．評価実験時，判断に迷った場合，比較的ゆっくりと動いている波の鮮鋭化具合を重視して選択したと報告する参加者が多かったことから，パラメータ  $w$  の値が小さくなるほどより過去の情報を使用し，波の揺らぎのようなゆっくりとした動きの対象にも鮮鋭化効果がおよぶと考えられる．これは，シミュレーション結果に則しており，過去の情報を使うほど鮮鋭化範囲が広がることが確認できた．

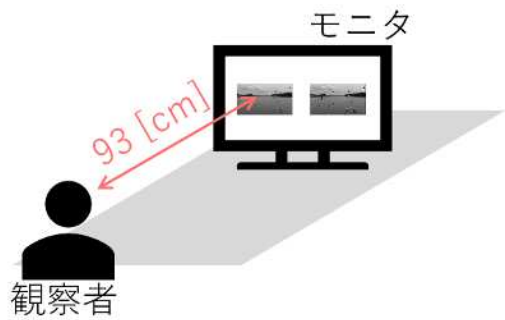


図 16 実験環境

表 5 鮮鋭感に対する一対比較の結果

	A	B	C	D	E
	原画像	VIR : $\delta T$ 10	VIR2 : $w$ 0.2	VIR2 : $w$ 2	VIR2 : $w$ 50
A	原画像	0.5	0.5	0	0
B	VIR : $\delta T$ 10	12.5	4.5	9.5	11
C	VIR2 : $w$ 0.2	12.5	8.5	9	11.5
D	VIR2 : $w$ 2	13	3.5	4	8.5
E	VIR2 : $w$ 50	13	2	1.5	4.5

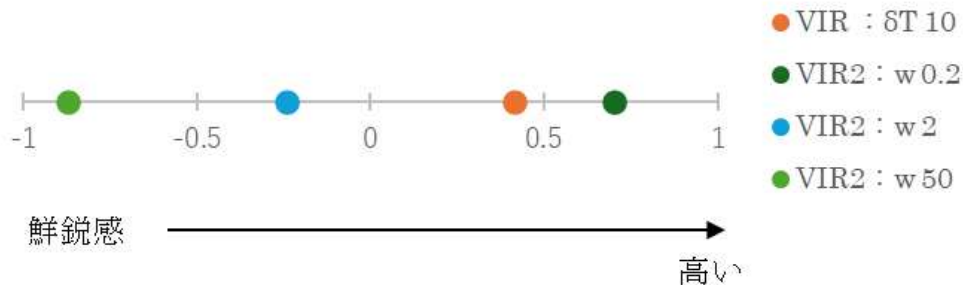


図 17 鮮鋭感の心理尺度

### 3.6 考察

VIR や VIR2 および VIR2+過去平滑化による処理後の画像におけるコントラストは、パラメータ  $\delta T$  および  $w$  の大きさの違いによる影響が小さい。一方で、移動物体の進行方向の前後に生じるコントラストの上昇範囲は  $\delta T$  や  $w$  の値に依存するため、処理画像の見え方はこれらの値によって変化する。現時点では、鮮鋭化画像における美醜や自然さといった見え方の適切さを評価する客観的な指標が存在しない。そのため、画像の種類や被写体の移動速度に応じて、パラメータは主観的に選択せざるを得ない。今後は、 $\delta T$  および  $w$  の適切な選択方法について、より客観的な基準に基づく検討が求められる。

### 3.7 まとめ

本章では、視覚のインパルス応答特性における興奮性と抑制性の応答の時間差に注目し、この時間差を大きくした条件で、視覚特性を定性的に模擬したデジタルフィルタを設計した。そして、提案手法の効果を、シミュレーション動画像と実際の動画像において確認した。その結果、このデジタルフィルタによって、コントラスト上昇効果が得られることと、S/N 比が改善することが分かった。ヒトの視覚において興奮性と抑制性の応答に時間差があることが、視覚から情報を得る際にこれらの利点を作り出していると考えられる。視覚のインパルス応答を模擬したデジタルフィルタを画像

処理として使用する場合は、視覚としての制限を受けないため、これらの特徴を用途やユーザの希望に応じた鮮鋭化処理技術として利用できるといえる。

視覚におけるインパルス応答モデルに基づく画像鮮鋭化手法をより効率的に行う方法を提案した。また、鮮鋭化処理によって生じる擬似輪郭の発生を低減する手法を提案した。過去フレームの寄与率を制御し、鮮鋭化画像の算出に使用する動画像フレームを 2 枚（鮮鋭化対象フレームと平均画像フレーム）にすることで計算コストを削減できること、平均画像フレームに空間的な平滑化処理をかけることで、鮮鋭感を残しつつ、擬似輪郭を低減できることが確認できた。提案手法の効果をシミュレーション動画像および内視鏡動画像、飛行する鳥の動画像において確認した。その結果、提案手法により、計算コストを削減できること、鮮鋭化処理に伴う不自然な像を緩和できることを確認した。上述のとおり提案したデジタルフィルタが視覚としての制限を受けないため、ヒトが観察する用途においては過剰ともいえる鮮鋭化をも可能である。提案手法は、それにともなう違和感を低減することが可能である。以上のように、視覚のインパルス応答特性を定性的にデジタルフィルタとして模擬することは画像鮮鋭化技術として有効である。

## 第4章 移動物体の見え方予測への応用

### 4.1 はじめに

本章では、視覚におけるインパルス応答モデルに基づくデジタルフィルタリング処理の移動物体の見え方予測への応用について述べる。視覚のインパルス応答モデルに基づいて、回転する図形の見え方をデジタルフィルタリング処理によって予測する手法を提案し、その有効性を検証する。また、これまでに開発している等速直線運動する対象の見え方を予測する手法を用い、対象が不意に目の前を横切る視覚状況を想定した条件で、提案手法の有効性を検証する。

### 4.2 移動物体と静止物体の見え方の違い

ビジュアルデザインやプロダクトデザインにおいて、デザイナーは対象の見え方を操作し、消費者に適切な感性情報を伝達することに細心の注意を払う。しかしながら、動いている物体の見え方は静止時の見え方と異なるため、動く物体の見え方をデザイン対象にすることは、デザイナーの経験や試行錯誤によるほかなかった。

視覚は積分的な処理をしている。これは、光の明滅周波数がある程度高くなると、その明滅を知覚できなくなることから分かる[34,35]。それは光学カメラにおける露光時間に対応し、移動する物体を観察するとぼやけて見えてしまうモーションブラーという現象を生じる[14]。一方で、Ramachandran らは動く対象の物体境界が鮮明に知覚されるモーションシャープニング現象を報告している[13]。Takeuchi らは一般的な画像においても動きによる鮮明化が生じること、およびその要因について示している[48]。

視覚特性によって移動する物体の見え方は静止状態とは異なる。移動している物の見え方をデザイン対象とするならば、その違いを保証してデザインすることが要求されることになる。ここで、保証するとは、移動時に意図した図形の見え方になるように静止状態の図形を生成することを意味する。この保証によって移動物体の見え方をデザイン対象とできれば、デザイン手法が拡張され、新たな情報伝達手段として発展することが期待できる。

上述のモーションシャープニング現象は、これまでにいくつかの視覚メカニズムが仮説として説明されている[13,15,48,49]。これらの仮説のうち、視覚のインパルス応答モデル[32]は、ヒトの視覚においてモーションブラー現象もモーションシャープニ

ング現象も両方とも説明できるとしている[15].

著者らは、視覚のインパルス応答モデルに基づいた画像処理手法を開発し、移動する物体の見え方を予測することを試みている。先の報告[17]では、有効性を確認する実験において液晶モニタを用いており、そのリフレッシュレートの制約によって対象の移動速度が比較的低速な範囲に制限された。また、モニタ内の離散的な映像ではなく現実空間で移動する物体の見え方については確認できていない。さらには、扱える運動の種類が平行移動のみに限定されていた。

本章では、物理的に観察対象を一定速度で移動させた実験を実施しやすいように、回転運動する図形に対象を定めた。まず、回転運動する対象の見え方を視覚のインパルス応答モデルから予想する手法を提案する。そして対象を物理的に回転させる条件の下で提案手法の効果を確認することで、視覚のインパルス応答モデルによって回転運動する図形の見え方がどの程度予測できるのかについて検討する。

### 4.3 等速直線運動する図形に対する手法

Päakkönen らは、視覚におけるインパルス応答が興奮性と抑制性の応答を重ね合わせた形になっており、この応答特性によってモーションブラー現象もモーションシャープニング現象も説明可能であると述べている[15]。移動している観察対象に視覚におけるインパルス応答を示す時間的なフィルタが重畳された結果「見え」となって知覚されると言い換えることができる。これに基づいて、著者らは、移動する物体の見え方を予測する手法を開発した[17]。

観察者の眼が動くとき移動時の見え方の予測が困難であるため、移動物体が一定速度で一定方向に移動すると考えて、この視覚における時間的なフィルタリング処理を空間的なフィルタリング処理として記述する。これを順変換と呼ぶ。静止した画像を用意し、この画像が移動している時の見え方は、用意した画像に順変換の処理を掛けた像になっていると考えることができる。

逆に、移動中にこう見えてほしいと想定する見え方を画像として用意し、移動中にそのように見えることを逆算した静止画像を作成することも考えられる。このためには、順変換で用いられたフィルタの逆変換を適用し、移動中の見え方の想定画像から対象が移動する前の静止時における像を生成できるかもしれない。これを逆変換と呼ぶ。この逆変換によって移動時に知覚される見え方を保証した画像を生成することを試みる。

視覚のインパルス応答として、McKee らの論文[55]で示された測定結果を用いた。論文中的図（論文 [55] の Fig. 6）をトレースし、次の関数  $p(t)$  に対して、最小二乗法を用いてパラメータ  $k_n$ ,  $\mu_n$ ,  $\sigma_n$  を求めた。



$$p(t) = m_1(k_1, \mu_1, \sigma_1, t) + m_2(k_2, \mu_2, \sigma_2, t) \quad (12)$$

$$m_n(k_n, \mu_n, \sigma_n, t) = k_n \exp\{-(t - \mu_n)^2 / 2\sigma_n^2\} / \sqrt{2\pi}\sigma_n \quad (13)$$

