

測位衛星の時刻情報を用いたカメラ映像の フレーム時刻推定手法の提案と時刻精度の評価

前田 武大^{1,a)} 安藤 隆史^{1,b)} 木谷 友哉^{1,c)}

概要：本研究では、市販されるカメラデバイスにおける内部クロック精度の誤差に着目し、GNSS（Global Navigation Satellite System）測位の過程で得られる数十ナノ秒精度の時刻情報を用いることで映像データの各フレームの撮影時刻を推定する手法を提案する。実際に市販されるカメラデバイスを用いて撮影した映像データに対して手法を適用したところ、0.927 ミリ秒と 1 ミリ秒未満の誤差でフレーム生成時刻を推定可能であることが示された。

1. はじめに

近年、土木分野を中心に UAV（Unmanned Aerial Vehicle, 無人航空機）による空撮技術が盛んに利用されている [1]。UAV による空撮は移動しながら行われ、どこで撮影されたデータなのか正確に把握するために衛星測位システムによるセンチメートル精度の位置測位を行う場合がある。そのセンチメートル精度の位置情報を正しく映像と突き合わせるためには、映像データにミリ秒精度のタイムスタンプが付与される必要がある。複数データの時刻同期のためにはサンプリングデータに正確な時刻情報を付与することが重要である。

異なるデバイス間の時刻を同期させる手法として、TCP/IP 系のネットワーク上で使用されている NTP（Network Time Protocol）[2] を用いる手法や IEEE1588v2 で規格化されたプロトコルである PTP（Precision Time Protocol）[3] を利用したものがある。NTP は、パケット交換によりサーバ・クライアント間の相対的な時刻差を求め、時刻同期を行う。特定の LAN 内など、安定したネットワーク環境ではミリ秒以下での時刻同期精度が期待される。しかし、相対的な時刻差はサーバ・クライアント間のネットワーク状態に左右されることやパケット交換の往路と復路で経路が異なる可能性があることから高精度な時刻同期は難しい。PTP は、ネットワーク上で時刻同期を行うもので、OS 等の処理能力の影響を受けることなく時刻同期を行うことができる。ソフトウェアでの実現の場合は数十マイ

クロ秒、ハードウェアでの実現の場合は数十～数百ナノ秒レベルの時刻同期精度が期待される。しかし、NTP と同様にネットワーク状態に左右されやすく、ネットワークの両端に常にタイムスタンプを発行する時計といった専用の機器が必要になるなど、安価に利用できるものではない [4]。

著者らの研究グループでは、慣性運動センサに対して衛星測位システム（GNSS: Global Navigation Satellite System）から得られる数十ナノ秒精度の時刻情報を用いてセンシングデータにサブミリ秒精度のタイムスタンプを付与する手法を提案している [5]。時刻情報の付与には GNSS 受信モジュールが出力するタイミングパルスと呼ばれる信号を利用した。タイミングパルスは衛星システム内の原子時計と同期して一定間隔で立ち上がる信号で、その精度は数十ナノ秒かつ、信号の出力された GNSS グローバル時刻もナノ秒の分解能で得られる。一般の機器でサンプリングを行う場合、デバイスのクロック精度は 1 秒に数十マイクロ秒程度の誤差があり、データサンプリングするタイミングもその影響を受ける。研究グループの手法は、GNSS モジュールのナノ秒精度のタイミングと、マイクロ秒精度サンプリングタイミングの差に着目した。クロックの誤差を把握するために、センサデータサンプリングと同時にタイミングパルス信号を取得し、サンプルデータ内に 1bit の情報として埋め込んだ。その 1bit の情報をもとにデータ処理することで、統計的にサンプリング時刻を推定した。この手法は、サンプリング周波数に推定精度が依存するが、1000Hz サンプリングにおいて時刻付与精度数十マイクロ秒を実現できる。

