

最新のマシンビジョンカメラ用 性能表示規格 EMVA1288 技術編 “規格書を読む”

日本インダストリアルイメージング協会*¹

名雲 文男

新しいマシンビジョン (MV) カメラの世界規格 EMVA*² 1288 が成立した。筆者の勝手な解釈だが、同規格の新機軸は徹底した物理単位表示とグラフ表示にある。その効果によりカメラのデジタル化や撮像素子の急速な技術進歩に適應できる性能表示法となった。本誌 2008 年 10 月号には、同規格の主要部分である第一部 (Module 1)*³ を“その概要”という副題で仕様書の特徴を紹介した¹⁾。本稿は続編の位置付けで、“規格書を読む”と副題して新規格の理論と測定、データ処理法の実際を紹介する。

日本では今年 JIIA が規格“FA カメラの標準化 (WG3)*⁴”の改定作業をスタートさせた。規格 EMVA1288 はこの改訂版に包含される予定であり、それによって国内での普及が図られることになる。従ってカメラ技術者にはいずれ新式仕様書の作成が求められる。一方、カメラユーザーにはその仕様書のより深い理解が必要になる。そのためには EMVA 規格書原典を読みこなす必要があるが、これが少々煩雑な上にその英文が結構読みづらい。本稿はこの少々難解な原典を読み解く上で少しでもお役に立つ情報の提供を目指す。

はじめに

規格 EMVA1288 (Module1) の構成は従来型の仕様規格書と全く異なる。同規格はまず前提として理論的基盤である物理モデルと数学モデルを明示する。次いでその理論に則って整然とカメラの測定、処理および仕様表記法を規定する。本稿の解説も大筋でそ

*1: Japan Industrial Imaging Association (JIIA)

*2: European Machine Vision Association

*3: Module 2: Linearity 規格は 2008 年完成、目下カラーに関する規格が開発中である。

*4: 平成9年度通商産業省工業技術院委託報告書、『生産工程におけるセンサ技術を利用した画像処理システムの標準化に関する調査研究』第4章『FAカメラの標準化 (WG3)』(JEITA)。今年、JIIAがJEITAの承諾を得て改定作業に着手した。

*5: 参照先の#7とは規格書の節番号、#7(m)は式番号(m)、#7 Fig. nは図番号を指す

の構成に沿って進める。

当規格は従来規格とは 90 度異なる垂直思考が必要な概念である。しかもこの規格書は煩雑な数式と極めて多数の変数の羅列が目障りで読みづらい。加えて言葉のハンディもある。そこで本稿では文章ではなく独自の図表をベースに解説を行う。これは変数と数式を一括整理したもので少々くどい図表だがお許し願う。ちなみにゴールは“第5表: 測定値と仕様値”であり、仕様のデータを算出する仕組みを解説する。測定値と伝達値に関する第3表と第4表がその補助役で物理モデルを解説する。

なお、本稿では規格書原典上の数式や図表を度々参照する*⁵。規格書原典²⁾は EMVA のホームページから Down Load して頂くと良い。また仕様書のテンプレート³⁾やサンプル⁴⁾も参考になるであろう。勿論それら資料が無くても特に支障はない。

新仕様書の概要

新規格の概説に先立ち新仕様書を簡単に紹介する。なお、新仕様書の詳解は本誌の前稿“その概要”を参照願う。

新規格は Module 1 (感度と SNR の仕様記述の規定) を筆頭に複数のモジュールからなる。その仕様書の内容は全モジュールに共通の“一般情報”とモジュール別の“仕様値一覧表”と“グラフ表示”で構成される。

●一般情報 (#6:General Information)*⁶

製品情報としてメーカー名、機種名、撮像素子の種類と仕様、画素数、機能等々を表示する。

●仕様値一覧表 (Derived Quantities)*⁷

これはいわゆるデータシートであり、仕様書の中心部分である。

主な表示項目 (Item) は以下の通りである。

時間ノイズ関連項目

(Temporal Noise Parameters)

全量子効率、総システムゲイン(その逆数)、時間ダークノイズ、暗電流値、飽和容量

空間ノイズ関連項目

(Spatial Noise Parameters)

空間オフセットノイズ、空間ゲインノイズ

算出データ (Derived Parameters)

限界感度 (Absolute Sensitivity Threshold)、ダイナミックレンジ、SNR 最大値、全量子効率、総システムゲイン、限界感度等々。

従来規格にない項目が目につく。時間ノイズや空間ノイズなど、EMVA規格が測定対象とするノイズは6種類にもおよぶ。またここに具体例はないが、各項目の表示単位にも特徴がある。例えば感度 = 入射光子数、ノイズ = 電子数等々、全ての仕様値は物理量の絶対値表示に徹している。

● グラフ表示

仕様値の“グラフ表示”は当規格の特徴の一つである。仕様書には12のグラフが提示される。これらには“測定データ”(生データ、Raw Measurement Data)と“算出データ”(Derived Data)がある。

