

翻訳論文 特徴を有しない画像に含まれる空間周波数特性に対する視覚探索

著者	加藤 和夫, 田代 和樹, 黒木 友裕, 石川 敦雄, 佐藤 巧
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	50
号	1
ページ	37-42
発行年	2016-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00000538/

特徴を有しない画像に含まれる空間周波数特性に対する 視覚探索

Visual Search Controlled by Spatial Frequency without Salient Features in an Image

加藤 和夫* 田代 和樹*
Kazuo KATO Kazuki TASHIRO

黒木 友裕** 石川 敦雄**
Tomohiro KUROKI Atsuo ISHIKAWA

佐藤 巧*** (和訳者)
Takumi SATO

Abstract: To clarify the characteristics of visual search that are controlled by spatial frequency, we measured the scan path during eye movement in response to visual stimuli. A target stimulus with the spatial frequency of $1/f^\beta$ (where β is the slope of power spectral density of luminance in an image) was embedded in a background stimulus with white ($1/f^0$) characteristics. An instruction-based task was employed in this study wherein a subject searches for the target as rapidly as possible and fixates on it. Participants were six healthy males aged 21-22 years. In the task, a threshold for spatial frequency, which was the minimum value required by the subjects for the search, corresponded to β of approximately 0.2-0.3. This finding has potential application in the design of visual presentation media, such as signs and tablets, by providing ease of viewing to the user.

Keywords: Visual Search, Spatial Frequency, Eye Movement, $1/f^\beta$, Scan Path

本論文の翻訳元

本論文は

K.Kato, K.Tashiro, T.Kuroki and A.Ishikawa:
“Visual Search Controlled by Spatial
Frequency without Salient Features in an
Image”, IEEJ Transactions on Electrical and
Electronic Engineering , pp.S91-S95(2015)
を翻訳したものであり、併せて参照頂きたい。

1 はじめに

形、色、奥行き、空間周波数のような視覚情報は、観察者が画像を見る際の眼球運動に基づく視

覚探索に影響を与えている可能性がある。この問題について考察するため、サリエンシーマップ^[1]という、眼球運動に基づく視線誘導が視覚的に関心を持つ場所を示す概念が導入された。多くの研究において、視覚情報と視覚探索の関係について、色やコントラスト、方向、エッジ、あるいは色と形の組み合わせについて研究されてきたが、その関連については、まだ明らかになっていない^[2-4]。

ここで、画像中の視覚情報の一つである空間周波数は、視覚特性に影響を与えることが分かっており、数多く研究されている。Travassoli ら^[5-6]は、空間周波数は対象物の探索に影響を与え、その探索において空間周波数に対するバンドパス機構が存在することを示している。これまでの我々の研究では、被験者に自然風景画像を呈示し、眼球運動を伴う視覚探索と画像特徴量を関連付ける研

* 東北学院大学 工学部 電子工学科

** 株式会社竹中工務店

*** 東北学院大学大学院 工学研究科 電子工学専攻

究を行った。その結果、空間周波数は視覚探索を促進させるパラメータの一つである可能性があり、これらの結果は、眼球運動に基づいた生理学的な根拠となり、視覚環境のデザインに適用できると結論づけられている^[7]。しかし、空間周波数のみで構成され、視線を引きつける目立った特性のない画像に対する応答については明確になっていない。

従って、本研究の目的は、目立った特徴のない空間周波数特性のみで構成された背景画像に組み込んだターゲット刺激に対する、眼球運動を伴う視覚探索について考察することである。

