

## 論文の内容の要旨

論文題目	GPUを用いた時刻比較用ソフトウェアGPS受信機の開発に関する研究
学 位 申 請 者	後 藤 忠 広

全地球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System; GNSS) の信号を仲介とした時刻比較は、国際原子時 (International Atomic Time; TAI) 決定のための方式の一つである。本研究では、高精度な時刻比較に対応したソフトウェア無線技術によるGPS受信機の開発を行った。

TAIは、世界各国の標準機関 (National Metrology Institute; NMI) が保持する原子時計の歩度を元に決められる。このため、NMIではGNSSや商用通信衛星などを使用して互いの原子時計間の時刻差を計測している。GNSS時刻比較では、搬送波位相を観測量として使用することで、擬似距離のみを使用した場合と比べ二桁程度時刻比較精度を改善できる。また、GPSではL1帯とL2帯の二周波を受信することで電離層の影響を相殺した時刻比較が行える。時刻比較を行うためには、GPS受信機に原子時計から供給される10 MHzと1 PPS信号を入力し、受信したGPS信号を外部から入力された10 MHzと1 PPSに同期して記録する必要がある。しかし、通常の二周波観測が可能な測地用GPS受信機には10 MHzや1 PPSの入力端子は無く時刻比較目的には使用できない。一部、時刻比較に対応した受信機も市販されているが、種類は限られており、価格も測地用に比べると高価である。TAI高精度化のためには、多くのNMIが二周波受信機による観測を行うことが望ましいが、現状では高価な受信機を保持しているNMIは全体の半数程度である。

一方、汎用のアナログ・デジタル変換器 (Analog-to-Digital Converter; ADC) はサンプリングクロックの切替えに対応した機種が多く、外部基準信号に同期してサンプリングを行えるため、これらADCに原子時計からの信号を供給しGNSS信号を記録すれば、高価な市販受信機を使用せずとも高精度な時刻比較が行える。近年では、専用のADCと論理回路により構築されていたデジタル信号処理を、汎用のADCとパソコン上のソフトウェアで行うソフトウェア無線 (Software-Defined Radio; SDR) 技術の研究が進んでおり、GNSSの信号処理をパソコン上で行うソフトウェアGNSS受信機の開発も数多く行われている。デジタル信号処理部をソフトウェアで実装することで、アルゴリズムの実装やデバッグが論理回路に比べて簡単に行える。装置専用のシミュレータがなくても、アルゴリズム単体から

装置全体にわたる評価まで容易に行えるなど利点が多い。GPS衛星が送信する測位信号は、複数の衛星が同一の搬送波に異なる擬似雑音 (Pseudo Random Noise; PRN) 符号を拡散した符号多重化方式が採用されている。これまではコード周期が短い民生用信号は搬送波周波数が1.5 GHz帯のL1にしか送信されておらず、1.2 GHz帯のL2では暗号化された軍用コードのみ送信されていた。軍用コードの復調をソフトウェア上で実装することは難しく、二周波観測が可能なソフトウェア受信機は極めて稀であった。しかし、2005年以降に打ち上げられた衛星ではL2にも民生用信号が送信されていることから、ソフトウェア受信機でも容易に二周波観測が可能となった。

本論文では、高精度な時刻比較用受信機を安価に構築するため、外部同期可能な汎用ADCとパソコン上のソフトウェア関連器による二周波時刻比較用ソフトウェアGPS受信機を開発し、その性能を評価した結果についてまとめる。デジタル信号処理をパソコン上のソフトウェアで行う場合、ハードウェアで実装した場合と比べてどうしても処理速度が劣る。本研究では、ゲーム用に開発された画像処理ボード (Graphics Processing Unit; GPU) を使用することで、ハードウェアと同等の処理速度をソフトウェア関連器で実現した。FPGAなどによる論理回路では、シフトレジスタと加算器の組み合わせで時間領域の関連器を容易に構築できるが、GPUのような並列計算機では積和演算は最適化が難しい。そこで、周波数領域の関連アルゴリズムを採用することで並列計算機での最適化を行った。通常は周波数領域に変換する際、大量のサンプリングデータに対してFFTを行う必要から時間領域の方が有利であることが多いが、FFTのアルゴリズムは並列計算機に最適化されており、GPUでは周波数領域で行った方が高速に処理できる。

開発したソフトウェア受信機を使用して、共通アンテナ、共通基準信号による市販GNSS受信機との比較と、遠隔地におかれた原子時計間の時刻比較実験を行った。市販GNSS受信機との比較では、擬似距離は低仰角における $C/N_0$ が悪い状態を含めても5 ns以内で一致しており、ヒストグラムからも白色雑音で分布していることが確認できた。一方、搬送波位相にはRFフロントエンドで周波数変換に使用した発振器の温度特性とみられる変動成分が検出された。今後、周波数変換用発振器の温度特性を調査するとともに、装置の恒温化などの対策が必要である。

原子時計間の比較では、水素メーザーを使用した時刻比較精度の評価と、衛星双方向時刻比較方式との同時観測による時刻比較結果の正しさを評価した。比較精度の評価では、短期は水素メーザーの比較が可能な $10^{-13}$ 台の結果を得た。しかし、現状ではL2民生用信号を送信する衛星が時間帯によっては減少してしまうため、このような時間帯では時刻飛びが生じ長期安定度が劣化した。そのため、平均化時間に対して理想的な $1/\tau$ の改善は得られていないが、今後L2民生用信号に対応した衛星が増加することで、1日平均で $10^{-15}$ 台に達すると考えられる。衛星双方向方式との比較では標準偏差で2 ns以内の一致度を得たが、やはり衛星数が減少する時間帯では時刻飛びの影響が見られた。一方、時刻飛びがない区間では1 ns以内の一致度と、これまで行われた既存実験と同等の精度が得られており、正しい時刻比較が行えていることを確認した。