この  $p(t)$  は、Pääkkönen らの報告 [15] に従い、興奮性の応答として正のガウス関数と抑制性の応答として負のガウス関数を重ね合わせたものである。

求めたパラメータ値を表 6 に示す。また、McKee らの示した視覚のインパルス応答とフィッティングした関数  $p(t)$  を比較した結果を図 18 に示す。図中の実線は視覚のインパルス応答を表し、白抜きの円形はパラメータ値を代入した関数  $p(t)$  を表す。図 18 より、関数  $p(t)$  は視覚のインパルス応答とほぼ一致していることを確認した。以下に画像生成手法の手順を示す。

順変換の処理手順：

- ① 視覚のインパルス応答を表す  $p(t)$  から空間フィルタ  $h(x)$  を設計する。図形が  $x, y$  直交座標系における  $x$  軸の正方向に速度  $s$  で平行移動する場合  $t = x/s$  とできるので、次式によって  $h(x)$  を得ることができる。

$$h(x) = p(x/s) \quad (14)$$

- ② 静止時の見え方を表す画像  $f(x, y)$  をフーリエ変換し  $F(u, v)$  を求める。このとき、 $u$  は  $x$  方向の空間周波数、 $v$  は  $y$  方向の空間周波数を表す。また、関数  $h(x)$  をフーリエ変換し  $H_0(u)$  を求め、すべての  $v$  において  $H(u, v) = H_0(u)$  とする。この  $H(u, v)$  はフーリエ空間における 2 次元フィルタとなり、 $u, v$  の範囲は、 $F(u, v)$  と同じである。
- ③ 式(15)によってフィルタリング処理を行う。フィルタリング処理された結果は  $G(u, v)$  と表す。

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) \quad (15)$$

- ④  $G(u, v)$  を逆フーリエ変換し、移動時の見え方を表す画像  $g(x, y)$  を得る。

逆変換の処理手順：

- ① 順変換の処理手順①と同様に視覚のインパルス応答を表す  $p(t)$  から空間フィルタ  $h(x)$  を設計する。
- ② 移動時の見え方を表す画像  $g(x, y)$  をフーリエ変換し  $G(u, v)$  を求める。このとき、 $u$  は  $x$  方向の空間周波数、 $v$  は  $y$  方向の空間周波数を表す。また、関数  $h(x)$  をフーリエ変換し  $H_0(u)$  を求め、すべての  $v$  において  $H(u, v) = H_0(u)$  とする。この  $H(u, v)$

はフーリエ空間における2次元フィルタとなり、 $u, v$ の範囲は、 $G(u, v)$ と同じである。

- ③ 式(16)によってフィルタリング処理を行う。フィルタリング処理された結果は $F(u, v)$ と表す。ここで $H^*(u, v)$ は関数 $H(u, v)$ の複素共役を表す。 $d$ はとても小さい値である。

$$F(u, v) = G(u, v)H^*(u, v) / \{H(u, v)H^*(u, v) + d\} \quad (16)$$

- ④  $F(u, v)$ を逆フーリエ変換し、静止時の見え方を表す逆変換画像 $f(x, y)$ を得る。

式(16)は、画像処理の分野において、劣化した画像品質を復元する際に用いられる計算方法の一つである[56]。

表6 各パラメータ値

パラメータ	$m_1$	$m_2$
$k_n$	11.6	-5.49
$\mu_n$	24.4	49.0
$\sigma_n$	6.55	10.6

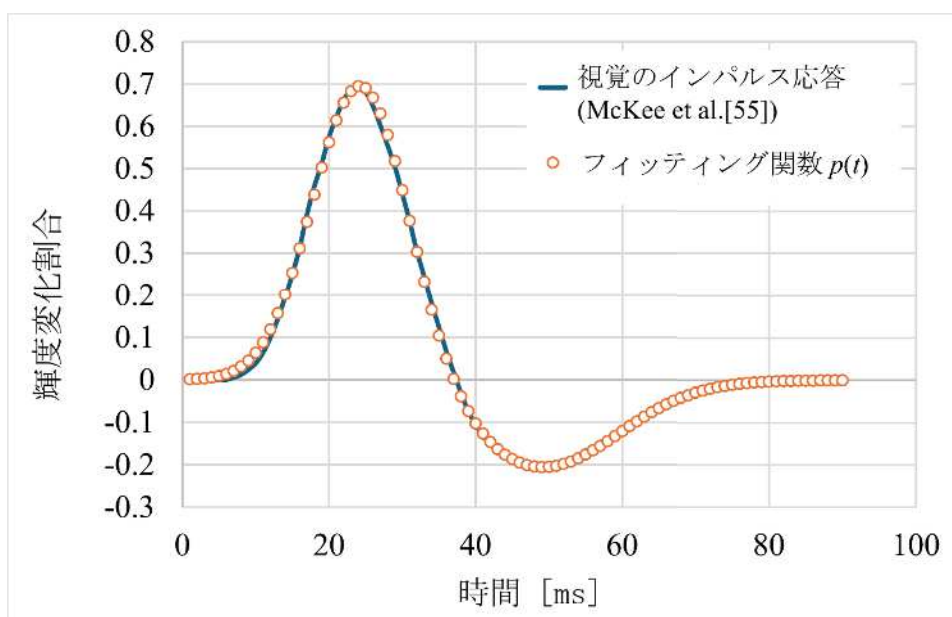


図18 視覚のインパルス応答と関数 $p(t)$ の比較

## 4.4 回転運動する図形に対する手法

本章では、回転運動する物体を対象とした運動時の見えを予測する手法を提案する。回転する物体は、回転中心からの距離によって速度が変化するため、直交座標系においては、中心からの距離に応じたフィルタの設計が要求される。そこで、提案手法では極座標系でフィルタリング処理をする。これによって、円周部の回転角速度に合わせたフィルタの設計でよくなる。

順変換の処理手順：

- ① 中心からの距離  $r$ 、角度  $\theta$  の極座標系を考える。視覚のインパルス応答を表す  $p(t)$  から  $h(\theta)$  を設計する。 $\theta$  軸の正方向に角速度  $\omega$  で図形が回転する場合  $t = \theta / \omega$  とできるので、次式によって  $h(\theta)$  を得ることができる。このとき、 $p(t)$  は平行移動の場合と同じである。

$$h(\theta) = p(\theta / \omega) \quad (17)$$

- ② 静止時の見え方を表す画像  $f(x, y)$  に対して、回転軸を中心に極座標変換した  $f(\theta, r)$  を求める。
- ③ 順変換では  $f(\theta, r)$  をフーリエ変換し  $F(u, v)$  を求める。逆変換では  $g(\theta, r)$  をフーリエ変換し  $G(u, v)$  を求める。 $u$  は  $\theta$  方向の空間周波数、 $v$  は  $r$  方向の空間周波数を表す。関数  $h(\theta)$  をフーリエ変換し  $H_0(u)$  を求め、すべての  $v$  において  $H(u, v) = H_0(u)$  とする。この  $H(u, v)$  はフーリエ空間における 2 次元フィルタとなり、 $u, v$  の範囲は、 $F(u, v)$  と同じである。
- ④ 式(14)を用いてフィルタリング処理された結果  $G(u, v)$  を求める。
- ⑤ 順変換においては  $G(u, v)$  を逆フーリエ変換して極座標系における出力画像  $g(\theta, r)$  を求め、座標系を直交座標に復元して移動時の見え方を表す画像  $g(x, y)$  を得る。

逆変換の処理手順：

- ① 順変換の処理手順①と同様の極座標系において、視覚のインパルス応答を表す  $p(t)$  から  $h(\theta)$  を設計する。
- ② 移動時の見え方を表す画像  $g(x, y)$  に対して、回転軸を中心に極座標変換した  $g(\theta, r)$  を求める。
- ③ 逆変換では  $g(\theta, r)$  をフーリエ変換し  $G(u, v)$  を求める。 $u$  は  $\theta$  方向の空間周波数、 $v$  は  $r$  方向の空間周波数を表す。関数  $h(\theta)$  をフーリエ変換し  $H_0(u)$  を求め、すべての  $v$  において  $H(u, v) = H_0(u)$  とする。この  $H(u, v)$  はフーリエ空間における 2 次元フィルタとなり、 $u, v$  の範囲は、 $G(u, v)$  と同じである。

- ④ 式(15)を用いてフィルタリング処理された結果  $F(u, v)$  を求める.
- ⑤  $F(u, v)$  を逆フーリエ変換して極座標系における出力画像  $f(\theta, r)$  を求め、座標系を直交座標に復元して静止時の見え方を表す画像  $f(x, y)$  を得る.

## 4.5 回転運動する図形に対する画像生成結果

矩形が放射状に並んだ図形とアルファベット記号の「Y」をモチーフとした図形を対象として提案手法による生成画像を図 19 に示す. 順変換および逆変換の処理による効果を観察するために 2 種類の図形を選定した. それぞれの図形は, 速度が  $\pi/3[\text{rad/s}]$ ,  $\pi/2[\text{rad/s}]$ ,  $2\pi/3[\text{rad/s}]$ ,  $5\pi/6[\text{rad/s}]$  で, 時計回りに等速回転することを想定した. 順変換および逆変換において想定する速度を, 以降, 想定速度と表記する. 両図形とも, マイケルソンコントラスト値 3.7%であった. 円形の枠取りをして, 余白部分は濃淡値 0 で塗りつぶし予測結果に影響を与えないようにした. 画像サイズは  $720 \times 720[\text{pixel}]$ , 8[bit]グレースケール画像であった.

図 19 において, 上部に矩形が並んだ図形, 下部に「Y」をモチーフにした図形と, それぞれの順変換, 逆変換の結果を示した. (a)(d)はそれぞれ入力画像である. (b)(e)は順変換画像であり, 視覚のインパルス応答から推測される, 移動中における典型的な見え方だと予想される図形である. (c)(f)は逆変換画像であり, (c)(f)の画像が回転運動することで視覚による変換が起こり(a)(d)の画像が観測されることを予想している.