測定データとは測定結果の生データである。生データグラフを仕様書に表示する理由は、読者にデータの精度やばらつき度の確認手段を提供するため、としている。

算出データとは測定値からデータ処理で算出した結果であって、これには全量子効率、限界感度とSNRダイアグラムなどの項目がある。これらの項目は新仕様書の新機軸のひとつであ

※6: これはテンプレート上での命名である。規格書ではこれをBasic Informationと異なる命名をしている。

※7: これはテンプレート上での命名である。これをMost important Dataと呼ぶベンダーもある。

り、マシンビジョンカメラの多様な用途に対応するための大変便利なツールとして提供される。

理論編

理論編について

この解説は規格書に準じて理論編からスタートする。実技編では測定データから仕様書記載の各パラメータ(仕様値)を算出することになるが、理論編の目的は仕様値の物理的意味とその算出法の理論的背景を解説することにある。

理論編の流れは第1図のとおりである。まず、測定対象のカメラの物理モデルを紹介する。ここでは光信号に6つのノイズ源(第2表)を加えた7つの成分を考える。第二のステップは物理モデルを伝達関数として定式化する(第3表)。ここでカメラ出力端(点C)へ伝達された7つの成分の出力値、すなわち理論値を仮に伝達値と呼ぶ。第三のステップは規格書の数学モデルに相当する。ここでは出力端(点C)で計測されるデータを測定値と呼び、これを成分である伝達値の和として表示する(第4表)。この数学モデル(第4表)からゴールである仕様値パラメータの算出法(第5表)が導かれる。なお本稿では以降、仕様値パラメータのうち計測結果のデータを“測定データまたは生データ(Raw Measurement Data)”と呼び、これをデータ処理して得る値を“算出値

(Derived Data)”と呼ぶことにする。

変数の命名 (#7.1)

理論編を始めるにあたり、まず当規格が用いる変数を整理する(第1表)。

第1表の変数(統計量)“ μ ”“ σ ”“ σ^2 ”はそれぞれ平均値、標準偏差および分散を表す。これらは均一被写体を撮像した場合の信号振幅値(以降信号値と呼ぶ)、ノイズ実効値、およびノイズ電力値に相当する。こうした測定値の統計処理法はデジタルカメラのノイズ測定では標準的な手法である。

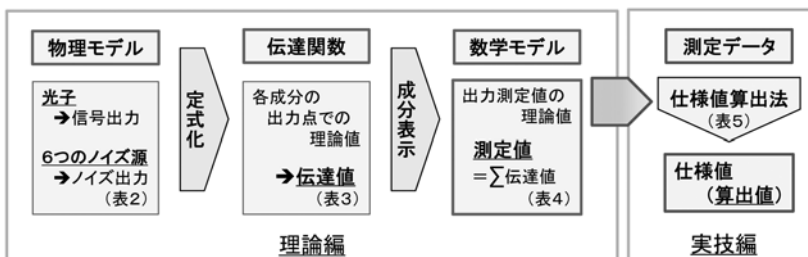
添字は標本集団の名称である。これが実に煩雑なので実例をもって説明する。

$\sigma_{y,temp,dark}^2 \rightarrow$ (dark) 遮光状態で(y)カメラ出力端で測定した(temp)時間(σ^2)ノイズ電力値

なお、添字ではない“yや y_{ij} ”はカメラ出力点Cにおける出力瞬時値を指す。原文ではこれを“Digital Gray

第1表 変数の命名法

| | | | |
|---------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| α_x : 標本集団 x の統計量を表す変数 | | | |
| x : 標本集団を表す添字 | | | |
| 変数 α | n_x | x の確率変数 | 信号瞬時値 |
| | μ_x | n_x の平均値 | 信号振幅値 |
| | σ_x | n_x の標準偏差値 | ノイズ実効値 |
| | σ_x^2 | n_x の分散値 | ノイズ電力 |
| 添字 x | p | 入射光子数 | |
| | e | 電子数 | |
| | d | 暗電荷数 | |
| | y | カメラ出力値 (Digital Gray Value) | カメラ出力端の画素出力値 |
| | $temp$ | 時間ノイズ | (測定値) |
| | $Spat$ | 空間ノイズ | |
| | $dark$ | 遮光下測定値 | |



第1図 理論編解説シナリオ

Value” というが、本稿では“カメラ出力値”と呼ぶ。また前後の関係によっては、画素単位の出力との意味を込めてこれを“画素出力値”と呼ぶ場合もある。

物理モデル (#7.1)

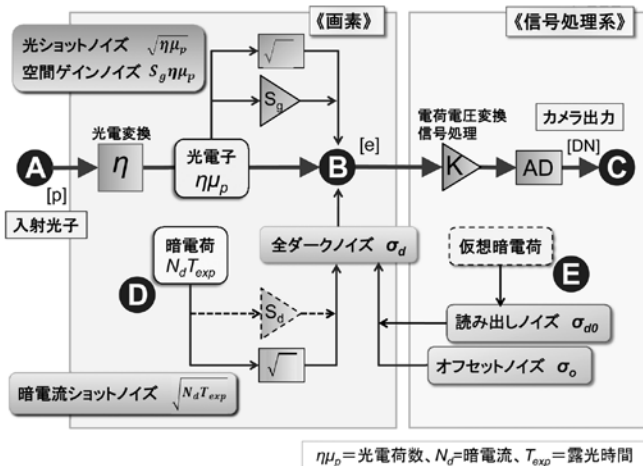
さて理論編の導入部としてカメラの物理モデル (第2図) を説明する。同図は規格書の物理モデル (Fig.2) と数学モデル (Fig.3) を独自に拡張したもので、入力の入射光子 (点 A) と暗電荷 (点 B) がカメラの中を変換、伝送されて出力 (点 C) に至るまでの過程を表わす。

