

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500190

研究課題名（和文）デジタルアイ（計算視覚）開発と視覚インターフェース最適設計への応用に関する研究

研究課題名（英文）Formulation of Digital Eye (Computational Human Vision Model) and Its Application to Vision-Based Optimal Design of Imaging Systems

研究代表者

松井 利一 (MATSUI TOSHIKAZU)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20302458

研究成果の概要（和文）：我々は、視覚系における焦点調節誤差特性（網膜像のボケが提示画像の性質に依存して変化する特性）の重要性に着目して2次元自動焦点調節機構モデル（デジタルアイ）を定式化し、文書画像を読み易くするための最適表示条件（文字と文字間隔、行と行間隔の最適関係）の理論的導出に適用した。その結果、本モデルの応答特性に基づき文書画像の最適表示条件が導出可能であり、従来の実測結果とも良く対応することが示された。これは、デジタルアイが視覚インターフェースの最適設計の為の基盤技術になり得ることを意味する。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a two-dimensional mathematical model (digital eye) of the auto-focusing accommodation mechanism in human vision and applied the model to theoretical derivation of the optimal display condition for document images. The proposed model is formulated based on the idea that the accommodation-error characteristic, i.e., blur characteristic for the retinal image, plays an important role in human vision's image processing. The optimal display condition represents the optimal relationship between lines and their spacing and the optimal relationship between characters and their gap in document images and is indispensable for making documents easy to read. Consequently, the following two results were obtained. (1) The optimal display condition for document images could be theoretically derived from the proposed model's response to document images. (2) The theoretically derived optimal display condition was almost the same as the experimentally derived one. The above results suggest that the proposed model can be a basis for performing vision-based optimal design of imaging systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：視覚インターフェース

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：デジタルアイ，2次元自動焦点調節機構モデル，視覚インターフェース，最適設計，最適表示条件

## 1. 研究開始当初の背景

次世代テレビ方式（スーパーハイビジョン、立体テレビ）の検討が既に始まっており、インターネットの分野でも、電子図書、電子辞典、電子新聞など何らかの電子ディスプレイを用いる環境が今後ますます増加すると予想される。また、高齢化社会の進行により、老眼者の数も確実に増加すると予想される。この様な状況の中で、次世代テレビ方式の決定、電子ディスプレイのスペック（画素構造、必要解像度、色再現法式などのハード面）の決定、読みやすい文書画像表示方法（行と行間隔の関係、文字と文字間隔の関係、老眼者に適した表示方法などのソフト面）の決定等の視覚インターフェースの最適化には、最終的に被験者による評価が不可欠である。しかし、被験者による評価には、評価結果の客観性の欠如、評価の煩雑性と手間の増加、被験者の負担の増加などの問題点がある。また、老眼者に適した表示法と健常者に適した表示法に違いがあるとすれば、その本質的原因は何かという疑問に正確に答えるのも難しい。上記問題点の解決の為には、被験者の視覚機能を定量的にシミュレート可能な視覚システム（デジタルアイ）を開発し、このモデルの応答出力に基づく視覚インターフェース最適設計法を構築するのが解決策の1つとなり得る。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒトの視覚系の機能・特性を理論的にシミュレート可能な視覚システム（デジタルアイ）を開発し、提示画像に対するこの視覚システム（デジタルアイ）の定量的応答特性に基づいた視覚インターフェースの最適設計法を構築することにより、健常者や老眼者の別を問わず、将来の知的生活環境の構築に寄与することである。具体的な視覚インターフェースの最適設計として、文書画像を読み易くするための最適表示条件（文字と文字間隔、行と行間隔の最適関係）の理論的導出に適用する。

## 3. 研究の方法

本研究ではディスプレイとヒト視覚系の間のインターフェース（視覚インターフェース）を最適設計する基盤技術を確立するために、ヒトの視覚系の機能・特性を理論的にシミュレート可能な視覚システム（デジタルアイ）を定式化することになる。そこで、以下の3つの手順に従って研究を進める。

