天体用 CMOS カメラの露光・データ記録シーケンスの推定(Rev. 1.02)

宮下和久*

1．はじめに

裏面照射型などの高感度 CMOS 撮像素子を搭載した天体用 CMOS カメラが現れ、月・惑星の表面の観測に用いられてきている。これらのカメラは動画が撮影できることから、星食観測への応用の可能性について観測者の間で議論されるようになった。とりわけ小惑星による恒星食の観測では、多くの場合対象となる天体が暗く、従来使われていたアナログ高感度カメラでは 1 秒から数秒といった長い時間の蓄積露光が必要が必要であった。小惑星の形状や重星の伴星の観測においてより有用なデータを得るには高い時間分解能が必要であり、また、より暗い恒星の食現象を観測可能とするためにも高感度 CMOS カメラへの期待が高まっているのである。星食観測とは、天体の天球上での位置を正確な時刻を測ることにより明らかにする形で行われる観測である。現在では観測値として数ミリ秒またはそれ以下の精度求められるようになってきており、そのためには、動画に高精度の時刻が記録されなければならない。ところが、CMOS カメラにはまだアナログビデオのようなタイムインサータは開発されていない。そのため、GPS を利用した時計装置が発生する 1 PPS 信号により点滅する LED 光を観測時にともに撮像し、それを基準として精密な時刻を求める方法が観測者の間で採用されつつある。本研究は、撮像素子が記録した 1 PPS の LED 光の明るさを、動画のフレームから読み取って測定することにより、CMOS カメラの露光と記録の時間タイミングを明らかにしようと試みたものであり、以下にその方法と結果について述べる。

2．天体用 CMOS カメラの記録の仕組みと課題

従来の天体用アナログビデオカメラが出力する信号はコンポジット信号であり、その信号にタイムインサータで時刻をスーパーインポーズさせ、パソコンにキャプチャしてファイルとして記録させる、という方法で観測が行われていた。このときカメラの出力する信号の規格は NTSC 方式や PAL 方式として厳密に定められており、露光と出力のタイミングはカメラが工業製品の品質として確実に保証していた。したがって、カメラの露光とタイムインサータの時刻記録のタイミングを（複数の撮影モードを持っていればそれぞれに対して）一旦測定しておけば、そのカメラを使うユーザは全て同じ補正値を使うことができたのである。

一方、天体用 CMOS カメラは、PC 周辺機器間の通信規格である USB（2.0, 3.0）を経由して、直接 PC がファイルとして書き込む方法である。露光、データ読み出し、通信伝達、ソフトウエアによる処理命令、ディスクへの書き込み、という一連の流れに必要な時間が、観測者の用いる環境ごとに異なる可能性が極めて高く、また、これらのそれぞれの処理にかかる時間を測定することは一般的には困難である。

この課題を解決し、観測されたビデオに対して正確な現象時刻を与えるために、GPS 受信機が発生する 1 PPS の LED 光を観測時に視野照明として同時に記録する方法が採用されつつある。LED の発光の立ち上がりはナノ秒オーダーとたいへん速く、正確な時刻基準として用いることができる。この時刻保持法は、タイムインサータが登場する以前のアナログビデオカメラでも用いられていたが、その当時から、たとえば NTSC の 33msec の露光期間のどこで光り始めたのかがわからないと、33msec が時刻誤差として生じてしまう、という問題があった。