中央のラインは信号成分の流れである。まず、光子が画素内へ入射 (点 A) して、光電変換 (全量子効率: η)、電荷蓄積 (点 B)、電荷電圧変換および信号処理系を経てデジタル値として出力される (点 C)。ここで全量子効率 (η) には画素の開口率や透過率などを含む。また光電子数から出力信号までの伝達比を総システムゲイン (K) と定義する。

第2図上部のラインは光 (光電子) に起因するノイズ、下部左側は熱 (暗電荷) に起因するノイズ、そして右側には信号処理系で生じるノイズの流れを表わす。規格書では後者を仮想的に画素で発生する仮想暗電荷と定義する。

6 種のノイズ

画素部 (点 B) に集積されるノイズ源 (単位: 電子数) は6種に分類する (第2表)。横軸 [行 2] では発生原因



第2図 物理モデル

別に光電子、暗電荷および仮想暗電荷の3種に分類し、更に縦軸 [列 A] では時間的な信号のゆらぎである時間ノイズと、画素間のばらつきに起因する空間ノイズの2種に分類する。

光ショットノイズと暗電流ショットノイズはその発生メカニズムが全くランダムな物理現象であり、その実効値 (標準偏差値) は理論的にそれぞれ原因の電子数の1/2乗で与えられる [行4列CE]。

空間ゲインノイズは画素毎の感度のムラが原因であって、その実効値は光電子数に比例する (その比例係数が S_g)。なお、熱起因の空間ノイズ成分 (暗電流ムラ、第2図の S_d 相当) について当規格書に特段の言及はない。

仮想暗電荷ノイズには時間的にランダムな読み出しノイズと画素間のダークムラが原因の空間オフセットノイズがある。これらは露光時間 (T_{exp}) に

依存しないからこれを本稿では固定分と呼ぶ。

ノイズの周波数スペクトルであるが、ショットノイズと読み出しノイズが中心の時間ノイズは主としてホワイトノイズである。空間ノイズの場合、信号処理系で発生する同期性ノイズもあり、非ホワイトノイズを含む場合がある。なお、当規格の数学モデルはノイズ成分がホワイトであることを前提にしており、非ホワイトノイズ成分が多い場合は規格の適用外としている。

数学モデル (#7.1)

伝達特性と伝達値

理論編解説の第二ステップ (第3表) では物理モデルである第2図の入力から出力に至るまでの経路を数値化 (定式化) する。なおこのステップは規格書に記載の無い本稿の追加部分である。

第2表 ノイズの成分分析 (観測点 B: 画素部における信号とノイズの種類と値)

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---|-------------------|-------------|--------------------|------------|----------------------|--------------|---------------|
| 1 | | 露光時間に依存する成分 | | | | 露光時間に依存しない成分 | |
| 2 | ノイズ源 (単位: 電子数) | <光起因成分> | | <熱起因成分> | | <固定分> | |
| 3 | | 光電子 | $\eta\mu_p$ | 暗電荷 (熱電子) | $N_d T_{exp}$ | 仮想暗電荷 | |
| 4 | 時間ノイズ | 光ショットノイズ | $\sqrt{\eta\mu_p}$ | 暗電流ショットノイズ | $\sqrt{N_d T_{exp}}$ | 読み出しノイズ | σ_{d0} |
| 5 | 空間ノイズ | 空間ゲインノイズ | $S_g \eta\mu_p$ | (暗電流ムラ) | | 空間オフセットノイズ | σ_o |

第3-1表 光起因の信号とノイズの伝達値（観測点 A～C：その経路の伝達特性）

| 列 | A | B | C | D | E | F | G | H |
|---|--------------------|----------|-----------|----------------|------------|------------------------------------|-------------|-----------------------|
| 行 | | | A：入力値 | 光電変換 量子効率 | | B | システム ゲイン | C：伝達値 |
| 1 | 光起因成分 | | 単位：光子 [p] | | | 単位：電子 [e ⁻] | | 単位：[DN] |
| 2 | 光信号成分（入射光子→光出力信号値） | | μ_p | η | | $\mu_e = \eta \mu_p$ | K | $K \eta \mu_p$ |
| 3 | 時間ノイズ | 光ショットノイズ | 実効値 | $\sqrt{\mu_p}$ | | $\sqrt{\mu_e} = \sqrt{\eta \mu_p}$ | | $K \sqrt{\eta \mu_p}$ |
| 4 | | | 電力 | μ_p | | $(\sqrt{\mu_e})^2 = \eta \mu_p$ | K^2 | $K^2 \eta \mu_p$ |
| 5 | 空間ノイズ | 空間ゲインノイズ | 実効値 | | $S_g \eta$ | $S_g \eta \mu_p$ | K | $K S_g \eta \mu_p$ |