### (1) 視覚系における焦点調節機構の重要性の検証（実験的検討）

視覚系では焦点調節誤差特性（網膜像のボケの程度が提示画像の性質に依存して変化する

特性）が重要な役割を果たしているという我々の考え方の正当性を、焦点調節応答の実測により検証する。これは、我々の考え方が正しくなければデジタルアイの定式化自体が意味を持たなくなるからである。具体的には、画像品質の主観評価を行っている最中の眼の焦点調節応答を実測し、画質の程度に依存して焦点調節誤差がどのように変化するかという対応関係を明らかにする。さらに、主観評価結果に影響を与える画質劣化画像の情報に関する検討、および、画像認識を行う際の焦点調節誤差に関する検討も行い、視覚系における焦点調節機構の重要性の検証を行う。

### (2) 視覚系における焦点調節機構の重要性の検証（理論的検討）

視覚系では焦点調節誤差特性が重要な役割を果たしているという我々の考え方の正当性を、客観的鮮鋭さ評価尺度を用いて理論的に検証する。我々は、焦点調節機構の特性を導入した客観的鮮鋭さ評価尺度を既に提案しているが、この尺度から焦点調節機構の特性を取り除いた場合の鮮鋭さ評価性能を調べることにより焦点調節機構の重要性を別の観点から検証する。さらに、焦点調節特性を含まない従来の鮮鋭さ評価尺度の評価性能を高める方法についても検討し、それでも焦点調節特性が導入された尺度の評価性能の方が高いことを明らかにする。

(3) 2次元自動焦点調節機構モデルの定式化  
視覚系の焦点調節特性が理論的に再現可能な1次元の視覚系の数理モデル（1次元協調視覚モデル）は既に定式化済みであるが、この1次元モデルに方位チャネル特性と各方位チャネルに最適な焦点調節状態を計算するためのフィードバックループを組み込むことにより2次元自動焦点調節機構モデルに拡張する。さらに、定常最適制御を用いて焦点調節機構の動特性の再現も可能になるように拡張する。

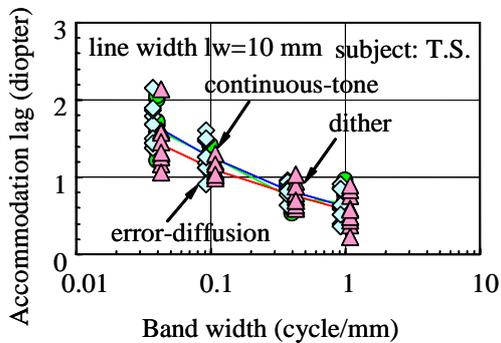
### (4) 視覚インターフェースの最適設計への適用

視覚インターフェースの最適設計の例として、文書画像を読み易くするための最適表示条件（文字と文字間隔、行と行間隔の最適関係）の理論的導出に適用し、2次元自動焦点調節機構モデルが視覚インターフェースの最適設計の為の基盤技術になりうることを検証する。

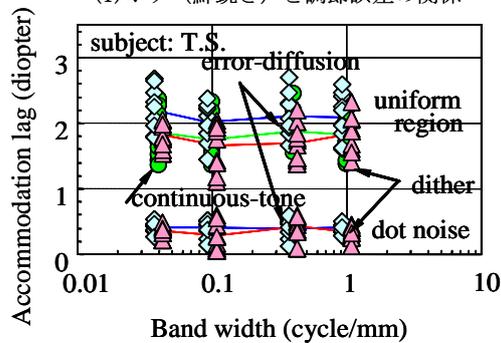
## 4. 研究成果

### (1) 視覚系における焦点調節機構の重要性の検証（実験的検討）

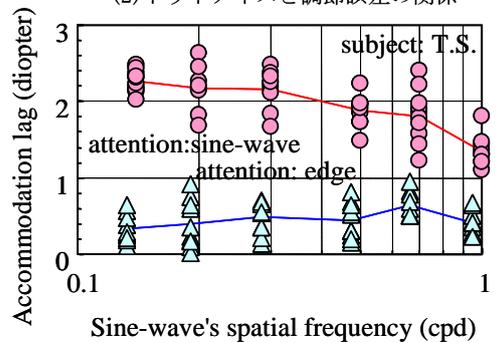
①画質に対するヒューマンファクタとして眼の焦点調節応答に着目し、画質劣化が焦点調節応答にどのように影響するのか、及び、画質劣化画像のどのような情報（空間周波数構造あるいは空間的特徴）が焦点調節機構を駆動するのかを明らかにした。具体的には、鮮鋭さ、ノイズ、擬似輪郭を主観評価している最中の焦点調節応答、及び、正弦波、方形波、基本波なし方形波の静止画像観察中の焦点調節応答を赤外線オプトメータを用いて実測した。その結果、(i)鮮鋭さ、ノイズ、擬似輪郭を主観評価中の焦点調節応答（図1）より、鮮鋭さの程度の低下に伴い焦点調節誤差が増加し、ノイズや擬似輪郭に注意すると焦点調節誤差が減少すること（画質劣化と焦点調節応答の関係）、(ii)静止画像（正弦波、方形波、MF波）観察中の焦点調節応答の比較から、空間周波数構造よりも空間的特徴が調節手がかりとなり、焦点調節機構を駆