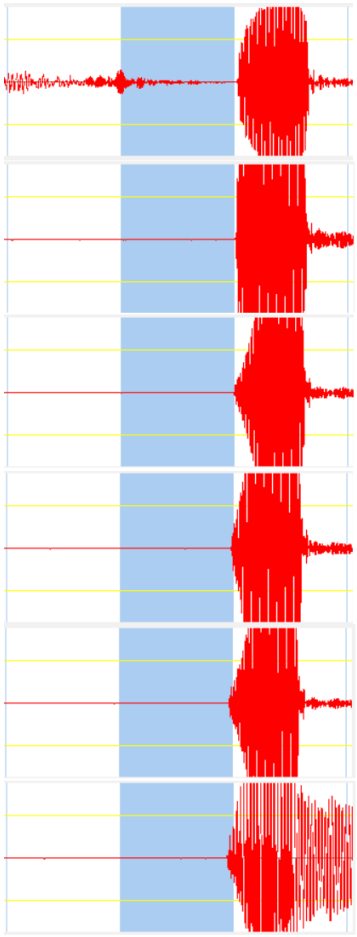

図 1　NTSC のフレーム（水色）に対して 1 秒に 1msec ずつ「入り込んで」いくように見える 1PPS 音声信号（赤色）

* 星食観測日本地域コーディネーター

3．フレーム露出時間内の LED の光り始めを推定する方法

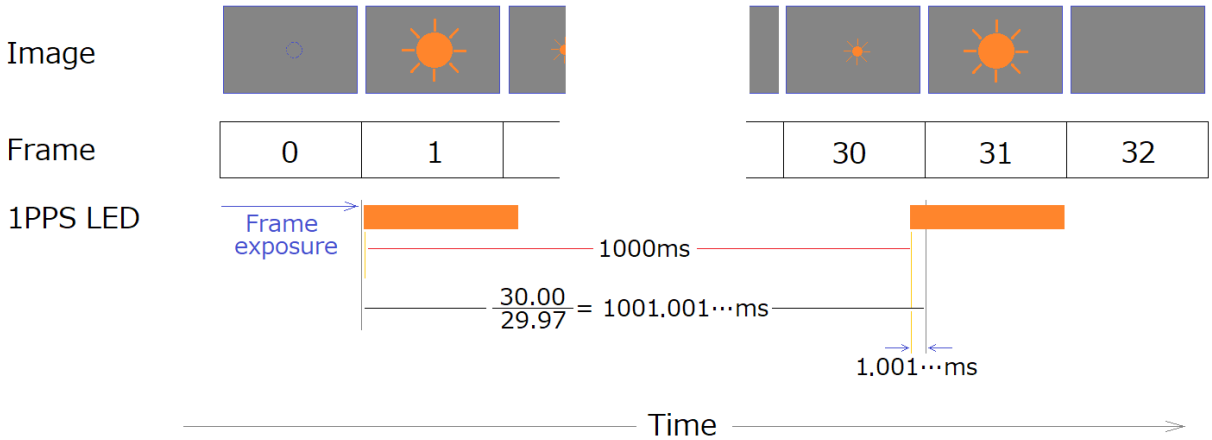

図２　NTSC 方式の動画のフレームに対して 1PPS がずれていくしくみ

理解しやすくするために、ずれの量を大きく描いている。実際のずれの量はフレーム長の約 33 分の 1 であり、図 1 に示すとおりである。

上記の課題に対して。筆者は NTSC のフレームレートが 29.97fps と整数ではなく、30 フレーム進めると画面と 1PPS が約 1msec ずれることを利用して、同時録音された時報音から時刻を求める方法を考案した（宮下, 2006）。この手法は一眼レフカメラで撮影された小惑星による恒星食の動画の時刻解析にも応用されてきている(図１）。その仕組みを図 2 に示す。この場合には、画面内に写っている LED の光を通常の天体と同様な方法で測光すればよい。上記の NTSC の場合では、30 フレームごとのフレームについて見ていくと、１ PPS 信号の開始点がフレームに対して 1msec ずつ早くなっていくことから、LED 光の「蓄積量」が時間に比例して大きくなっていくようすをとらえることができる。更に時間が進むと、１ PPS の点滅光はフレームから外れるようになり、その段階になると時間に比例して光量が減じていくようになる。したがって、この方法を用いて LED 光を測光したとき、光量の変化は直線的になるはずである。測光時に直線的な変化をするかどうかにより、カメラの出力にガンマ補正等がかかっているかどうかや、フレームをファイルに記録するのに要する時間のゆらぎを検出することも可能となる。

