

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：12614

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630403

研究課題名(和文)長期海中観測を想定した水中音響通信による高精度時刻同期手法の開発

研究課題名(英文)Development of high precision time synchronization method by using underwater acoustic communication for long term observation

研究代表者

近藤 逸人(KONDO, Hayato)

東京海洋大学・その他部局等・准教授

研究者番号：40361802

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):本研究は、水中音響通信技術を使って、海中で分散独立する観測システム間で高精度な時刻同期を実現する手法を開発することを目的とし、水中で対向する二つの音響通信装置間で通信をおこなう間に、基準となる側のクロックに、時刻のずれている側のクロックを同期させることを目標として、クロック同期のための音響通信アルゴリズムを提案し、テストシステムを構築して、水槽実験をおこなうことにより時刻同期の可能性を示した。

研究成果の概要(英文):The goal of this study is to develop high precision time synchronization method between distributed underwater observation systems using acoustic communication technology. We have developed a method that a drifted clock synchronizes to a reference clock while two acoustic communication devices are communicating each other. A test system was developed and the feasibility of the proposed method has been proved by tank tests.

研究分野：水中工学

キーワード：ソナー 水中音響通信 時刻同期 FPGA

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境問題や資源問題を背景として海洋における長期観測の重要性が強調されている。米国における Ocean Observatory Initiative: OOI (<http://www.oceanobservatories.org/>) などのように、巨額を投じて海域に観測網を構築する計画が実行に移されつつあるのが代表的な例である。海中に投入される観測機器では、長期間連続して観測をおこない、正確な時刻情報を持った時系列データを取得することが特に必要とされ、分散配置される観測ノードや移動プラットフォームでは、複数ノード間の高精度な時刻同期が重要な技術課題として注目されている。この時刻同期は観測データのタイムスタンプやプラットフォーム間で使用される音響通信および測位に大変重要であり、海底地下資源の探査などでは、信号源と受信ノード間において μs ~ ns オーダでの高精度な時刻同期が必須である。

陸上で時刻同期の基準として用いられる GPS は電波減衰の激しい海中では使用できないため、これに代わる時刻同期手法の開発が期待されている。一方、米国においては、2011 年からチップスケールの原子時計 (Chip Scale Atomic Clock: CSAC) が市販されるようになった。このターゲット市場には、海底資源探査や無人機の時刻同期などが挙げられており、分散するノード間の時刻同期の重要性を裏付けている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、水中音響通信技術とチップスケール原子時計を使って、海中に分散・独立して展開する観測システム間で高精度な時刻同期を実現する手法を開発することにある。具体的には、海面と海底を往復する移動体を想定して、この移動体と海中の各観測システムに原子時計を搭載する。この移動体は海上にて GPS を使い、まず自らに搭載する原子時計を GPS クロックに同期させ、その後潜行して海底観測ノードや長期滞在型水中ロボットの至近距離まで航行し、着底して距離を安定させるかホバリングして距離を一定に保ち、音響システムを介して高精度な時刻同期をおこなうことを想定している。提案するシステムの概念図を図 1 に示す。

本提案では、 $1\mu\text{s}$ 程度の時刻同期性能実現を目標とし、実際のビークルに組み込むシステムの前段階として、水槽実験が可能な卓上レベルのテストシステムを構築し、高精度時刻同期の手法確立を目指す。

ソナーでは変調された音響信号を使って高精度に距離を測定する技術が開発されている。一方でネットワーク上の分散システムにおける時刻同期を標準化した IEEE 1588 が提唱され、この利用を想定したデジタル・シグナル・プロセッサ (DSP) も市販されている。これらの技術を応用して融合し、高精度な時刻同期を実現しようとするところに

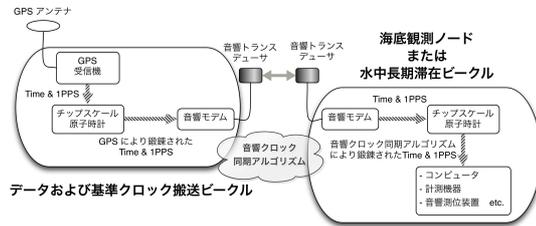


図 1 提案するシステムの概念図

本研究の学術的特色があり、成果を実用展開することで海底資源探査などに有用されることが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、水中音響による高精度時刻同期手法を提案するとともに、コンピュータ・シミュレーションにより水中音響の観点から検討を加え、卓上レベルのテストシステム (図 2) を構築して、プログラムを実装し、実験により検証をおこないながら改良を重ね、手法の確立を目指す。