第3-2表 ダークノイズの伝達値（観測点 B～C：その経路の伝達特性）

| 列 | A | B | C | F | G | H |
|----|--------------|----------------|-------------------------|----------------------|-------|------------------------|
| 行 | | | B：入力値 | システム ゲイン | | C：伝達値 |
| 6 | 熱起因成分 | | 単位：電子 [e ⁻] | | | 単位：[DN] |
| 7 | 暗電荷信号値（暗電荷数） | | $N_d T_{exp}$ | | K | $K N_d T_{exp}$ |
| 8 | 時間ノイズ | 暗電流 ショットノイズ | 実効値 | $\sqrt{N_d T_{exp}}$ | | $K \sqrt{N_d T_{exp}}$ |
| 9 | | | 電力 | $N_d T_{exp}$ | | $K^2 N_d T_{exp}$ |
| 10 | 固定分 | | 単位：電子 [e ⁻] | | | 単位：[DN] |
| 11 | 時間ノイズ | 読み出しノイズ | 電力 | σ_{d0}^2 | K^2 | $K^2 \sigma_{d0}^2$ |
| 12 | 空間ノイズ | オフセットノイズ | 電力 | σ_0^2 | | $K^2 \sigma_0^2$ |
| 13 | 全ダークノイズ | | 電力 | σ_d^2 | | $K^2 \sigma_d^2$ |

まず、物理モデルの信号変換、伝送の過程を伝達関数と考える。その伝達関数の出力、すなわちカメラ出力の理論値を伝達値と呼ぶ。第3表は入力である光信号と5つのノイズ成分（暗電流ムラノイズは省略）が6つの伝達値として出力されるまでの過程を各行別に示す。このうち画素点Bの値は第2表をそのまま転記している。また点Bから点Cへの振幅値の伝達比は総システムゲイン K であり、電力値では K^2 である。この表の内容は簡単だが結果は重要なので一度は6つの成分別にきちんと目を通して頂きたい。

第3表で注目すべきことがある。それは光出力信号値 $K \eta \mu_p$ [行2列H] と光ショットノイズ電力値 $K^2 \eta \mu_p$ [4H] の比が K であることで、後にこの関係から総システムゲイン K を算出することになる。

測定値と伝達値

第三のステップではカメラ出力端（点C）で計測されるデータ、すなわち信号とノイズの測定値と伝達値の関係を整理する（第4表）。これは測定値の理論値による成分表示であり、数学モデルの数式 #7.1 (3)~(12) に相当し^{※8}、測定値から仕様値パラメータを算出する根拠を示す。なお、[偶数行] は測定値 (*印付きの変数 (yy*)) であり、[奇数行] は各成分の伝達値である。[列B]、[列D] はそれぞれ照明下、遮光下の値を、[列C] は両者の差（光起因分）を記す。観測値の変数名は煩雑だが第1表の変数名法を参照して頂きたい。伝達値は第3表を参照して頂けばその素性が分かる。

照明下での測定値 [列B] は伝達値成分 [列C+D+E] の和であり、遮光下の測定値 [列DE] はダーク関連の伝

達値 [列D+E] の和である。[列FGH] 内の等式はこうした各欄相互の関係を示す。その等式の上の (m) は数学モデルの数式番号 #7.1 (m) に相当し、その等式がそのまま成分表示になる。

これらの関係を例によって説明する。

●例：[行6列G]

“6B=7C+6D”

$$\rightarrow [6B] = \text{時間ノイズ} = \sigma_{y,temp}^2$$

$$[7C] = \text{光ショットノイズ} = K^2 \eta \mu_p$$

$$[6D] = \text{時間ダークノイズ}$$

$$= \sigma_{y,temp,dar}^2$$

$$\rightarrow \sigma_{y,temp}^2 = K^2 \eta \mu_p + \sigma_{y,temp,dar}^2 \rightarrow \#7.1 (6)$$

すなわち欄 [行6列G] 内の等式 “6B=6C+6D” は “時間ノイズが光ショットノイズと時間ダークノイズとの和であり、それが数学モデルの式 #7.1 (6) に当たる” ことを示している。

他の欄も同様である。このように第4表は煩雑な測定値の変数名の確認や、測定値の伝達値による成分表示すなわち数学モデルを確認するのに利用できる。読者には是非一度各変数名のチェックと、[列FGH] 内の等式のフォローをお願いする。

※8：数学モデルのうち #7.1(15)~(21) は、仕様値データ (Derived Data, 算出値) を測定値から求める定義式である。これについては続くデータ処理と仕様値の表示法の項で解説する。

