

特集 車載用カメラの性能統一表記とその評価法*

Unified Estimation Method for Automotive Cameras

菅原 良一

Ryoichi SUGAWARA

余 郷 幸 明

Yukiaki YOGO

清野 光 宏

Mitsuhiro KIYONO

This paper proposes a unified estimation method to be able to compare the performance of any type of automotive cameras. This method is expanded EMVA standard 1288 (European Machine Vision Association Standard) to be able to evaluate the wide dynamic range camera. Non-linear estimation model of internal image sensor has been newly developed. By using our method, automotive-vision-related system engineers can objectively decide the most suitable camera for the system.

Key words : Image Sensor, Automotive Camera, Dynamic Range, Estimation Method

1. まえがき

車載用カメラの選定には、画素数や感度、ダイナミックレンジといった一般的なスペックに加えて、温度や振動など車載固有の画質劣化要因に対する評価指標の観点も必要である。

現状、これらの指標の定義や評価方法が明確には存在しておらず、システムメーカーでは客観的なカメラ選定ができていないと言いがたい。そこで、車載用カメラの性能指標とその評価法の一案を提案する。

2. 性能指標の要件

車載用カメラの性能指標としてあるべき姿は、まず(1)表現すべき項目(単位系やパラメータなど)が網羅され、次にそれらを(2)効果的かつ客観的に配置できる評価軸があり、さらにこの新しい表記法に(3)従来おこなってきた主観的考察作業をも吸収可能な親和性が確保されていること、と考えた。

以下、これら3つについて詳述する。

2.1 表現すべき項目

画像認識用途では、解像度や最低照度に加え、ダイナミックレンジ、回路など内部に起因する画素ごとのノイズ、シャッタ方式の違いに現れる画素間の均一性や同時性、などが重要である。

一方、表示用途では、固定パターンのような画像としての見えに関わる各種ノイズ、色特性や空間分解能、コントラスト、時間的・空間的な歪などが重要である。

さらに光センシング用途では、動作環境条件における線形性・連続性、画素ごとのノイズの温度特性、周

囲照度変動に対する出力再現性、振動やEMCに対する信号の安定性などが重要である。

また特殊な用途では、単純な可視光特性だけでなく、色温度や赤外波長域に対する性能が求められる場合もある。

最終的には、これらの観点を網羅的に表現する必要があるが、いずれにしても、車載用途においては複数のパラメータに対する特性を総合的に見て適不適が検討される。

2.2 評価軸の決定

2.1であげたパラメータが、客観的に比較できる形式で提供される必要がある。

例えば、照度(Lux)という心理物理量は、光源の波長の違いにより測定結果の解釈が異なるという問題がある。単位系、評価方法や表記法を統一することでこの問題は解消され、客観的な比較、選定が可能になるはずである。

我々は、既存の規格を参考に、より複雑な分析が可能となるように、物理モデルに近い統合指標を構築することを目指すことにした。

2.3 ユーザビリティ

2.1, 2.2が実現できたとしても、まったく主観評価が不要になるわけではなく、新しい表記方法には照度(Lux)との関係性を残す必要もある。

例えば、換算式を用意することで、既存の評価系が流用可能になること等が考えられる。

以上の観点を整理し、Fig. 1に新しい表記法のコンセプトを示す。

横軸は、システムの要求仕様に対するカメラの使用条件である入射光強度やその波長域、動作露光時間やフレームレートなどの動作範囲を意味する。縦軸は、その使用条件におけるパフォーマンス、例えば動作条件範囲における感度とその再現性や均一性などの判断が可能な指標である。

これらの2軸によって被測定カメラがそのシステム用途に適するか否かが可視化される。

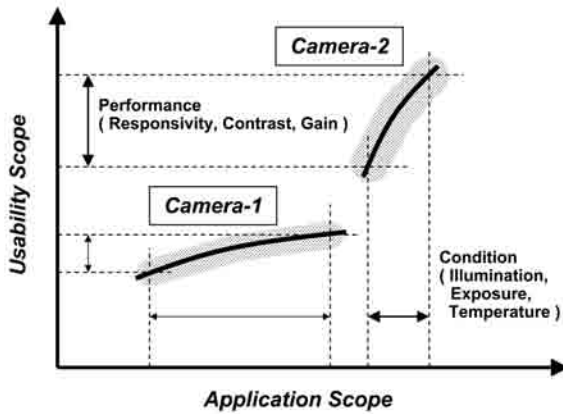


Fig. 1 Basic concept of the unified estimation method

3. 統一軸の設定

客観比較を実現するための統一軸としては、できる限り解釈に違いが発生することのない物理量で記述する必要があり、また前述の様々な使用条件下での再現性などのパフォーマンスを表現できるものでなければならない。

既存のカメラ規格としては、ある規格では感度、またある規格では空間分解能といった具合に、特定の性能を表現するように表記法や評価法を定めたものが主流であった^{1) 2)}。