ここ数年、欧州や中国では独自GNSSの運用が開始されようとしているほか、日本やインドでは地域的な測位衛星を打ち上げるなど、マルチGNSSの時代が到来したと言われている。また、新しい衛星ではより高精度な測位信号の送信も始まっている。ソフトウェア受信機ではこれら新しい信号に柔軟に対応可能であることから、今後はマルチGNSSに対応した受信機の改良を図り、より高精度な時刻比較が行えるよう引き続き開発を進めていきたい。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名	後藤 忠広
審査委員主査	本多 弘樹
委員	多田 好克
委員	吉永 努
委員	大須賀 昭彦
委員	李 還幫
委員	※近藤 正章

当博士研究は国際原子時を決定するに当たり、GPS観測で二周波搬送波位相を用いた精密単独測位に基づく時刻比較に関するもので、GPUを用いた時刻比較用ソフトウェアGPS受信機の開発に関する研究について記述したものである。本論文は以下の内容から構成されている。

第1章では研究の背景、目的、内容について記述している。

第2章では原子時計の比較の概念について記述している。原子時計間の比較は、測定対象や測定精度が他の物理現象の測定に比べると少し特殊である。ここでは、測定する観測量がどのようなものかと、測定結果をどのように評価したら良いかを説明するとともに、代表的な原子時計間の比較手法についても説明している。

第3章ではGPS時刻比較について詳しく述べている。GPSの概要について紹介し、続いて、搬送波位相による時刻比較精度はサブナノ秒に達するため、衛星、受信機の位置情報だけでなく、伝搬経路で生じる遅延や、太陽や月の引力による観測局位置の変位など細かな影響を考慮して時刻差を求める必要があることを説明している。本章の後半では、高精度な時刻比較を行うために必要となる具体的な解析手法について述べている。

第4章では、受信機を開発するために採用したソフトウェア無線技術について述べている。ソフトウェア無線技術を採用することの利点と、これまでのソフトウェアGNSS受信機における先行研究の紹介を行っている。また、時刻比較におけるソフトウェア無線技術への取組みについて紹介するとともに、ソフトウェア無線

技術の有効性についても検証を行っている。

第5章では、開発した時刻比較用ソフトウェアGPS受信機の詳細について述べている。まず、時刻比較受信機に要求される機能の検証を行っている。開発した受信機の機能は、カーナビなどの単独測位用の受信機に比べると簡略化できる理由を示している。一方で、高精度な時刻比較を行うために実装が必要な機能についても説明している。設計部分では、時系列と周波数領域の二通りの相関方式について、時系列に相関をとる場合と、周波数領域に変換してから相関をとる場合で、処理速度の違いを示すとともに、GPUによるデジタル信号処理では周波数領域を用いた方が有利であることを示している。開発部分では、GPS信号を受信するために必要なアナログ信号処理部とソフトウェア相関器の開発に関して記述している。アナログ部では周波数変換の際に付加される位相雑音の軽減と、時刻比較に必要なADCの機能についてまとめている。ソフトウェア相関器については、GPU上に実装した相関器の詳細を記述している。

第6章では、開発した受信機が基本的な性能を有しているか評価した結果について述べている。開発した受信機で受信した信号の観測精度は理論精度と一致し、設計どおりの性能を保持していることを示している。続いて、市販の時刻比較用GNSS受信機と同じ条件で測定を行い、両受信機が出力する観測量に対して差分をとることで評価を行っている。擬似距離の差分には系統的な誤差などはみられず群遅延の追尾がきちんと動作している確認を行っている。一方、搬送波位相にはフロントエンドで採用した周波数変換用発振器の温度特性とみられる変動成分が残っている。この部分についての対策の検討を行っている。

第7章では実環境への適正を評価した結果について記述している。実際に時刻比較実験を行い、その精度と測定値の妥当性の評価を行っている。水素メーザを用いた時刻比較精度の検証では、短期では水素メーザの変動を観測可能な精度が得られていることの確認を行っている。測定値の妥当性では、衛星双方向方式との同時観測を行い、異なる方式で同じ時刻差が得られるかの検証を行っている。その結果、過去の同様な比較と変わらない値が得られたことから、測定結果に対しても問題ないことの確認を行っている。ただし、どちらの比較でも長期間の観測では一部時刻飛びが生じることを観測している。これは、ソフトウェア受信機が受信可能なL2信号は民生用信号のみであり、全ての衛星を使用して処理できないことが原因であるが、ソフトウェア受信機の観測精度としては問題ない結果が得られていることの確認を行っている。

第8章で、本研究全体のまとめと今後の課題について記述している。

以上のように本論文では、GPUを用いた時刻比較用ソフトウェアGPS受信機の新しい方式を提案し、提案方式の実システム上での実装と評価を行い、実用上必要な観測精度を達成していることを示している。これは、ソフトウェア受信機の研究分野を開拓する先導的な研究成果である。以上より、本論文は博士（工学）の学位請求論文として十分な価値を有するものと認める。