2 実験方法

2.1 視覚刺激

本研究では、ホワイトノイズの空間周波数を有する画像を背景画像として用いる。背景画像は、円形の黒枠で囲み、30箇所(縦5×横6)に分割した。背景画像と同様の空間周波数スペクトルを有するものの、画像サイズが異なるホワイトノイズの画像に対して、二次元の指数関数を適用したデータに逆フーリエ変換を用いて、ターゲット刺激を作成した。次に $1/\beta^3$ の周波数特性を有するターゲット刺激を、30箇所内の1箇所にランダムに組み込んだ。なお、 β 値は円形のターゲット刺激の中心からの角度1度毎に、半径方向の輝度のデータのパワースペクトルの回帰直線の傾きを算出し、360度分の平均値として定義した。ターゲット刺激や背景画像は空間周波数を除いて、平均輝度値を含む視覚特性は同一となっている。

図1は視覚刺激の例である。 β 値が0.8のときのターゲット刺激の位置を矢印で指し示している。

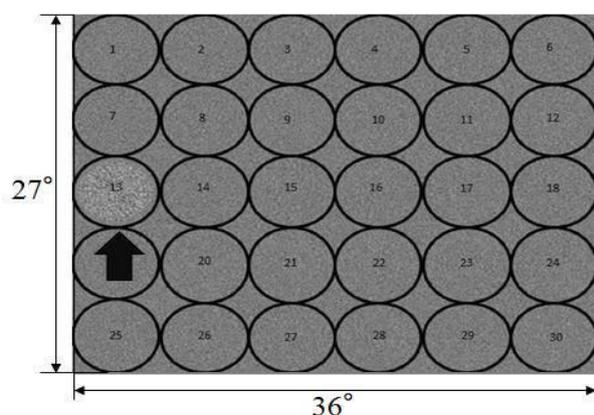


図1 β 値が0.8の視覚刺激の例。矢印は β 値が0.8のターゲット刺激の位置を示している。

30箇所のそれぞれに、1から30の番号が示してある。視覚刺激は、17インチのCRTモニター(Trinitron Multiscan E200, SONY)を用いて呈示し、観察者との距離は約0.5mである。背景画像は視野角で $27^\circ \times 36^\circ$ 、視覚刺激の平均、最大、最小の輝度値はそれぞれ、13, 20, 5 cd/m^2 であった。ターゲット刺激として、 β 値が0.1から0.8まで0.1刻みで8パターン呈示した実験をcoarse条件、 β 値が0.22, 0.25, 0.28, 0.32, 0.35, 0.38, 0.42, 0.45, 0.48のパターン呈示した実験をfine条件として行った。

2.2 実験タスク

図2に実験タスクを示す。1回の試行で20秒間の視覚刺激を呈示、続けて5秒間十字記号を示してあるブランク画面を呈示する。coarse条件では各 β 値を用いた8回の試行から構成され、fine条件では9回の試行から構成される。どちらの条件においても、最後の試行ではブランク画面は呈示していない。実験では、coarse条件を最初に実施し、適度な休憩の後にfine条件を行った。どちらの条件においても、視覚刺激の β 値の呈示順番はランダムとした。探索時間の計測をするため、被験者にはターゲット刺激を探索し、発見した際には直ちにコンピュータのマウスをクリックしてもらうように指示を与えた。探索時間は視覚刺激を1回呈示する毎に被験者がマウスをクリックするまでの時間として定義した。探索後はターゲット刺激を注視してもらった。ブランク画面呈示の間は、ターゲット刺激の組み込まれている位置を口頭で答えてもらい、その後は十字記号を注視してもらった。このタスクの前に、同じ実験タスクであるものの、被験者に上述した指示を与えない自由探索タスクを行ったが、本研究では解析は行わなかった。