4．カメラの特性を調べる実験

観測時には、観測する星の部分に影響を及ぼさないようにするために、暗視野照明で LED 光を照射することが望ましい。そのときに、どのような位置を照明するのがよいのかを探るために、図 3 に示すような基礎的実験をおこなった。

従来の NTSC（29.97fps）や PAL(25fps)は、露光時間に比べて素子からの読み込み時間が短いことから、画像の位置による時刻の差は無視できる。一方、一眼レフカメラの動画撮影機能や天体用 CMOS カメラは、露光時間に対する読み込み時間の割合が比較的大きく、画面上の方と下の方では、録画の開始および終了のタイミングがずれているとされている。そこで図 3（右）のように縦方向と横方向のそれぞれの位置について、LED 光の変化を調べた。

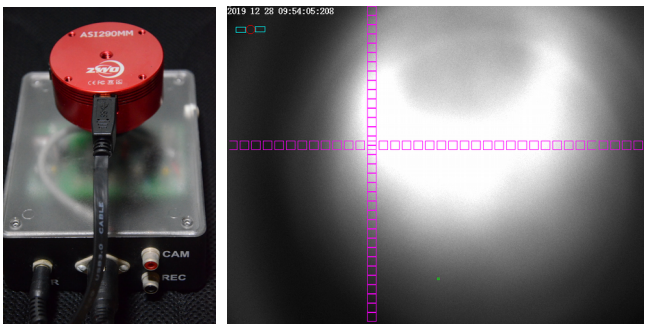

図３　カメラの特性を調べる実験と、画面上の測定位置

タイムインサータにレンズ付きのカメラを載せ、ピントを外して大きく LED 光が写りこむようにした。(左)

測光は、Limovie ver. 0.9.99.4B の持つ 1PPS LED 光用の検出部を用いて測光した(右)。このとき、縦方向と横方向で LED の光り始めのタイミングか異なるかどうかを調べた。

キャプチャ用のソフトウエアとして Robin Glover 氏開発の SharpCap * を用いた。このソフトエアは、フレーム毎に撮影時刻がデータとして書き込むことができる。更に、Limovie をはじめとする星食動画解析ソフトウエアによりそのデータを読み出し、時刻観測に役立てることができる。ただし、SharpCap が書き込んだ時刻は、ソフトウエアが画像データを PC のメモリに読み込んだ段階での PC のシステム時計の時刻であると考えられ、撮像素子が露光した時刻よりも遅い時刻を示している可能性がある。そこで、1PPS の LED 光が光始めた時刻とフレームに書き込まれた時刻を比較することで、記録された時刻のタイミング（遅延時間）を求めることにより、その補正値を得ることを目的に、以下の実験をおこなった。

この実験では、露出時間を 13msec に設定した。これで 13msec×77frames=1.001sec となり、77 フレームごとに測光を行えば、1PPS とフレームの露光が 1msec ずつずれていく様子を観察することができる。