とについては、水中音響を専門とする研究協力者の協力のもと研究を遂行し、後半期からとを並行して実施し、の水槽実験を通して改良を経ながら、同期手法の確立を目指す。

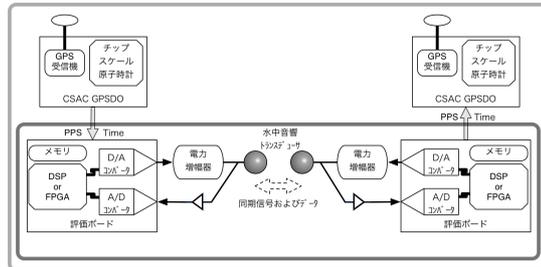


図 2 構築しようとするテストシステム

4. 研究成果

(1) はじめに、水中音響による高精度時刻同期手法を提案するとともに、水中音響の観点からコンピュータ・シミュレーションをおこない、要求する時刻同期精度の実現に必要な音響システムの仕様について詳細に検討した。さらに、この結果を受けてテストシステムの詳細設計を実施し、この設計に基づいてテストシステムを構築した。テストシステムは、デジタル・シグナル・プロセッサ (DSP)、フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA)、デジタル・アナログコンバータ (DAC)、アナログ・デジタルコンバータ (ADC) からなる回路基板と、増幅装置、およびトランスデューサから構成した。構築したシステムが正常に動作することを確認する意味から、今回は FPGA のみにプログラムを実装して、送信と受信を共通のクロックで動作させるために、一つのボードに実装することとした。この構成を図 3 に示す。共通のクロックで送受信を管理することにより、二つの異なる電子回路でおこるクロック

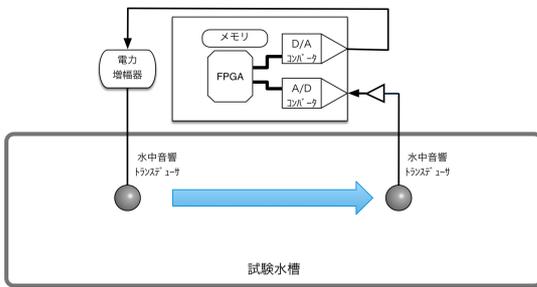


図 3 実験システム 1

クの不整合等によるばらつきを排除し、トランスデューサ、アナログフロントエンド、および水中伝搬の過程で、どの程度のばらつきが発生するかを確認することができる。水槽実験では、送波用トランスデューサと受波用トランスデューサの距離を変化させ、基本的なパースト波を送受信する実験を実施し、送信から受信までの信号遅延時間が、どの程度ばらつくかを検証した。実験の結果、トランスデューサの距離が 1m までの場合、ばらつきは $2\mu\text{s}$ 以内に収まることが確認された。

(2) 次に、送信波を単一周波数のパースト波ではなく、変調波とすることで、時刻検出の精度を向上させ、送信と受信の両方をおこなうことのできるシステムを一对 (Master、Slave) 構築し、図 4 に示すような時刻同期手法の効果を確認する実験をおこなった。ここで、Master のクロックが正確であり、Slave のクロックがずれていることを想定し、時刻同期の手順を説明する。伝搬にかかる時間を正確に計測して、Master の時刻を伝送し、これに片道伝搬時間を加えた時刻を参照して Slave が時刻を合わせるのが時刻同期の手順である。さらには、Master から送信される信号を一定間隔とし、Slave において、この周波数を適倍して内部クロックの周波数を同期させることが目標である。この手法の有効性を確認するための水槽実験の手順は、Master から Slave へ一定間隔で送信し、Slave が Master から信号を受信してから一定時間後に Master に向けて返信し、Master がこれを受けて求めた往復時間のばらつきと、求めた往復時間を Master から Slave に送信する信号の発信間隔に変調して送信することとし、一定間隔で送信した

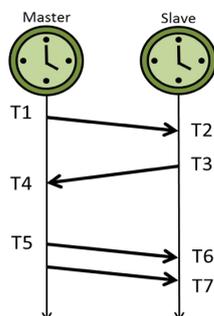


図 4 時刻同期手法

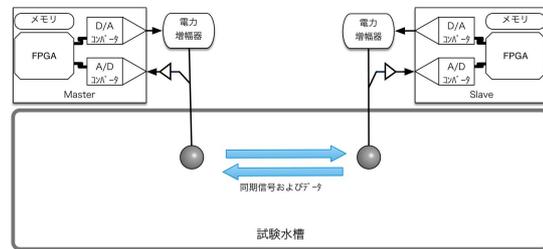


図 5 実験システム 2

信号の間隔を Slave 側で受信した場合のばらつきについて評価する。

実験システムの構成を図 5 に示す。実験では距離を 1、2、3m と設定して、それぞれ 14,000 回の計測をおこなった。この結果、の実験で計測された時間のばらつきは、ほぼ正規分布とみなせることが確認され、それぞれの距離ごとの標準偏差は、1m で $0.32\mu\text{s}$ 、2m で $0.49\mu\text{s}$ 、3m で $0.85\mu\text{s}$ という結果を得た。の実験で計測された時間のばらつきについても、ほぼ正規分布とみなせることが確認され、それぞれの距離ごとの標準偏差は、1m で $0.29\mu\text{s}$ 、2m で $0.54\mu\text{s}$ 、3m で $0.83\mu\text{s}$ という結果を得た。

