

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	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—
氏 名 (Name)	大高 洸輝
<p>ヒトの視覚特性に基づいたデジタルフィルタは，様々な分野に幅広く応用できる有用なツールである．本論文では，動く物体の見え方を説明可能である，視覚のインパルス応答特性に着目した．視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタを提案し，画像鮮鋭化への応用および移動物体の見え方予測への応用について検討した．これによって，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の利点や有効性について述べた．</p> <p>第 1 章では，研究背景および目的を述べた．第 2 章では，本論文に関連する研究を調査して概要をまとめた．</p> <p>第 3 章では，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について，画像鮮鋭化への応用について議論した．本章では，視覚のインパルス応答特性における興奮性応答と抑制性応答の時間差を導入したデジタルフィルタを設計し，この時間差が画像鮮鋭化にもたらす効果を検討した．提案手法をシミュレーション動画像，化学反応動画像，振動するロウソク火炎上空の対流構造可視化動画像に適用し，動画像において動きのある対象について，従来法よりも大きなコントラスト上昇効果と S/N 比改善効果が得られることを示した．一方で，提案手法ではフレーム間の移動量が大きい物体に対しては，その物体境界において不自然な像や擬似的な輪郭線が現れるという欠点があった．そのため，この欠点を低減し，画質を改善する手法も提案した．その際，処理を効率的に行うために，計算コストを削減した手法として提案した．提案手法をシミュレーション動画像，内視鏡動画像，飛行する鳥のトラッキング動画像に適用し，鮮鋭感を保持しつつ計算コストを低減できること，鮮鋭化処理に伴う不自然な像や擬似輪郭を緩和できることを示した．</p> <p>第 4 章では，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の移動物体の見え方予測への応用について検討した．本論文では，移動物体の見え方予測として次の 2 つを考えた．</p> <p>① 静止時の見え方を表す画像に対して，視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタをかけることで，移動時の見え方を表す画像を生成する順方向的な予測（順変換）</p> <p>② 移動時の見え方を表す画像に対して，視覚のインパルス応答特性に基づく逆フィルタをかけることで，静止時の見え方を表す画像を生成する逆方向的な予測（逆変換）</p> <p>著者らは，視覚のインパルス応答特性をより精緻に模擬したデジタルフィルタを用いて移動する物体の見え方を予測することを試みている．これまでの報告では，予測手法の有効性を検証する実験において，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</p>	

によって比較的低速な範囲に制限されていた。本章では，現実空間で移動する物体の見え方がどの程度予測できるのかについて検討した。まず，観察対象を一定速度で移動させる実験を実施しやすいように，回転運動する図形を対象とした。ここでは，回転運動する図形の見え方を視覚のインパルス応答モデルから予測する手法を提案した。次に，対象を物理的に回転させる条件で提案手法の有効性を検証した。提案手法は，入力画像が回転した時の見え方を予測する画像（順変換）および，回転した時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，回転中にそのように見えるように逆算した静止画像（逆変換）を生成できる。提案手法の有効性を検証する実験の結果，提案手法による順変換では，入力画像がある程度ぼやけていて，回転速度が速い場合，再現精度は高くないものの，予測画像に近い見え方であると判断する参加者が増えたことを示した。また，想定する見え方として用意する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する図形の見え方を予測可能であることを示した。

動く物体を見る際，目で追うこともあれば，追わずに横切ることもある。対象が不意に目の前を横切る視覚状況を想定し，等速直線運動する対象の見え方を予測する手法を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として提案した。そして，動く刺激を瞬間的に提示することで，目の前を不意に横切る視覚状況を再現し，提案手法の有効性を検証した。実験の結果，提示刺激の想定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ことが多かった。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くなる可能性が示唆された。