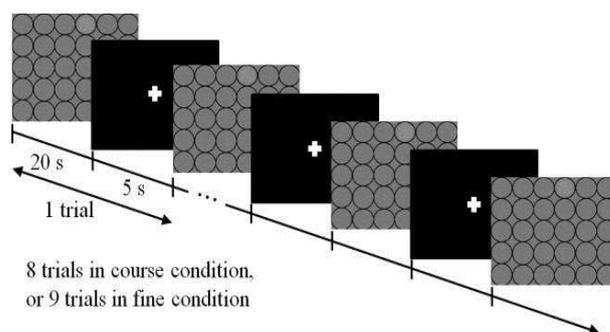


図2 実験タスク

2.3 眼球運動測定

実験は、6名の健康な被験者(21~22歳)に行ってもらった。被験者からはインフォームド・コンセントを得た。呈示画像におけるxy座標上の注視点位置は、角膜反射法に基づいた眼球運動測定装置(Eyemark Recorder EMR-8, NAC Image Technology)を用いて測定した。なお、サンプリング周波数は、30Hzである。

2.4 データ解析

xy座標の2次元マップ上に表される視線軌跡は両眼を重ね合わせた注視点で描かれている。視線軌跡のばらつきを明確にするため、各 β 値、被験者毎に、両眼の平均値をとった注視点の標準偏差(以下偏差とする)を計算した。統計処理として、この偏差と探索時間に反復測定による一元配置の分散分析を適用し、ポストホック検定としてボルフエローニの多重比較を使用した。各 β 値で被験者間で平均した正答率は、正解の場合を100%、不正解の場合を0%として計算された。

3 実験結果

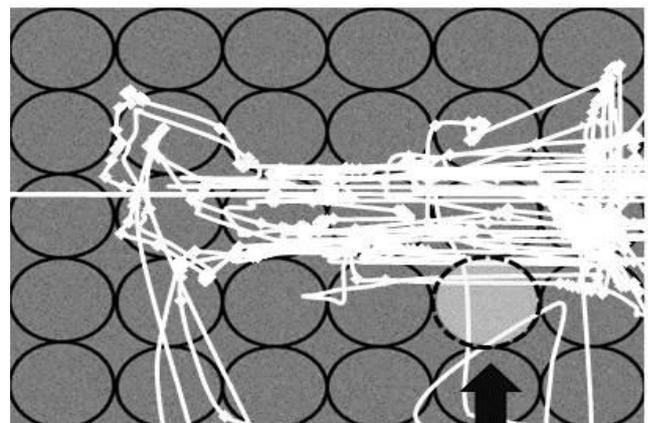
図3は、 β 値が0.2と0.8のときのターゲット刺激を呈示した際の、代表的な被験者から得られた視線軌跡を示している。 β 値が0.2の場合(図3(a))には、視線軌跡はばらつきが大きく、ターゲット刺激に視線が向いてない結果であった。一方、 β 値が0.8の場合(図3(b))には、視線軌跡がターゲット刺激の周りに集中していて、ばらつきが少ない結果であった。

図4は各被験者の視線軌跡から注視点座標の偏差を計算し、全被験者の平均を算出した結果である。偏差は、横方向(図4(a-b))では1.0~7.5度程度、coarse条件の縦方向(図4(c))では2.0~5.0度程度、fine条件の縦方向(図4(d))では1.0~5.0度程度であった。すべての解析結果より、 β 値が大きくなるほど偏差は減少する傾向にあり、縦、横の両方向においても最大は β 値が0.2であった。統計処理の結果より、coarse条件の横方向、($F(7, 35) = 5.704, p < 0.01, \text{power} = 0.996$)、fine条件の横方向、($F(8, 40) = 11.503, p < 0.01, \text{power} = 1.00$)、coarse条件の縦方向、($F(7, 35) = 3.309, p < 0.01, \text{power} = 0.914$)、fine条件の縦方向、($F(8, 40) = 5.703, p < 0.01, \text{power} = 0.998$)において β 値間で偏差に有意差を示した。ポストホックテストでは、coarse条件の横