第4表 測定値と伝達値（観測点Cにおける信号とノイズの成分表示）

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|---|---|--|---|---|-----------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------|
| 1 | 照明下の測定値 | | | | | [A] | [B] | [D] |
| 2 | カメラ出力値 | (照明下-遮光下) | | 遮光下の測定値 | | 照明下の測定値 | | 遮光下の測定値 |
| 3 | | 光起因成分 | | 熱起因成分 | | 固定分@ $T_{exp}=0$ | | |
| 4 | μ_y^* 全出力信号値 (Mean Gray Value) (振幅値) | $\mu_y^* - \mu_{y,dark}^*$ | | ダーク出力信号値 $\mu_{y,dark}^* = K\mu_d$ | | (式番号) 測定値 =Σ伝達値 | (3) 4B* = 5C+4D = 5C+4D* | (11) 4D = 5D+5E |
| 5 | | 光出力信号値 $K\mu_e = K\eta\mu_p$ | | 暗電荷信号 KN_dT_{exp} | | 仮想暗電荷信号 $K\mu_{d0}$ | | |
| 6 | σ_y^2 全ノイズ (電力) | $\sigma_{y,temp}^2 - \sigma_{y,temp,dark}^2$ | | 時間ダークノイズ $\sigma_{y,temp,dark}^2 = K^2\sigma_d^2$ | | (5) 6A* = 6B*+8B* = (7C+6D) +(9C+9E) | (6) 6B* = 7C+6D* | (12) 6D = 7D+7E |
| 7 | | 光ショットノイズ $K^2\mu_e = K^2\eta\mu_p$ | | 暗電流ショットノイズ $K^2K_dT_{exp}$ | | | 読み出しノイズ $K^2\sigma_o^2$ | |
| 8 | | $\sigma_{y,spat}^2 - \sigma_{y,spat,dark}^2$ | | 空間ダークノイズ $\sigma_{y,spat,dark}^2$ | | | (7) 8B* = 9C+8D* | 8D* = 9E |
| 9 | 空間ゲインノイズ (電力) $K^2Sg^2\eta^2\mu_p^2$ | | | | オフセットノイズ $K^2\sigma_o^2$ | | | |

yy* = 測定値(シンボル)、xx = 伝達値 測定値* = Σ伝達値 (m) = 数学モデル(式番号m)@規格書#7.1項

実技編 1 測定法

測定手順 (#7.3)

ここからは一転して実技編である。まず第3図に測定手順の概要を示す。測定には時間測定とか空間測定など複数種類があるが(B)、それぞれ光源の光量を固定し(A)、露光時間を入力変数として計測する(C)。出力変数(測定値)は信号値とノイズ電力値である(C)。データ処理ではまず、その結果を測定値グラフにまとめる(生データグラフ(C))。次いで生データグラフから仕様値を算出する(算出値(D))。これら算出値の求め方は後に第5表を用いて解説する。得られた算出値は生データとともに規定に従って仕様書に記載する。これで一連の作業が完結する。

測定環境の設定 (#7.2)

測定設備の設定を規格書は第4図のとおり規定する。

- 被写体(光源)
 - : 単色光で円盤状の拡散光源
 - : 中心波長
 - = 全量子効率が最大となる波長
 - : 半値幅 ≤ 50nm
- 設定(第4図): fh=d/D=8
(レンズは使用しない)

測定法

準備が整ったら測定に入る。測定には時間ノイズ測定と空間ノイズ測定があり、それぞれ照明下測定と遮光下測定を行う。照明下測定では第4図の設定で光源の光量を固定し、後者ではレンズキャップを装着したうえで、ともに露光時間(蓄積時間) T_{exp} を変化させ

て、点Cのカメラ出力値 (y_{ij}) (または画素出力値、瞬時値) を計測する。そのデータに統計処理を施して信号値(平均値: μ_y) とノイズ電力値(分散値: σ_y^2) の二つの測定値を得る。

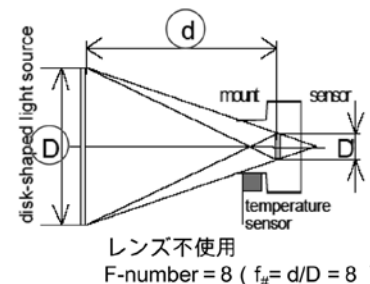
ノイズの分離抽出と画面間処理 (#7.3)

6種のノイズは以下の測定手順に従って分離抽出する。まず、発生原因別の3分類(光起因成分、熱起因成分、固定分)は3つの測定(照明下測定、遮光下測定および露光時間 $T_{exp}=0$ の値)によって得る。また、時間ノイズと空間ノイズは下記の通り画面間の演算処理を経て抽出する。

時間ノイズ測定では連続して撮像した2画面のカメラ出力を用いる。信号値 (μ_y) は1画面内の画素毎の全出力



第3図 測定手順



第4図 測定設備の設定 (#7.2Fig4)