図 19(b)(e)より, 順変換画像では, 回転移動速度が速くなるにつれ円周部付近の図形の境界部分にぼやけが発生した. 入力が鮮明な場合ぼやけが生じることが Pääkkönen ら[15]によって報告されており, 使用した入力図形も鮮明であるため, その結果に則している. 一方で, マイケルソンコントラスト値は 9.1%になっていた. この画像の見え方が, 移動中の見え方に一致しているかどうかは評価実験において確認する必要がある.

図 19(c)(f)より, 逆変換画像では図形の境界部分に縞模様を生じ, 回転移動速度が上昇するにつれ, この縞の間隔が広くかつ顕著になった. なお, 縞が想定速度の上昇に伴って顕著になることで 8[bit]のダイナミックレンジを超えることを防ぐために, 入力画像のコントラスト値は 3.7%とした. この逆変換画像が移動中の図形の見え方が入力画像に近くなるかを保証するものであるのかどうかは, 評価実験で検証する必要がある.

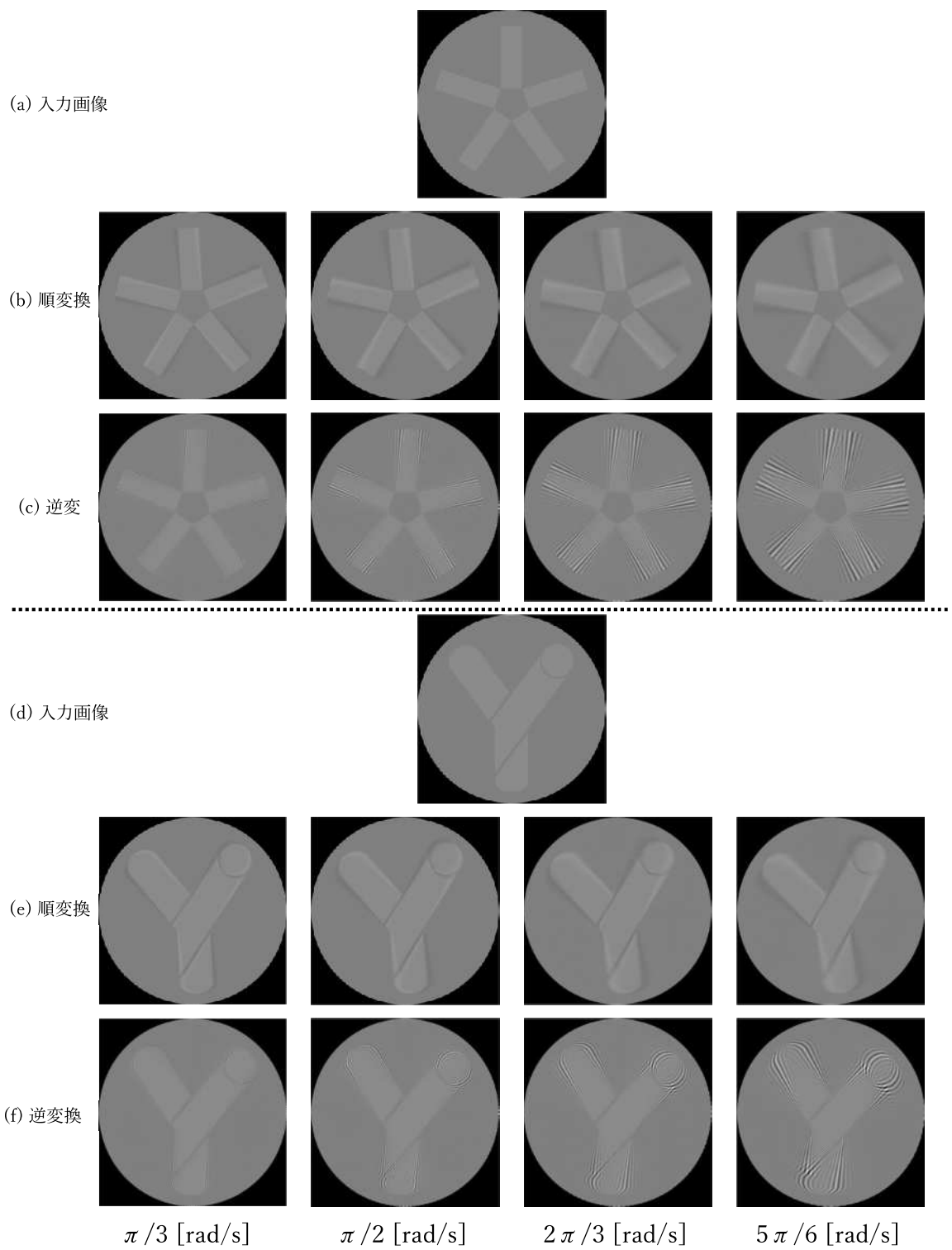


図 19 順変換および逆変換結果

## 4.6 回転運動する物体の見え方予測（順変換）の評価実験

### 4.6.1 予備観察

提案手法による順変換によって生成される画像が，図形を移動させているときの見え方になっているのかどうかを評価する実験をおこなった．

実験に先立ち，実験者による観察において，図 19(a)の図形を  $\pi/3$ [rad/s] と  $5\pi/6$  [rad/s] で回転させたとき，いずれの回転速度においても明らかに図形境界部のぶれは生じず，鮮明さが保持された．実験者による観察時の環境は，4.6.3 節で述べる実験環境と同じであった．視覚において物体の境界部分の情報は重要であり，十分にコントラストがある鮮明な境界では，インパルス応答モデルで予想される図形境界のぼやけは観測されないことがわかる．十分にコントラストがある鮮明な境界では，今回使用した回転速度の範囲においては鮮鋭さが保持される視覚機能が存在することを示している．

### 4.6.2 刺激

提案手法で用いたモデルには，視覚における側抑制機構のような空間的に明暗境界を強調する機能を入れていないため，この影響を低減することを目的として図 20(a)に示した物体境界をぼかした図形を用いることとした．この図形は，図 19(a)の回転軸方向に対して， $\sigma = \pi/90$ [rad]のガウシアンフィルタを掛けて作成した．そして，図 20(a)に対して，想定速度  $\pi/3$ [rad/s]で順変換して作成した図形が図 20(b)であり，想定速度  $5\pi/6$ [rad/s]の順変換図形が図 20(c)である．なお，図 19(d)の図形を同様に処理し回転させて観察したが，回転速度による見え方の違いが不明瞭であったため図 20(a)の図形を選定した．

図 20(a)を印刷し，直径 17[cm]の回転盤に貼り付けて作成した．図 20 における円形の枠外の黒い部分は，印刷後切り取ってから回転盤に貼り付けた．このとき，矩形の長辺 2.5[deg] (5.7[cm])，矩形の短辺 0.84[deg] (1.9[cm])，中心から短辺までの距離 0.66[deg] (1.5[cm])であった．提示物の中心を回転中心として， $\pi/3$ [rad/s]で時計回りに回転，ならびに  $5\pi/6$ [rad/s]で時計回りに回転させて提示刺激とした．提示刺激の速度は，以降，回転速度と表記する．図 20 の(a)～(c)を比較刺激として用意した．比較刺激も印刷し提示刺激と同じ大きさで作成した．

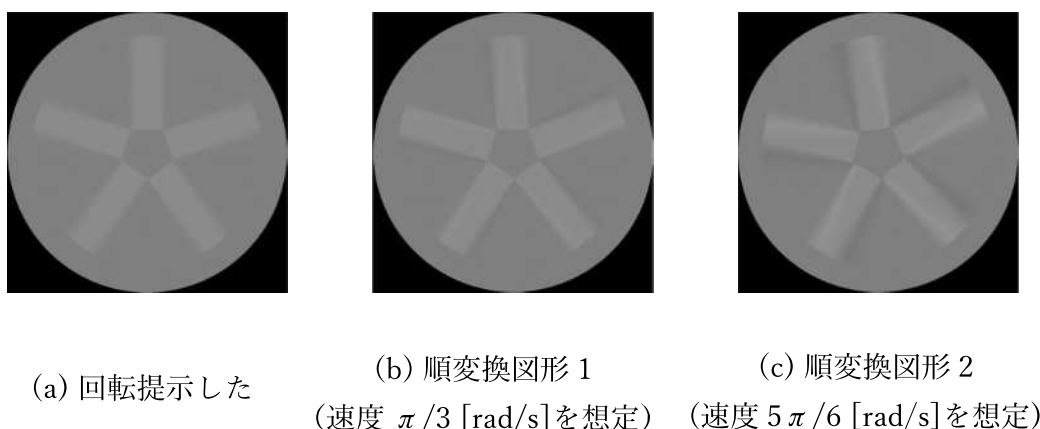


図 20 提示刺激(a)および比較刺激(a)～(c)

#### 4.6.3 実験環境

実験環境を図 21 に示す．実験参加者は，1.3[m]離れた位置から直径 7.5[deg] (17[cm]) の提示刺激の中心を注視した．観察位置は顎台によって固定された．比較刺激は実験参加者から 1.3[m]の距離に静止させておいた．刺激以外の部分は黒い布で覆い，周囲への光の拡散を抑制した．提示刺激の回転は DC モーター（印加電圧 3[V] において約 7.5[RPM]）とギヤボックスによって行った．実験は昼白色蛍光灯下で実施し，提示刺激は D65 光源で照らした．その他に光源は無かった．このとき，提示刺激周辺の照度は 592[lx]であった．Kelly[32]による視覚のインパルス応答モデルでは，刺激の背景輝度に依存して特性が変化する（ここでは，網膜照度，単位：[td]を用いて示されている）．本実験における輝度値（73[cd/m<sup>2</sup>]）のときの一般的な瞳孔径を 3～4[mm]程度[57]の円形と仮定した場合，網膜照度は 516～917[td]となり，視覚のインパルス応答となる 2 相性となっていると予想される[32]．図 18 で示した順変換で用いたインパルス応答関数は，実験参加者のインパルス応答の関数を正確に模擬しているとはいえないが，おおよその傾向は似通っているものと考えた．

