確率共鳴現象の応用による ハレーション環境での歩行者認識性能の改善

田所 幸浩 $^{1,a)}$ 葛西 誠 2 一木 輝 3 田中 宏 1

概要:夜間でのドライバの歩行者認識を助けるため、これまでにナイトビューシステムなど様々な装置が 開発・提案されている。これらの装置では、デバイスやアルゴリズムを改良することで、所望の認識性能 を実現するように設計されている。本検討では、「雑音を印加すると微弱な信号や情報が増幅される」とい う奇異な特徴をもつ確率共鳴現象に着目し、所望性能をデバイス等の再設計なしに実現する簡易な方法を 提案・評価する。図1に示されるようなハレーション環境に着目し、このような環境でも現象応用により 認識性能を改善する可能性があることを、簡易な実証機の製作及び模擬実験を通して示す。本環境での性 能改善手法の一つに AGC(Auto-Gain Control)があるが、この従来手法では得られないダイナミックレン ジの改善効果を提案手法により獲得できることも示す。

1. はじめに

夜間などでのドライバの歩行者認識を助けるため、ナイ トビューシステムなど様々な装置が開発・提案されている。 これらの装置では、デバイスやアルゴリズムを改良するこ とで、所望の認識性能を達成するように設計される。本検 討では、所望性能をデバイス等の再設計なしに実現する簡 易な方法を提案・評価する。ここでは、「雑音を印加する と微弱な信号や情報が得られる」という奇異な特徴をもつ 確率共鳴現象(Stochastic Resonance)の応用を提案する。

確率共鳴現象とは、雑音による、微小信号に対する応答 の最適化現象であり、我々生体などでは視覚や脳などの非 線形特性をもつ器官に本現象を活用していると言われてい る [1], [2], [3], [4]。このような確率共鳴現象を情報関連機 器に応用すると、これまでの手法では検出できない微弱な 信号を獲得することが期待できる。具体的には、理論検討 を中心とした様々な検討から、次のような2つの応用メ リットのあることがわかっている。

まず一つ目として、システムが応答できない微弱信号 を、適度な雑音を意図的に加えることで獲得できる点が

 株式会社豊田中央研究所 TOYOTA Central R&D Labs., Inc., Nagakute, Aichi 480– 1192, Japan
 2 北海道大学大学院情報科学研究科

- Graduate School of Info. Sci. & Tech., Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0808, Japan
- ³ 名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センター Green Mobility Collaborative Research Center, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan
- ^{a)} tadokoro@mosk.tytlabs.co.jp

ある。デバイスにはそれぞれ固有のダイナミックレンジ があり、例えばダイナミックレンジから外れた微弱な信 号に対してデバイスは反応できない。この場合、適度な雑 音を加えることでダイナミックレンジを改善することが でき、本来のデバイス性能では検出できない微弱なサブ スレッショルド信号や強い信号が検出できる可能性があ る [3], [5], [6], [7], [8]。

もう一つの応用メリットとして、信号対雑音電力比(S/N) が低い環境において、微弱信号を確率共鳴素子により取り 出す点がある。雑音がなければ容易に信号を得ることがで きるが、信号電力に比べてはるかに強い雑音が重畳される とS/Nは低くなり、信号を得ることは難しくなる。この様 な状況において雑音が非ガウス性を呈する場合、確率共鳴



図 1 ハレーションによる歩行者の蒸発現象の例 Fig. 1 Example of a pedestrian under glare conditions from the driver's viewpoint.



図 2 構築した評価系と試作機の回路構成





(a) Image sensor part $(10 \times 10 \text{ PD array})$



(b) Display part $(10 \times 10 \text{ LED array})$



現象を発現する非線形素子の最適設計により、線形フィル タのような従来手法よりも微弱信号を精度よく取り出すこ とができる [9], [10], [11], [12], [13]。