値の平均値として算出する (#7.3 (23))。一方、時間ノイズ電力値 ($\sigma_{y,temp}^2$) は 2 画面の画素出力値間の差の分散値として算出する (#7.3 (24))。なお、空間的なばらつき (ノイズ) は 2 画面の差を取ることで相殺される。

$$\mu_y = \frac{1}{N} \sum_{ij} y_{ij} \quad \#7.3(23)、(32)$$

$$\sigma_{y,temp}^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{N} \sum_{ij} (y_{ij}^A - y_{ij}^B)^2 \right] \quad \#7.3(24)$$

y_{ij}^X : 画面 AorB における画素出力値
N: 画素数

空間ノイズ測定では連続して撮像した多数の画面を用いる。多数の画面間の平均値をとることで時間雑音を抑圧

する。空間ノイズ電力 ($\sigma_{y,spat}^2$) は平均化処理後の画素出力値 (y_{ij}) とその平均値 (μ_y) との差信号 (ばらつき) に対する分散値として算出する。

$$\sigma_{y,spat}^2 = \frac{1}{N} \sum_{ij} (y_{ij} - \mu_y)^2 \quad \#7.3(43)$$

総ノイズ測定では単一画面に対する FFT 処理でスペクトル分析を行う。単一画面中には時間的なゆらぎ成分も空間的なばらつき成分もともに含まれるためである。FFT 処理は画素出力値とその平均値 (μ_y) の差信号に対して施す。なお、規格書では水平ライン毎に FFT 処理を行い、全ラインの平均値として 1 次元スペクトル分析を行うとしている。その結果、もし非ホワイトノイズの比率が高い場合、その

多くは空間ノイズの影響と考えられるが、その場合の性能表示は当新規格に準拠しない、と EMVA は規定している。その理由はホワイトノイズを前提とした EMVA 規格の物理モデルに合致しないためである。なお FFT の結果はノイズスペクトル図として仕様書に表示する。

仕様値の算出

測定の次は得られたデータの処理である。ここでは測定値から算出値 (Derived Data) を求める方法を、第 5 表を用いて解説する。なお、第 5 表 [列 F] には算出値の大半が示されている。総システムゲインや全量子効率はその代表例である。

第 5 表 測定値と仕様値

| 列 | A | B | C | D | E | F | G | H | | | |
|----|--------|---|--------------------|------------------------|------|-------------------------|-----|------|--|--|--|
| 行 | | Y 軸 | 単位 | X 軸 | 単位 | 測定値グラフ [列BD] | | | | | |
| 1 | L+D | 照明下測定 | | | | | | | | | |
| 2 | Fig. 1 | 全出力信号値 | VS | 入射光子数 | | | | | | | |
| 3 | (a) | μ_y | [DN] | μ_p | [p] | | | | | | |
| 4 | Fig.2 | 全時間ノイズ電力値 | | 入射光子数 | | | | | | | |
| 5 | (b) | $\sigma_{y,temp}^2$ | [DN ²] | μ_p | [p] | | | | | | |
| 6 | D | 遮光下測定 | | | | 算出値 | | 式番号 | | | |
| 7 | Fig.3 | ダーク出力信号値 | VS | 露光時間 | | 暗電流値 | | (27) | | | |
| 8 | (c) | $\mu_{y,dark}$ | [DN] | T_{exp} | [s] | KN_d | (a) | | | | |
| 9 | Fig. 4 | 時間ダークノイズ電力値 | | 露光時間 | | 時間ダークノイズ | | (28) | | | |
| 10 | (d) | $\sigma_{y,temp,dark}^2$ | [DN ²] | T_{exp} | [s] | $K^2 N_d \sigma_{d0}^2$ | (b) | | | | |
| 11 | L | 光起因成分=照明下出力-遮光下出力 | | | | 算出値 | | 式番号 | | | |
| 12 | Fig.5 | 光ショットノイズ電力値 | VS | 光出力信号値 | | 総システムゲイン | | (25) | | | |
| 13 | (e) | $\sigma_{y,temp}^2 - \sigma_{y,temp,dark}^2$ | [DN ²] | $\mu_y - \mu_{y,dark}$ | [DN] | K | (a) | | | | |
| 14 | Fig.6 | 光出力信号値 | | 入射光子数 | | 全量子効率 | | (26) | | | |
| 15 | (f) | $\mu_y - \mu_{y,dark}$ | [DN] | μ_p | [p] | $K \eta$ | (a) | | | | |
| 16 | | 空間ノイズ測定 | | | | 算出値 | | 式番号 | | | |
| 17 | Fig.11 | 空間ゲインノイズ値 | [DN] | 光出力信号値 | | 空間ゲインノイズ | | (44) | | | |
| 18 | (h) | $\sqrt{\sigma_{y,spat}^2 - \sigma_{y,spat,dark}^2}$ | | $\mu_y - \mu_{y,dark}$ | [DN] | S_g | (a) | | | | |
| 19 | Fig.12 | 空間ダークノイズ値 | VS | 露光時間 | | オフセットノイズ | | (45) | | | |
| 20 | (j) | $\sigma_{y,spat,dark}$ | [DN] | T_{exp} | [s] | σ_0 | (b) | | | | |

