

非対称通信回線に対する高精度遅延計測装置

越智 雅人[†] 遠藤 慶一[†] 黒田 久泰[†] 小林 真也[†]愛媛大学[†]

1. はじめに

産業機械の製造業者から、遠隔操縦の実現にあたり、通信遅延計測を 1ms の分解能で計測をしたいとの要求があった。本研究では、通信速度、遅延ともに非対称な IP 回線において、それぞれの方向の通信遅延を 1ms の分解能で計測可能で、Stratum-1 の精度をもつ安価な遅延計測装置の開発を行った。

遠隔操縦とは、専門技能を持った操縦者が実際にその場に赴くことなく、遠隔地から車両や産業機械などの操縦を行うことである。遠隔操縦を実現することにより、人が実際に赴くことが困難な場所で作業を行うことが可能になる。また、AI 等ではできない高度な判断を要する作業を無人機で行うことができる。加えて、操縦者を集めた一つの拠点から、各現場の産業機械を操作することで、専門技能を持つ人材の不足を解消することができる。

産業機械の遠隔操縦を実現するためには、複数の映像や音声の同期を行う必要がある。一定以上の通信遅延は遠隔操縦を困難としてしまうため、高精度な遅延計測を行うことが重要である。通信遅延を計測する方法として、多くの OS では往復の遅延時間を計測する Ping コマンドが使用可能であるが、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、往復遅延時間を半分にするだけでは、片方向の遅延時間の精度保証ができない。

本研究では、安価な GPS 受信機と Raspberry Pi を用いて、時刻が正確な Stratum-1 の NTP サーバーを 2 台構築し、そのサーバー間の遅延時間を計測することで、1ms の分解能で片方向の遅延時間が計測可能か評価を行う。

2. 通信遅延計測装置の概要

2.1 通信遅延計測装置の構成

本研究で開発を行った通信遅延計測装置は、GPS 受信機と Raspberry Pi を GPIO で接続した、Stratum-1 の NTP サーバーである。本研究で用い

表 1 Raspberry Pi の仕様

CPU	ARMv7 Processor rev3 1.5GHz
メモリ	4GB
有線 LAN	Gigabit Ethernet

表 2 GPS 受信機の仕様

GPS モジュール	GYSFDMAXB
対応測位衛星システム	GPS(米国), QZSS(日本)
出力データ形式	NMEA0183 V3.01
1PPS 精度	±10ns

た Raspberry Pi と GPS 受信機の仕様を、それぞれ表 1、表 2 に示す。

2.2 時刻同期

遅延計測を行うためには、正確な時刻を取得する必要がある。NTP プロトコルは階層構造をもっており、極めて正確な時刻を提供する原子時計、GPS など Stratum-0 に接続された NTP サーバーを Stratum-1 と呼ぶ。Stratum-1 の NTP サーバーは、原子時計に準ずる高い精度を有している。

本研究では、Stratum-1 の NTP サーバーを構築し、GPS 受信機から出力される 1PPS 信号で補正を行うことで、より正確な時刻を取得できるようにする。また、GPS 受信機から NMEA データ（衛星受信数や位置特定品質などの情報）を取得することにより、正確な時刻が取得できていることを確認する。

2.3 遅延計測手法

ネットワークにおける遅延には、アプリケーション遅延、伝送遅延、伝搬遅延、輻輳遅延の 4 種類がある[1]。本研究では、遅延計測の精度を評価するために、2 台の Stratum-1 の精度をもつサーバー間を、LAN ケーブルで直結させて遅延計測を行った。通信プロトコルとして UDP プロトコルを使用し、1 回の通信で送信する情報は、NTP サーバーからの送信時刻のみである。UDP 通信は TCP 通信に比べてアプリケーション遅延が小さい。また、パケットサイズが小さいため、伝送遅延、伝搬遅延、輻輳遅延も小さくすることができる。