このような確率共鳴現象であるが、これまでは非線形物 理の分野を中心に議論がなされており、我々の知る限りで は実応用に至った例が存在しない。そこで本報告では一点 目の応用メリットに関して、自動車に関連する実環境にお いて現象応用に成功した結果を報告する。想定する状況は、 図1に示すような、夜間でのハレーションによる歩行者の 蒸発現象である。ナイトビューシステムのようにドライバ の歩行者認識を助けるシステムにおいても、ヘッドライト の強い光によりデバイスが飽和し、性能低下が発生する。 対策として AGC(Auto-Gain Control)のような手法を採る ことが考えられるが、AGC では対応可能な入力光量領域 (ダイナミックレンジ)を高光量側にシフトするのみであ り、ダイナミックレンジそのものは改善されない。高光量 側にシフトすると逆に低光量側に反応できなくなるという 欠点がある。今回提案する確率共鳴現象の応用では、雑音 を印加するという単純な操作のみで、ダイナミックレンジ を高光量側にシフトしつつダイナミックレンジそのものも 改善することができる。このような提案手法について実証 機を試作し、以上の効果を理論解析及び視覚的に評価する。

2. 構築した評価系と試作機の回路構成

試作した実証機を含む今回の評価系を図2に示す。ここでは図1の状況を机上で模擬するため、ヘッドライトの代わりにLEDライトを使用した。ヒトの形を印刷した透明OHPシートを手で振りながらLEDライトの前にかざすことで、ヘッドライトの前を歩く歩行者を模擬する。ヒトが印刷された部分はA[lx]だけ光を弱めるため、適度なLEDライト光量の下ではその形をヒトの目でも認識できる。しかし今回の評価系では、LEDライトとシートの間隔を短く

設定しており、強い光があたる状況である。この場合、図 1のような蒸発現象が発生し、歩行者の形を認識すること ができない。

以上のようなヒトの目での見え方を、実証機上で再現す る。具体的には受光部 (Image sonsor part) において、光信 号を Photo-Detector (PD)[14] により電気信号として取り 込み、その信号を発光部 (Display part) に設けた LED[15] で表現する。本評価系では適度な光量下だと歩行者の形を 表現するように LED は点灯するが、強光下では PD 及び LED 出力が飽和し、その形を表現できない。この飽和とい う現象が、ヒトの目において図 1 の状況では歩行者を認識 できないという事象に相当する。詳細は 3.1 節で示すが、 実際、LED において飽和は発生している。なお、ここでは 解像度を上げるため、図 3 に示すように PD と LED のペ アを縦 10 個 × 横 10 個の並列構成とした。

上記の実証機において、確率共鳴現象の適用による認識 性能改善を評価する仕組みを示す。今回の現象適用の狙い は強光下において、「歩行者の形」という微弱信号を適度な 雑音を加えて取り出すという、1章で示した応用メリット の獲得にある。そのためには、実証機上で飽和が発生して いるデバイスに対して適度な雑音を印加する必要がある。 今回の系の場合、LED での飽和発生により蒸発現象を模擬 しているが、PD のダイナミックレンジを確率共鳴により 改善することで、LED 飽和の原因となる大きな入力電圧 発生を回避する。PD の特性は駆動電圧 V_p に応じて変化 するため [14]、これに雑音を印加することを考えた。具体 的には、電源電圧としてファンクションジェネレーターを 用い、一定のオフセット電圧 V_c に雑音信号 V_η を加えた電 $E V_p = V_c + V_\eta$ を駆動電圧として用いる。雑音として発 生が容易な、平均ゼロ、分散 σ_n^2 の白色ガウス雑音を考え る。その結果、駆動電圧 V_p は、以下の様な確率:

$$P(V_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\eta^2}} \exp\left\{-\frac{(V_p - V_c)^2}{2\sigma_\eta^2}\right\}$$
(1)

にしたがい、 V_c を中心にして様々な電圧が確率的に発生 する。確率共鳴現象の効果は雑音電力に依存するため、式 (1) に含まれる分散項 (雑音電力) σ_{η}^2 を適度な値に調整する 必要がある。

3. 性能解析

本章では、実証機の性能を解析的に示す。まず 3.1 節に て、回路の基本特性を把握するために行った測定結果を紹 介し、実証機の動作メカニズム及び飽和発生の様子を示す。 3.2 節では、駆動電圧に雑音を加えた場合の特性を理論解 析により導出する。

3.1 実証機の基本性能

図2の動作原理説明や測定結果を通じて、飽和の発生箇



Fig. 4 Resistor voltage V_R for the input light strength *l*.