#### 4.6.4 実験手続き

$\pi/3$ [rad/s]と  $5\pi/6$ [rad/s]で提示刺激を回転させ，その見えが比較刺激の 3 つのうちどれに近いかなど回答させた．各回転速度 5 回ずつ試行し，提示順はランダムであった．

本実験には 21 歳～24 歳の正常な視力を有する（矯正視力を含む）10 名が参加した．なお，本実験は山口大学における「人を対象とする一般的な研究に関する審査」委員

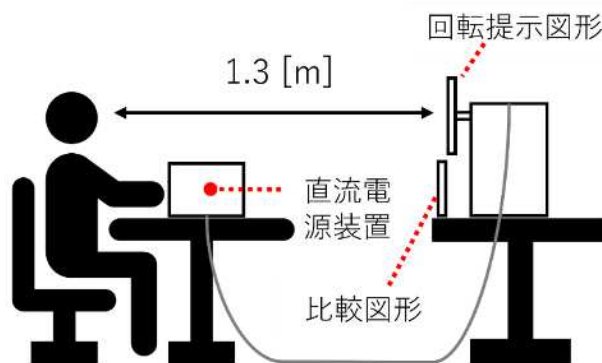


図 21 実験環境

会の承認を得て実施した（管理番号：2023-089-02）。事前に実験内容および取得データの取り扱いについて実験参加者に説明し，同意を得たうえで実験を実施した。

#### 4.6.5 実験結果と考察

実験参加者には提示刺激の回転中心を注視するように教示したが，意識的でないにしても回転する図形を追いかけるように視点を移動させて観察することがありえる。そこで，参加者毎に 5 回の試行において選択された回数がもっとも多い図形をその参加者の見え方として採用することで個人の見え方を表した。実験参加者 10 名分の回答に対してこの方法で代表値を求め集計した。このとき，回転速度  $5\pi/6$  [rad/s] の場合において，図 20(b) および (c) の選択回数が同数で最多になった参加者が 1 名いたため，この回転速度における分析の対象から除外した。従って，回転速度  $\pi/3$  [rad/s] のときの分析対象データは 10 名分，回転速度  $5\pi/6$  [rad/s] のときの分析対象データは 9 名分であった。

集計結果を図 22 に示す。図 22(a) には回転速度  $\pi/3$  [rad/s] のときの結果を，図 22(b) には回転速度  $5\pi/6$  [rad/s] のときの結果を示している。

比較刺激間の選択頻度の差があるかどうか分析するために，フィッシャーの正確確率検定を行った。回転速度  $\pi/3$  [rad/s] の場合における参加者の回答データにおいては，3 つの比較図形の選択頻度データに対してクロス集計表を作成し，5 未満の頻度が 20% 以上あったためフィッシャーの正確確率検定を採用した。回転速度  $5\pi/6$  [rad/s] の場合のデータについても同様に分析した。なお，帰無仮説は「3 つの比較図形の選択頻度



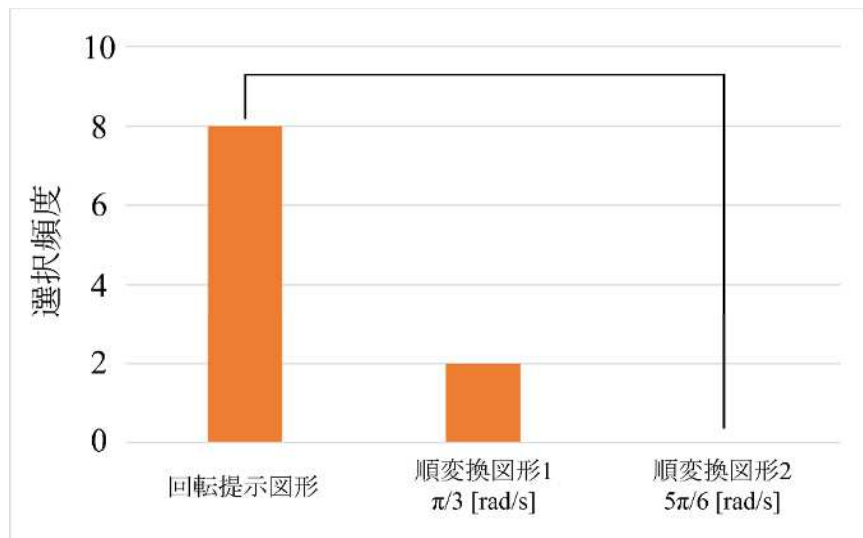
は等しい」とし、有意水準 0.05 で両側検定を行った。

分析の結果、回転速度  $\pi/3$  [rad/s] の場合において  $p=.00042$  であり、有意差があった。回転速度  $5\pi/6$  [rad/s] の場合については  $p=.19$  であり、有意差はなかった。

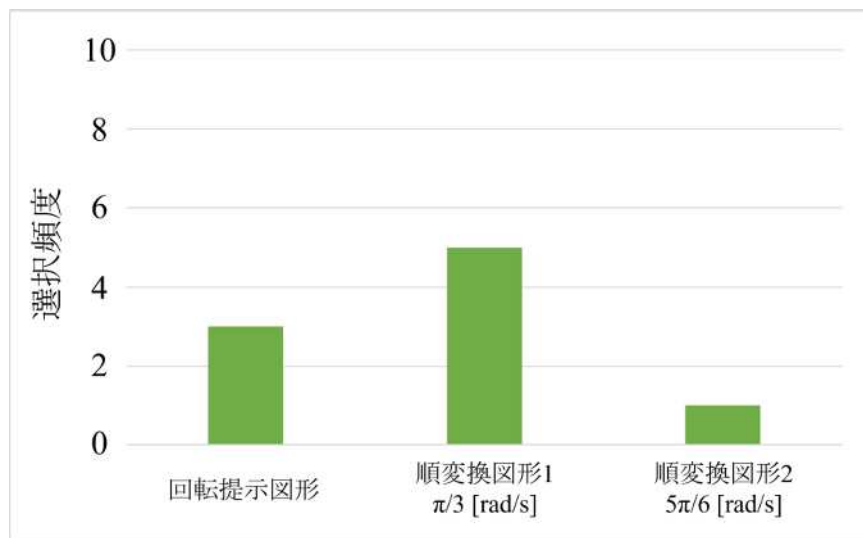
回転速度  $\pi/3$  [rad/s] のときは、多重比較を行った結果、変換前の画像と想定速度  $5\pi/6$  [rad/s] で作成した画像の間に有意差があり ( $p=.0021$ )、変換前の画像と想定速度  $\pi/3$  [rad/s] で作成した画像 ( $p=.069$ ) および想定速度  $\pi/3$  [rad/s] で作成した画像と想定速度  $5\pi/6$  [rad/s] で作成した画像 ( $p=1.00$ ) では有意差はなかった。なお、有意水準の補正にはボンフェローニ法を使用し、補正後の  $p$  値が 1 を超える場合は  $p=1.00$  とした。変換前の画像が選択される頻度が高いために、順変換によって得られた図形は回転移動時の見えを正確に表しているとは言えない。このように、低速な回転時には、有意に順変換よりも原画像の見え方に近かったことを表していた。

図 22(b) に示したように、回転速度  $5\pi/6$  [rad/s] のときは、図 22(a) のような選択される図形の偏りは見られなかった。想定速度  $\pi/3$  [rad/s] で作成した順変換画像の選択頻度が上昇するが、各図形の選択頻度に有意差はなかった。輪郭が比較的鮮明ではなく、より高速に回転するときにおいて、図形はモーションシャープニング現象やモーションブラー現象をともなって観測されている実験参加者が増えたと考えられる。ただし、その見え方は実験参加者に依存していた事がわかった。

以上の結果より、回転移動する図形の見え方においては、順変換に用いたインパルス応答の関数の正確性が低かった影響により予想精度が低かっただけでなく、Päakkönen らが提唱する視覚のインパルス応答モデル以外の視覚メカニズムが寄与していることが予想された。輪郭があいまいな図形が高い速度で回転することにより、視覚のインパルス応答モデルから予想される見え方に近づく参加者も増加するが、想定した速度と必ずしも一致しないため、その予測精度も高いとは言えなかった。



(a) 提示刺激を  $\pi/3$  [rad/s] で回転  
(図中の実線は有意差があった組み合わせを表す)



(b) 提示刺激を  $5\pi/6$  [rad/s] で回転

図 22 比較刺激の選択頻度の集計結果

## 4.7 回転運動時の見え方を想定した図形生成（逆変換）の評価実験

### 4.7.1 予備観察

移動図形の見え方を保証して静止画像を生成する手法を検証する実験を実施した。想定速度 4 段階で逆変換画像を作成し、それらを物理的に回転させ、想定する見え方に近くなるように観察者が回転速度を調整する課題とした。特に高速回転を想定する場合において、逆変換によって生じる縞模様が互いに重なり合わないよう、図 19(f)で示した「Y」をモチーフにした図形を対象とした。

実験に先立って、図 19(f)の逆変換図形を印刷し、それぞれの想定速度と同じ速度で回転させたとき、実験者による観察において図 19(f)に特徴的にみられる黒白の縞模様が保持されることが確認された。

### 4.7.2 刺激

図 19(d)で示した「Y」をモチーフにした図形をマイケルソンコントラスト値が 1.7%になるように低コントラストにした画像（図 23）を移動時の見え方になる想定画像とした。時計回りに等速で回転させる条件で逆変換画像を作成した。想定速度は  $\pi/3$ [rad/s],  $\pi/2$ [rad/s],  $2\pi/3$ [rad/s],  $5\pi/6$ [rad/s]の 4 段階とした。図 23 の図形自身をそれらの速度で回転させたときは、モーションブラー現象がおこり、Y の字が視認できなくなっていたことをあらかじめ確認した。また、本章で用いた実験装置で出せる上限の速度まで選定した。作成した画像は印刷し、直径 17[cm]の回転盤に貼り付けて提示刺激とした。4.6 節で示した実験と同様に円形の枠外の黒い部分は切り取ってから回転盤に貼り付けた。提示物の直径 7.5[deg] (17[cm]) , 「Y」モチーフの高さ 5.8[deg] (13[cm]) , 「Y」の字の両肩の幅 5.0[deg] (11[cm]) , 「Y」の字の胴部の幅 1.3[deg] (2.9[cm]) であり、「Y」モチーフは提示物の中央に配置された。回転中心は提示物の中心であった。提示刺激の回転は DC モーター (3[V]において 7.5[RPM]) とギヤボックスによって行った。また、移動時の見え方になる想定画像である図 23 を比較刺激として用意した。比較刺激も印刷し提示刺激と同じ大きさで作成した。