本研究は、UAV による空撮をターゲットとする。空撮に用いられる UAV の移動速度は秒速 10m から 30m であ

¹ 静岡大学 大学院総合科学技術研究科 情報学専攻

^{a)} t-maeda@kitanilab.org

^{b)} t-ando@kitanilab.org

^{c)} t-kitani@kitanilab.org

り [6], 今回は例として秒速 10m で移動する場合を想定する。また, 移動中の車体の姿勢角などは無視し, 鉛直方向下向きに撮影するものとする。秒速 10m で移動する場合, 1 ミリ秒では 1cm 移動することになる。ここで空撮と同時に RTK (Realtime Kinematic)*1 測位技術によるセンチメートル精度での位置測位を行うことを考えると, 時刻精度も 1 ミリ秒精度が必要となる。

そこで本研究では対象を安価な UAV に搭載する一般的な市販のカメラデバイスとし, カメラデバイスから得られる映像データにフレーム生成時刻を推定する手法を提案する。その手法を実際に映像データに対して適用した結果について示す。

2. GNSS 時刻情報を用いたフレーム生成時刻推定手法

本章では, 手法に利用する GNSS 測位の過程で得られる時刻情報の概要と映像データのフレーム時刻を補正する必要性について説明し, 映像データのフレーム生成時刻を推定する手法について述べる。

2.1 タイミングパルス信号の概要

GPS (Global Positioning System) に代表される GNSS は位置情報サービスに用いられるだけでなく, 時刻情報を利用する分野においても利用されている。地球上において位置を算出するためには, 複数の衛星から受信した信号を利用して衛星からの距離を算出する。そして, それぞれの整合性が合う位置を推定することで自己位置を算出している。これを実現するため, GNSS は GNSS 時刻と呼ばれる正確な時刻を基準に構築されている [8]。それらの時刻系は, 米国海軍天文台の管理する時刻系である, UTC (Coordinated Universal Time, 協定世界時) に同期するように管制制御されている [9]。各衛星には原子時計が搭載され, 各衛星間の時刻情報は高精度に同期されている。衛星ごとに生じる時刻誤差は, 地上の管制センターによって監視され, 誤差量を電波に乗せて放送している。そのため, 全衛星は数十ナノ秒で同期された時刻となっている。

GNSS 測位によって得られる正確な UTC 時刻やタイミングパルスは様々な分野で利用されている。多くは時刻同期を目的とした利用であり, 樊ら [10] は, 水中における測距のために音源と受信機の時刻を GPS 時計に同期させるための研究を行った。GNSS 受信モジュールには位置情報や時刻情報だけでなく, タイミング情報を出力する製品は多くある。例えば, 数千円程度で購入可能なモジュールでも UTC の毎秒コンマゼロ秒に矩形波の立ち上がりが発生する 1PPS (Pulse Per Signal) 信号 (図 1) を出力する機

能を備えている [11]。一般的な GPS 受信モジュールではタイミングパルスは 1PPS の固定出力であるが, 我々が使用している数万円程度の GNSS 受信モジュールはタイミングパルスの出力間隔をナノ秒精度で変化させることが可能である [12]。本稿では PPS 信号をまとめてタイミングパルスと呼ぶ。

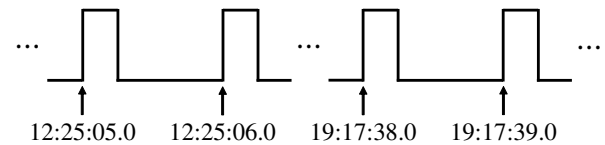


図 1 PPS 信号の出力

2.2 カメラデバイスのフレーム生成精度

市販のカメラデバイスをはじめとする電子機器には水晶振動子によるクロックが搭載されることが多い。一般的な水晶振動子の精度は 10ppm (Parts Per Million) から 100ppm 程度である [13]。このクロック誤差量は発振器の個体, 使用環境によって異なるため, 一定のオフセット補正で対応できるものではない。つまり, 異なるデバイスで集めたデータをサブミリ秒以下の精度で統合することは難しい。したがって, 複数のデータを統合するにはクロックを補正, あるいはデータに付与された時刻情報の補正が必要となる。