所やその様子を示す。製作した実証機では、まず PD が光 を検知すると光電効果により電流が流れて PD の印加電圧 が減少し、 $1M\Omega$ の抵抗に発生する抵抗電圧 V_R が増加す る。すなわち、PD の検知した光量に V_R は比例する。そし て LED では、この電圧 V_R に比例して明るさが変化する。

飽和現象の発生状況を測定結果を用いて調べる。まず、 入力光量 l に対する抵抗電圧特性を測定し、PD での飽和 発生状況を確認した。測定した結果を図4に示す。ここで は雑音は印加せず、 $V_p = V_c$ としていることに注意された い。入力光量は、光量計(ミノルタ デジタル照度計 T-1H) を用いて、PD 直下における光量として測定した。また、 PD と LED ライト間の距離を変えることで入力光量を変 化させた。図4より、各駆動電圧において、入力光量に比 例して抵抗電圧が増加する応答領域(橙色領域)と、入力 光量が変化しても抵抗電圧が変化しない飽和領域(水色領 域)の2つが存在することがわかる。入力光量が飽和領域 に含まれる場合、抵抗電圧は変化せず、歩行者の形の様子 を LED 側に正しく伝えることができない。しかし、駆動 電圧を増やすことで動作点を飽和領域から応答領域に移す ことができ、この問題を解決することができる。例えば、 入力光量が 100[lx] であった時、 $V_p = 2.0$ [V] だと飽和領域 に属するが、 $V_p = 4.0[V]$ まで上げると応答領域に入る。こ の意味で、PD においては適度な駆動電圧の印加により飽 和現象は発生しないと考えることができる。

また応答領域の特性は、駆動電圧に関係なく同じように 振る舞うことが見て取れる。この特性を多項式近似により フィッティングすると、 $\alpha = -2.0 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 0.0307$ 、 $\gamma = -0.0750$ として $R_L(l) = \alpha l^2 + \beta l + \gamma$ と表現できる。 得られた結果を図 4 の赤丸プロットで示す。決定係数の値 は 0.9976 と理想値の 1.0 にかなり近く、この二次式が応答



図 5 駆動電圧 V_p に対する V_T 及び V_L 特性 Fig. 5 Measured V_T and V_L for the driving voltage V_p .

領域の特性を精度よく表していることがわかる。また飽和 領域の特性は、入力光量に対して一定値をとり、駆動電圧 に比例してその一定値は増加する。つまり、この場合の特 性は、 $V_o = 0.425$ として、 $R_S(V_p) = V_p + V_o$ と表現でき る。以上をまとめると、抵抗電圧特性は、

$$V_{R} = H(l; V_{p}) = \begin{cases} R_{L}(l) = \alpha l^{2} + \beta l + \gamma & (l < l_{0}) \\ R_{S}(V_{p}) = V_{p} + V_{o} & (l \ge l_{0}) \end{cases}$$
(2)

と書ける。なお、 l_0 は $R_L(l) = R_S(V_p)$ をみたすl、つまり $R_L(l)$ と $R_S(V_p)$ が交わる入力光量点を表し、

$$l_0 = R_L^{-1}(V_p) = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 + 4\alpha(V_p - \gamma)}}{2\alpha}$$
(3)

である。

次に、抵抗電圧に対する MOSFET のドレイン-ソース電 $E V_T$ 及び LED 印加電圧 V_L 特性について考察する。図 5 に、入力光量を 120[lx] として駆動電圧を変化させながら測 定した結果を示す。まず、 V_T は 0.0~2.1[V] の範囲で変動 することがわかる。[16] より、 V_T がこの範囲の値を取る場 合、出力電流は線形に応答する。すなわち、MOSFET は 飽和していない。次に LED 印加電圧 V_L について、 V_p が 0.7[V] を超えて LED が点灯した後、線形に印加電圧は増 加するが、2.0[V] を超えるとその値は飽和しはじめる [15]。 この飽和により、 V_L が 2.0[V] 以上となる入力光量に対し ては PD array で取り込んだ光の様子を LED で表示する ことができない。なお、この LED が反応できる最小の駆 動電圧を V_p^L 、飽和が始まる電圧を V_p^H とすると、図 5 よ り $V_p^L=0.95$ [V]、 $V_p^H=1.95$ [V] である。