さらに、時刻同期全体でどの程度のばらつきを有するかを評価するために、で計測した値をで発信間隔に変調して発信するという一連動作をおこない、最終的に Slave で計測される時間のばらつきを計測して評価したところ、同じく正規分布として確認され、標準偏差は、1m で $0.44\mu\text{s}$ 、2m で $0.74\mu\text{s}$ 、3m で $1.03\mu\text{s}$ という結果を得た。

(3) 上記の結果から、理想的な環境であれば、数 μs のオーダで時刻同期が可能であるとの知見が得られた。

実験の途中で、各回の受信で得られる時間に、非常に小さい時間誤差 (数 μs) を持つ観測結果が、固まって一部混入することがあることも判明した。(例えば図 6 を参照) この時間誤差は、時間の短さから水槽の壁面から多重反射したもの (数百 μs と予想) とは考えにくく、トランスデューサを固定していた数 mm 角の木製部材からの反射と思われた。この固定方法を変更すると、予想通り、図 7 のように短い時間間隔の誤差は消え、時刻同期の精度が向上した。通常ソーナールにより距離計測をおこなうような場合には、より遠方を見ていることから、至近距離の障害物は問題とならないが、本システムの実装では、慎重に設置方法を検討しなければならないことがわかった。

このことから、について支持部材を見直してから再実験を実施したところ、観測結果は、正規分布として確認され、標準偏差は、1m で $0.22\mu\text{s}$ 、2m で $0.36\mu\text{s}$ 、3m で $0.53\mu\text{s}$ という結果を得て、標準偏差にしておよそ半分という精度が得られるようになった。

仮に、このような微小な時間誤差が混入した

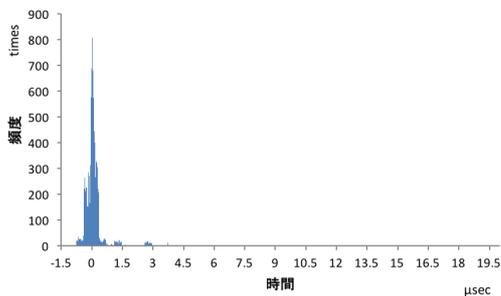


図 6 の実験結果
距離 3m 木材支持の場合

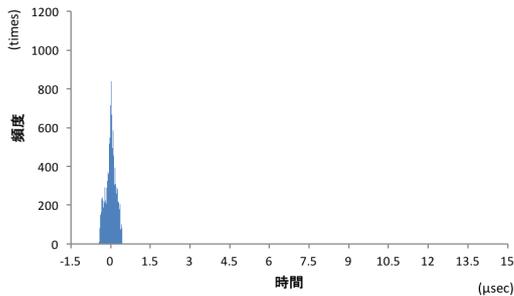


図 7 の実験結果
距離 3m 支持改良の場合

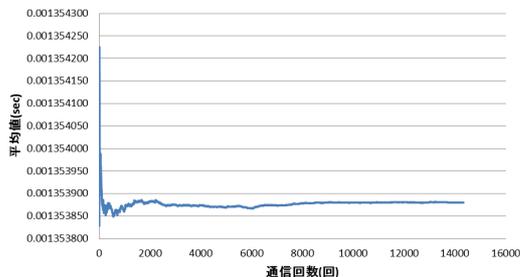


図 8 通信回数に対する平均値

場合、受信の度毎に直接時刻同期をおこなうと、時刻同期の精度を確保する上で支障があるため、ある程度の時間継続して通信をおこなって観測の平均値を用いることで、時刻同期の精度を確保できることを確認した。図 8 にこの例を示す。この例は距離 2m の場合で、木材支持をして 14,000 回計測をおこなったものである。この場合、730 回程度の計測がおこなわれれば、その時点の平均値が、全体の平均値に対して $\pm 25\text{ns}$ 以内に収まり、7,400 回程度の平均値が得られれば、 $\pm 5\text{ns}$ 以内に収まることが確認された。

5 . 主な発表論文等 〔図書〕(計 2 件)

中原 悠 (指導教員：近藤 逸人) 水中音響通信による時刻同期に関する研究
変調信号を用いた時間伝達、東京海洋大学卒業論文、2015、36

内藤 慎太郎 (指導教員：近藤 逸人) 水中音響による時刻同期に関する基礎的研究、東京海洋大学卒業論文、2014、47

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ocean.e.kaiyodai.ac.jp>

6 . 研究組織

- (1) 研究代表者
近藤 逸人 (KONDO, Hayato)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号：40361802
- (2) 研究協力者
尾崎 俊二 (OZAKI, Shunji)
株式会社 SGK システム技研・取締役