### 4.7.3 実験環境および実験手続き

実験環境を図 24 に示す。観察者は 1.3[m]離れた位置にあご台で固定された状態で提示刺激の中心を注視し、提示刺激の見えが比較刺激、すなわち「回転移動中に見せ

たい見え方」となるように提示刺激の回転速度を調整した。回転速度の調整は、モーターへ印加する電圧の調整によって行った。実験参加者（観察者）は 21 歳～23 歳の矯正視力を含む正常な視力を有した 7 名であった。各参加者は、4 種類の画像のそれぞれ 5 回ずつ試行し、平均の回転速度をその参加者の調整速度データとした。画像の提示順はランダムであった。

本実験は、山口大学における「人を対象とする一般的な研究に関する審査」委員会の承認を得て実施した（管理番号：2023-089-02）。事前に実験内容および取得データの取り扱いについて実験参加者に説明し、同意を得たうえで実験を実施した。

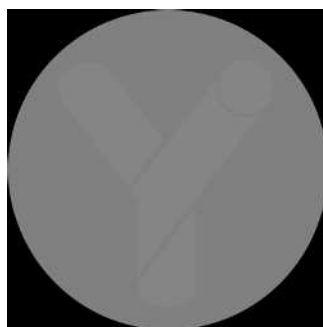


図 23 低コントラストにした図形

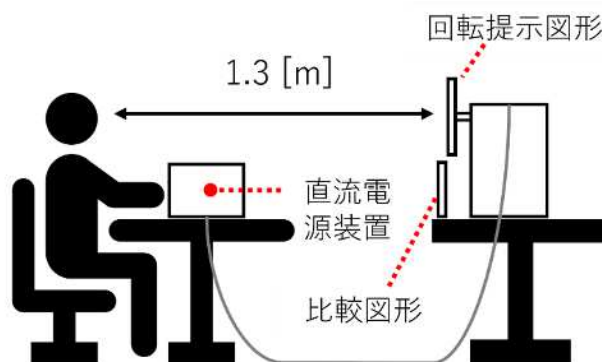


図 24 実験環境

#### 4.7.4 実験結果と考察

実験結果を図 25 に示す。実験参加者 7 名の平均を赤線、想定した速度を青線で示した。逆変換画像を作成した際の想定速度とモーターの回転速度との関係が示されている。また、図中のエラーバーは標準誤差を表す。

図 25 より、想定速度と観察者による調整速度は概ね一致した。想定速度と観察者による調整速度の差の有無を検定するために、 $t$  検定を実施した。実験で取得したデータの正規性を調べるために Shapiro-Wilk の検定を実施した結果、正規性が想定された ( $p > .05$ ) ため  $t$  検定を採用した。帰無仮説を「想定速度と観察者による調整速度の差は無い」として、各想定速度と調整速度の差における 95% 有意水準の範囲内に 0 が含まれるかどうかを検定した。

各速度における統計量（平均値と想定速度の差）と  $p$  値を表 7 に示す。いずれも  $p > .05$  であり、帰無仮説が採択された。

以上の結果より、いずれの速度においても、想定速度と観察者による調整速度の間には差はなく、観察者は逆変換画像を生成するときに想定した速度において、最も想定画像に近い知覚がなされたことを表していた。4.6 節で示した順変換の実験では、インパルス応答の関数は図 18 の特性に固定されているのに対して、この実験では観察者自身が提示物の回転速度を調整しているため、インパルス応答の特性が観察者に合うように調整されたと考えることもできる。

表 7 観察者による調整速度と想定速度の差の検定結果

	$t$ 値	$p$ 値
$\pi/3$ [rad/s]	-1.24	0.26
$\pi/2$ [rad/s]	-1.77	0.13
$2\pi/3$ [rad/s]	0.20	0.85
$5\pi/6$ [rad/s]	0.29	0.78

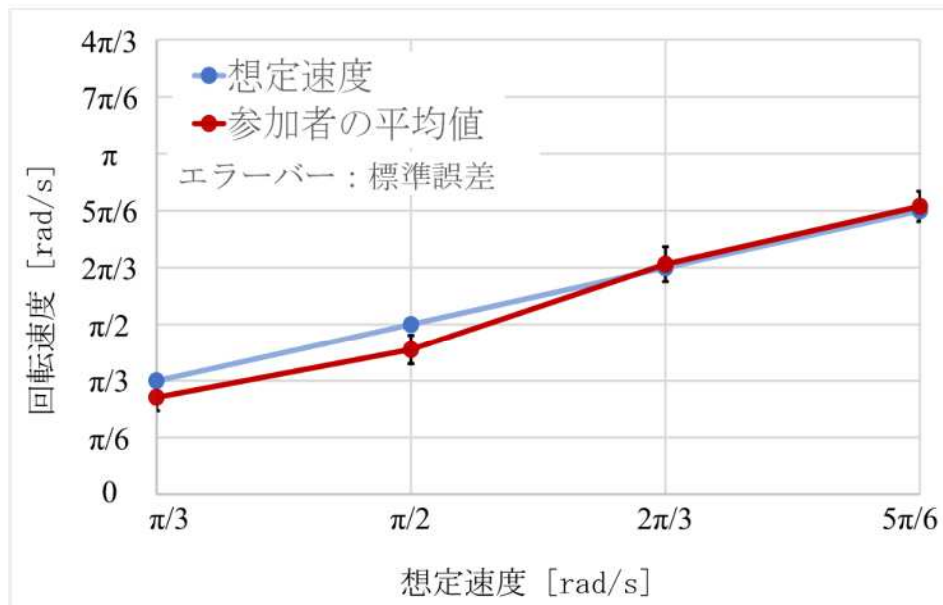


図 25 想定速度と観察者による調整速度の関係

実験後の内省報告により、最も想定図形に近い見えになる速度に調整したときの回転図形の見え方においては、図形中の Y の字が視認でき、図 19(f)に見られる白黒の縞模様は観測されないことが確認された。ただし、Y の字の輪郭が図 23 で示されている元の図形よりも膨らんで観測されていたことが報告された。これは観察者におけるインパルス応答の特性によるものと考え、実験に用いた速度  $2\pi/3$  [rad/s] を想定した逆変換画像を入力として、インパルス応答の特性を変化させて順変換画像を生成した。結果を図 26 に示す。順変換の想定速度は  $2\pi/3$  [rad/s] である。インパルス応答の特性として、Kelly[32] によるモデルから求めたインパルス応答をトレースし、式(12) に対して最小二乗法を用いて各パラメータを求めた。各パラメータ値は表 8 に示す。網膜照度が小さくなるほど「Y」の字の輪郭がぼやけていた。このぼやけによって元の図形より膨らんで観測されたと考えられる。観察者における視覚のインパルス応答特性は、実験に用いたインパルス応答の特性よりも暗い（網膜照度が小さい）ときの特性であった可能性がある。

これらのことにより、想定画像が低コントラストである場合において、視覚のインパルス応答モデルを用いて逆変換した場合、設定速度で回転させたときの見え方がある程度予測可能であることが示された。

第 4.6 節で述べた実験結果も踏まえると、回転させる図形のコントラストが高かったりエッジが明瞭であったりする場合は、提案手法による予想画像ではその推定精度

は高くないことがわかった．移動物体の知覚においては，視神経における大細胞系の働きが重要である報告がある[39,40,49]．より精度よく回転移動中の見え方を予測するためには，インパルス応答だけではなく，別の視覚メカニズムを組み入れることの必要性を示している．

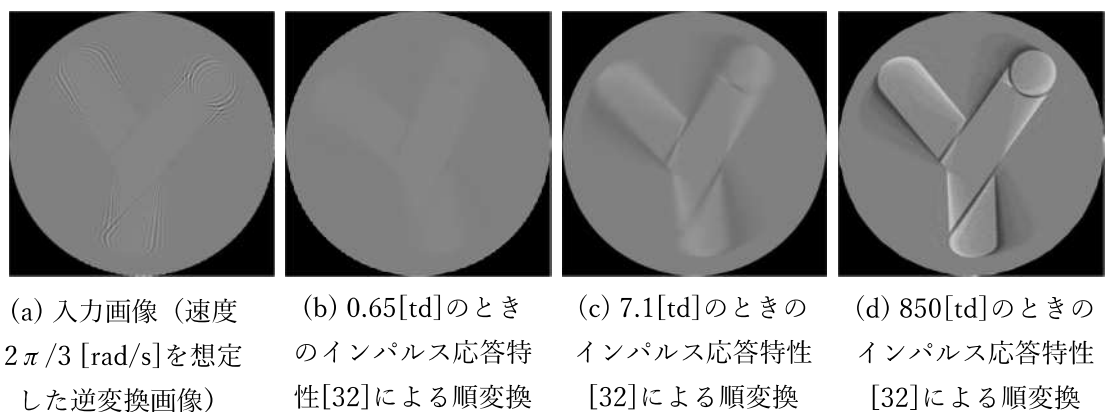


図 26 視覚のインパルス応答の特性を変更した場合における順変換画像

表 8 各インパルス応答特性におけるパラメータ値

		$k_n$	$\mu_n$	$\sigma_n$
0.65[td]のとき	$m_1$	50.6	77.5	20.0
	$m_2$	-14.5	140	21.4
7.1[td]のとき	$m_1$	31.5	50.9	12.0
	$m_2$	-27.0	91.0	16.5
850[td]のとき	$m_1$	17.6	32.6	6.18
	$m_2$	-16.8	52.3	9.37