最後に、図4と図5から実証機のダイナミックレンジD を求める。まず飽和領域特性から、LEDが反応可能な抵 抗電圧の上限値 $V_R^H = S(V_p^H)$ 及び下限値 $V_R^L = S(V_p^L)$ を 得る。次に応答領域特性から、この上限値と下限値を与え る入力光量を求める。これらはそれぞれ $l^L = L^{-1}(V_R^L)$ と $l^H = L^{-1}(V_R^H)$ のように表され、式 (3) 同様に計算できる。 その結果、求めるダイナミックレンジは $D = l^H - l^L$ と なる。実際には、 $V_p^L \approx 0.95$ [V] から $V_R^L = 1.38$ [V] となり、 $l^L = 43.6$ [lx] である。同様に $l^H = 79.0$ [lx] となり、雑音を印 加しない場合のダイナミックレンジは D = 35.4[lx] となる。 受光部で取り込んだ光を LED で表示するためには、当然 ながらその光量がこのダイナミックレンジ内に収まる必要 がある。

3.2 確率共鳴現象発現時の性能

前節で議論したように、実証機では LED の飽和により $l^{H}[lx]$ 以上の入力光量に対して表示を行うことができない。 そこで雑音印加により PD 特性を確率的に変化させ、系の ダイナミックレンジの改善を図る。以下では、雑音印加時 の平均抵抗電圧特性を解析的に算出し、ダイナミックレン ジの改善効果を評価する。

PD 駆動電圧 V_p に雑音 V_η が含まれる場合 $(V_p = V_\eta + V_c)$ を想定する。この時の抵抗電圧の平均特性は、式 (2) を用いて、

$$\bar{V}_R(l;\sigma_\eta^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(l;V_p)P(V_p)V_p$$

$$= \int_{-\infty}^{\xi(l)} R_S(V_p)P(V_p)dV_p$$

$$+ \int_{\xi(l)}^{+\infty} R_L(l)P(V_p)dV_p \qquad (4)$$

となる。ここで、 $\xi(l)$ は $R_L(l) = R_S(V_p)$ を満たす V_p 、すなわち応答領域特性 $R_L(l)$ と同じ値をとる飽和領域特性 $R_S(V_p)$ を与える駆動電圧値 V_p であり、

$$\xi(l) = \alpha l^2 + \beta l + \gamma - V_o \tag{5}$$

と表せる。式 (1) を式 (4) に代入して得た、平均特性の数値 例を図 6 に示す。駆動電圧の平均値 V_c =2.0[V] とし、与え る雑音の電力 (分散) に関して 3 つの場合の特性を描いて いる。なお比較のため、雑音を印加しない場合の特性 (図 4 における V_p =2.0[V]) も描いた。また、雑音の分散が σ_{η}^2 の時の平均特性の下限値が V_R^L と等しくなる入力光量を式 (4) の逆関数を用いて $\bar{l}^L = \bar{V}_R^{-1}(V_R^L)$ 、同様に上限値と等 しくなる入力光量を $\bar{l}^H = \bar{V}_R^{-1}(V_R^H)$ とすると、雑音を印 加した場合のダイナミックレンジは、

$$\bar{D} = \bar{l}^H - \bar{l}^L \tag{6}$$

となる。3.1節同様、受光部で取り込んだ光を LED で表示 するためには、その光量はこのダイナミックレンジ内、つ まり l^L から l^H の領域内に収まる必要がある。図 6 より、 IPSJ SIG Technical Report



Fig. 6 Average resistor voltage in the case of adding noise.