本研究で実装した、通信遅延計測プログラムのアルゴリズムを以下に示す。

Highly accurate delay measurement device for asymmetric communication connection

[†]Masato Ochi, Keiichi Endo, Hisayasu Kuroda, Shinya Kobayashi, Ehime University

1. Stratum-1 の精度をもつ遅延計測装置を 2 台用意（それぞれ X, Y とする）
2. X からの送信時刻の情報を含むパケットを, X から Y へ送信
3. Y は X からのパケットを受信した後, 直ちに受信時刻を記録し, X からの送信時刻との差から X→Y の通信遅延時間を計算
4. Y からの送信時刻の情報を含むパケットを, Y から X へ送信
5. X は Y からのパケットを受信した後, 直ちに受信時刻を記録し, Y からの送信時刻との差から Y→X の通信遅延時間を計算
6. 2~5 の手順を 10 セット行い, 最大, 最小, 平均の遅延時間を計算

本研究では, Stratum-1 の精度をもつ遅延計測装置として, GPS 受信機と Raspberry Pi からなる NTP サーバーを用いた.

3. 通信遅延計測装置の評価

3.1 通信遅延計測条件

2 台の遅延計測装置 A, B を用いて, 通信遅延計測を行う. 最初にパケットを送信する遅延計測装置を A とした場合と B とした場合の 2 通りで遅延時間の計測を行うことにより, 2 台の装置が保持する時計の間で時刻のずれが存在するかどうかを調べる.

2.2 で述べたように, 通信遅延計測を行う上で, GPS 受信状況は重要である. NMEA データの項目のうち, 表 3 の条件を満たした場合に通信遅延の計測を行った.

表 3 遅延計測条件 (NMEA データ)

衛星受信数	5 以上
位置特定品質	1
ステータス	A
位置精度低下率	3 以下
垂直精度低下率	3 以下
水平精度低下率	3 以下

3.2 通信遅延計測の評価

最初にパケットを送信する遅延計測装置を A とした場合と B とした場合の遅延計測結果を, それぞれ表 4, 表 5 に示す. パケットを A から送信した場合と B から送信した場合の平均遅延時間は, ほぼ等しいことがわかる. すなわち, 2 台の装置が保持する時計は正確であるといえる.

このことから, 1ms の分解能で遅延時間を計測できる遅延計測装置を, 安価に開発することができたといえる.

表 4 最初に A から送信した場合の遅延計測結果

A→B の遅延	B→A の遅延
0.106ms	0.094ms
0.123ms	0.096ms
0.096ms	0.087ms
0.088ms	0.084ms
0.094ms	0.080ms
0.089ms	0.083ms
0.099ms	0.083ms
0.143ms	0.088ms
0.145ms	0.091ms
0.128ms	0.084ms
最大: 0.145ms	最大: 0.096ms
最小: 0.088ms	最小: 0.080ms
平均: 0.111ms	平均: 0.087ms

表 5 最初に B から送信した場合の遅延計測結果

B→A の遅延	A→B の遅延
0.105ms	0.080ms
0.126ms	0.091ms
0.111ms	0.075ms
0.100ms	0.076ms
0.098ms	0.077ms
0.107ms	0.084ms
0.118ms	0.089ms
0.127ms	0.101ms
0.103ms	0.084ms
0.102ms	0.083ms
最大: 0.127ms	最大: 0.101ms
最小: 0.098ms	最小: 0.075ms
平均: 0.110ms	平均: 0.084ms

4. おわりに

本研究では, 安価な GPS 受信機と Raspberry Pi を用いて, 通信遅延を 1ms の分解能で計測可能で, Stratum-1 の精度をもつ安価な遅延計測装置の開発を行うことができた. 今後は, 計測した遅延時間を用いて, どのように映像や音声の同期を行うかが課題となる.

謝辞

本研究は, 2020 年度に株式会社タダノとの共同研究として実施したものである.

参考文献

- [1] APPOSITE TECHNOLOGIES: ネットワークの世界における遅延とは, <https://www.apposite-tech.com/blog/ネットワークの世界における遅延とは/> (参照 2020-12-8).