[列 A] (Fig.x): 仕様書テンプレートのグラフ図番

[列 A] (a) ~ (j): 規格書 #7.3. で仕様書記載が要求されているグラフ名の記号

[列 G]: 算出値の算出法。(a) なら算出値=データグラフ (直線) の傾き、(b) なら算出値=Y 軸切片

[列 H]: 規格書 #7.3 記載の式番号で、測定値から算出値を求める計算式を指す

まず、最初の作業として測定データをグラフ化する。作成するグラフのX軸の変数、Y軸の変数にはそれぞれ第5表の[列D]の変数と[列B]の測定値をとる。なおX軸[列D]は基本的に露光時間(T_{exp})か、これに準ずる入射光子数(μ_p)ないし光信号値である。一方、Y軸[列B]の値は出力信号値かノイズ電力値(Y軸、[列B])である。こうしたグラフを照明下測定、遮光下測定および空間ノイズ測定ごとに作成する。作成したグラフはそのままで仕様書に記載する測定値(生データ)グラフになる。なお、第5表[列A]のFig.1~6, 11, 12は仕様書テンプレート上の生データグラフの図番である。

次に各種の仕様値(算出値[列F])を求める。作成したグラフのデータ直線の傾きとY軸切片をご覧いただきたい。もし[列G]の指定が“a”ならその直線の傾きが、“b”ならY軸切片が求める算出値になる。こうした仕様値算出の根拠は規格書#7.3の式([列H]の式番号)に示されているが、下記の例のように第4表を参照することで容易に確認できる。

●例：総システムゲイン(K)

第5表[13F] = $K \rightarrow$ [13G] = “a”

Y軸： $\sigma_{y,temp}^2 - \sigma_{y,temp,dark}^2$

\rightarrow 表4 [6B] - [6D] = [6C]

$\rightarrow K^2 \eta \mu_p$:

光ショットノイズ電力値

X軸： $\mu_y - \mu_{y,dark}$

\rightarrow 第4表[4B] - [4D] = [4C]

$\rightarrow K \eta \mu_p$: 光出力信号値

故にグラフの傾き $a=Y/X=K$

第4表の助けを借りてこうした手続きを踏めば全量子効率や時間ダークノイズ電力値など他の仕様値の算出法もその根拠も容易に理解できる。一度他の算出値で試して頂ければ算出値の求め方と第5表の理解が一層深まると思う。



実技編 2 表示法

表示事項

最後のステップは得られた仕様値データの表示法である。EMVA規格は仕様書に記載する事項として、仕様値一覧表(データシート)とグラフ(測定データグラフと算出データグラフ)が規定されている。

このうちデータシートが最も重要である。大半の情報がここに表示されるからだ。その表示項目は第一節で紹介したとおりだが、大部分は第5表[列F]記載の算出値として得られている。第5表に記載のない飽和光量は照明下測定で出力信号値の飽和点での入射光子数として得られる。

データシートは仕様書テンプレートの体裁に従って作成すればよい。ただしEMVA規格は仕様書に記載する“データのタイプ”の明記を要求しているので注意が必要である。“データのタイプ”とは記載されたデータが機器の固有値か、代表値かまたは保証値なのか等々であって、保証値の場合は保証期間の記載も求められる。

グラフ表示のうち生データグラフについては前節で得られたとおりでよい。残るのは3つの算出データグラフ、すなわち全量子効率、限界感度およびSNRダイアグラムである。

全量子効率と限界感度

全量子効率と限界感度のグラフ表示はともに分光特性表示(X軸=波長)であって、異なる波長の光源下で照明下測定を繰り返すことで得られる。

特定の波長 λ に対する全量子効率($(\eta(\lambda))$)は第5表[行14]指定の方法で算出する。なお、全量子効率は“光電子数/入射光子数”であって、一般的な相対分光感度の“出力電圧/入射光電

力”と異なるので注意が必要だ(第5図)。

限界感度とは最低被写体照度に相当する値で、SNRが1となる入射光子数($\mu_{p,min}$)すなわち、光電子数($\eta \mu_{p,min}$) = 読み出しノイズ(σ_{a0})で定義され、次の式#7.1(16)で与えられる。

$$\mu_{p,min} = \sigma_{a0} / \eta \quad \#7.1(16)$$

限界感度(Absolute Sensitivity Threshold)は上式のとおり、全量子効率 η に反比例するグラフとして描くことができる。

全量子効率、余談

この場を借りて全量子効率について筆者の私見を付記する。全量子効率の分光特性を測定するには多数の異なる波長の単色光源を準備し、測定を繰り返す必要があるため、その実行にはかなりの抵抗感があるかと思う。そこで個人的な提案をしたい。この作業を撮像素子メーカーから支給される撮像素子の相対分光感度特性からの換算で代替できないだろうか。

第5図をご覧いただきたい。同図はカメラの全量子効率実測値(実線)と撮像素子の相対分光感度特性(鎖線)、そしてその分光感度から変換した全量子効率の換算値(\diamond)とを比較している。この比較結果に上記提案の妥当性が十分に示されているように思われる。この提案が良しとなれば全量子効率の絶対値を求める照明下測定係は一度で済む。残りの波長の全量子効率については相対感度特性値に(a/波長)を乗じて換算すれば良い(aは全量子効率の絶対値を合わせるための系数)。