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特性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た。また，今後の研究課題について述べた。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Digital Filters Based on Impulse Response Characteristics of Vision —Applications to Image Sharpening and Estimation of the Perceived Appearance of Moving Objects—
氏 名 (Name)	OTAKA Koki
<p>Digital filters based on human visual characteristics are useful tools that can be widely applied in various fields. This paper focuses on the impulse response characteristics of human vision. Digital filters based on the impulse response characteristics of vision are proposed and its application to image sharpening and estimation of the perceived appearance of moving objects are discussed. The advantages and effectiveness of utilizing the dynamic characteristics of vision as a digital filter are discussed.</p> <p>Chapter 1 describes the background and objectives of the study. In Chapter 2, we survey and summarize studies related to this paper.</p> <p>Chapter 3 discusses digital filtering processing based on the impulse response characteristics of vision, focusing on its application to image sharpening. In this chapter, a digital filter incorporating the temporal difference between excitatory and inhibitory responses in the visual impulse response was designed, and the effect of this temporal difference on image sharpening was examined. The proposed method was applied to a simulation movie, a chemical reaction movie, and a convection structure visualization movie above oscillating candle flame, and it was shown that the contrast increase and the signal-to-noise ratio improvement were larger than those of the conventional method for moving objects in the movies. On the other hand, the proposed method has the disadvantage that unnatural images or pseudo-contour lines appear at the object boundaries when the amount of movement between frames is large. Therefore, a method was also proposed to reduce this disadvantage and improve image quality. This method was proposed as a method to reduce computational costs for efficient processing. The proposed method was applied to simulated motion images, endoscopic video sequences, and tracking images of flying birds, demonstrating that computational cost can be reduced while preserving sharpness, and that unnatural images and pseudo-contours associated with sharpening can be mitigated.</p> <p>Chapter 4 discusses digital filtering processing based on the impulse response characteristics of vision, focusing on its application to estimation of the perceived appearance of moving objects. The two estimation methods are as follows:</p>	

- ① Forward transformation, where an image of the appearance at rest is filtered by a digital filter based on visual impulse response characteristics to produce an image of the appearance in motion.
- ② Inverse transformation, where an image of the perceived appearance during motion is transformed by an inverse filter based on the impulse response characteristics of vision to produce an image corresponding to the appearance at rest.

The authors attempt to estimate the perceived appearance of moving objects using digital filters that more precisely reproduce the impulse response characteristics of vision. In previous reports, experiments to verify the effectiveness of the estimation method used LCD monitors, which were limited to a relatively slow range by their refresh rate limitations. In this chapter, the extent to which the appearance of moving objects in real space can be estimated was examined. First, to facilitate experiments in which the object of observation is moved at a constant speed, a figure in rotational motion was used as the object of observation. In this chapter, a method is proposed for estimating the perceived appearance of rotating figures using a visual impulse response model. Second, the effectiveness of the proposed method was verified under the condition that the object is physically rotated. The proposed method can generate forward and inverse transformation images. The results of an experiment to verify the effectiveness of the proposed method showed that more participants judged that the forward transformation using the proposed method looked similar to the predicted image, although the reproduction accuracy was not high, when the input image was somewhat blurred and the rotation speed was high. In the case of low-contrast images, the proposed inverse transformation can predict the appearance of a rotating figure.

When looking at a moving object, we may follow it with our eyes, or we may cross it without following it. Assuming a visual situation in which an object unexpectedly crosses in front of the eyes, we proposed a method for estimating the perceived appearance of an object in constant velocity linear motion as a digital filtering process based on the impulse response characteristics of vision. The instantaneous presentation of moving stimuli was used to reproduce a visual situation in which an object suddenly crosses the observer's view, thereby verifying the effectiveness of the proposed method. The results of the experiment showed that the estimated images generated with the assumption that the stimuli were to be moved at a slower speed than that assumed for the presented stimulus were often selected. It was suggested that the eye movements may be more susceptible to the effects of eye movements when the object is moving in a constant velocity linear motion.