5．測定結果

5－1　1 か所の測定点における結果

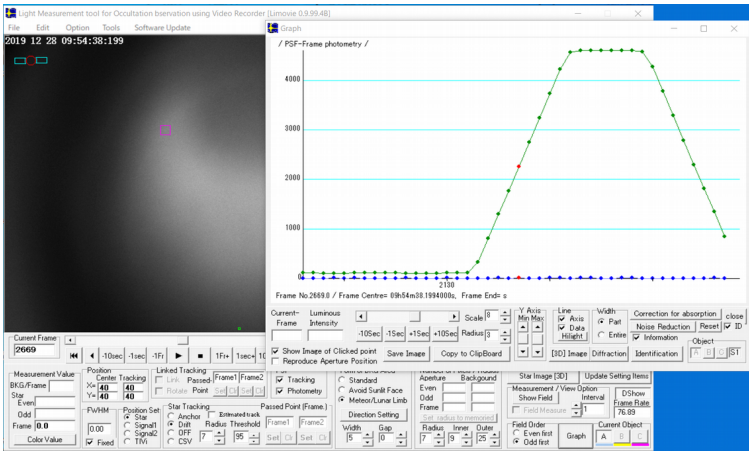

図 4 画像のマゼンタ色の枠内の測光（ピクセル値の合計）

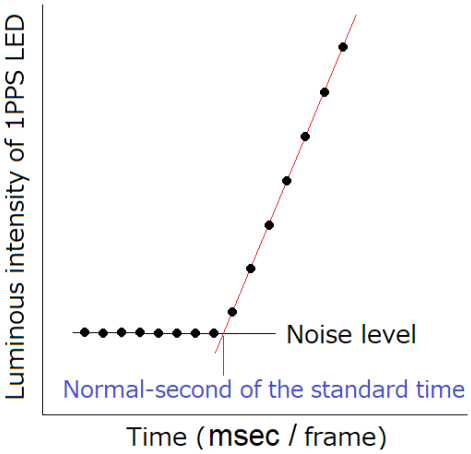

図 5　フレームと 1PPS のタイミングを求める

測定結果を図 4・5 に示す。光量の増減は直線状の変化となった。この結果は録画のフレームレートの安定と光量と出力の双方がともに直線的な関係にない限り実現しえないことから、CMOS カメラは星食観測に対しても適した特性を持っていることが確認できた。図 5 において、測光値のノイズレベルからの立ち上がりの位置が 1PPS の正秒を示している。この位置は、増光時の値を最小二乗法で直線に近似し、ノイズレベルを平均した直線と交わる点として求めることができる。図 5 の横軸方向の測点の間隔は 1msec であるから、この手法によれば観測に対してサブミリ秒の精度で時刻基準を与えることができると考えられる。

5-2　画面横方向におけるフレームと正秒のタイミング

図 6 は、図 3 の測定店の横方向の並びについて測った結果である。左側の 6 個の測定点が大きくかけ離れた値となっているが、これは LED の光がないまたは極めて淡い部分である。画面の明るさをほとんど感じないような場合は、1PPS の情報が正しく読み取れない可能性があることを示している。

一方、画面で明るさを視認できる状態であれば、あまり明るさには拠らなくなる。また、光が飽和している（サチレーションを起こしている）か否かに関わらず、求められた正秒に違いが認められない。左より 10 番目から右より 2 番目までの LED 光が明るい部分での 1 PPS が光り始める時刻のばらつきは 1σ=0.004msec であり、1msec よりはるかに小さい値

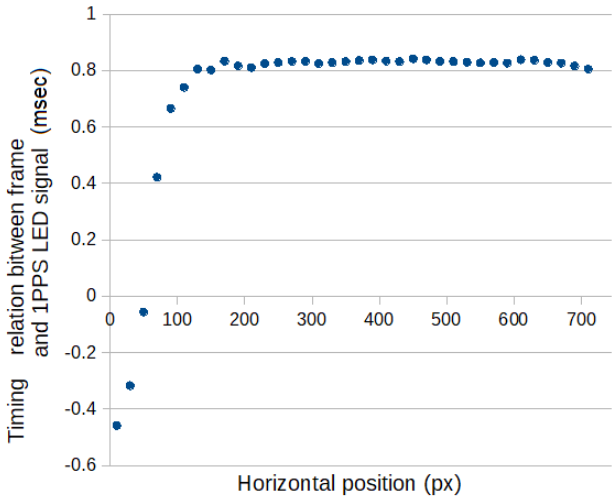

図 6　水平方向の LED のタイミング

縦軸は、1PPS のフレーミングに対するタイミングを、フレームの露出長を単位に表している。

である。以上より、このフレームに対する 1PPS 信号のタイミングを探す方法は、観測時の時刻記録の時刻基準として、たいへん高い時刻精度を提供することができると考えられる。

