

## 審査の結果の要旨

氏名 志村 拓也

本研究は、広範囲にわたる深海調査のために開発の進められている長距離航行型の自律型無人探査機（AUV）に関して、運用性・信頼性を大きく向上させるために、状態監視や指令の送信を行うための音響通信に関する研究である。海洋において水平方向に音響通信を行うと、屈折波や反射波などのマルチパス波が数多く受信され、前後の信号に重なってシンボル間干渉が起き、信号の識別が困難になる。従来は、適応等化器によって、マルチパス波を除去するという方法が採られていたが、受信されるマルチパス波が多いと、適応等化器が処理できず、復調が困難になるという課題を有していた。

本研究では、位相を共役（時間反転した信号）にした位相共役波を用いて、マルチパス波を逆に利用して通信を行う方式を提案したものである。海洋においては、焦点側の音源から発信した音響信号をアレイで受信し、この受信信号を時間反転してアレイから発信すると、時間が逆転した伝搬現象が起き、元の音源の位置に音波が収束して焦点を結ぶというものである。この位相共役波による音波の収束は、従来のビームフォーミングとは異なり、マルチパス波が点に対して収束するため、遠距離であっても鋭く収束する特徴を有している。また、途中の伝搬路の特性や相手の位置を特定する必要がないといった利点がある。

2章においては、位相共役波による収束特性について、空間的な収束性やアレイの傾斜・配置の影響についてシミュレーションおよび水槽実験を行い、位相共役波が空間的に鋭く収束することを紹介している。水槽実験では、アレイを傾斜した場合、素子間隔を広げ疎にした場合についても検証し、収束特性にはほとんど影響せず所望の信号が得られることを確認している。さらに、雑音を加わった場合の収束特性についても試験を行い、アレイ側で位相共役波が雑音に埋もれてしまうほどSN比が悪い場合でも、焦点では十分なSN比で所望の信号が受信できることを確認した。こうした位相共役波の諸特性は、実海域スケールのシミュレーションでも同様に確認できている。

3章においては、位相共役波を用いた通信の可能性について取り組んでいる。

位相共役の収束効果だけで通信を実現しようとする、アレイを構成する送受波器が多数必要になることから、得られた信号をさらに適応等化器で処理するという方法を提案し、従来の手法との比較検討を行った。水深 100m の浅海域において、15km の距離を隔てて、使用周波数を  $500\text{Hz} \pm 50\text{Hz}$ 、変調方式を 16QAM、アレイの素子間隔を 15m、送受器数を 7 個としたときの、アレイから点への通信のシミュレーションをおこなった結果、(a)適応等化器のみを用いた結果では復調はまったく達成されず、(b)の位相共役の効果だけを用いた場合でも復調はできないのに対して、(c)位相共役と適応等化を組合せた手法では、エラーのない復調が達成されることを示した。従来の方法では通信が行えない条件下でも、この手法によって通信が実現されるということが示された。深海域でのシミュレーションでも同様の効果が得られ、この手法により数千 m の深海域であっても 10~30 個程度の送受波器アレイで通信が可能であるという結果を得た。

4 章においては、実海域における実証実験について紹介している。最初の実海域実験は、水深約 1,100m の深度がほぼ一定の海域で通信距離 10km の実験を行っている。この実験では、アレイ側の送受信装置に水中ウィンチを装備し、高度を変えながら、焦点側との間で受送信を繰り返すという仮想アレイ方式で計測を行った。多数のマルチパス波が受信されているが、焦点では明瞭なパルスが受信できており、位相共役の収束が確認できている。アレイから点への通信を、周波数帯域  $500\text{Hz} \pm 50\text{Hz}$ 、シンボルレートは 50bps で実施した。シミュレーションでの結果と同様、適応等化器のみの場合では通信が不可能であるのに対し、位相共役を用いることで通信が可能になるということが実証されている。

つぎの実海域実験では、駿河トラフ軸にそって、通信距離を 20、30、40km と距離を変え、受波のみの仮想アレイ方式で点からアレイへの通信を行って、同様に良好な結果を得ている。さらに水深 4,000m の外洋において、距離 100km の通信試験を行い、こちらも良好な結果を得ている。

5 章においては、AUV の移動や流れによる影響について検討を加えている。AUV のような移動体の場合、送波・受波点が変化して、焦点とアレイ間の伝搬特性が変化しないという前提は崩れる。また、流れがあれば、Active な位相共役の場合、forward propagation と backward propagation で逆向きにその影響が加わるため、同じく前提が崩れるので、その影響をシミュレーションで検討した。移動体との通信のシミュレーションは、送波・受波点が移動する影響を考慮したノーマルモード法を用いて行った。その結果、位相共役の効果のみで復調すると移動の影響で位相が回転し、エラーが発生するが、移動速度が 2~3knt 程度の低速であれば、位相共役と適応等化を組合せた方法によって、影響を補償しエ

ラーのない通信が可能になることが示せた。一方、流れのある環境下でのシミュレーションを実施し、流れが低速であれば、提案している位相共役と適応等化を組合せた方法によって、その影響を補償し、通信が可能になるという結果が得た。

以上、長距離航行型の AUV との通信について、従来の手法では不可能な条件下でも、通信が可能になる位相共役波による通信手法を提案し、さらに、位相共役波と適応等化を組合せた方法を提案し、これによってアレイを構成する送受波器をできる限り少なくして通信が可能になること、移動や流れなどの影響を補償できることをシミュレーションと実海域実験で実証する有益な成果を上げた。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。