## 4.8 平行移動する対象の視覚状況を考慮した評価実験

### 4.8.1 実験目的

日常生活において、私たちは動く物体を目にする機会が多い。物体を目で追う場合もあれば、物体を追うことなく通り過ぎる場合もある。対象物を目で追わない場合の見え方や、目の前で不意に動く対象物をデザインする手法を開発できれば、デザイナーの仕事の幅が広がり、新たな情報伝達手段としても活用できる。ここでは、対象が不意に目の前を横切る視覚状況を想定し、4.3 節の等速直線運動する対象の見え方を予測する手法を用いた評価実験を実施した。動く刺激を瞬間的に提示することで、不意に目の前を横切る視覚状況を再現した。

### 4.8.2 刺激

図 27 は、実験に使用した提示刺激（図 27(d)）と比較刺激（図 27(a)～(d)）である。図 27(a)は原画像を表す。図 27(d)は 567[mm/s]の想定速度で予測した逆変換画像を示す。対象を 567[mm/s]で等速直線運動させた際に(a)のように見えるためには、静止時の見え方として(d)のような画像であることを予測している。図 27(b)は、図 27(d)を 567[mm/s]の想定速度で動かした場合の順変換画像である。つまり、図 27(d)を想定した速度で動かしたときの見え方を予測している。これは、4.3 節で述べた等速直線運動する対象の見え方を予測する手法における逆変換の計算過程では、式(16)のように、値「ゼロ」を含む場合の計算不可を防ぐために分母に定数  $d$  を加えている影響を考慮して用意した。図 27(c)は、図 27(d)を 340[mm/s]の想定速度で動かしたときの順変換画像である。図 27(d)を想定より遅い速度で動かしたときの見え方を予測している。これは、3.6 節および 3.7 節の結果を踏まえ、本実験に用いるインパルス応答特性の正確性を考慮して用意した。

### 4.8.3 実験環境および実験手続き

実験環境を図 28 に示す。実験参加者は、1.3[m]離れた位置から、瞬間的に提示される物理的に動く提示刺激を観察し、そのときの見え方に最も近いものを比較刺激から選択して回答した。また、提示刺激の提示方法および実験手順を図 29 に示す。提示刺激の移動には、ステッピングモータ（Nema23 ステッピングモータ、1.3[Nm]、モータドライバ：VGEBy, TB6600）およびリニアスライダ（Heechoo, HRC45-C）を使用した。提示刺激の移動速度は 567[mm/s]であった。瞬間的な提示は、ビデオプ



ロジクター（SONY, VPL-VW255）を用い、提示時間は 100[ms]であった。30 回試行した。観察は暗室で行い、瞬間提示時の背景輝度は 24[cd/m<sup>2</sup>]であった。暗順応を避けるために提示刺激の提示部分以外は背景輝度で照らした。実験には 21～23 歳の男性 3 名が参加した。

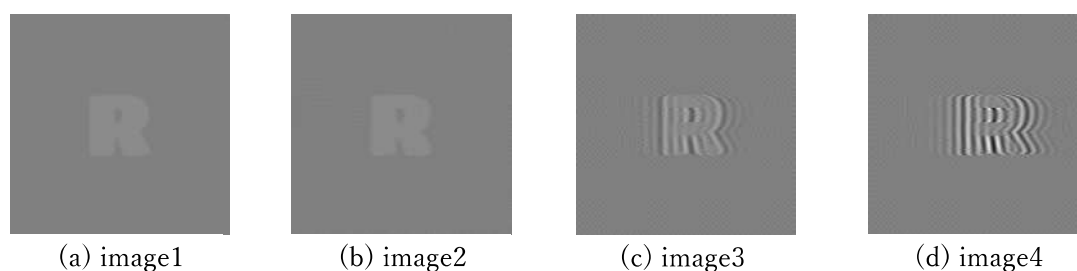


図 27 提示刺激(d)と比較刺激(a)～(d)

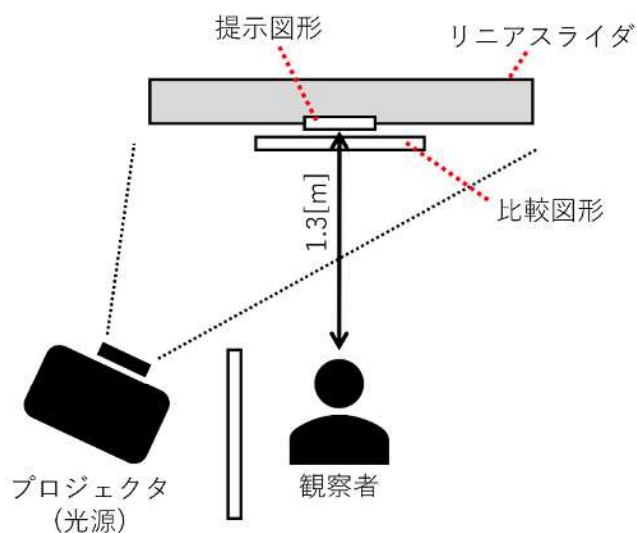


図 28 実験環境

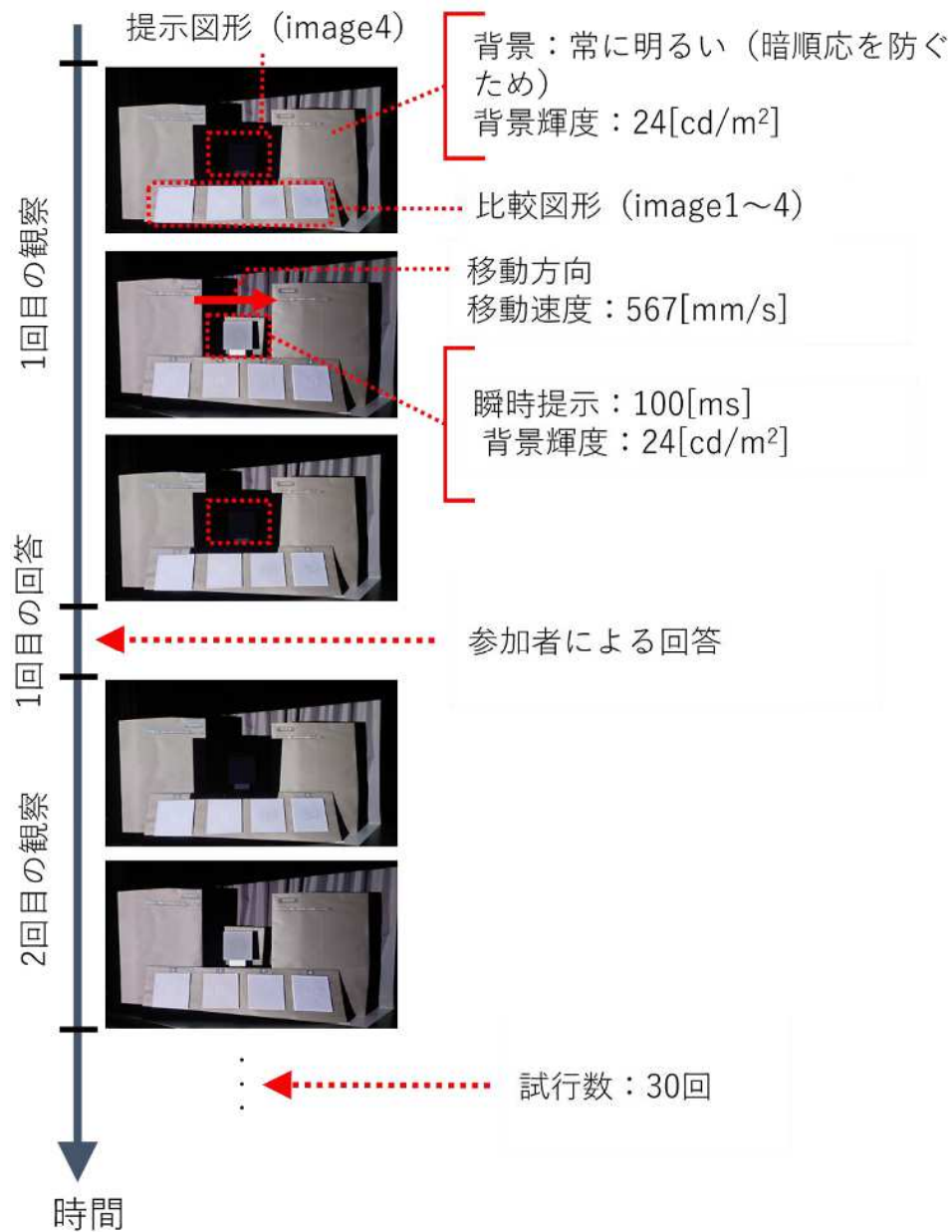
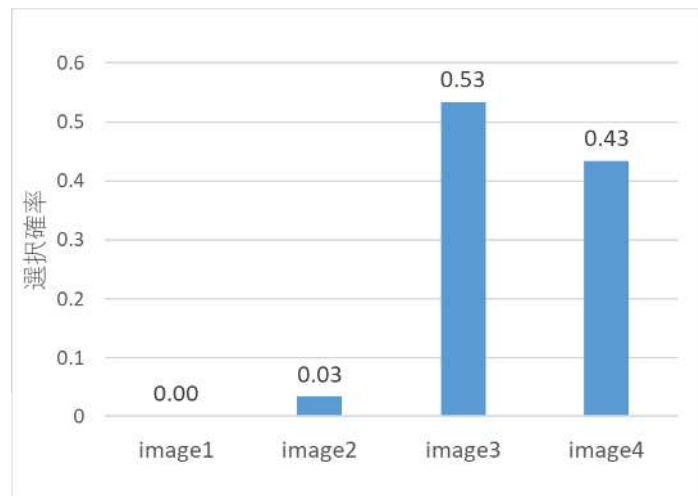