5-3　画面縦方向におけるフレームと正秒のタイミング

画面垂直方向についてのタイミングの結果を図 7 に示す。水平方向とは異なり、画面の下の方になるにつれてフレームが 1PPS に対して遅れていくことを示している。この撮影条件（ASI290MM、ビニング 2）の場合には、1 ラインにつき 0.0077msec ずつのずれがある。これにより、540 ピクセル（ライン）で構成されるこの画面は、最上部と最下部で 4.16msec の露光タイミングの差が生じていることになる。したがって、観測する天体を画面中央に置き、LED の暗視野照明光を画面最下部に当てて観測した場合、LED の示す正秒に比べて天体位置における正秒は 2msec ほど遅れていることになり、5-2 に述べたきわめて高精度な時刻基準としての LED 光を生かすことができない。

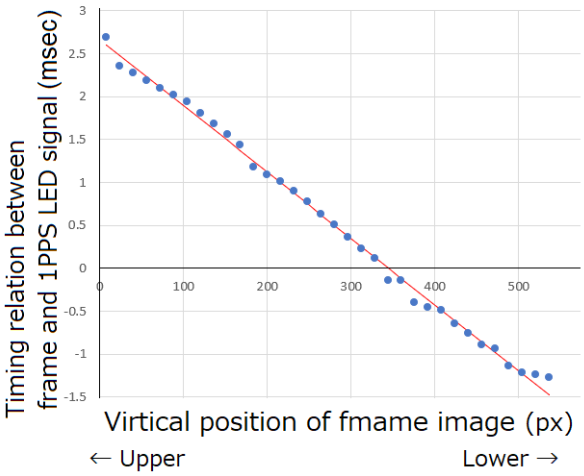

図 7 画面垂直方向の LED 光のタイミング

また、画面横方向のタイミングが高い精度で一致していたのに対して、縦方向は直線からの外れが比較的大きい。これは読み出し速度にある程度のゆらぎ（ばらつき）があることを意味しているのではないかと考えられるが、この結果だけで明確に結論することはできない。

6.　動作シーケンスのまとめ

ZWO 社の天体用 CMOS カメラ ASI290MM を USB3.0 で PC につないだときの動作の特徴として次の点が明らかになった。

1)　フレームレートが安定している。
2)　出力時にガンマ補正等の補正はなされていない。光量と出力値は比例する。
3)　画面横方向については、フレームと 1PPS のタイミングがどこも一定である。これは、1 ラインの読み取りが瞬時（0.0077msec）に行われていることを示している。
4)　撮像素子の 1 ラインの読み取りは 0.0077msec の時間間隔で次のラインを読み取っている。したがって、画面の高さが 540 ピクセルだとしたとき、最上部と最下部の間には録画開始および録画終了の時刻に 0.00416 秒(4.16msec)の時間差が生じる。

以上から ZWO 社の ASI290MM の動作シーケンスをまとめると図 8 のようになる。これによれば、露出時間として 4msec を設定して記録したときには、画面上端と下端ではちょうど 1 フレーム分時間的に食い違った画像データが得られることになる。

