

## GPSを用いた高精度遅延計測装置の開発

土井 望<sup>†</sup> 遠藤 慶一<sup>‡</sup>  
愛媛大学工学部情報工学科<sup>†</sup>

黒田 久泰<sup>‡</sup> 小林 真也<sup>‡</sup>  
愛媛大学大学院理工学研究科<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

産業の現場において遠隔地から現場の装置に対して遠隔操縦を行うことで人件費の削減などが期待できる。遠隔操縦をする際、操作反映までの通信遅延は事故発生の危険性を高める。産業の現場で操作に対する反応の遅延は100ms程度であれば許容される場合が多い。また4Gと5Gの違いの1つとして無線区間での通信遅延が10msから1msまで短縮され、その差を調べるには1msの精度で通信遅延の測定を行える必要がある。通信遅延の計測を行う手法としてpingコマンドがある。しかしpingコマンドは往復の遅延時間を計測しており、回線の非対称性から往路と復路の遅延の同一性は保証されず、単純に往復の遅延時間を半分にしただけでは、片方向の遅延時間の精度の保証ができない。そのためpingコマンドを用いた計測は十分な精度であるとは言えない。そこで本研究ではGPS受信機、Raspberry Pi4 Model Bを用いて、小型で安価な通信遅延計測を行える装置の開発を行った[1]。開発した装置は、GPSに搭載された原子時計と時刻同期を行い正確な時刻を得ている。そのため2台の装置を用いた際、2台の装置内の時計は限りなく等しいため、通信経路の往路、復路それぞれで通信遅延の測定を1msの精度で行うことができる。

## 2. 通信遅延計測装置の概要

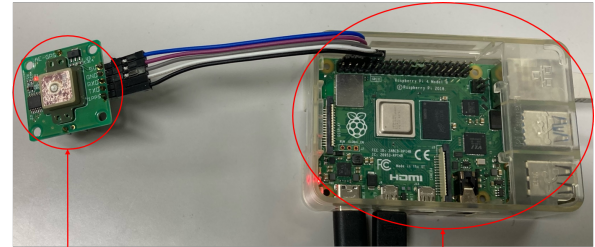
## 2.1. 装置の構成

本研究で用いた通信遅延計測装置は、GPS受信機、Raspberry Pi4 Model Bから構成される。実際の装置を図1に示す。Stratum-0のGPSと時刻同期を行うことで原子時計に準ずる高い精度の時刻を得られる。またGPSを受信している間はGPS受信機から出力される1PPS信号で補正を行い、より正確な時刻を取得している。

## 2.2. 計測手順

計測には装置2台を用いる。2台の装置がそれぞれGPSと時刻同期を行うことで、それぞれの時計が同じ時刻であるとみなせる状態で計測を行う。計測手順を図2及び、下記に示す。

1. GPS受信状況、GPSとPPS信号の同期状況を確認
2. 装置Aからの送信時刻の情報を含むパケットを装



GPS受信機

Raspberry Pi4 Model B

図1: 通信遅延計測装置

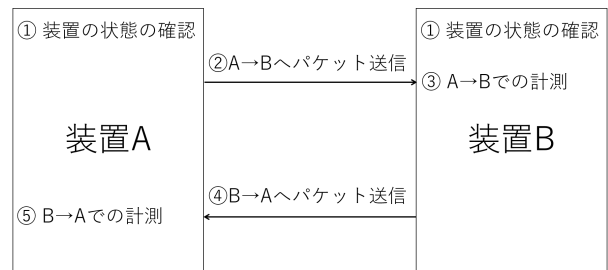


図2: 計測手順概要図

置Bへ送信

3. 装置Bは装置Aからのパケットを受信した後、直ちに受信時刻を記録し、装置Aからの送信時刻との差から装置A→装置Bの通信遅延時間を計算
4. 装置Bからの送信時刻の情報を含むパケットを装置Aへ送信
5. 装置Aは装置Bからのパケットを受信した後、直ちに受信時刻を記録し、装置Bからの送信時刻との差から装置B→装置Aの通信遅延時間を計算

## 3. GPSの受信ができない場合の計測

実際に産業の現場での通信遅延計測装置の使用を考えた場合、GPSの受信が難しい環境での使用が考えられる。実際の時刻は時間経過と共に進んでおり、装置内の時計はGPSと同期を取れている間は、実際の時刻とほぼ等しく時間経過と共に進んでいる。そのため計測結果に対して1msの精度を保証できている。しかし、装置内の時計はGPSと同期を取れていない場合、時間経過によって実際の時刻とのずれが生じる。現実時間を横軸、時計の示す時間を縦軸とした場合の時計のずれの広がりを図3に示す。図中の実線が現実時間と時計の示す時間が等しい理想的な時計を表しており、点線が現実時間と時計の示す時間にずれのある時計を表す。理想的な時計とずれのある時計の間での時間のずれは、現実時間の経過に伴って増加すると考えられる。そこでこの時間のずれに対して短い時間で考えたとき、線形とみなし

Developing communication delay measurement equipment with high accuracy by use of GPS