我々は、欧州マシンビジョン用カメラの標準規格であるEMVA1288^{3) 4)}に着目した。この規格は、横軸に入射光子数、縦軸に出力信号対雑音比（以後S/Nと略す）で描く表現方法を採用している。光子数は物理量であり、波長ごとの入射光の条件を一意に表現することができ、前述したコンセプトにおける使用条件として求める方向性と合致する。また縦軸にはS/N表示を採用することで、A/D分解能や出力電圧範囲など、回路仕様の異なるカメラ間の性能比較も可能になるため、前述したコンセプトのパフォーマンス表現の方向

性と合致する。

ただし、EMVA1288はカメラパラメータをすべて線形モデルで定義したものであったので、以下に述べる非線形の特性を含むあらゆるカメラに対応できるようにすることを本手法の目標とした。

4. ダイナミックレンジ性能の表現

今回、前述した複数の性能のうち、車載用途において重要なダイナミックレンジ性能の、光子数とS/N軸上への表記を試みた。

ダイナミックレンジ性能の表記法としては、様々な方法が存在する各種ダイナミックレンジ拡大技術間の、パフォーマンスの違いを表現できるかにかかっている。

Fig. 2に示す信号フローのモデルを用いて、技術に起因する性能の違いを表現する方法を説明する。

ダイナミックレンジの拡大は、撮像1フレーム内で、露光時間や画素内の駆動電圧を制御する等によって複数条件の画像を取得し後段で合成する方法や、画素内にLog特性回路を挿入する方法等によって実現される。すなわち、Fig. 2における入射光子から電子数の光電変換係数 η 、もしくは電子数からセンサ出力への変換ゲインKのいずれかに、非線形の特性をを持たせることによってダイナミックレンジを拡大する。

したがって、各技術適用後のパフォーマンスとしては、結果としてのダイナミックレンジだけでなく、その実現手段である回路素子の追加や動作制御の変更等、内部に非線形の技術を導入した代償として増加してしまう画素ノイズや空間的なノイズの傾向等をも、同時に可視化することが重要である。これによって、内部的なダイナミックレンジ拡大技術に違いがあったとしても、カメラ出力としてのノイズ特性すなわちS/Nの違いとして比較検討できるようになると考えられる。

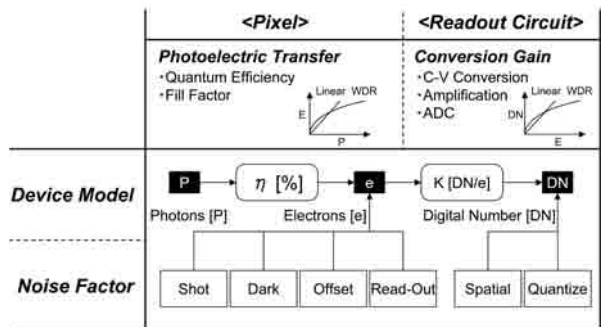


Fig. 2 Physical model of wide dynamic range operation

次章では、上記観点で、実際の車載用カメラの評価結果をもとに、光子数とS/Nの軸上で違いを表現できるかを検証する。

5. カメラ測定

検討対象として、半導体レベルで手法に違いのある2種類のワイドダイナミックレンジタイプのカメラを比較した。

5.1 S/Nの算出

S/N (=SNR) は次式から算出する。

$$SNR = \frac{S_e}{N_e} = \frac{S_{DN} / K}{N_{DN} / K} \quad [1]$$

$$S_{DN} = \mu_y - \mu_{y-dark} \quad [2]$$

$$N_{DN} = \sqrt{\sigma_{y-spatial}^2 + \sigma_{y-temporal}^2} \quad [3]$$

ここで、 S_e と N_e は、蓄積電子数で換算した信号とノイズを、 S_{DN} と N_{DN} は、A/D変換後の画素出力のデジタル値における信号とノイズ成分をそれぞれ示している。

μ_y は光入射時、 μ_{y-dark} は光入射がない状態、それぞれの出力値を示している。

$\sigma_{y-spatial}$ は輝度値の空間上のバラツキ、 $\sigma_{y-temporal}$ は時間軸上のバラツキ、それぞれの標準偏差である。

ダイナミックレンジ拡大技術の適用時は、光電変換係数 η もしくは変換ゲイン K が非線形の特性を持つため (Fig. 2参照)、回路モデルだけでS/Nを推定することは困難である。そこで、既知の露光条件の下で、光源の強度をスイープさせることで、実際の入射光子数を変化させて得た実測データに対し、上式を用いてS/Nを算出する。この点がEMVA1288の測定法とは異なる。

なお、今回検証の対象としたカメラは、回路トポロジに多少の差異はあるが、どちらもLog特性回路を用いたタイプであり、光電変換係数 η のみ非線形特性を有し、変換ゲイン K は線形特性を有する。今回用いた上記算出式は、あらかじめ変換ゲイン K を算出できる場合を想定しており、変換ゲイン K に線形性が成立し