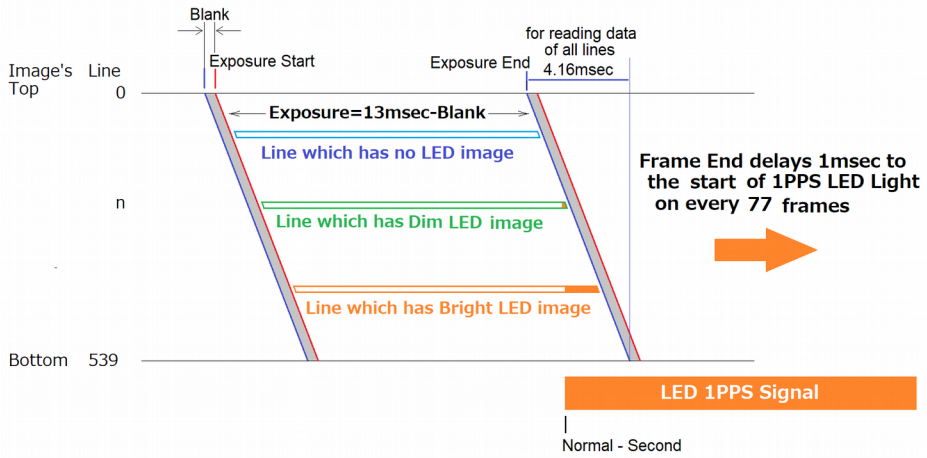

図 8　測定結果から推定した露光・データ読み込みのシーケンス

また、1PPS の LED 光を用いてフレームとの時間差を用いた記録をした時には、

5) 本稿末尾の表のようにして、フレームと 1PPS 信号の間に 1 秒ごとにつき 1msec の時間差をつくりだすことができる。（例： 13msec × 77frame=1.001sec, 11msec × 99frame = 1.001sec）

6) LED の 1PPS とフレームを 1msec ずらせるような撮影と測光（13msec 露光のフレームを 77 コマごとに測光など）を行うと、LED 光が時間に比例して増加していく様子をとらえることができる。これに最小二乗法で直線をフィットさせると、その立ち上がりで正秒の位置を求めることができる。

7. 精密な時刻を得るための観測装置と観測法

第 6 項の 3)および 4)より、精密な時刻観測を行うためには、観測対象の天体と 1PPPS の LED 光は、画面上の縦位置が同一でなければならない。したがって、LED 光はアナログビデオカメラで用いられていたような点状はなく、対象の天体がどの位置にあっても対応できるように、画面の縦方向に長く光らせなければならない。上述のように、極端に暗くない限り、場所による光の「濃淡」がある程度あっても構わない。

この条件を満足させるものとして、渡辺裕之氏は図 9 のような装置を試作した。これは、オフアキシスガイドアダプターのプリズムを 180° 回転させて、ガイダーの代わりに取り付けた LED 光で撮像素子の左右どちらかの端を照射するものである。図のように、画面の右横を上から下まで照射している。

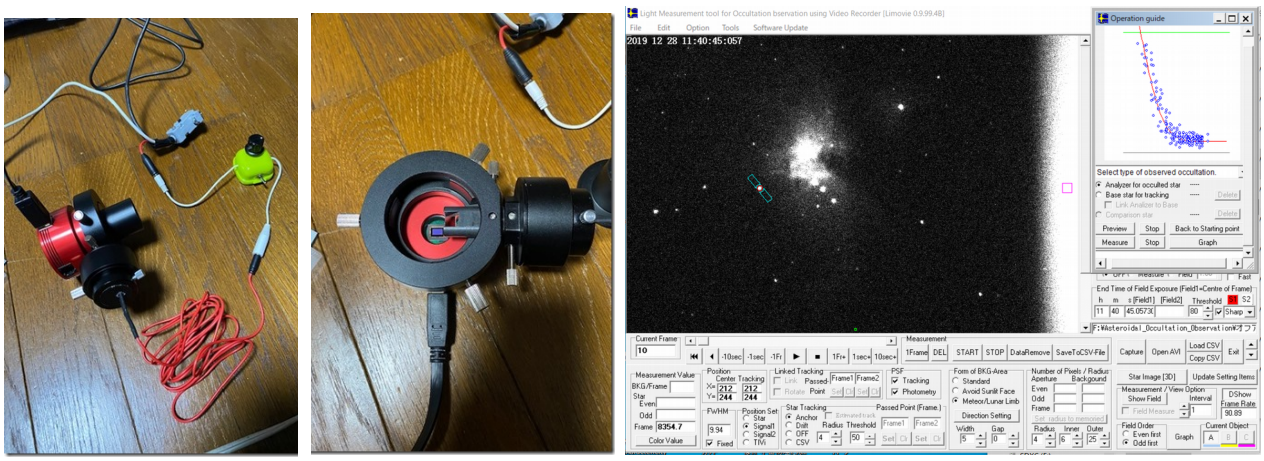

図 9　PPS プロジェクションユニット（左、中）を使用して暗視野照明した LED 照射光（右）

装置は渡辺裕之氏の発案と製作による。　オフアキシスガイダーを改造して、LED 光を画面の右端に照射する。

解析時には、Limovie の 1PPS 信号受光エリアを対象天体と同じ縦位置に置き、フレームと 1PPS が 1 秒につき 0.001 秒ずれることを利用して精密な時刻データを得るための基準とすることができる。