2.3 タイミングパルスを用いたフレーム生成時刻推定手法

ここまでで述べたタイミングパルスを用いて映像データのフレーム生成時刻を推定する手法について述べる。手法は, 第 1 ステップとして実際のフレームレート (f_r) を推定する。第 2 ステップとして推定したフレームレートでフレーム生成した場合と理想的なフレームレート (f_0) でフレーム生成した場合で生じる, フレーム生成タイミングの規則的な関係に着目する。その規則性に基づいて実際のフレームの中で最も理想的なフレーム生成タイミングに最も近いデータを抜き出し, そのデータを基準に時刻付与することで, 誤差の小さい時刻を付与するというロジックである。

2.3.1 実フレームレートの推定

まず, 映像データにフレーム生成時のタイミングパルス信号の信号出力の有無を記録する必要がある。付与の方法として, 1/0 の信号を撮像素子の一部に記録させることで映像データに付与する方法も考えられるが, 一般的なカメラデバイス内部に信号を送信することは難しい。そこで本研究では, タイミングパルス信号を発光ダイオード (LED) に接続し, 光としてカメラ映像内に写り込ませることで信号状態を付与する (図 2)。

映像フレームデータをタイミングパルスの立ち上がりに

*1 衛星データと電子基準点からの補正情報を組み合わせ, 移動局の位置をセンチメートル精度でリアルタイムに決定する位置測位技術 [7]

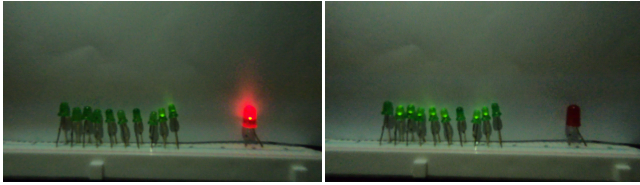


図 2 フレームデータに付与したタイミングパルス情報
(左：立ち上がり時，右：立ち下がり時)

よってデータ分割すると、パルスの出力間隔 (W 秒) ごとにフレーム生成したフレームデータのデータ群を生成できる。本稿ではその W 秒分のデータ群の一つ一つをセクタと呼ぶ。

カメラデバイスで撮影した映像データからフレームデータを特定できると、各 W 秒あたりのフレーム数、そして大まかなフレームレートを推定することができる。例として 1PPS に設定 ($W = 1$) し、想定されるフレームレート (f_0) を 4fps として映像データを撮影した場合のフレームデータを図 3 に示す。

時刻 t が先頭のセクタに含まれるフレーム数を $n(t)$ とする。一定時間内 (T_A) のセクタにおける合計フレーム数を算出し、それをセクタ数で割ることで次式のような形で実際のフレームレート (f_r) を推定することができる。前提として、計算に必要な一定時間内のカメラデバイスにおけるクロック周波数は変化しないものとする。