(1) ボケ（鮮鋭さ）と調節誤差の関係



(2) ドットノイズと調節誤差の関係



(3) 擬似輪郭と調節誤差の関係

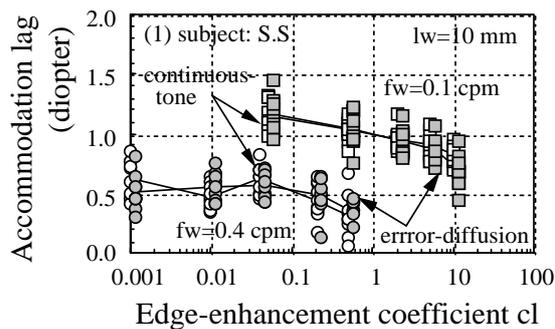
図1 主観評価時の焦点調節誤差の実測結果

動することが示された。以上の結果は、視覚系が行う主観的画質評価では、画質の主観的判断が焦点調節機構に影響されると同時に、画質劣化画像の空間的特徴に基づいて計算されていることを示唆する。即ち、主観評価と相関性の高い客観評価値が導出できる客観評価法を開発するには、評価尺度に焦点調節特性を導入すると同時に、空間的情報を用いて評価値を計算する枠組みを構築するのが1つの有効な方法になりうることを示唆する。

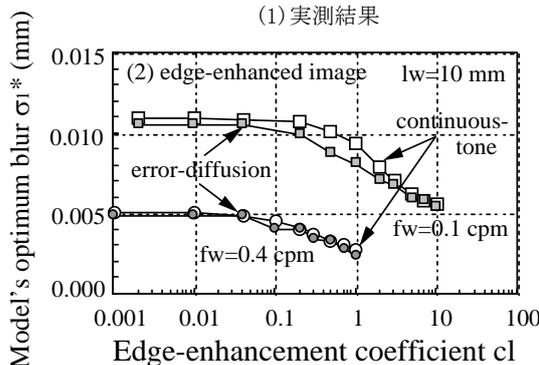
②従来の画像認識では焦点調節特性は考慮されないが、我々は、視覚系の焦点調節特性が視覚や認識に重要な役割を果たすと考えている。我々の考え方の正当性を検証する為、画像を正確に認識するのに必要な画像提示時間とその際の焦点調節応答を赤外線オプトメータを用いて実測した。具体的には、3ドットからなる画像を短時間提示し、3ドットの方角を認識するのに必要な提示時間とそのときの焦点調節応答を実測した。その結果、3ドットの方角を正確に認識するためには焦点調節誤差を減少させることが必須であることが明確化された。これは、視覚情報処理機能である認識機能にも焦点調節機構が重要な役割を果たしていることを意味し、我々の考えが正当であることを再度確認した。

(2) 視覚系における焦点調節機構の重要性の検証（理論的検討）

①既に定式化してある視覚系の1次元焦点調節機構モデルを用いた開発した客観的鮮鋭さ評価法を利用し、画質要因として重要な鮮鋭さの程度を評価する視覚系の主観評価機能に及ぼす焦点調節誤差特性の影響を理論的に検討した。評価画像は、帯域幅可変の画像システムから出力された線幅可変の一般化ナイフエッジ画像とそのエッジ強調画像及びそれらの擬似中間調画像であり、画像観測特性に関する視覚系と本モデルの同等性及び主観評価値と客観評価値間の相関係数値と画像観測機構の有無の関係を調べた。その結果、以下が示された。(i)図2は、提示画像の画質改善を行った場合のエッジ強調係数と焦点調節誤差実測値の関係（左）とモデルから推定した網膜像のボケの関係（右）を表し、両図の比較により、我々の1次元焦点調節機構モデルが鮮鋭さ主観評価時に於ける視覚系の焦点調節応答特性の再現が可能であることが確認された（焦点調節特性に於ける視覚系と本モデルの同等性）。(ii)焦点調節特性を導入した評価尺度の評価性能は、焦点調節特性を導入していない評価尺度よりも高く、評価条件に依存した評価