以下の2点が読み取れる:

- (i) 雑音電力の増加に伴い、応答特性の傾きが雑音を印加しない場合に比べて減少する。これにより、飽和せず応答可能な入力光量領域が拡大し、ダイナミックレンジが改善される。
- (ii) 雑音電力が大きくなると、入力光量が小さい場合に 出力される抵抗電圧の値が減少するため、LEDが表示 可能な入力光量領域は高光量側にシフトする。その結 果、弱い光に対して反応できなくなる。

これら(i) および(ii) を明確にするため、図7にダイナミックレンジと応答可能な入力光量の下限値(^Lの数値例を示す。図7より、雑音の電力に比例して、ダイナミックレンジと応答可能な入力光量の下限値はともに増加する。しかしその増え方に特徴があり、電力が小さい場合、ダイナミックレンジは急激に増加するのに対し、応答可能な入力 光量の下限値はゆるやかに増加する。電力が大きい場合には両者とも線形に増加する傾向にある。

本論文の冒頭で述べたように、図1のような状況への対 策手法の一つにAGCがある。本手法ではダイナミックレ ンジを所望の領域にシフトすることによりと入力光量の大 きな領域に対応できるため、歩行者を認識可能になる可能 性がある。図7で説明すると、確率共鳴現象の応用に基づ く提案システムと同様に、AGCの機能においても応答可 能な入力光量の下限値は変更可能である。しかし、ダイナ ミックレンジそのものは改善されないため、このようなシ フトによって入力光量の小さい領域には逆に対応できなく なり、認識性能の低下につながる。確率共鳴現象の応用に 基づく提案システムは図7に示されるようにダイナミック レンジ自身も改善されるため、このような性能低下を回避 することが期待できる。



図 7 雑音電力に対するダイナミックレンジ D と応答可能な入力光
 量の下限値 l^L の数値例

Fig. 7 Dynamic range \overline{D} and Minimum effective input light strength \overline{l}^L for the noise variance.

4. 雑音印加による認識性能改善の視覚的検証

本章では、確率共鳴現象の応用による歩行者認識性能の 改善効果を視覚的に検証する。確率共鳴現象の効果は印加 する雑音の電力に依存するため、雑音電力をパラメータと した評価を行ない、効果を最大化する雑音電力について考 察する。

図 8 に、雑音印加有無それぞれの場合の LED 表示結果 を示す。今回、PD への入力光量が 150[lx] となるように LED ライトと受光部との距離を設定した。OHP フィルム 上に印刷された歩行者の模様部分において光は 70[lx] だけ 減衰するため、受光部はこの部分に対して 80[lx] の光を受 け取る。また、PD への印加電圧として $V_c = 2.0$ [V] のオフ セット電圧を与え、さらに雑音を加える場合には 3 種類の 雑音電力を取り上げた。雑音を印加しない場合、図 4 にお ける $V_p=2.0$ [V] の特性をみると、150[lx] 及び 80[lx] の両場 合においてダイナミックレンジ外となり、PD は飽和して いる。そのため図 8(a) に示されるように、歩行者の形を LED で表示することができない。

次に、図 8(b)-(d) に示される雑音を印加した場合を考察 する。これら 3 つの図を比較すると、図 8(c) が最も歩行者 の形を認識できる。これは、150[lx] 及び 80[lx] の両場合に おいてダイナミックレンジ内となり、入力光を正しく LED で表示できるためである。また、雑音電力が小さい図 8(b) では、歩行者の形を見て取れない。図 6 における $\sigma_{\eta}^2=1.0$ の時の特性をみると、歩行者部分の光量 80[lx] はダイナ ミックレンジとなるが。入力光量 150[lx] はダイナミック レンジ外となる。その結果、歩行者部分とそれ以外の部分





(c) $\sigma_n^2 = 22.6$



(d) $\sigma_n^2 = 64.0$



との光量差が殆ど無く、歩行者の形を認識できなくなる。 また、図8(d)では雑音電力が大きすぎ、2種類の入力光量 (150[lx]及び80[lx])が応答可能な入力光量の下限値を超え ることができない。これによりLEDの輝度が極端に低下 して歩行者の形を認識できない。以上の議論により、最適 な雑音電力を与えると、歩行者の認識性能を改善できると いえる。そして性能改善をもたらす最適な雑音電力は、入 力光が応答可能な入力光量の下限値^Lを超えつつ、ダイ ナミックレンジを改善するものである考えられる。なお、 図8(b)-(d)の写真では歩行者認識の効果がわかりづらい感 がある。報告当日に紹介する映像を参照されたい。