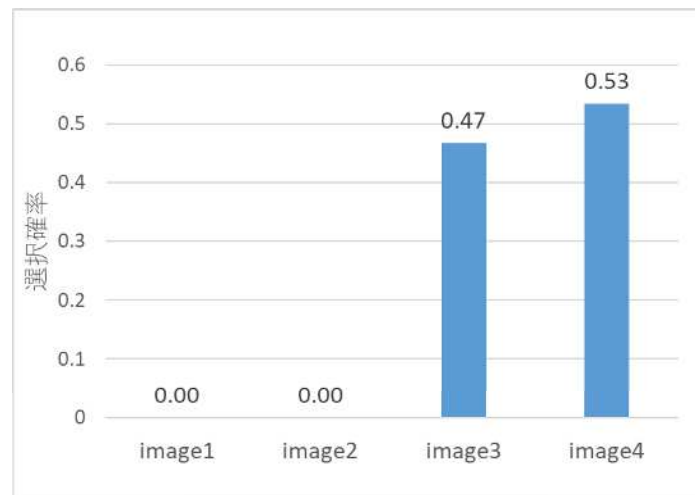
図 29 提示刺激の提示方法および実験手順

#### 4.8.4 実験結果と考察

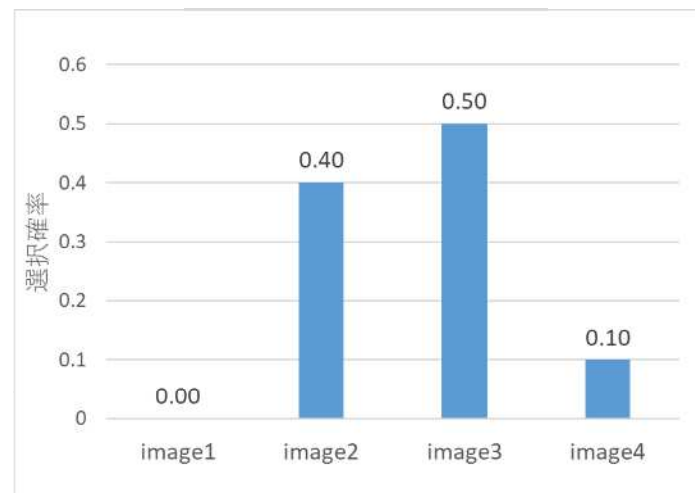
結果を図 30 に示す。参加者 1 と 2 は、図 27(c)や(d)と答えることが多かった。参加者 3 は、図 27(b)や(c)と答えることが多かった。参加者 3 名に共通して、図 27(c)に示した image3 を選択していることが多かった。視覚のインパルス応答特性に基づく予測が正確であるならば、図 27(a)の image1 や、逆変換の計算過程における定数  $d$  の影響を受けるならば図 27(b)の image2 が選択されるはずである。しかしながら、提示刺激の想定 (567[mm/s]) よりも遅い速度 (340[mm/s]) で移動させることを想定して作成した予測画像である図 27(c)の image3 が各参加者共通して選択されている。移動する物体を観察する際、中心窩で安定して対象を捉えるために、観察物体の移動方向と同方向に眼が動き始め、眼の動く速度が観察対象の動く速度に近づくにつれ、網膜上の像の動く速度は遅くなる[58]。この眼球運動によって提示刺激の想定より遅い速度で移動させることを想定して作成した予測画像 (image3) が多く選択されたと考えられる。不意に目の前を横切る視覚状況を再現するために、参加者には、図形提示領域の中央部を注視するように教示し、提示図形は瞬時提示しているものの、平行移動する物体を対象とする場合、眼球運動の影響を受けやすい可能性がある。



(a) 参加者 1



(b) 参加者 2



(c) 参加者 3

図 30 各参加者の実験結果

## 4.9 総合考察

回転する図形の見え方を予測する手法による順変換においては、入力画像がある程度ぼやけており、回転速度が速い場合においては、物理的に回転する図形と順変換によって生成された予測画像の見え方が近くなる傾向が窺えた。ただし、その再現精度は高くなかった。一方で、同手法による逆変換では、回転時にこう見えてほしいと想定する画像が低コントラストである場合において、回転する図形の見え方を予測できた。このように、用途や回転速度、図形のコントラストにおいて制限があるものの、回転する図形の見え方を視覚のインパルス応答モデルに基づくデジタルフィルタでシミュレーションできることがわかった。視覚のインパルス応答特性は平均輝度によって変化する。視環境が比較的安定している状況では、その観察対象の平均輝度に合わせてインパルス応答特性を選択することにより、提案手法を実場面で応用できると考えられる。視環境が動的に変化する状況では、印刷物のように図形を変化させられないものに対する応用は制限される。しかし、モニタに表示するなど図形を変化させられるのであれば、観察対象の平均輝度に応じて動的に応答特性を変化させるという工夫で実場面において応用できると考えられる。

目の前を不意に横切る視覚状況を再現した条件下で、等速直線運動する物体を対象にした場合、提示図形の想定速度よりも遅い速度で移動させることを想定して作成した予測画像が選択される傾向が見られた。平行移動する物体を対象とする場合、眼球運動の影響をより受けやすいと考えられた。平行移動する物体のシミュレーション手法においては、視覚のインパルス応答だけではなく、眼球運動を考慮したうえで移動物体の見え方を予測する必要があると考えられる。

## 4.10 まとめ

本章では、視覚のインパルス応答モデルをもとに回転移動する図形の見え方をデジタルフィルタリング処理によって予測する手法を作成した。そして、入力に対する回転時の見えの予測画像（順変換）および、回転時の見えを想定した静止画像（逆変換）を作成した。

手法の有効性を検証する実験を実施した。入力画像に対する回転時の見えの予測画像の生成（順変換）においては、入力画像がある程度ぼやけており、回転速度が速い場合、その再現精度は高くないものの、予測画像に近いと判断する参加者が増えた。

回転時の見えを想定した静止画像の生成（逆変換）においては、画像作成時に想定した速度と観察者が最も想定画像に近い見え方になるよう調整した速度が一致する結果を得た。これによって、想定画像が低コントラストである場合においては、提案手

法による逆変換が回転運動時の図形の見え方を予測できることが示された。ただし、逆変換時に縞模様が重なり合う場合においても有効であるかを明らかにする必要がある。また、予測できる図形には制限があるので、より汎用性を高めるには視覚のインパルス応答モデルだけでは限界があり、他の視覚メカニズムを反映させた改良が必要である。

## 第5章 結論

本論文では、ヒトの視覚特性を理解し効果的に応用することを動機として、視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタリング処理を、画像鮮鋭化へ応用することと移動物体の見え方予測へ応用することを目的とした。そして、以下の技術を提案した。

1. 視覚のインパルス応答を定性的に模擬したデジタルフィルタによる画像鮮鋭化技術
2. 視覚のインパルス応答を定量的に模擬したデジタルフィルタによって移動物体の見え方を予測する技術

1 の画像鮮鋭化への応用では、視覚のインパルス応答を定性的にデジタルフィルタとして模擬することにより、コントラスト上昇と S/N 比改善という画像鮮鋭化効果を得られることがわかった。また、計算コストが低いため、リアルタイム性を要する場面での応用も可能である。

2 の移動物体の見え方予測への応用では、視覚のインパルス応答を定量的にデジタルフィルタとして模擬することで、低コントラスト図形が回転する場合を想定するという条件付きではあるが、移動時の図形の見え方を予測して図形を生成できることがわかった。ただし、予測できる図形や移動方向、速度に制限があるため、より汎用性をもたせるためには、視覚のインパルス応答の模擬だけでは限界があることが示された。

視覚の動的特性をデジタルフィルタとして活用することで、移動している時だけ見せたい情報を付加するなど、デザイン手法の拡張および新たな情報伝達手段として発展することが期待できる。例えば、着用者や観察者が動くことでデザインが変化する服や運動速度によって模様が変化するステッカ、車両走行時のみに情報伝達する道路標示・標識など、様々な場面におけるデザインや情報伝達の幅の拡張に貢献することが期待できる。

今後は、移動物体の見え方予測手法を構築するために、個人における視覚のインパルス応答特性にチューニングする技術の開発が求められる。本論文で紹介した視覚のインパルス応答の測定方法を用いることで、個人の特性に合わせたデジタルフィルタを設計することが可能であるが、このチューニング作業が簡便化できれば、移動する物体の見え方の予測精度が向上し、より応用可能な範囲が拡張されると期待できる。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり，長きにわたりご指導・ご助言いただいた山口大学大学院創成科学研究科の長篤志先生に深く感謝いたします。また，有益なご助言をいただいた三池秀敏先生（山口大学名誉教授，山口学芸大学名誉教授），山口大学大学院創成科学研究科の多田村克己先生，中村秀明先生，水上嘉樹先生，相田紗織先生に感謝申し上げます。第3章の実験において，化学反応動画像をご提供いただいた千葉大学大学院理学研究科（現在，武蔵野大学工学部数理工学科）の櫻井建成先生，ロウソク火炎上空の対流構造可視化動画像をご提供いただいた宇部工業高等専門学校の長峯祐子先生，内視鏡動画像をご提供いただいた山口大学大学院医学系研究科の西川潤先生，坂井田功先生に感謝申し上げます。第4章における実験の一部は，山口大学大学院創成科学研究科の金子剛大氏（2021年度 博士前期課程修了）の協力により実施されました。ここに謝意を表します。また，実験に参加いただいた皆様に感謝申し上げます。