(1) 実測結果



(2) 計算結果

図2 鮮鋭さ評価時に於けるエッジ強調係数と焦点調節誤差の関係

性能の低下も少なく、この結果はエッジ強調処理の有無や階調再現法に依存しなかった。以上は、評価画像に依存して我々の1次元焦点調節機構モデルの焦点調節特性が適応的に変化することにより評価性能の低下を生じ難くしている可能性、さらには、視覚系に於いても同様の現象が生じている可能性をも示唆する。すなわち、以上の結果は視覚系の画像処理機能に於ける焦点調節特性の重要性を理論的に意味するものであり、視覚インターフェースの設計にも利用可能であると予想される。

②従来の客観的鮮鋭さ評価法において、MTF法の計算容易性と1次元焦点調節機構モデルに基づく評価法の画像表示システム(階調再現法)に対する不変性を両立する新しい客観的評価尺度(改良型MTF法)を提案した。具体的には、MTF法で使用されている画像システムのMTFを画像システム出力画像のフーリエ変換に置き換えた。これは、MTF法に協調視覚モデル法の特徴である画像観測の要素を組み込んだものである。一般化ナイフエッジ画像とそのエッジ強調画像及びそれらの擬似中間調画像を評価画像として用い、改良型MTF法と協調視覚モデル法の評価性能を比較した。その結果、改良型MTF法の以下の特性が明らかになった。(i)鮮鋭さの帯域幅依存特性だけでなく最適視距離特性の再現

も可能になった。(ii)連続階調画像だけでなく擬似中間調画像に対する鮮鋭さ評価も可能となり、主観評価値ともよく一致した。(iii)評価性能は、上記(i)(ii)の点においてMTF法よりも向上し、1次元焦点調節機構モデルに基づく評価法の評価性能にかなり近づいた。(iv)計算時間は、MTF法よりも多少増加したが、1次元焦点調節機構モデルに基づく評価法よりも圧倒的に少なかった。以上の結果は、改良型MTF法が、評価尺度値の計算の容易性と高い評価性能の両立という観点において、従来評価尺度には無い優れた特徴を有する新しい客観的鮮鋭さ評価尺度になり得ることを示唆する。

### (3) 2次元自動焦点調節機構モデルの定式化

①従来の1次元焦点調節機構モデルに方位特異性を持つ空間周波数チャンネルと、各方位チャンネルに評価関数を極大化するフィードバック機構を組み込むことにより、図3、4で示される2次元焦点調節機構モデルを構築し、その有効性を検証した。その結果、提案モデルの以下の特性が明確化された。(i)1つの方位チャンネルから2種類の応答(2種類の評価関数極大値)が出力される場合が存在し、視距離一定でも画像の性質に依存して焦点調節応答が異なるという実測結果を理論的に再現した(1次元焦点調節機構モデルの機能の継承)。(ii)擬似中間調画像の信号成分に依存して焦点調節応答が異なるという実測結果を理論的に再現した(画像復調特性の再現)。(iii)注意を向ける方位に依存して焦点調節応答が異なるという実測結果を理論的に再現した(方位チャンネル特性の再現)。以上の結果は、本提案の2次元焦点調節機構モデルが、階調再現方法に関係なく焦点調節機構の2次元応答特性がシミュレート可能であることを意味し、視覚系の焦点調節機構の有効なモデルになり得ることを示唆する。すなわち、一般画像に対する視覚インターフェースの最適設計法を確立する為の視覚系の数理モデルになりうることを意味する。

②既に定式化してある視覚系の数理モデルが、視覚系の焦点調節特性をより正確に再現可能となる様に、焦点調節特性の動特性を導入した。具体的には、改良した赤外線オプティメータを用いた焦点調節機構の反応時間と過渡応答特性を実測し、この特性を視覚モデル中に組み込んだ線形レギュレータによりモデル化すると同時に、多重方形波画像や方形波の基本周波数を除去した多重MI波画像に対する焦点調節特性の実測結果の理論的再現の可能性を検討した。その結果、焦点調節動特性を組み込んだ視覚モデルが多重方形波画像に対する焦点調節特性の再現に有

