

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05288

研究課題名(和文) 深層学習による時刻系信号の高精度化

研究課題名(英文) Increase the accuracy of time scales by using the deep learning technique

研究代表者

田邊 健彦 (Tanabe, Takehiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：30613989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：代表者が所属する産総研計量標準総合センター(NMIJ)が運用する時間周波数国家標準「UTC(NMIJ)」の、協定世界時(UTC、世界中で共有されている時刻の標準)への同期精度を向上させることを目的として、深層学習の活用する手法の開発に取り組んだ。この目的のために、UTCとHMの時間差を、「一次元畳み込みニューラルネットワーク」という深層学習の手法の一つを用いて予測した結果、それが時系列予測においてよく用いられる「カルマンフィルター」による予測よりも精度が良いことを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深層学習は近年様々な分野で応用され始めており、革新的な技術革新につながる可能性を秘めている。一方、正確な時刻を認識し共有することは、私たちの日常生活だけでなく、交通機関の運行スケジュール管理やGPSなどの衛星測位システムなど、社会の根幹を支える様々な技術においても必要不可欠であり、その重要性は古来より論を待たない。本研究により、時間標準の高精度化に深層学習の手法が有用であることを示す初の成果が得られた。本研究が契機となり、時間標準だけでなく計量標準の高精度化において深層学習が普遍的なツールとなることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The time difference between coordinated universal time (UTC) and a hydrogen maser, which is a master oscillator for the local realization of UTC at the National Metrology Institute of Japan (NMIJ), has been predicted by using one of the deep learning techniques called a one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN). Regarding the prediction result obtained by the 1D-CNN, we have observed improvement in the accuracy of prediction compared with that obtained by the Kalman filter. Although more investigations are required to conclude that the 1D-CNN can work as a good predictor, the present results suggest that the computational approach based on the deep learning technique may become a versatile method for improving the synchronous accuracy of UTC(NMIJ) relative to UTC.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：協定世界時 水素メーザー 時刻系信号 深層学習

1. 研究開始当初の背景

現在、国際単位系における時間の基本単位である「SI 秒」は、セシウム原子のマイクロ波領域の遷移周波数(9.192,631,770 GHz)により定義されている。これを実現するセシウム原子時計からの信号が、私たちが認識・共有する時刻の源流である。一方、時刻の標準としては「協定世界時 (Coordinated Universal Time, UTC)」が 1972 年以来その役割を担っている。時刻の生成で重要なことは、信号が止まることは許されないことである。そこで、連続かつ安定に周波数を刻む、商用セシウム原子時計や水素メーザー型周波数標準器(Hydrogen Maser, 以下 HM)などの実用原子時計が時刻の生成において主たる役割を担っている。UTC は、図 1 に示すように国際度量衡局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)によって以下の 3 段階で計算される時刻である。

- (i) 代表者が所属する産業技術総合研究所計量標準総合センター(NMIJ)を含む、世界約 80 機関で稼働している約 450 台の実用原子時計とその時刻比較データの加重平均である自由原子時(Échelle Atomique Libre, EAL)を計算
- (ii) EAL の歩度(一秒の間隔)を、数機関で稼働している原子泉型セシウム一次周波数標準および二次周波数標準で校正して国際原子時(International Atomic Time, TAI)を算出
- (iii) TAI に対して、地球の自転から定まる時刻である世界時(Universal Time, UT1)と整合させるための調整(うるう秒調整)を実施して UTC を算出

UTC は多数の原子時計のデータの加重平均から計算されることから分かるように、UTC そのものを刻む原子時計は存在せず、リアルタイムに知ることはできないペーパーロックである。また、UTC の計算は毎月 10 日頃に前月の 5 日毎の 0:00 UTC についてだけ行われ、その結果は BIPM が毎月公表する「Circular T」と呼ばれる文書により約一ヶ月後にしか分からない。これでは実用上不便なので、各研究機関では、UTC と同期させた UTC(k) (kは機関名の略称)という実信号を生成・運用し、これを各種測定における基準信号として使用している。

代表者が所属する産業技術総合研究所計量標準総合センター(NMIJ)で運用している時間周波数国家標準 UTC(NMIJ)は、Circular T で報告される協定世界時 UTC と UTC(NMIJ)の差を参考に、周波数源である HM の周波数値を調整することで、UTC との差が概ね ± 10 ns 以内に維持されている。

