

デジタル機器のマイクロプロセッサ高負荷時における時刻ドリフトの研究

古井 海里[†] 干川 尚人[†] 白木 厚司[‡] 下馬場 朋禄[‡] 伊藤 智義[‡]

国立高等専門学校機構 小山高専[†] 千葉大学[‡]

1. はじめに

IoT (Internet of Things) 技術の発展に伴い、多種多様なデジタル機器がネットワークに繋がる一方で、なりすましによる情報漏えい、不正アクセスのリスクが高まっており、機器を適切に識別することの重要性が増している。IoT 機器のなりすましを識別する手法としてハードウェア指紋を利用して機器特徴を抽出するクロックフィンガープリント手法 [1] が提案されているが、この研究は機器が無負荷の安定状態で行われた結果に限定されている。本稿では機器に対し負荷を印加することで、高負荷時に取得できる機器特徴量の影響を検証し、その結果と考察を示す。

2. 既存技術

IoT 機器やコンピュータなどのデジタル機器は、クロックと呼ばれる周期的信号に同期して動作する。このクロックは、水晶振動子を代表とする発振器を信号源としている。クロックフィンガープリント手法は、この発振器の固有差を抽出することによって機器を識別する。この固有性は、IoT 機器のシステム時刻がクロック信号によって更新されることを用い、識別対象となる機器がもつシステム時刻のずれを計測して抽出する [1]。先行研究 [2] では無負荷時においてシステム時刻のずれと環境温度の線形性が示されており、その線形性を用いた識別を試みている。

3. 研究目的および実験システム

温度情報を用いた識別には広い温度幅を要するが、無負荷状態でのコア温度は気温に依存するため、計測は狭い温度に限られる。もし意図的な負荷を与えることで、より広い温度幅を持つ計測が可能になれ

ば、識別性能の向上が見込める。そのためには、高負荷でも時刻ドリフトの計測が可能であることを示す必要がある。本稿では、マイクロプロセッサに負荷をかけることで、高負荷とそれに伴う高温状態による時刻ドリフトへの影響を検証する。

本検証における実験システムの構成を図 1 に示す。

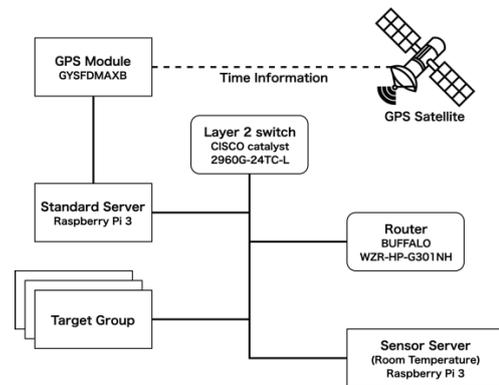


図 1 実験システム構成図

計測対象機器として、Raspberry Pi 3B+ (以降 Raspi と表記) を 3 台用意し、Raspi には Raspbian (April 2018, Kernel version 4.14) をインストールした。計測対象機器は Network Time Protocol (NTP) による時刻同期機能を無効化し、動作周波数を 1.4GHz に固定する。計測対象機器の時刻のずれを計測するために、基準サーバは Global Navigation Satellite System (GNSS) の発信する Pulse Per Second (PPS) 信号に基づいた時刻補正を行い、これを基準時刻とする。このとき、基準時刻とシステム時刻の差分の計測には NTP を用いる。同時に、計測対象機器のマイクロプロセッサのコア温度 (以降コア温度) を測定する。コアへの負荷によるシステム時刻のずれへの影響を調べるため、stress-ng コマンドによって段階的に負荷をかける。

4. 実験結果

図 2 に、stress-ng コマンドによって一定間隔ごとに CPU 負荷を 100% から 10% まで 10% ずつ変化させたときのコア温度と時刻ドリフト (基準時刻 1 秒あ

A Study on Clock Drift of Digital Equipment under High Microprocessor Load

[†]Kairi FURUI, [†]Naoto HOSHIKAWA,

[‡]Atsushi SHIRAKI, [‡]Tomoyoshi SHIMOBABA, and

[‡]Tomoyoshi ITO

[†]National Institute of Technology, Oyama College

[‡]Chiba University

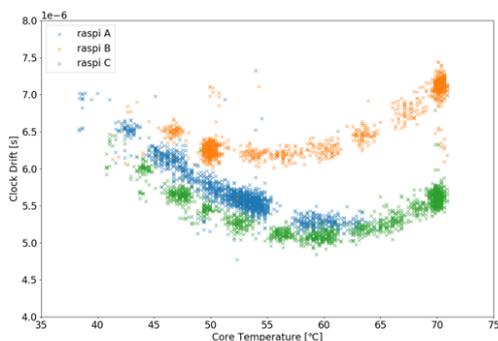


図2 負荷をかけたときのコア温度-時刻ドリフトの相関(計測対象機器のシステム時刻が進んだ量)の関係を示す。この計測は2019年12月13日から2019年12月19日の間に行った。

