

1ms オーダーで計測可能な片方向通信遅延連続計測装置

羽原 将貴[†] 遠藤 慶一[‡]
愛媛大学工学部工学科[†]黒田 久泰[‡] 小林 真也[‡]
愛媛大学大学院理工学研究科[‡]

1 はじめに

産業現場では遠隔操縦を実現する際に、通信が低遅延であることが求められる。クレーン運転等における操作反応時間は 100ms 以内であることが求められている。また、金属加工の工作機器の遠隔制御では、より短い遅延時間となることが求められている。しかし、IP 通信において通信遅延は常に一定ではない。そのため、遅延変動しても、その大きさが許容範囲内であることが確認できなければ遠隔操縦や遠隔制御の実現は不可能である。したがって遠隔操縦や遠隔制御の実現には、遅延変動を計測でき、その大きさが許容範囲内であると確認できる必要がある。

ローカル 5G と地域閉域網により、低遅延、高速な工場間ネットワークの実証が進められている。5G の無線区間の遅延は 4G の 1/10 程度に減少している。5G によって通信遅延が短縮されたことで 4G では実現できなかった金属加工の工作機器の遠隔制御が可能になると考えられている。2021 年度に、愛媛県内 2 拠点間で、エンドツーエンドでの通信遅延計測を行った [1]。その計測は日時を決めての単発的な計測に留まっていた。しかし、産業活動においては、連続的な通信の安定性が求められることから、持続的な計測を行う必要がある。そこで、1ms オーダーで連続して遅延計測が可能な通信遅延計測装置の開発を行い、評価する。

2 システム概要

遅延計測には、計測装置間の時刻を同期する必要がある。時刻が同期できていなければ装置間の時刻のずれの分だけ計測結果にずれが生じる。今回作成した装置のハードウェア構成図を図 1 に示す。図 1 のように Raspberry Pi に GPS 受信機を 1 台を接続したものを通信遅延計測装置の送信元、もうひとつ Raspberry Pi に GPS 受信機を接続したものを送信先として、2 台用意することでそれらの間の通信遅延が計測できる。作成した装置の時刻同期は計測装置の持つ GPS 受信機を利用して時刻を補正する方法、別途用意したタイムサーバに時刻同期を行う方法の 2 つに対応できる。そのどちらかの方法を環境によって選択し、遅延計測を行える。遅延計測に

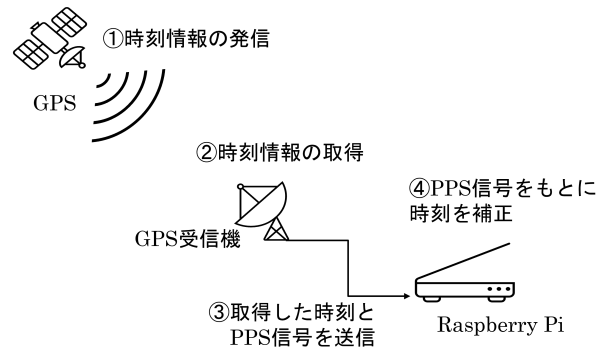


図 1 通信遅延計測装置の構成図

加えて、装置は GPS に準ずる Stratum 1 のタイムサーバとして使用でき、これら三役を 1 台で状況に応じて果たせる。

2.1 時刻合わせの方法

2.1.1 GPS 受信機を利用して時刻を補正する場合

使用時には、図 1 の GPS 受信機を窓際など衛星受信が 4 台以上可能な場所を探して設置する。4 台以上の衛星受信が可能な時、時刻補正には GPS 受信機内部にある水晶振動子に電圧をかけることで 1 秒ごとに発生する Pulse per Second (以下: PPS) を利用する。本研究では PPS の立下りエッジのタイミングを時刻補正に使用する。GPS 受信機から PPS が発信され、Raspberry Pi で受信したら PPS のエッジのタイミングで割り込みをかける。割り込みがかかると、装置内部の時刻を読み取り、その時刻情報の小数点以下を四捨五入し、内部時計に設定し直す手順を即座に行うことで内部時計の時刻が更新され PPS のエッジのタイミングと 0 秒のタイミングを合わせられる。従来法であれば GPS 情報を基に計算で徐々に時刻を補正していたが割り込みを持ちこいることで計算時間を省略して補正できる。また、PPS による割り込みは 1 秒間隔で連続して起こるため、時刻情報は継続して補正可能である。

2.1.2 タイムサーバに時刻同期を行う場合

GPS 受信機で衛星受信数が 4 台を下回った時、PPS が発生しないため GPS 受信機を利用して時刻を補正する方法は利用できない。別途用意したタイムサーバに定期的に時刻同期を行う方法で代用できないか考えた。そこで 1 分毎にタイムサーバに同期をかけた場合に発生する装置内部の時刻が 0 秒となるタイミングと PPS の立下りエッジのタイミングのずれを計測した。ずれが $500\mu\text{s}$ を超えていた場合、前後で 1ms のずれが生じるため、タイムサーバへ同期をかける方法は使用できない。調べる際に使用する装置 A、装置 B それぞれで使用予定の異なるタイムサーバに同期をかけた。そして、タイムサーバと装置 A、B の間にそれぞれハブを 1 台ずつ接続

The system measuring one way communication delay on the order of one millisecond

[†] M. Habara

Department of Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

[‡] K. Endo, H. Kuroda, S. Kobayashi

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

表1 PPSのタイミングと時刻のずれ(μs)

| 装置 | 平均 | 最大値 | 最小値 | 標準偏差 |
|-----|-------|-------|--------|-------|
| 装置A | 6.1 | 154.0 | -15.0 | 15.7 |
| 装置B | 125.3 | 430.0 | -163.0 | 163.1 |