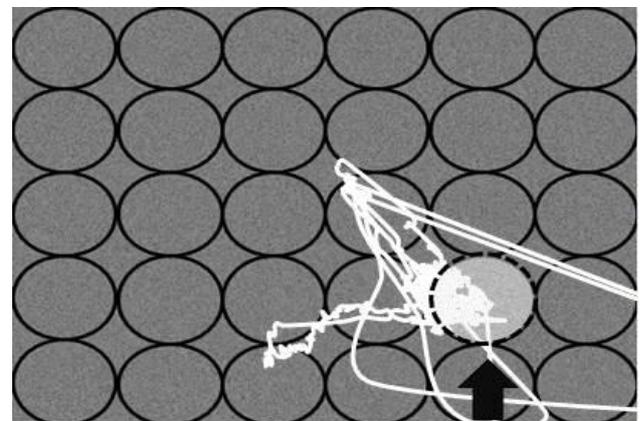
方向では、 β 値が0.2と0.7($p < 0.1$)、0.2と0.8($p < 0.1$)、fine条件の横方向では、0.22と0.42($p < 0.05$)、0.22と0.48($p < 0.05$)、0.25と0.28($p < 0.05$)、0.28と0.38($p < 0.05$)、0.28と0.48($p < 0.05$)、fine条件の縦方向では、0.28と0.48($p < 0.05$)で偏差に有意差が観測された。

図5は全被験者間で平均をとった正答率を示している。図5(a)に示すcoarse条件の結果では、 β 値が0.1~0.3と大きくなるほど正答率は上がり、 β 値が0.4~0.8では100%であった。図5(b)に示すfine条件の結果では、 β 値が0.28以下では正答率が30%以下であった。しかし、 β 値が0.35以上では100%であった。

図6は全被験者間で平均をとった探索時間の結果を示している。図6(a)に示すcoarse条件の結果では、 β 値が大きくなるほど探索時間は短くなり、最も探索時間が長かったのは、 β 値が0.2の約12秒であった。図6(b)に示すfine条件の結果では、 β 値が0.32以上では探索時間は約3秒以下であった。



(a) $\beta = 0.2$



(b) $\beta = 0.8$

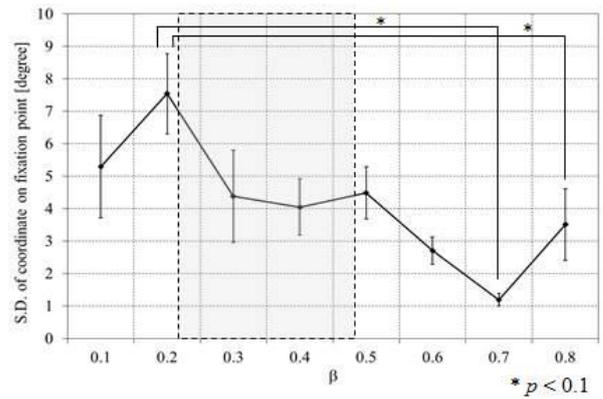
図3 β 値が0.2(a)と0.8(b)の視線軌跡。図は両眼の視線軌跡を重ねてある。矢印は、ターゲット刺激を示している。

統計処理の結果より、coarse 条件 ($F(7, 35) = 4.036, p < 0.01, \text{power} = 0.962$)、fine 条件 ($F(8, 40) = 4.663, p < 0.01, \text{power} = 0.991$)において β 値間で探索時間に有意差が見られ、また、ポストホック検定では、coarse 条件で β 値が 0.1 と 0.8 ($p < 0.1$) で有意差が見られた。