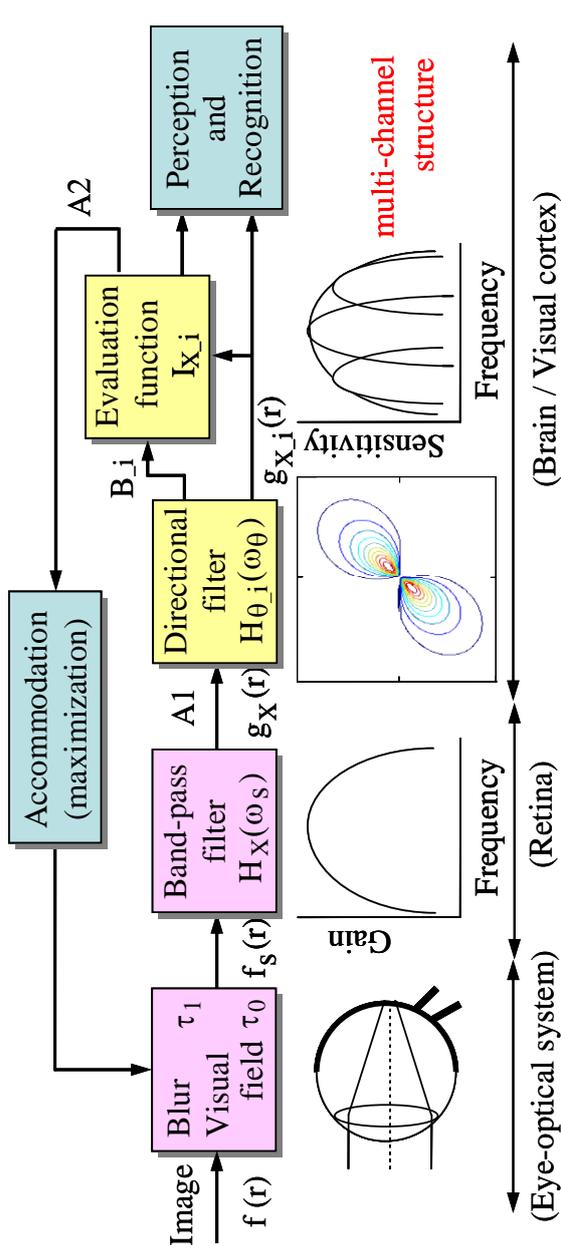


図3 2次元焦点調節機構モデルのブロック図

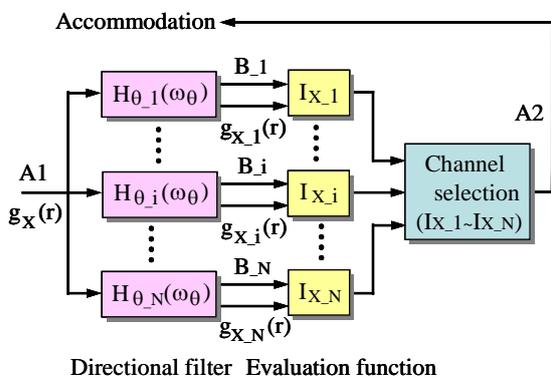


図4 2次元焦点調節機構モデルの方位チャンネル構造

効であることが確認された。

(4) 文書画像の最適表示条件（行と行間隔及び文字と文字間隔の最適な関係）

2次元自動焦点調節機構モデル（デジタルアイ）の視覚インターフェースへの応用の一環として、文書画像を読み易くするための最適表示条件（行と行間隔及び文字と文字間隔の最適関係）を理論的に導出する計算方法の枠組みを確立した。具体的には、図5に示されたように、文字を四角形の升目で単純表現した文書画像（擬似文書画像）を解析対象とし、行と行間隔または文字と文字間隔の関係を変化させた場合の2次元自動焦点調節機構モデルの応答特性を計算した。図6は、90度方向（行方向）の方位チャンネルにおける評価関数値と画像位置（視点位置）の関係であり、行送りがパラメータである。図より、評価関数値は、視点位置 0 deg（行中心）で極小になり、文字を模擬した黒■のエッジ位置で極大になることが分かる。また、行中心では、評価関数値が極大になる行送りが存在することが見て取れる。評価関数値は、その視点位置における画像の目立ちやすさの程度（印象の強さ）を表す数値として定義されており、大きくなるほど目立つと解釈される。従って、