$$f_r = \frac{n(t) + n(t+1) + \dots + n(t+T_A)}{W \cdot T_A} \quad (1)$$

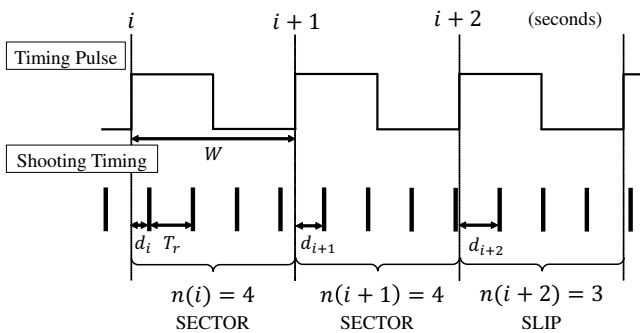


図 3 フレームデータの例

2.3.2 フレーム生成時刻の規則性

フレームレートが一定であり、理想的なフレーム数と実フレームレートが異なる場合、理想的なフレーム生成タイミングを基準に見たときに実フレーム生成タイミングの時間軸の位置関係が規則的に変化する。この規則性に着目し、タイミングパルスの立ち上がり時刻に最も近いフレームを探す。図 3 において、タイミングパルスの立ち上がりとその直後のフレームの間の時間 d_i に着目すると、単調増加するような規則的な変化となる。 d_i に規則的な変化が生

じることは、図 3 中の要素を用いると次式で示すことができる。

$$d_i + (f_0 - 1)T_r + T_r - d_{i+1} = 1$$

$$\begin{aligned} d_i - d_{i+1} &= 1 - (f_0 - 1)T_r - T_r \\ &= 1 - T_r \cdot f_0 \end{aligned}$$

d_i と d_{i+1} について、 $f_r > f_0$ のときは $T_r = 1/f_r$ から $T_r < 1/f_0$ となるため、 $W - T_r f_0 > 0$ となる。したがって、 $d_i > d_{i+1}$ であり単調減少となる。 $f_r < f_0$ のときは $T_r > 1/f_0$ となるため、 $W - T_r f_0 < 0$ となる。したがって、 $d_i < d_{i+1}$ であり単調増加となる。

また、タイミングパルス出力間隔 W 秒におけるフレーム数は次式で求めることができる。本稿では、図 3 における $n(i+2)$ のような 1 秒あたりのフレーム数が f_0 以外のセクタをスリップと呼ぶ。

$$n(i) = \begin{cases} f_0 + 1 & (f_r > f_0 \text{ and } d_i < 1 - (T_r \cdot f_0)) \\ f_0 - 1 & (f_r < f_0 \text{ and } d_i > 1 - (T_r \cdot (f_0 - 1))) \\ f_0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

単調変化する時間間隔は次式で示すことができる。ここで、スリップの発生から次のスリップの発生の間での間をブロックと名付ける。各ブロック内での d_i の単調変化を v_i 、各ブロック境界での変化を v_2 とする。

$$v_1 = \frac{f_0}{f_r} - 1 \quad (2)$$

$$v_2 = \begin{cases} \frac{f_0}{f_r} - 1 + T_r (f_r > f_0) \\ \frac{f_0}{f_r} - 1 - T_r (f_r < f_0) \end{cases} \quad (3)$$

2.3.3 タイミングパルスを利用したフレーム生成時刻推定

ここまで述べた単調変化する規則性に着目すると、 d_i は k セクタ後のスリップが発生するまで単調的に値が増減するため、各ブロック内 (セクタ i からセクタ $i+k$) で最も d_i がタイミングパルスの立ち上がり時刻に近いセクタを断定することが可能である。 $f_0 < f_r < f_0 + 0.5$ の場合、 d_i は単調減少するため $d_i \approx 0$ となるセクタはブロックの末尾のセクタ ($i+k$) の先頭のフレームが該当する。 $f_0 - 0.5 < f_r < f_0$ の場合、 d_i は単調増加するため $d_i \approx 0$ となるセクタはブロックの先頭のセクタ (i) の先頭のフレームが該当する。

1 秒あたりのフレーム数から特定したタイミングパルス

の立ち上がり時刻に最も近いフレームと d_i は、 d_i が単調変化する規則性のもとスリップの発生間隔 (T_s) によって特定できる。変化量が一定であることから $0 \leq d_i \leq T_r$ の時間を T_s 回に分けて単調増加もしくは単調減少すると考えると、 d_i の最小は $0 \leq d_0 \leq T_r/T_s$ となる。例えば、1PPS であり 5 秒おきにスリップが発生する場合 ($T_s = 5$)、 d_0 の最大は $T_r/T_s = T_r/5$ となる。これを実フレームレートを f_r としたとき、次式となる。タイミングパルスの立ち上がり時刻と各ブロック内で d_i が最小となるフレームとの間の時間を d_{min} とする。

$$T_s = \frac{1}{|f_0 - f_r|} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} d_{min} &< \frac{T_r}{T_s} \\ d_{min} &< \frac{f_0 - f_r}{f_r} \end{aligned} \quad (5)$$