なおHot Newsであるが、筆者がEMVA1288規格担当者に打診したこの提案の是非について回答があった。答えは“基本的に是認できる”。丁度この原稿の締切り3日前のことであった。

されると見込まれる。

こうして時の流れは進む。その時の流れに備えて新規格書読破に挑戦される読者諸氏に本稿がご理解の一助となればと願う。なお、参考文献には英文でよければEMVA⁵⁾とBasler社⁶⁾のHPに、和文なら映像情報メディア学会誌の解説記事⁷⁾があり、JIIA⁸⁾と(株)シーアイエス⁹⁾のHPにも筆者の解説資料がある。またEMVA288規格書読破にお役に立てるよう原典をそのまま訳本的に解説する資料も目下執筆中であり、いずれご提供できると思う。

謝辞

本稿を作成するに当たりご指導とご助言を頂きましたJIIA標準化委員会カメラ仕様分科会の皆様、そして貴重な資料の使用を許可して頂いたEMVAとBasler社に深謝いたします。

参考文献

- 1) 名雲文男, “最新のマシンビジョンカメラ性能表示規格EMVA1288, その概要、画像ラボ、2008年10月号
- 2) EMVA Home → Standards → 1288 → Download → EMVA Standard 1288, Release A2.01
http://www.emva.org/standard1288/downloads/emva_standard_1288_release_a201
- 3) EMVA Home → Standards → 1288 → Download → Tutorial for data presentation → Template Specification sheet
http://emva.org/files/standard1288/template_specification_sheet_emva1288_nov06.pdf
- 4) EMVA Home Standards → 1288 → Compliant Products
→ http://www.emva.org/emva_1288_standard_compliant_products_0
- 5) EMVA Home → Standards → 1288 → Download → <http://www.emva.org/standard1288/downloads>
- 6) Basler社 Home → Product & Solutions → Machine Vision → Technologies → EMVA1288 → Camera Characterization → http://www.baslerweb.com/beitraege/beitrag_en_18743.html
- 7) 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, pp.307~312 (2008)”
- 8) JIIA Home → 各種書類・報告書 → 技術報告 → http://www.jiia.org/jp/frm/frm_doc04.html
- 9) (株)シーアイエス Home → 技術情報 → <http://www.ciscorp.co.jp/technique/index.html>

【筆者紹介】

名雲文男

日本インダストリアルイメージング協会 (JIIA)
副代表理事
標準化委員会担当
(株)シーアイエス、
常務取締役 技術担当
E-mail: f.nagumo@ciscorp.co.jp
(主たる業務歴及び資格)

昭和44年東京工業大学修士課程修了
Sony(株)にてCCDカメラの研究開発、設計および同事業運営に従事。
技術士。

日本インダストリアルイメージング協会

URL: <http://www.jiia.org/>

株式会社シーアイエス

東京都八王子市東浅川町 539-5

URL: <http://www.ciscorp.co.jp/>

〈業務内容〉

カメラ開発、製造、販売

| | | |
|----------------|------------|---|
| Keyword | JIIA | Japan Industrial Imaging Association (日本インダストリアルイメージング協会) 産業用画像処理技術の日本発世界規格標準化を推進する協会。 |
| | EMVA | European Machine Vision Association 産業用画像処理技術の世界規格標準化を推進する欧州基盤の協会。 |
| | 時間ノイズ | 出力信号の時間的なゆらぎに起因するノイズ。発生源は光ショットノイズ、暗電流ショットノイズ、読み出しノイズなど。EMVA規格の時間ノイズ電力を分散値で評価する。これは既存規格と同等である。 |
| | 空間ノイズ | 出力信号の画素間のばらつきに起因するノイズ。発生源は画素間の感度や暗電流のばらつき、画素外部で発生する同期性ノイズなど。EMVA規格はこれを分散値で評価する。一方、既存規格はこれを波高値ベースで評価する。 |
| | 空間ゲインノイズ | 画素間の感度のばらつきに起因するノイズ。EMVA規格は空間ゲインノイズ電力を分散値で評価する。一方、既存規格はこれを波高値ベースで評価する。 |
| | 全量子効率 | 撮像素子に入射した光子数と励起された光電子数の比。ここでいう全量子効率とは開口率や透過率などを含めたトータルの効率として定義する。この場合入射光量の単位が光子数だが相対分光感度特性の場合電力(W)である点で大きく異なる。 |
| | SNR ダイアグラム | 入射光量の変化に対するSNRの変化を表示するグラフ。SNRを制限する光ショットノイズや空間ゲインノイズの評価が可能な現実に即したSNR評価法。既存のSNRでは多くの場合ダークノイズのみが評価対象になるが、現実のSNRはそれより低くなる。 |
| | 限界感度 | Absolute Sensitivity Thresholdの仮の訳語。SNRが1になる入射光子数で定義する感度。既存規格の最低被写体照度に相当する。相違点は前者の評価単位が光子数(物理量)、後者がルクス(心理物理量)。マシンビジョンではルクス評価で矛盾を生ずることがある。 |