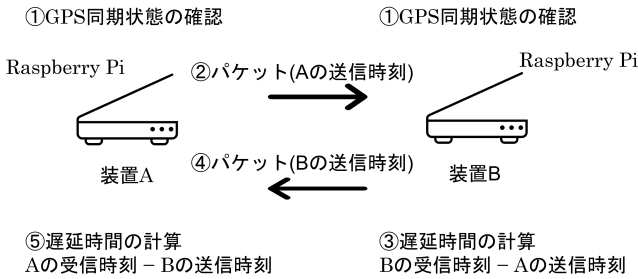


図2 エンドツーエンドの通信遅延の計測方法

して調べた。計測結果は表1になった。装置Aでは最大値154μs 最小値-15.0μsと170μs 近くずれは生じたものの平均では1桁におさまっている。また、最大値は154μsと500μsの半以下に収まっているため、要件を満たしているといえる。一方、装置BではAと比べてずれの幅が大きくなってはいたが時刻情報の同期がかかってから1分経過するまではずれが単調増加し、同期をかけた後数秒で最小値の-163μsを次の同期がかかる2秒前で最大値である430μsのずれが生まれていた。PPS信号の前後の差が最大でも593μsと今回使用する装置で許容される1msを超えるずれは検出されなかった。このことからPPSを用いて時刻補正を行った時計とタイムサーバを用いて時刻補正を行った時計は1msオーダーで時刻差はないと言える。

2.2 エンドツーエンドの遅延計測方法

エンドツーエンドの遅延計測は装置A,B間で送信時刻を含むパケットの送受信で行う。まず、GPS同期状態の確認を行う。GPS同期状態が衛星受信数4台以上であれば遅延計測を開始し、4台未満であればGPSの情報が得られる場所へ装置を移して再度同期状態の確認を行う。遅延計測は図2に示す通りである。遅延計測では、Aから内部時計から時刻情報を取得し、直ちにその時刻情報を含むパケットをサーバ側に送信する。そして、BではAからパケットを受信したら直ちにその受信時刻を内部時計から取得し、受信時刻から受信したパケットに含まれるサーバからの送信時刻の差を取る。この差が片方向の通信遅延であり、結果はログファイルに出力する。GPS同期状態の確認を行った後からログファイルに出力するまでの手順をAとBで入れ替えることで逆方向の通信遅延を測定することができる。これらを定期的に行うことで連続して遅延計測を行える。

3 装置間の時刻差に関する評価

装置同士をLANケーブルで直結すると通信過程で発生する遅延を極力減らすことができ、2台の装置が保持する時計の時刻のずれの大きさを調べることができる。また、双方向で通信をすることで互いの時刻で相手に対するずれを調べることができる。装置同士の時刻のずれが計測結果に影響が出

表2 PPSで時刻補正を行いLANケーブルで直結した時の遅延計測結果(ms)

| 装置 | 平均 | 最大値 | 最小値 | 標準偏差 |
|---------|------|------|------|------|
| 装置A → B | 0.16 | 0.17 | 0.15 | 0.01 |
| 装置B → A | 0.13 | 0.15 | 0.11 | 0.01 |

表3 タイムサーバで時刻補正を行いLANケーブルで直結した時の遅延計測結果(ms)

| 装置 | 平均 | 最大値 | 最小値 | 標準偏差 |
|---------|------|------|------|------|
| 装置A → B | 0.22 | 0.23 | 0.21 | 0.00 |
| 装置B → A | 0.11 | 0.12 | 0.10 | 0.01 |

ないか調べるために、装置間をLANケーブルで直結し、その遅延時間を求めた。遅延時間の結果が0.5msを超えていない場合、装置間の時刻のずれは1ms以内に収まり、1msオーダーの計測結果に影響が出ないものとする。

遅延計測は20回行い、PPSで時刻補正を行って計測した結果を表2、タイムサーバに時刻同期を行って計測した結果を表3に示している。表2の結果から装置Aから送信した時、装置Bから送信した時で時刻のずれは最大で0.17ms程度であることがわかる。逆方向でも最大で0.15msであり、また、標準偏差もそれぞれ0.01msに収まり1msを基準に考えると時刻のずれは小さく、計測結果に影響が出ないものと考えられる。このことからPPSを用いて時刻補正を行って1msオーダーで遅延計測を行う時に装置間の時刻のずれは計測に影響が出ないこと、1msオーダーの計測が可能であることがわかる。表3の結果から装置Aから送信した時、装置Bから送信した時で時刻のずれは最大で0.23ms程度であることがわかる。逆方向でも最大で0.12msであり、また、標準偏差もそれぞれ0.01ms以内に収まり1msを基準に考えると時刻のずれは小さく、計測結果に影響が出ないものと考えられる。このことからタイムサーバに時刻同期を行って1msオーダーで遅延計測を行う時に装置間の時刻のずれは計測に影響が出ないこと、1msオーダーの計測が可能であることがわかる。したがって今回提案する2つの時刻補正方法それぞれで遅延計測が可能であるとわかる。

4 おわりに

本研究ではRaspberry PiとGPS受信機を用いて遅延計測装置を作成し、衛星受信数が4台以上のとき、4台を下回ったときそれぞれの計測方法について考え、どちらの手法でも使用可能であることを示した。また装置間を有線接続し、遅延計測を行うことで装置の時刻のずれの大きさを確認し、計測結果に影響が出ないものであることを示した。今後は作成した装置を用いて実際に産業現場で遅延計測を行い、装置が問題なく遅延計測可能であることを示す必要がある。

参考文献

[1] 土井 望, 遠藤 慶一, 黒田 久泰, 小林 真也, “GPSを用いた高精度遅延計測装置の開発”, 情報処理学会第84回全国大会講演論文集(4), pp.803-804, 2022.