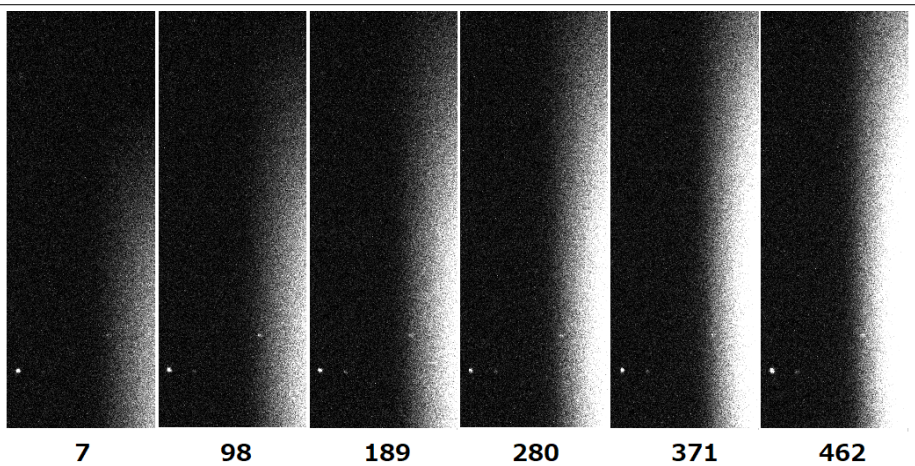

図 10　1msec ごとの LED の明るさの変化

露出 11msec のときの 91 フレームごとの画像。数字はフレーム番号を表す。

また、この装置を使うと、上記の推定されたシーケンスを目で見て確かめることができる。No.7 フレームまたは No.98 フレームから同じ明るさのところを右の画像でたどっていくと、4～5 個目の画像で上端に達する様子が見られる。

8. 結論と今後の課題

観測時に 1PPS の LED 光を撮像素子の左右どちらかの側を一定幅で上から下まで照射しながら星食現象を動画で撮影し、照射光の明るさを一定のフレーム間隔で測光する方法により、1msec よりも高い精度でフレーム露光が行われた時刻を求めることができる。このとき、パソコンの内部時計は時として誤差が 500msec に達することもあるとされていることから、適切な方法で+/-30msec 以下の誤差にしておく必要がある。現時点で、Limovie の出力する CSV ファイルを表計算ソフトで処理すれば上述の方法により比較的簡単に精密な時刻基準を求められるが、観測者が観測のたびにそれを行うのは煩雑であり、計算法等に誤りがあれば、誤差の要因にもなってしまう可能性もある。解析ソフト側でそれをサポートする仕組みが必要であり、特にソフトウエアの操作性を簡単で確実なものとすることが必須である。観測者の意見を反映しながら Limovie の新機能を作成していくことが、この手法を有効に活かして観測するために重要になってくると考えられる。

本研究は筆者の所有する天体用 CMOS カメラ 1 機種について行ったものである。CMOS カメラは数社から多様な機種が発売されている。今回明らかになった動作シーケンスの特徴が他の機種でも同様であるかどうかについて、今後解析を進めていきたい。

9. 謝　辞

渡辺裕之氏は、CMOS カメラの星食観測への応用を早くから実践され、その課題や問題点について指摘されてこられた。また、LED 光の暗視野照明装置を試作され、その画像および試写動画を提供くださった。本研究はその実践を裏付けるために行ったものであり、氏のご協力とこの分野の先進的な取り組みに謝意と敬意を表します。