ないワイドダイナミックレンジタイプ、例えばオーバーフロー容量方式や、長短露光時間の組み合わせ方式等では、別途K推定モデルの追加が必要になる。

また、前述したように、本手法ではイメージセンサへの入射光子数を制御して測定するため、露光時間やゲインがカメラ内部で自動制御されてしまうものは評価ができないので、自動露光制御機能を切るなどの注意も必要である。

5.2 測定結果

Fig. 3は、市販のワイドダイナミックレンジカメラ2種類 (WDR-1, WDR-2) の測定結果を示したものである。

WDR-1のメーカー公称スペックは、 $6\mu\text{m}$ 画素、10bit出力、ダイナミックレンジ100dB、WDR-2のメーカー公称スペックは、 $10\mu\text{m}$ 画素、12bit出力、ダイナミックレンジ120dBである。

比較のため、WDR-1をEMVA1288で評価した結果も示した。本手法により、ダイナミックレンジ拡大技術が適用された性能を計測できていることがわかる。

本手法によって、

①車載に多く求められる露光条件固定での使用条件においては、暗側は画素間の暗電流やオフセットのバラツキにより、明側は画素間の感度バラツキによりそれぞれ制限され、メーカー公称値のダイナミックレンジ性能に満たない実力であること、

②ダイナミックレンジ拡大技術が適用されたイメージセンサでは、S/Nカーブは線形特性や単調カーブではないこと、

③画素サイズが大きく、したがって画素容量が大きいイメージセンサの方が、ダイナミックレンジは広いものの、A/Dの電圧分解能 (LSB) が得られる暗側の限界性能が低いこと、

などの物理原理に基づく性能比較評価も可能になった。

なお②にあげたように、ワイドダイナミックレンジタイプは、中間照度範囲においてS/Nが落ち込む特性が見られる。

ダイオード特性を利用したLog圧縮回路による方式の場合、その回路特性上、閾値電圧バラツキの影響により、圧縮特性への切替えが発生する電圧のミスマッ

チのため、中間照度範囲において空間ノイズが大きく増加する傾向があることが知られている。今回の測定結果の中間照度範囲でのS/Nの落ち込みは、このノイズ増加の影響が反映されたものと考えられる。

以上の測定結果から、光子数とS/Nの統一軸で、カメラのダイナミックレンジ性能と、イメージセンサ内部の技術的方策に起因した中間特性におけるノイズの増加傾向などを、同時に表現可能であることが確認できたといえる。

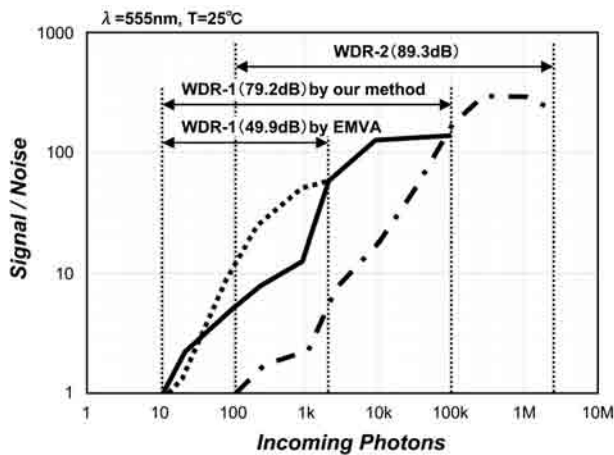


Fig. 3 Estimation examples

6. むすび

EMVA1288を参考に、車載用カメラを横並びで比較することが可能な性能指標および評価法を提案した。

今後は、サンプル数を増やすとともに、他のダイナミックレンジ拡大技術を含む様々なイメージセンサ技術に対するモデル検証を充実させること、温度変化に対するロバスト性やリニアリティ、コントラスト、さらにはこれらの分光感度特性への対応など、評価すべき性能指標と対応するモデルを充実するよう、本手法の改良をすすめていく。

<参考文献>

- 1) FAカメラの標準化 (WG3) :
http://www.fast-corp.co.jp/software_dl/upload/doc/0248/pdf_j/camerastd.pdf
- 2) CIPA DC-004 デジタルカメラの感度規定 :
http://www.cipa.jp/hyoujunka/kikaku/pdf/DC-004_JP.pdf
- 3) EMVA 1288 Release Candidate 3.1 :
http://www.emva.org/cms/upload/Standards/Stadard_1288/EMVA1288-3.1rc.pdf
- 4) 名雲文男：最新のカメラ仕様表示規格EMVA1288, 映像情報メディア学会誌 Vol. 62, No. 3 (2008), p.307

<著 者>



菅原 良一
(すがわら りょういち)
半導体先行開発部 IP企画室
半導体センサの技術開発に従事



余郷 幸明
(よごう ゆきあき)
半導体プロセス開発部 第2開発室
半導体デバイスの技術開発に従事



清野 光宏
(きよの みつひろ)
半導体先行開発部
センサIP開発室
半導体センサの技術開発に従事