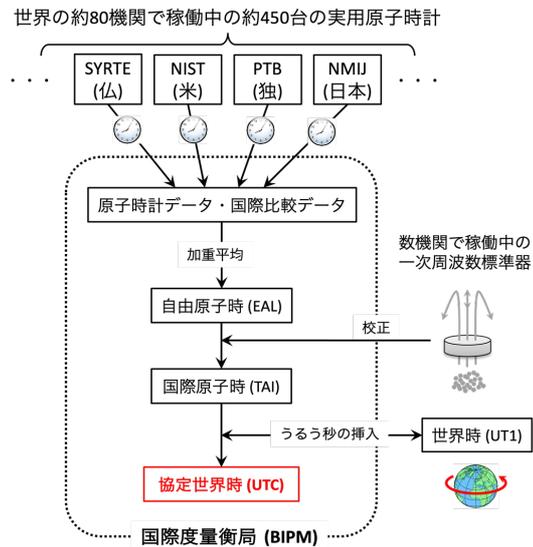


図 1: UTC 計算の概略図

2. 研究の目的

産業界・学术界では、UTC(NMIJ)を基準信号とする周波数標準器が多数用いられており、UTC(NMIJ)の UTC との同期精度を向上させることは重要な研究課題であり続けている。これを踏まえて、代表者は機械学習の手法の一つである深層学習の手法を用いて UTC(NMIJ)の UTC への同期精度を向上させることを目的として研究に取り組んだ。

図 2 に本研究の概念図を示す。従来、UTC(NMIJ)を UTC に同期させるための HM の周波数調整は、過去の HM の周波数挙動から今後の挙動を予測して行ってきた。一方、機械学習とは、現在手元にあるデータの重要なパターンや傾向を機械(コンピューター)自身が学習し、その結果から新しいデータの性質や挙動を予測・分類する技術の総称である。特に、脳の神経回路網を数学的に表現した計算モデルである「ニューラルネットワーク」を用いた機械学習が深層学習である。代表者所属の研究グループには、過去 10 年以上に渡る HM の周波数データの蓄積がある。そこで、「この過去のデータを用いた深層学習により HM の周波数値が予測できれば、

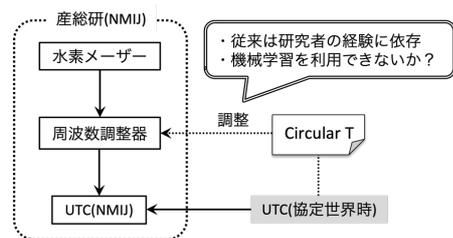


図 2: 本研究課題の概念

より効率的に周波数調整を実施し、UTC(NMIJ)の UTC への同期精度を向上できないだろうか？」という問いが、本研究課題の原点である。

3. 研究の方法

「2」で述べた目的の達成のために、以下の技術を開発することとした。

- (i) UTC と HM の時間差を予測するための手法
- (ii) 予測結果を実際の HM の周波数調整にフィードバックするためのアルゴリズム

4. 研究成果

(i) UTC と HM の時間差予測手法の開発

「2」で述べた目的の達成には、まず UTC と UTC(NMIJ)の周波数源である HM の時間差を予測するための手法の確立が必須である。これに対して、「一次元畳み込みニューラルネットワーク(One-dimensional convolutional neural network, 1D-CNN)」という、深層学習の手法の一つを用いて HM と UTC の時間差を予測した。1D-CNN による予測の流れを図 3 に示す。最初に、過去約 3.5 年間の UTC と HM の時間差データのうち、62 %を 1D-CNN の学習として入力し、その出力と実際の結果(目的値)との平均二乗平均値を「損失値」として計算した。この結果に基づき、「Adaptive Moment Estimation (Adam)」と呼ばれる最適化関数により 1D-CNN を最適化、つまり学習させた。その後、学習に使用していない残りのデータと 1D-CNN による予測結果を比較した。