10. 参考文献

1) 早水　勉, GPS による汎用時刻保持装置の開発, 国立天文台報 第 5 巻 73-79 (2001)
2) 宮下和久, ビデオ画像用光量測定ソフトウエア Limovie の開発と星食観測への応用, 国立天文台報 第 9 巻, 1－26（2006）
3) 藤澤泰充, 発光ダイオードの高速パルス電流に対する応答特性, 照明学会誌 第 81 巻 第 8A 号 (1997)

11.　付録

11-1　LED 信号とフレームの間に微小な時間差をつくる設定

○ 1001 を素因数分解すると　7×11×13 = 1001 となる。この素因数のうち任意の二つを選び掛け算した数値を a 、残る一つを b とする。 a と b を露出時間(msec) とインターバルのどちらかになるように割り振ると 1msec の差を作ることができる。

143msec :	0.143sec * 7frames = 1.001 sec
91msec :	0.091sec * 11frames = 1.001 sec
77msec :	0.077sec * 13frames = 1.001 sec
13msec :	0.013sec * 77frames = 1.001 sec
11msec :	0.011sec * 91frames = 1.001 sec
7msec ;	0.007sec * 143frames = 1.001 sec

これらの場合には、たとえば 11msec の露光時間の場合、91 フレーム進めたところで UTC がフレーム記録時刻に対して 1msec 進むような差が生じる。そのため、1PPS のパルス（光）の立ち上がり時を記録したフレームは、フレームの進みとともにだんだん明るくなる。明るさの変化から、最初に明るくなったフレームの露光終了時刻より 1 PPS の立ち上がり（正秒）が何ミリ秒前だったかを求める。

○ 999 を素因数分解すると、 3×3×3×37 = 999 となる。上記と同様に。

333msec :	0.333sec * 3frames = 0.999 sec
111msec :	0.111sec * 9frames = 0.999 sec
37msec:	0.037sec * 27frames = 0.999 sec
27msec:	0.027sec * 37frames = 0.999 sec
9msec :	0.009sec * 111frames = 0.999 sec
3msec :	0.003sec * 333frames = 0.999 sec

これらの場合は、たとえば 27msec の露光時間を設定したとき、37 フレーム進めたところで UTC がフレーム記録時刻に対して 1msec 遅れるような差が生じる。そのため、1PPS のパルス（光）の立ち上がり時を記録したフレームは、フレームの進みとともにだんだん暗くなる、。明るさの変化から、LED 光が消える直前のフレームから、1PPS の立ち上がりが何ミリ秒後であるかを求める。

※ 上記に準ずるものとしては、何らかの数をかけて 1002msec となるような露光時間を用いる方法がある。ただし、差が 2msec と大きくなり、推定の精度が半分になることが考えられることから、上記が適用しにくいような露光時間に対して用いるようにする。

○　1002 を素因数分解すると 2×3×167 となる。

501msec :	0.501sec * 2frames = 1.002 sec	○ 露光時間が長いので実用的
334msec :	0.334sec * 3frames = 1.002 sec	▲ 0.333* 3= 0.999 で代替できる
167msec :	0.167sec * 6frames = 1.002 sec	▲ 0.143 * 7=1001 で代替できる
6msec :	0.006sec * 167frames = 1.001 sec	▲ 0.007 * 143=1001 で代替できる
3msec :	0.003sec * 334frames = 1.001 sec	▲ 差が露光時間と近く非実用的
2msec :	0.002sec * 501frames = 1.001 sec	▲ 差が露光時間と近く非実用的

○ 1 秒以上の蓄積をかけるなら、下記のように直接作り出せる。

1001msec :	1.001sec * 1frame = 1.001 sec
2001msec :	2.001sec * 1frame = 2.001 sec

上記はミリ秒単位で整数となるような組み合わせの計算であるが、小数で表される数でも解析可能である。詳細は別紙に記すこととする。