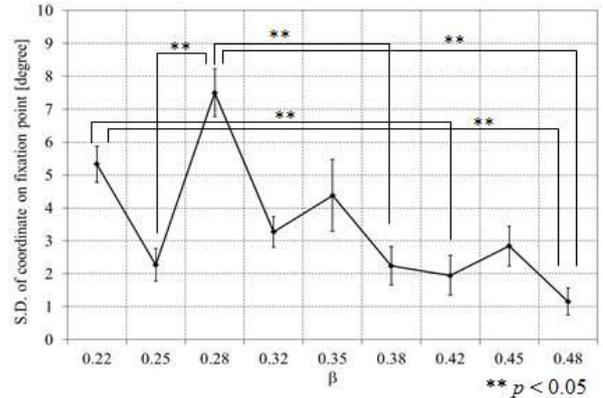
4 考察

図4(a)と図4(c)の coarse 条件の結果は、 β 値が 0.2 の視線軌跡に最大のばらつきが生じ、 β 値が大きくなるほどばらつきは少なくなることを示している。図5(a)と図6(a)に示すように、被験者は β 値が 0.8 の際に最短時間の約 2 秒でターゲット刺激を 100%の正答率で探索できたことがわかる。この結果より、被験者は、ターゲット刺激と背景の空間周波数の差が大きいほど容易に見分けることができることを示している。さらに、 β 値が 0.3~0.8 では、正答率が高く、かつ探索時間も短くターゲット刺激を探索できている傾向にある。しかし、図5(b)と図6(b)で示すように、fine 条件の正答率と探索時間より、 β 値が 0.28 以下になった際に被験者がターゲット刺激を探索することが突然困難になったことを示している。これらの結果は類似性の観点から解釈され、背景とターゲット刺激間の空間周波数の高い類似性が視覚探索に困難さを引き起こしたといえる^[8-9]。したがって、視覚探索における閾値が各ターゲット刺激とホワイトノイズ背景の β 値の差異として存在し、それは 0.2~0.3 に相当すると考えられる。一方、多重比較による探索時間の有意差は、図6(a)に示すように、0.1 と 0.8 にだけ観測された。これは、閾値周辺の探索時間に大きなばらつきが見られ、ターゲット刺激を見分けることが主観的に困難であることが原因と推測される。

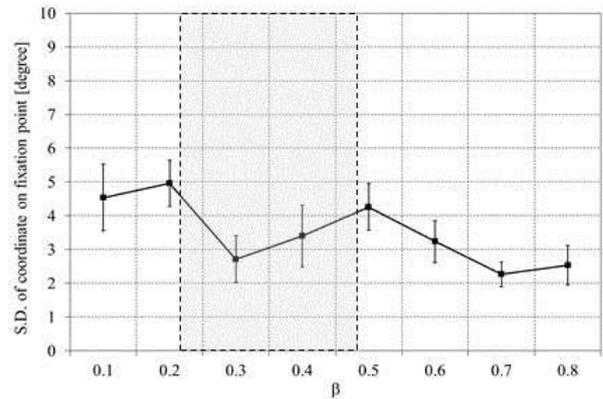
図4(a)に示すように、 β 値が 0.2 以下の視線軌跡の変動は、単純に偏差が大きくなるのではなく、ピークと比べて、逆に偏差が小さくなっている。一方、図5(a)では、正答率は単純に減少している。図4に示した視線軌跡や図5に示した正答率の変化傾向の差異は、無意識的あるいは意識的な認知処理過程が反映している可能性がある。ここで、無意識的な処理過程は、客観的な視線軌跡を用いた評価に反映され、意識的な処理過程は口頭での回答を用いた主観的な評価に反映される。そのため、 β 値が 0.2~0.3 の閾値以下においては、衝動性眼球運動に基づく自動的な眼球の制御^[10]の関与があると示唆される。すなわち、口頭での応