これらの規則性に基づき、各ブロック内で d_i が最小となるフレームに対して、タイミングパルスが出力された時刻を付与することで、実フレーム時刻間隔の $1/T_s$ の誤差で時刻を付与することができる。また、フレームレートの変動が小さい場合、各ブロック内で d_i が最小となるフレームを基準に前後のフレームに対して推定フレーム時刻間隔 T_r による線形的な時刻付与ができ、すべてのサンプルに対して、 $1/T_s$ の誤差で時刻付与が可能となる。

2.3.4 タイミングパルス信号を変化させることによるフレーム時刻精度の調整

タイミングパルスを 1PPS で固定出力した場合、実フレームレートによっては推定できない場合が発生する。スリップが発生しないために推定手法を適用できない場合として、フレームレートが偶然にも理想のフレームレートに近い場合が挙げられる。そのような場合は、タイミングパルスの出力間隔を実フレームレートを考慮して適切に設定することで、任意のスリップを生じさせることで解決する。

ここで、 $W = 1$ の場合の f_0 , f_r , d_i を、 $W = 1$ 以外に拡張した値 f'_0 , f'_r , d'_i として、新たに定義する。

$$f'_r = \frac{n(t) + n(t+1) + \dots + n(t+T_A)}{W \cdot T_A}$$

$$d'_i + W \cdot (f'_0 - 1)T'_r + T'_r - d'_{i+1} = W$$

$$\begin{aligned} d'_i - d'_{i+1} &= W - W \cdot (f'_0 - 1)T'_r - T'_r \\ &= W - W \cdot T'_r \cdot f'_0 \end{aligned}$$

$$n(i) = \begin{cases} f'_0 + 1 & (f'_r > f'_0 \text{ and } d'_i < W - (W \cdot T'_r \cdot f'_0)) \\ f'_0 - 1 & (f'_r < f'_0 \text{ and } d'_i > W - (W \cdot T'_r \cdot (f'_0 - 1))) \\ f'_0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

また、 d'_i の変化量を v'_1 , v'_2 としたとき、式 2、式 3 をもとに次式で示すことができる。

$$v'_1 = \frac{f'_0}{f'_r} - 1$$

$$v'_2 = \begin{cases} \frac{f'_0}{f'_r} - W + T'_r & (f'_r > f'_0) \\ \frac{f'_0}{f'_r} - W - T'_r & (f'_r < f'_0) \end{cases}$$

スリップの発生間隔を T'_s としたとき、式 4 をもとに次式で示すことができる。

$$T'_s = \frac{1}{|f'_0 - f'_r|}$$

時刻精度 (T_a) と所望の精度になるための 1 セクタあたりのフレーム数 f''_r の関係性は、式 5 より、次式となる。

$$T_a = \frac{1/f''_r}{1/(f'_0 - f'_r)}$$

$$T_a \cdot f''_r = f'_0 - f'_r$$

$$T_a \cdot f''_r + f'_r = f'_0$$

$$f''_r \cdot (T_a + 1) = f'_0$$

$$f''_r = \frac{f'_0}{T_a + 1}$$

所望の f''_r は、 $f''_r = f'_r \cdot W$ とできるため、タイミングパルス間隔 W は、 f''_r/f'_r とすれば良い。これにより、任意の時刻精度を達成できる。