5. まとめ

本報告では、確率共鳴現象で得られるメリットの一つで ある、システムが応答できない微弱信号を適度な雑音を加 えて取り出すという点を、ハレーションという状況に絞り 実証した。効果検証のための実証機を製作し、その特性を 詳細に解析することで、雑音印加により得られるダイナ ミックレンジの改善効果を解析的に明らかにした。特に、 従来手法である AGC に対し、提案システムはダイナミッ クレンジをシフトさせる機能を持つだけではなく、ダイナ ミックレンジそのものを改善する効果もあることが分かっ た。このような効果は、模擬実験を通して視覚的にも確認 できている。

今回の実証機はナイトビューシステムのように、図1の 状況をカメラなどの光学デバイスで取り込み、信号処理を 施した後、ドライバが認識しやすいように再度表示するよ うなアプリケーションに向いている。しかし、一般的に飽 和特性をとるデバイスの特性は図4のようにモデル化でき るため、今回の検討内容はこのような光学系のアプリケー ションのみならず、様々なものに広く展開できるものと考 える。今回着目したメリットを獲得するためには雑音発生 装置を追加で設ける必要があり、この代替手段や、状況が 時々刻々と変化する車両走行中での雑音電力の調整方法な

参考文献

- K. Wiesenfeld and F. Moss, "Stochastic resonance and the benefits of noise: from ice ages to crayfish and SQUIDs.," *Nature*, vol. 373, no. 6509, pp. 33–36, Jan. 1995.
- [2] B. McNamara and K. Wiesenfeld, "Theory of stochastic resonance," *Physical Review A*, vol. 39, no. 9, pp. 4854– 4869, May 1989.
- [3] L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni, "Stochastic resonance," *Reviews of Modern Physics*, vol. 70, no. 1, pp. 223–287, 1998.
- [4] M. I. Dykman and P. V. E. McClintock, "What can stochastic resonance do?," *Nature*, vol. 391, no. 6665, p. 344, Jan. 1998.
- [5] J. J. Collins, C. C. Chow, and T. T. Imhoff, "Stochastic Resonance without Tuning," *Nature*, vol. 376, no. 6537, pp. 236–238, 1995.
- [6] A. Ichiki, Y. Tadokoro, and M. Takanashi, "Sampling frequency analysis for efficient stochastic resonance in digital signal processing," *Journal of Signal Processing*, vol. 16, no. 6, pp. 467–475, 2012.
- [7] S. Kasai and T. Asai, "Stochastic Resonance in Schottky Wrap Gate-controlled GaAs Nanowire Field-Effect Transistors and Their Networks," *Applied Physics Express*, vol. 1, no. 8, p. 083001, Jul. 2008.
- [8] B. Kosko and S. Mitaim, "Stochastic resonance in noisy threshold neurons," *Neural Networks*, vol. 16, no. 5–6, pp. 755–61, Jan. 2003.
- [9] A. Ichiki and Y. Tadokoro, "Relation between optimal nonlinearity and non-Gaussian noise: Enhancing a weak signal in a nonlinear system," *Physical Review E*, vol. 87, no. 1, p. 012124, Jan. 2013.
- [10] S. Kasai, Y. Tadokoro, and A. Ichiki, "Design and characterization of nonlinear functions for the transmission of a small signal with non-Gaussian noise," *Physical Review E*, vol. 88, no. 6, p. 062127, Dec. 2013.
- [11] F. Chapeau-Blondeau and D. Rousseau, "Noise-Enhanced Performance for an Optimal Bayesian Estimator," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 5, pp. 1327–1334, May 2004.
- [12] S. Sugiura, A. Ichiki, and Y. Tadokoro, "Stochastic-Resonance Based Iterative Detection for Serially-Concatenated Turbo Codes," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 19, no. 10, pp. 655–658, Oct. 2012.
- [13] S. Kay, "Noise Enhanced Detection as a Special Case of Randomization," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp.709–712, 2008.
- [14] SIEMENS, "Data sheet: Silicon PIN Photodiode with Very Short Switching Time - SFH 229," Jan. 1997.
- [15] ROHM, "Data sheet: SLR-56 series," Dec. 2010.
- [16] Diodes, "Data sheet: ZVN2110A series," Mar. 1994.