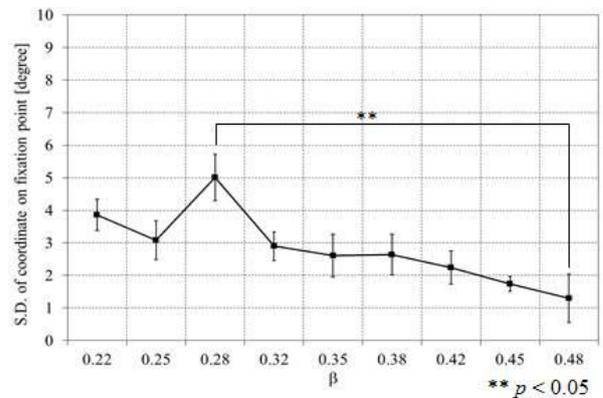
(a) coarse 条件における横方向の偏差



(b) fine 条件における横方向の偏差

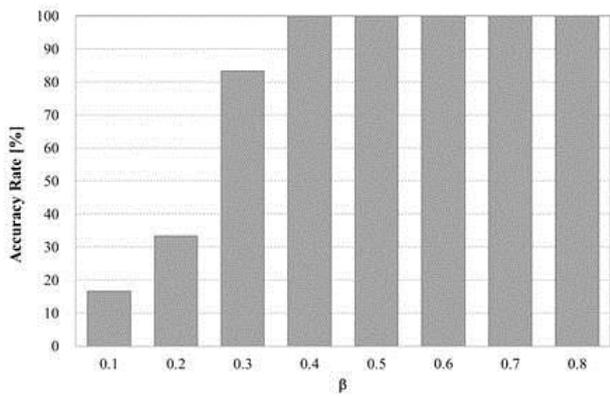


(c) coarse 条件における縦方向の偏差

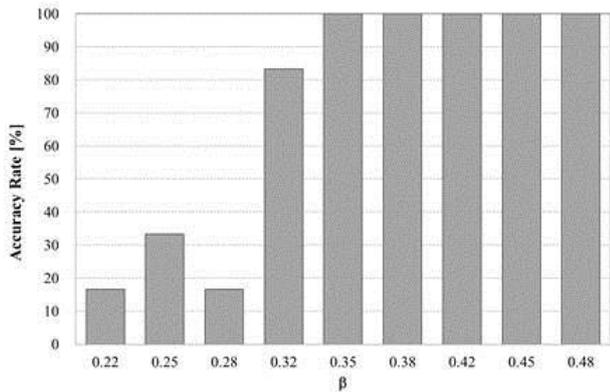


(d) fine 条件における縦方向の偏差

図4 両眼の平均をとった注視点の偏差(平均±標準偏差)を示す。アスタリスクは多重比較による有意差を示している。(a)と(c)の点線での囲みは、fine 条件の β 値の範囲を示している。