3. 検証実験

本章では、提案手法の時刻推定精度について一般的なカメラデバイスを用いて検証、評価を行う。

3.1 検証方法

時刻の推定精度の確からしさの評価には、測位衛星の絶対時刻と同期した情報が必要となる。そこで検証のためにタイミングパルスと同期する LED とは別に 10 個の LED の点滅によって時刻情報を表すようにする。具体的には、10 個の LED はマイクロコントローラ (M5Stack[14]) に接続されており、タイミングパルスが立ち上がるごとに 1kHz でカウントするプログラムが動作する。各秒数の小数部を 1000 倍したものを 2 進数に変換し、1/0 を点灯・消灯で表現することによって時刻情報を表す。ここで用いる

M5Stack は、FreeRTOS によるマルチタスク制御が可能である。マルチタスク制御により処理を分散させることで、割り込み処理などによる時刻計算のずれが生じないようにする。GNSS 受信モジュールの PPS ピンから M5Stack へ タイミングパルス信号を入力させるようにし、一方のコアでタイマ割り込みによる 1 ミリ秒単位の計算、他方で LED の点滅の処理を行う。

検証の流れは以下の通りである。撮影した映像データをフレームごとに分割し、GNSS 受信モジュールの PPS 信号に同期した LED の点灯・消灯状態をフレームから目視で確認して単位セクタに分割する。セクタあたりのフレーム数を求め、スリップの発生するセクタを特定する。各セクタにおけるタイミングパルスの立ち上がり時刻に最も近いフレームを抽出する。提案手法によって推定時刻の付与とフレームに写るマイクロコントローラに接続された 10 個の LED から実時刻を推定する。提案手法の推定時刻と 10 個の LED から読み取った時刻を比較することで実時刻との差を比較する。

検証に使用する機材を表 1 に、システム構成図を図 4 に示す。これらの機材を用いて約 1 分間撮影を行う。カメラデバイスにはフレームレートやシャッタースピード等を変更できる GoPro[15] を用いる。そして、1 ミリ秒単位で点滅する LED の点灯・消灯を把握するために、フレームレートを 120fps、シャッタースピードを 1/1920 秒に設定する。また、撮影した映像データのフレーム分割には画像処理ライブラリである、Python 版 OpenCV[16] を使用する。

表 1 使用機材

使用機材	
カメラデバイス名	GoPro HERO6 BLACK
品番	CHDHX-601-FW
フレームレート	120fps
シャッタースピード	1/1920 秒
解像度	1080p (1920×1080 ピクセル)
保存形式	H.264/MPEG-4
マイクロコントローラ	M5Stack 社製 M5Stack Basic (ESP32 搭載)
GNSS 受信モジュール	SparkFun 社製 GPS-RTK2 (u-blox 社製 ZED-F9P 搭載)