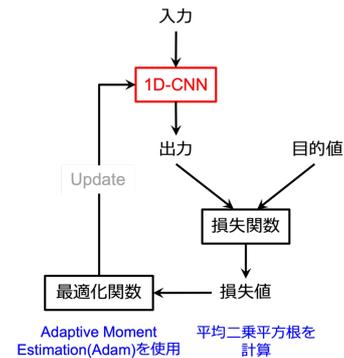


図 3：1D-CNN による UTC と HM の時間差予測の流れ

本研究では、1D-CNN による予測と共にカルマンフィルターによる予測も行なった。2つの手法により得られた予測と実際のデータのポイント毎の差をプロットしたのが図 4 である。青が 1D-CNN、緑がカルマンフィルターによる結果である。2つの手法による予測の平均二乗平方根を計算した結果、今回構築した 1D-CNN はカルマンフィルターよりも良い予測精度を示すことを見出した。この原因は、カルマンフィルターによる予測は線形ガウス状態空間モデルに基づく推定であるのに対して、1D-CNN による予測はこのような仮定に制限されず、より広いパラメータ空間を利用した推定であることが考えられる。1D-CNN は提案されて 10 年前後の新しい手法であるが、時系列予測の古典的手法とも言えるカルマンフィルターよりも良い性能を示したことは興味深い。長短期記憶(LSTM)などの再帰型ニューラルネットワークを用いることで、さらに予測精度を向上させられると考えられる。なお、この結果は国内の関連学会で発表するとともに、国際誌上で発表した。

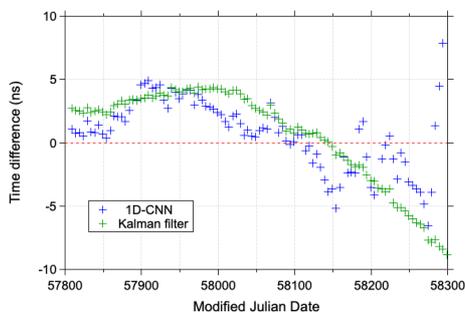


図 4：予測結果と実際の時間差データのポイント毎の差(青: 1D-CNN, 緑: カルマンフィルター)

(ii) 予測結果を実際の HM の周波数調整にフィードバックするためのアルゴリズム開発

次に、(i) で得られた予測結果を UTC(NMIJ)システムに実装する、つまり HM の周波数調整にフィードバックするアルゴリズムの開発に取り組んだ。具体的には、過去に行った調整前の UTC と UTC(NMIJ)の時間差データおよび傾きから、最適な調整時期や調整量を予測するシステムの開発である。ここで強調してきたいのは、HM の周波数調整を完全にこのシステムに頼ることは目的としていないということである。あくまで、我々が判断を行う上での一つの材料を提供するようなシステムを構築するという思想で開発に取り組んだ。この開発中、代表者が所属するグループにおいて予期せざる人員変更が生じ、代表者自身が UTC(NMIJ)の維持・管理に主導的役割を果たすようになったため、このアルゴリズム開発の完成には至らなかった。しかし、代表者自身が HM の周波数調整も含めた UTC(NMIJ)の運用に深く関わるようになったため、その経験を踏まえたより実務に適用し得るシステムの開発が進められていると考えている。また、本研究課題を遂行する過程で、研究開始当初には想定していなかった共同研究の萌芽も得られた。これは今後の研究の深化に大きな役割を果たすものと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 田邊健彦	4. 巻 71
2. 論文標題 UTC(NMIJ)の運用とその堅牢化・高精度化に向けた取り組み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計量標準と計量管理	6. 最初と最後の頁 53-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takehiko Tanabea, Jiaxing Ye, Tomonari Suzuyama, Takumi Kobayashi, Yu Yamaguchi, and Masami Yasuda	4. 巻 90
2. 論文標題 Potential for improving the local realization of coordinated universal time with a convolutional neural network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 125111(1-5)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5088533	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田邊健彦, 小林拓実, 西山明子, 川崎瑛生, 岩佐章夫, 安田正美
2. 発表標題 UTC(NMIJ)の現状とその堅牢化に向けた取り組み
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田邊健彦, 大久保章, 稲場肇, 小林拓実, 高見澤昭文, 赤松大輔, 安田正美
2. 発表標題 NMIJにおける周波数メトロロジークリンクシステムの開発
3. 学会等名 電気学会電子回路研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田邊健彦, 叶嘉星, 鈴山智也, 小林拓実, 安田正美
2. 発表標題 協定世界時と水素メーザー周波数標準器の時間差予測手法の開発
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

産業技術総合研究所計量標準総合センター 物理計測標準研究部門時間標準研究グループ ホームページ
<https://unit.aist.go.jp/ripm/time-stdg/>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------