## 参考文献

- [1] Gabor, D.: Theory of communications, Journal of Institution of Electrical Engineers, 93, pp. 429–457, 1946.
- [2] 大澤五住：初期視覚メカニズムとそのモデル，知能と情報（日本知能情報ファジィ学会誌），18(3)，pp.369-376，2006.
- [3] 長山格，村上篤志，福嶋浩之，高良富夫：Gabor フィルタを援用した適応的特徴検出器と顔画像への応用，映像情報メディア学会技術報告，22(33)，pp.7-12，1998.
- [4] 細井聖：人にやさしい画像認識技術，映像情報メディア学会誌，55(11)，pp.1384-1387，2001.
- [5] 志田輝，橋本晃一，吉澤望，小平恭宏：神経生理学モデルを考慮したエッジ検出手法の開発と検証—トネル内の明視性評価への応用—，照明学会誌，107，pp.3-12，2023.
- [6] 大佐欣也：デジタル画像圧縮用ブロック歪み除去フィルタ，新日鉄技報，367，pp.21-24，1998.
- [7] Barbara, B., and Mark, E. M.: A multiscale spatial filtering account of the White effect, simultaneous brightness contrast and grating induction, Vision Research, 39, pp.4361-4377, 1999.
- [8] Mark, E. M., Barbara, B., and Davis, C.: The Oriented Difference-of-Gaussians Model of Brightness Perception, Proc. IS&T International Symposium on Electronic Imaging: Retinex at 50, pp.RETINEX-019.1- RETINEX-019.9, 2016.
- [9] Kyngjun, L., Seungwoo, W., and Jechang, J.: Pre-Processing Filter Reflecting Human Visual Perception to Improve Saliency Detection Performance, Electronics 2021, 10(23), 2892, pp.1-20, 2021.
- [10] Adelson, E. H., and Bergen, J.R.: Spatiotemporal energy models for the perception of motion, Journal of the Optical Society of America A, 2, pp.284-299, 1985.
- [11] Nishimoto, S., Vu, A. T., Naselaris, T., Benjamini, Y., Yu, B., and Gallant, J. L.: Reconstructing Visual Experiences from Brain Activity Evoked by Natural Movies, Current Biology, 21, pp.1641-1646, 2011.
- [12] 奥富正敏ほか，デジタル画像処理[改訂新版]編集委員会（編）：デジタル画像処理[改訂新版]，CG-ARTS 協会，pp.113-116，2015.
- [13] Ramachandran, V. S., Rao, V. M., and Vidyasagar, T. R.: Sharpness constancy during movement perception, Perception, 3(1), pp.97-98, 1974.
- [14] Burr, D. C.: Motion smear, Nature, 284, pp.164-165, 1980.

- [15]Pääkkönen, A. K., and Morgan, M. J.: Linear mechanisms can produce motion sharpening, *Vision Research*, 41, pp.2771-2777, 2001.
- [16]長篤志, 三浦一幸, 杉村敦彦, 西橋賢祐, 三池秀敏: モーションシャープニング現象モデルによる画像の先鋭化, 画像電子学会第 246 回研究会講演予稿, pp.49-54, 2009.
- [17]Kaneko, K., Otaka, K., and Osa, A.: A computer simulation method for the motion sharpening phenomenon in human vision system, *Proc. of SPIE 12177, International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2022*, 12177P, 2022.
- [18]Rao, R., and Ballard, D.: Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects, *Nature Neuroscience*, 2(1), pp.79-87, 1999.
- [19]Lotter, W., Kreiman, G., and Cox, D.: Deep predictive coding networks for video prediction and unsupervised learning, *arXiv:1605.08104v5*, 2017.
- [20]江村恒一, 加藤正隆, 渡辺英治: 運転における人の視覚を再現する深層学習モデル, 自動車技術会論文集, 53(6), pp.1102-1107, 2022.
- [21]Watanabe, E., Kitaoka, A., Sakamoto, K., Yasugi, M., and Tanaka, K.: Illusory motion reproduced by deep neural networks trained for prediction, *Frontiers in Psychology*, 9(345), pp.1-12, 2018.
- [22]Lotter, W., Kreiman, G., and Cox, D.: A neural network trained for prediction mimics diverse features of biological neurons and perception, *Nature Machine Intelligence*, 2, pp.210-219, 2020.
- [23]篠森敬三: 加齢効果に伴う世代間・世代内の視覚感度の個人差, 光学 (日本光学会論文誌), 34(6), pp.299-305, 2005.
- [24]Solomon, S. G., Martin, P. R., White, A. J., Rüttiger, L., and Lee, B. B.: Modulation sensitivity of ganglion cells in peripheral retina of macaque, *Vision Research*, 42, pp.2893-2898, 2002.
- [25]Zhou, B., Bao, Y., Sander, T., Trahms, L., and Pöppel, E.: Dissociation of summation and peak latencies in visual processing: an MEG study on stimulus eccentricity, *Neuroscience Letter*, 483, pp.101-104, 2010.
- [26]江島義道: 空間周波数特性による視知覚現象の解析, 心理学評論, 29(3), pp.257-277, 1986.
- [27]内川恵二, 篠森敬三 (編): 視覚 I 視覚系の構造と初期機能, 朝倉書店, pp.222-224, 2007.
- [28]Kelly, D. H. : Visual responses to time-dependent stimuli. I. Amplitude sensitivity measurements, *Journal of the Optical Society of America*, 51, pp.422-429, 1961.

- [29]池田光男：マックスウェル視のときの網膜照度の計算と測定, VISION, 1(2), pp.58-61, 1989.
- [30]Ikeda, M.: Temporal impulse response, Vision Research, 26, pp.1431-1440, 1986.
- [31]Burr, D. C., & Morrone, M.C.: Impulse-response functions for chromatic and achromatic stimuli. Journal of the Optical Society of America A, 10, pp.1706-1713, 1993.
- [32]Kelly, D. H.: Theory of Flicker and Transient Responses, I. Uniform Fields, Journal of the Optical Society of America, 61(4), pp.537-546, 1971.
- [33]吉本早苗, 竹内龍人：網膜照度により変化する視覚運動の知覚, 心理学評論, 54(2), pp.168-178, 2011.
- [34]Barlow, H. B.: Temporal and spatial summation in human vision at different background intensities, Journal of Physiology, 141, pp.337-350, 1958.
- [35]Legge, G. E.: Sustained and transient mechanisms in human vision: temporal and spatial properties, Vision Research, 18(1), pp.69-81, 1978.
- [36]Anderson, C. H., and Van Essen, D. C.: Shifter circuits: a computational strategy for dynamic aspects of visual processing, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 84, pp.6297-6301, 1987.
- [37]Martin, K. E., and Marshall, J. A.: Unsmearing visual motion: development of long-range horizontal intrinsic connections, Hanson S.J., Cowan J.D., Giles C.L. (Eds.), Advances in neural information processing systems, 5, Morgan Kaufmann, San Mateo, 1993.
- [38]Burr, D. C., and Morgan, M. J.: Motion deblurring in human vision, Proc. R. Soc. Lond. B, 264, pp.431-436, 1997.
- [39]Georgeson, M. A., and Hammett, S. T.: Seeing blur: 'motion sharpening' without motion, Proceedings of Biological Science, 269(1499), pp.1429-1434, 2002.
- [40]Hammett, S. T., Georgeson, M. A., Bedingham, S., and Barbieri-Hesse, G. S.: Motion sharpening and contrast: Gain control precedes compressive non-linearity ?, Vision Research, 43, pp.1187-1199, 2003.
- [41]Kupyn, O., Budzan, V., Mykhailych, M., Mishkin, D., and Matas, J.: DeblurGAN: Blind Motion Deblurring Using Conditional Adversarial Networks, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 8183-8192, 2018.
- [42]Goodfellow, I. J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., and Bengio, Y.: Generative adversarial nets, Advances in neural information processing systems, 27, 2014.

- [43]Zhang, K., Luo, W., Zhong, Y., Stenger, B., Ma, L., Liu, W., and Li, H.: Deblurring by realistic blurring, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition , 2020.
- [44]Kobayashi, T., Kitaoka, A., Kosaka, M., Tanaka, K., and Watanabe, E.: Motion Illusion-like Patterns Extracted from Photo and Art Images Using Predictive Deep Neural Networks, Scientific Reports, 12-1, 3893, 2022.
- [45]富永昌治：トーンマネジメント：人間の視覚に適応した階調特性の制御，映像情報メディア学会誌，62(10)，pp.1534-1541，2008.
- [46]田口亮：視覚システムとその特性に基づく画像処理，Journal of Signal Processing, 19(1)，pp.3-14，2015.
- [47]Ohtaka, K., Osa, A., Sugimura, A., Miike, H., Ikemoto, Y., Fukuda, M., and Koshiyama, Y.: Motion sharpening and its stabilization using optic flow fields, International Workshop on Advanced Image Technology 2011, submission 44, 2011.
- [48]Takeuchi, T., and De Valois, K. K.: Sharpening image motion based on the spatio-temporal characteristics of human vision, Proc. of SPIE-IST Electronic Imaging: Human Vision and Electronic Imaging X, 5666, pp.83-94, 2005.
- [49]Hammett, S. T., Georgeson, M. A., and Gorea, A.: Motion blur and motion sharpening: temporal smear and local contrast non-linearity, Vision Research, 38, pp.2099-2108, 1998.
- [50]富士フイルム株式会社, 伊藤渡, シャープネス処理方法および装置並びにプログラム, 特許第 4067863, 2008.
- [51]大高洸輝, 長篤志, 三池秀敏, 杉村敦彦, 西川潤, 坂井田功：動き情報を基にした鮮鋭化処理における安定化とカラー画像処理への拡張, Proc. The 13th IEEE Hiroshima Student Symposium, pp.326-329, 2011.
- [52]Miike, H., Miura, K., Nomura, H., and Sakurai, T.: Flow waves of hierarchical pattern formation induced by chemical waves: The birth, growth and depth of hydrodynamic structures, Physica D, 239, pp.808-818, 2010.
- [53]篠森敬三編：視覚 I —視覚系の構造と初期機能—, 朝倉書店, pp.27-28, 2007.
- [54]大山正, 今井省吾, 和気典二編：感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, pp.46-49, 2007.
- [55]McKee, S. P., and Taylor, D. G.: Discrimination of time: comparison of foveal and peripheral sensitivity, Journal of the Optical Society of America A, 1, pp.620-627, 1984.
- [56]奥富正敏ほか, デジタル画像処理[改訂新版]編集委員会（編）：デジタル画像処理[改訂新版], CG-ARTS 協会, pp.146-147, 2015.

- [57]内川恵二，篠森敬三（編）：視覚I視覚系の構造と初期機能，朝倉書店，pp.18-19，2007.
- [58]河野憲二：追従眼球運動，Equilibrium Research，56(3)，pp.197-207，1997.