3.2 実験結果

各セクタにおけるフレーム数をまとめたものを図 5 に示す。

図 5 から、9 秒ごとにスリップが発生している。各セクタにおけるフレーム数を式 1 に代入することで推定される実フレームレート f_r を算出する。

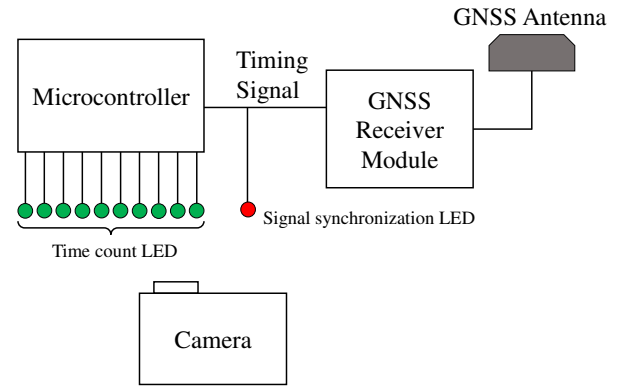


図 4 システム構成図

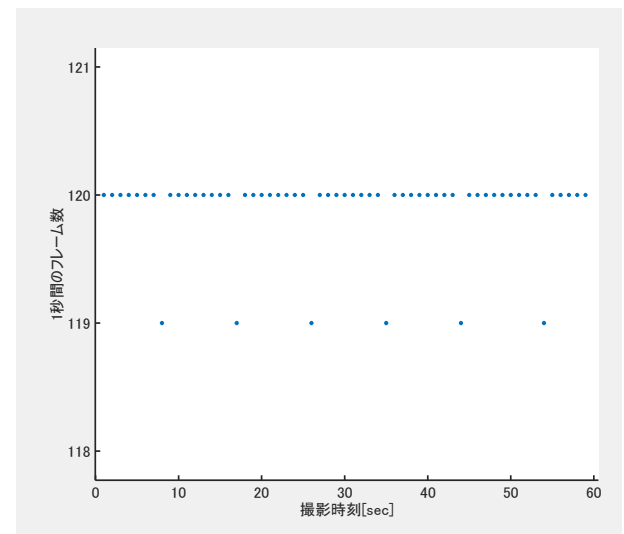


図 5 各セクタにおけるフレーム数

$$\begin{aligned}
 f_r &= \frac{n(t) + n(t+1) + \dots + n(t+T_A)}{W \cdot T_A} \\
 &= \frac{120 + 120 + \dots + 119}{1 \cdot 9} \\
 &= \frac{1079}{9} \approx 119.889[\text{fps}]
 \end{aligned}$$

続いて、タイムカウント用 LED の点灯・消灯から読み取られる、各セクタにおけるタイミングパルスの立ち上がり時刻に最も近いフレームの秒数を図 6 に示す。

$f_0 = 120$, $f_r = 119.889$, $T_s = 9$ とし、式 5 に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 d_{\min} &< \frac{T_r}{T_s} \\
 d_{\min} &< \frac{f_0 - f_r}{f_r} \\
 &= \frac{120 - 119.889}{119.889} \\
 &= \frac{1}{1079} \approx 0.0009268[\text{sec}] \\
 &= 0.927[\text{msec}]
 \end{aligned}$$

映像データのフレームのうち、ある 1 秒間についてタイ

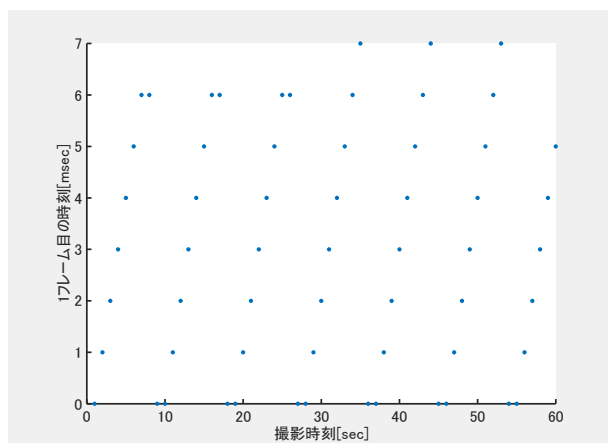


図 6 各セクタの 1 フレーム目の秒数

ミングパルスの立ち上がり時刻に最も近いフレームの秒数を基準として、推定したフレームレートをもとに線形的にタイムスタンプの付与をした。結果、付与した時刻とフレーム内の LED から読み取ることのできる時刻との差の平均は 0.447 ミリ秒、標準偏差は 0.365 であった。

3.3 提案手法の適用による評価

前節の結果から提案手法について評価する。

実際にカメラデバイスを用いて映像データをフレーム分割し、フレームレートの推定、フレーム生成時刻の推定を行った結果、タイミングパルスの立ち上がり時刻と各ブロック内で d_i が最小となるフレームとの間の時間は最大で 0.927 ミリ秒となり、1 ミリ秒未満の誤差でフレーム時刻を推定することが可能であることが示された。タイミングパルスのみで時刻推定した場合、1 フレーム分の誤差 (120fps においては 8.333 ミリ秒) が生じてしまうが、提案手法により 1/10 程度の誤差に抑えることができた。しかしながら、各フレームに写る LED を目視によって確認していることや、LED の点灯・消灯時の残像が写り込むことが原因となる実フレーム生成時刻の差異が考えられるため、実用上では高精度に時刻を付与できる仕組みを考える必要がある。