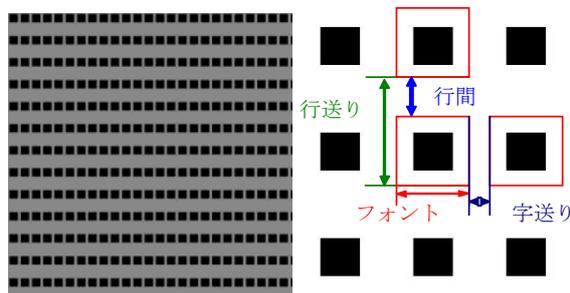


図5 模擬文書画像とその拡大図

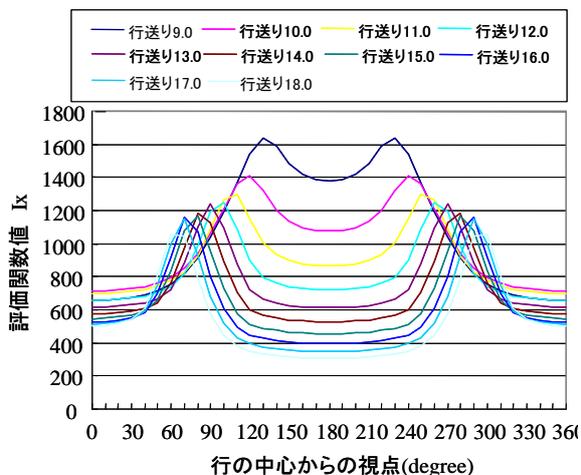


図6 9pt フォントにおける評価関数値と視点位置の関係（字送り 10[1/1000em]）

図6の結果は、行中心を見た場合、行として最も目立つ行間隔が存在すること、即ち、行と行間隔の最適関係が存在することを意味すると考えられる。同様に、文字と文字間隔の最適関係の存在も導出可能であった。以上の結果は、文書画像の最適表示条件が2次元自動焦点調節機構モデルから理論的に導出可能であることを意味する。また、この導出条件は、実験から求められた最適表示条件とも良く対応していた。以上は、2次元自動焦点調節機構モデルの有効性・正当性を示すものであり、視覚インターフェースの最適設計法を確立する為の基盤技術になり得ると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 松井利一：“視覚系の画像観測特性が鮮鋭さ評価機能に及ぼす影響に関する計算論的考察”，映像情報メディア学会誌，査読有り，Vol. 63, No. 7, pp. 967-976 (2009).

[学会発表] (計6件)

- ① T. Matsui : “ Informational Representation for Image Quality Degradation Activating Accommodation Mechanism in Subjective Evaluation Process ”, Proc. of The 17th International Display Workshops (IDW' 10), VHF1-2, pp. 347-350, December 1-3, 2010, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan
- ② 松井利一：“2次元焦点調節機構モデルの定式化とその有効性の検証”，電子情報通信学会技術研究報告ヒューマン情報処理研究会，Vol. 110, No. 228, pp. 93-98, 2010. 10. 15, 東北大学電気通信研究所 (仙台市)
- ③ 松井利一：“複数の空間周波数を含む画像に対する焦点調節特性と焦点調節手がかり”，電子情報通信学会技術研究報告ヒューマン情報処理研究会HIP2009-109, Vol. 109, No. 345, pp. 73-78, 2009. 12. 18, 東北大学電気通信研究所 (仙台市)

- ④ T. Matsui, T. Fujita : “ Comparison in Sharpness Evaluation Performance between Improved Conventional Methods and Cooperative Vision-Model-Based Method ”, Proc. of The 16th International Display Workshops (IDW' 09), VHF3-1, pp. 507-510, December 9-11, 2009, World Convention Center Summit, Miyazaki, Japan
- ⑤ 松井利一, 藤田智大：“エッジ強調画像の鮮鋭さ評価に於ける改良型従来評価法と協調視覚モデル法の性能比較”，映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会，Vol. 33, No. 40, pp. 25-28, 2009. 10. 8, 機械振興会館 (東京)
- ⑥ 松井利一：“視覚系の画像観測特性が鮮鋭さ評価機能に及ぼす影響”，電子情報通信学会技術研究報告ヒューマン情報処理研究会，Vol. 108, No. 282, pp. 45-50, 2008. 11. 8, 金沢工科大学 (金沢市)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 利一 (MATSUI TOSHIKAZU)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20302458