<sup>†</sup>N. Doi

Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Ehime University

<sup>‡</sup>K. Endo, H. Kuroda, S. Kobayashi

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

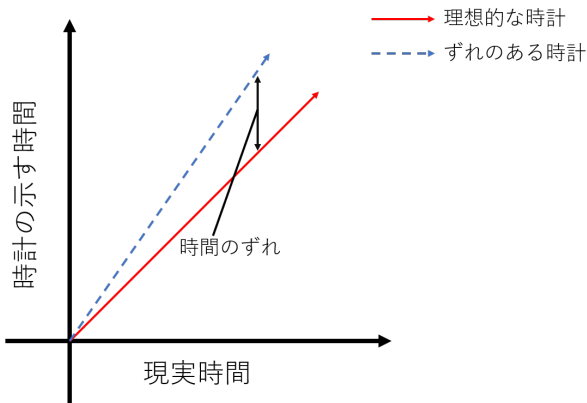


図 3: 時計のずれの広がり

補正を行う。つまり、GPS を受信できておらず、ずれが発生している装置内の時計を用いて計測を行った計測結果に対して、改めて GPS を受信し同期をとった際に分かる理想的な時計に限りなく等しい状態の装置内の時計と発生していた時刻のずれを用いて線形補正を行う。ここで、この補正を行った計測結果に対して 1ms の精度を保証するためには線形補正の誤差を  $\pm 0.5\text{ms}$  の範囲を満たす必要がある。その範囲を明らかにするためには GPS を受信できていない時間と装置の時計のずれを計測する必要がある。そこで装置に対して GPS の受信ができない状態でどの程度の時間のずれが発生するか計測を行った。

### 3.1. 計測手順

GPS との同期を一時的に止めることで、GPS の受信ができない状況を作る。計測の手順を下記に示す。

1. GPS モジュールから得られる時刻情報と PPS 信号に、装置内時計が同期を行えているか確認し、確認がとれた場合手順 2 に進み、とれない場合は手順 1 を反復
2. 装置が、GPS モジュールとの同期を停止するように設定を変更
3. 手順 2 で変更した設定の適用を行う
4. 手順 3 における装置内時計の時刻を記録 (直前まで同期を行っていたため装置内時計と GPS の時刻はほぼ等しい)
5. 時間経過を待つ
6. 装置が、GPS モジュールとの同期を再開するように設定を変更
7. 手順 6 で変更した設定の適用を行う
8. GPS モジュールとの同期再開後に、装置内時計を修正した時間と、同期完了の際の装置内時計の時刻を記録
9. 手順 8 で記録した「同期完了の際の時刻」と「修正した時間」との差が、装置内時計の同期再開の時刻となる
10. 手順 9 で求めた「同期再開の時刻」と手順 3 で記録した「同期停止の時刻」との差が、装置内時計の同期を行っていない時間となる

表 1: 修正時間の平均、標準偏差、最大修正時間

装置	平均 [ms]	標準偏差 [ms]	最大修正時間 [ms]
装置 A	-5.696	5.664	-14.536
装置 B	-4.860	4.624	-11.724
装置 C	-3.988	7.349	-14.558

11. 手順 10 で求めた装置内時計の時間における装置内時計のずれが、手順 8 で記録された修正時間となる

### 3.2. 計測結果

通信遅延計測装置 3 台、装置 A、装置 B、装置 C を用いてそれぞれで 11 回計測を行った。約 1 時間での修正時間の平均、標準偏差、最大修正時間を表 1 に示す。加えて現実時間の経過に伴ってずれが増加するか確かめるために約 24 時間での計測を数回行った。実測値としては 50ms から 100ms のずれが発生しており、1 時間でのずれ量から増加していることが分かった。この結果から、 $-5\text{ms}$  程度の時刻修正が平均して 1 時間の GPS を受信できない状態行われることが分かる。また標準偏差の値が 5ms 程度あり、 $-10\text{ms}$  程度の時刻修正が起こる。さらに実測値としては  $-15\text{ms}$  程度の時刻修正が行われている。このとき、実際の時刻を  $y[\text{ms}]$ 、経過時間を  $x[\text{ms}]$  とすると、 $y = x$  が成り立つ。修正時間を  $t[\text{ms}]$  としたとき、GPS を受信できない状態での端末の時計は  $y + t$  で表せ、傾き  $a$  を用いると  $y + t = ax$  と表すことができる。ここで 1 時間、 $3600000\text{ms}$  における実測値として大きかった修正時間  $-15\text{ms}$  を用いると  $3600000 - 15 = 3600000a$  が成り立つ。また線形補正の誤差を  $\pm 0.5\text{ms}$  の範囲を満たすためには、 $y + 0.5 = ax$  を満たす  $x$  から、 $y - 0.5 = ax$  を満たす  $x$  の間の時間であればよい。これらを解くと  $x = -119904.077\text{ms}$ 、から  $x = 119904.077\text{ms}$ 、つまり約 33 分の間であればよい。しかし 33 分の場合、装置の時間のずれの揺らぎによっては 1ms の精度を保証できない恐れがあるため、GPS を受信できない状態になってから 20 分間を 1ms での精度を保証した補正を行うことができる時間とした。

### 4. おわりに

本研究では GPS を受信することで 1ms の精度で通信遅延の測定を行うことができる装置の、GPS を受信出来ない場合での精度を明らかにした。この結果、GPS を受信できない場合においても 20 分間であれば 1ms の精度の保証を線形に補正を行うことで得ることができるようになった。

現在、計測を行うには CUI 上で操作者が複数の操作を行う必要がある。そのため今後は GUI で操作を行い計測を行うためのデスクトップアプリケーションの作成を行う。

### 参考文献

- [1] 越智雅人, 遠藤慶一, 黒田久泰, 小林真也, “非対称通信回線に対する高精度遅延計測装置”, 情報処理学会第 83 回全国大会講演論文集 (4), pp.309-310, 2021.