4. 結論

本稿では、クロック誤差等に起因するカメラデバイスの内部時刻精度の低下に着目し、それらを GNSS 測位の過程で得られる数十ナノ秒精度の時刻情報を利用することで映像データのフレーム生成時刻を推定する手法を提案した。そして実際にカメラデバイスから得られた映像データに適用することで、その手法の評価を行った。映像データから実フレームレートの推定、フレーム生成時刻の推定を行った結果、タイミングパルスの立ち上がり時刻と各ブロック内で d_i が最小となるフレームとの間の時間は最大で 0.927 ミリ秒となった。また、ある 1 秒間の各フレームに付与し

た時刻とフレーム内の LED から読み取ることのできる時刻との差の平均は 0.447 ミリ秒、標準偏差は 0.365 であった。このことから 1 ミリ秒未満の精度で時刻推定が可能である。

今後は、より高精度に時刻推定を行えるような仕組みや想定される環境における映像データの撮影を行う必要がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H01731 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 井上 公, 内山庄一郎, 鈴木比奈子: 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術, 防災科学技術研究所研究報告, No. 81, pp. 61–98 (2018).
- [2] Mills, D. L.: Internet Time Synchronization: the Network Time Protocol, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, pp. 1482–1493 (1991).
- [3] IEEE Instrumentation and Measurement Society: *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, IEEE (2008).
- [4] 岩間 司: ICT 社会を支える時刻同期技術, 情報処理, Vol. 57, No. 1, pp. 52–57 (2015).
- [5] 安藤隆史, 木谷友哉: 高精度衛星測位情報を付加した時刻同期可能なセンシングデータ生成プロセスの開発, 自動車技術会 2019 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, No. 138-19 (2019).
- [6] 大迫貴之, 米山兼二郎: 6. 小型 UAV を用いた広域航空写真撮影, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 48, No. 5, pp. 281–284 (2009).
- [7] 国土地理院: ネットワーク型 RTK 測量について, <https://www.gsi.go.jp/common/000080891.pdf>. Accessed Feb. 12, 2020.
- [8] 近藤仁志: GPS 受信機を用いた時刻・タイミング生成とそのアプリケーション, システム/制御/情報, Vol. 51, No. 6, pp. 273–278 (2007).
- [9] 豊泉裕章, 源田正弘: GPS による精密 1PPS 信号出力, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門, Vol. 125, No. 8, pp. 1217–1222 (2005).
- [10] 樊 春明, 浪江宏宗, 古澤昌彦, 本多由希子, 安田明生: GPS による時刻同期を用いた水中計測に関する研究, 日本航海学会論文集, Vol. 108, pp. 157–163 (2003).
- [11] 秋月電子通商: GPS 受信機キット 1PPS 出力付き「みちびき」3 機受信対応, <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-09991/>. Accessed Feb. 7, 2020.
- [12] u-blox: ZED-F9P module, <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>. Accessed Feb. 7, 2020.
- [13] 安井 吏: 7-1 振動子の精度, トランジスタ技術, Vol. 2010, No. 12, p. 147 (2010).
- [14] M5Stack: M5Stack - Modular Rapid ESP32 IoT Development Board, <https://m5stack.com/>. Accessed Feb. 14, 2020.
- [15] GoPro: GoPro Official Website, <https://gopro.com/>. Accessed Feb. 12, 2020.
- [16] OpenCV: OpenCV, <https://opencv.org/>. Accessed Feb. 6, 2020.