Chapter 5 summarizes the findings throughout Chapters 3 and 4. This chapter describes the usefulness, scope of application, and future issues of digital filtering processing based on the impulse response characteristics of vision.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	大高洸輝
審 査 委 員	主 査：長 篤志
	副 査：多田村克己
	副 査：中村秀明
	副 査：水上嘉樹
	副 査：相田紗織
論 文 題 目	<p>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—)</p>
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>本論文は、ヒトの視覚のインパルス応答特性に基づいた二種類のデジタルフィルタを提案し、それらの工学的利用における有効性を示すことを目的としている。ヒトの視覚特性は多くの画像処理技術等に活用されているが、視覚のインパルス応答を活用した工学的応用はこれまでほとんどされておらず、その有効性も明確でなかった。研究の核となる視覚のインパルス応答とは、瞬間的な光刺激に対する視覚系の時間応答特性を指す。</p> <p>まずは、視覚のインパルス応答を模したデジタルフィルタを画像鮮鋭化に応用する方法を述べている。従来手法である tUSM 法を拡張し、興奮性応答と抑制性応答の時間差を導入した画像強調手法 VIR 法を提案している。そして、VIR 法は従来法と比較してより大きなコントラスト上昇効果と S/N 比の改善が得られることを示している。さらに、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し、画像品質を改善する手法 VIR2+過去平滑化法を提案している。この手法を、内視鏡画像と飛行する鳥のトラッキング動画画像へ適用することにより有効性を実証している。主観評価実験でも、鮮鋭化の効果が確認されている。これらにより、提案手法は動画画像における画像鮮鋭化処理として有効であることを示している。</p> <p>続いて、視覚のインパルス応答モデルに基づいたデジタルフィルタリング処理を移動する物体の見え方を予測する手段として応用する方法について述べている。移動時の見え方を予測する「順変換」の評価実験では、入力図形を高速で回転させた場合、想定速度よりも遅い回転速度の見え方に近く観察されることがわかった。これは、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可能性を示唆している。移動時の見え方を想定して静止画像を生成する「逆変換」の評価実験では、画像を生成する際に想定した回転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回転速度がほぼ一致する結果が得られ</p>	

た。また、平行移動する図形を対象とした評価実験では、想定速度よりも遅い速度で移動する予測画像が最も多く選択された。これは、眼球運動が移動物体の見え方の予測に影響を与えている可能性を示唆している。以上の結果より、提案するデジタルフィルタは図形の移動時の見え方を予測できること、またその手法を適用可能とする条件を示している。提案手法は、ビジュアルデザインやプロダクトデザインなどにおけるデザイン手法の拡張や、新たな情報伝達手段の発展に貢献すると期待できる。

なお、本審査申請時の論文題目は、「視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタ—画像鮮鋭化技術と視覚のシミュレーション技術への応用—(Digital Filter Based on Impulse Response Characteristics of Vision —Image Enhancement Technology and Human Vision Simulation Technology—)」であったが、本審査会での意見を受けて、「視覚のインパルス応答特性に基づくデジタルフィルタ—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—)」に修正された。

公聴会では学内外の聴講者が出席し活発な質疑応答がなされた。公聴会における主な質問内容は、カラー画像への適用可能性、パラメータの選択方法、生成画像の見え方、提案手法の改良方法、観察者の視力の影響、動体視力との関連性、他の動画像へ適用した際の課題点、処理画像の専門家による評価、深層学習との組み合わせ方法等についてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 5 編）

- 1) 大高洸輝, 長篤志, 長峯祐子, 三池秀敏, 視覚の時間応答特性を基にした画像強調手法～抑制性応答と興奮性応答の時間差がもたらす効果～, 映像情報メディア学会誌, Vol. 71, No. 4, pp. J144-J150 (2017)
- 2) 大高洸輝, 長篤志, 長峯祐子, 西川潤, 坂井田功, 視覚の時間応答特性を基にした画像強調手法における画像品質の改善, 映像情報メディア学会誌, Vol. 74, No. 1, pp. 215-221 (2020)
- 3) 大高洸輝, 長篤志, 視覚のインパルス応答モデルによる回転運動する図形の見え方の予測, 日本感性工学会論文誌, Vol. 24, No. 2, pp. 269-276 (2025)
- 4) Koki Otaka, Kouta Kaneko, Atsushi Osa, Image Generation Method for Predicting the Appearance of Rotating Figures, International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2024, Proc. of SPIE, Vol. 13164, pp. 131642K-1 - 131642K-5 (2024)
- 5) Koki OTAKA, Atsushi OSA, PREDICTING METHOD FOR APPEARANCE OF MOVING OBJECTS IN INSTANTANEOUS PRESENTATION, The KEER 2024 International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research (KEER2024) Proceeding, pp. 774-778 (2024)