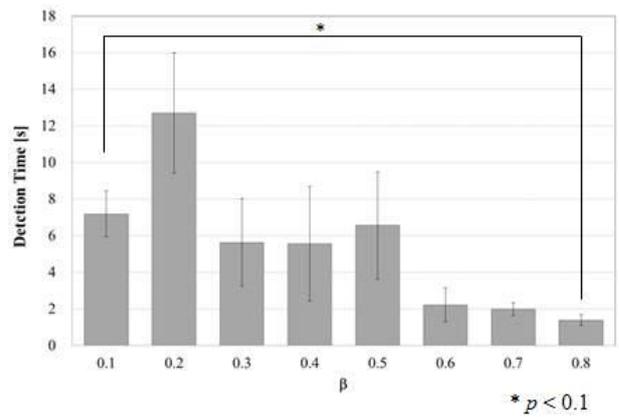


(a) coarse 条件

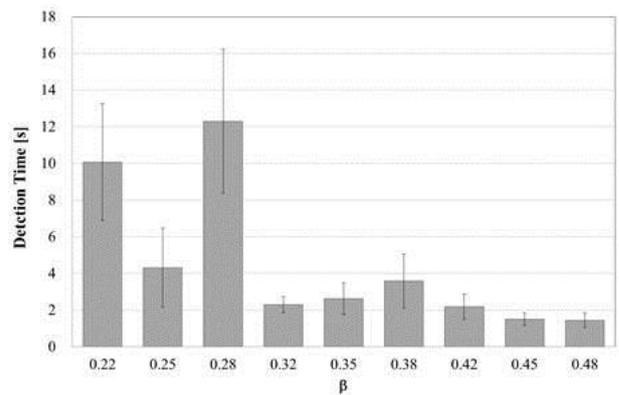


(b) fine 条件

図5 被験者間で平均した正答率



(a) coarse 条件



(b) fine 条件

図6 被験者間で平均した探索時間

答といった主観的な評価では見つけられない、無意識的な視覚探索であることを意味していると推察される。しかし、本研究だけではこれ以上の詳細な検討については、明確にはできない。 β 値が 0.25 の正答率や探索時間は、 β 値が 0.22 や 0.28 の場合とは異なるが、それらの結果は、図4(b)に示す、視線軌跡の傾向と一致している。図4(b)に示す、 β 値が 0.25 と 0.28 では視線軌跡に大きな差異が観測されたが、0.25 と 0.32 では大きな差異は観測されなかった。 β 値が 0.25 の視線軌跡、正答率、探索時間における特異的な応答については本研究においては明確にすることはできないものの、重要な知見を含んでいると考えられ、今後の検討課題としたい。

また、図4の視線軌跡の偏差、図6の探索時間における、coarse 条件と fine 条件の結果より、その値に一貫性が認められなかったが、この結果は、fine 条件より coarse 条件の方が、視覚探索における β 値のダイナミックレンジが広がっていることを反映していると考えられる。この結果については更なる研究が必要である。

5 まとめ

本研究の目的は、視線を引きつけるような目立った特徴がない空間周波数といった視覚特性のみで構成された画像に対する視覚探索をした際の視線軌跡、正答率、探索時間の検討であった。結果からは、視覚探索の閾値には各ターゲット刺激とホワイトノイズの背景の空間周波数 β 値の差異が関係し、その値は、0.2~0.3 に相当すると結論付けられた。空間周波数は目立った特徴がないため、建築物や都市景観、標識やタブレットのような視覚呈示方法に適用できる可能性があり、目立つ特徴によって環境を乱すことなく、これらがユーザーに容易に必要な情報を与えることができると考えられる。

参考文献

- [1] J.M. Findlay, and R. Walker: "A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition", Behavioral and Brain Sciences, Vol. 22, pp. 661-721 (1999)

- [2] L. Itti, and C. Koch: "A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention", *Vision Research*, Vol. 40, pp. 1489-1506 (2000)
- [3] R.J. Baddeley, and B. W. Tatler: "High frequency edges (but not contrast) predict where we fixate: A Bayesian system identification analysis", *Vision Research*, Vol. 46, pp. 2824-2833 (2006)
- [4] J. Zelinsky: "Using eye saccades to assess the selectivity of search movements", *Vision Research*, Vol. 36, pp.2177-2187 (1996)
- [5] A. Tavassoli, I. van der Linde, A. C. Bovik, and L. K. Cormack: "Orientation anisotropies in visual search revealed by noise", *Journal of Vision*, Vol. 7, No. 12, pp. 1-8 (2007)
- [6] A. Tavassoli, I. van der Linde, A. C. Bovik, and L. K. Cormack: "Eye movements selective for spatial frequency and orientation during active visual search", *Vision Research*, Vol. 49, pp. 173-181 (2009)
- [7] K. Kato, A. Shikoda, M. Nishida, T. Kuroki, A. Ishikawa, and T. Kobayashi: "Characteristics of Image Properties Inducing Eye Movement", *IEEJ Trans. EIS*, Vol.131, No.1, pp.175-181 (2011)(in Japanese)
- [8] J. Duncan, and G. W. Humphreys: "Visual search and stimulus similarity", *Psychological Review*, Vol. 96, No.3, pp. 433-458 (1989)
- [9] J. M. Findlay, and I. D. Gilchrist: "Active vision: The psychology of looking and seeing", Oxford University Press (2003)
- [10] S. Mannan, K.H. Ruddock, and D.S. Wooding: "Automatic control of saccadic eye movements made in visual inspection of briefly presented 2-D images", *Spatial Vision*, Vol. 9, pp. 363-386 (1995)