5. 考察

図2に示されたコア温度と時刻ドリフトの関係は曲線的になっており、先行研究で確認された線形性が得られなかった。しかし、高温時でも時刻ドリフトのばらつきは変化しておらず、線形ではないが機器の特徴として現れていると言える。つまり、高温時でも時刻ドリフトの計測が可能であると言える。また、これまでは時刻ドリフトとコア温度が線形関係となるような計測結果が得られていたが、その原因は先行研究での計測は無負荷下で行われており、コア温度が室温という狭い温度幅に限定されていたためだと考えられる。

ここで、時刻ドリフトは発振器の固有性を抽出しているため、この非線形性は Raspi の水晶振動子が持つ温度特性に起因するという仮説が立てられる。水晶振動子などの発振器において、理想の周波数との相対誤差を周波数偏差と呼び、温度依存性を持つことが知られている。水晶振動子の発振周波数や電気的特性は、水晶の切断方位によって決定される[3]。水晶の切断方位で最も一般的に用いられている AT カット板の周波数偏差は切断角度によって温度特性が定まり、三次曲線によって近似できる[4]。Raspi の発振器は AT カット水晶振動子であるため、変曲点が 25°C の三次曲線が得られると考えられる。

そこで、本実験で得られた計測データに対し、変曲点を 25°C とする最小二乗法を試み、変曲点の時刻ドリフトを基準とした周波数偏差を算出した結果を図3に示す。同図から、この近似曲線は計測結果によく適合していることが分かる。もし時刻ドリフトの温度特性が水晶振動子の温度特性によるものであれば、本計測の範囲外でも図3の近似曲線に従うと推測できる。ただし、計測できたコア温度の範囲

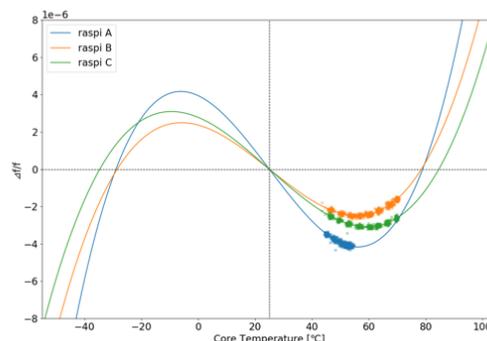


図3 三次の近似曲線による周波数偏差のコア温度特性外でもこの三次曲線に従うかは別途検証が必要である。

以上より、負荷によって上昇したコア温度の範囲では時刻ドリフトは線形にならないという結果が得られた。今後は、この結果が水晶振動子の特性に依存しているのかを明らかにすることが課題である。

6. おわりに

本実験により、高負荷時でも時刻ドリフトの誤差は変わらずに計測が可能であることが示された。また、これまで確認されていたコア温度と時刻ドリフトの線形性とは、計測温度幅が狭い場合のみで成り立つ現象であることが示され、負荷による高温下には非線形性があり、これが水晶振動子の温度特性による可能性が示された。今後はこの温度特性の調査を更に進めることにより、クロックフィンガープリントの実用化を目指していく。

謝辞

本研究は矢崎財団 (Yazaki Memorial Foundation for Science and Technology) の支援を受けた。

参考文献

- [1] 干川尚人, 下馬場朋禄, 伊藤智義. デジタル機器のクロック周波数信号特性に基づく個体識別技術. 電子情報通信学会第16回ネットワークソフトウェア研究会, 6 2018.
- [2] 並木涼, 干川尚人, 下馬場朋禄, 伊藤智義. デジタル機器におけるシステム時刻のずれと環境温度の変動との相関性. 電子情報通信学会第18回ネットワークソフトウェア研究会, 1 2019.
- [3] 小川智哉. 結晶物理工学. 裳華房, 11 1976.
- [4] 中澤光男. AT カット水晶振動子のカット角に対する周波数頂点温度特性の二次形式による解析. 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, Vol. 119, No. 8-9, pp. 1042-1045, 1999.