

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名 Sahdev Kumar  
学位の種類 博士 (工学)  
学位記番号 博 甲 第 53 号  
学位授与 平成 29 年 2 月 23 日  
学位授与条件 学位規定第 3 条第 3 項該当  
論文題目 Development of a long-range ultrasonic imaging system in air using an array transmitter  
(アレイ送信機を用いた長距離空中超音波イメージングシステムの開発)  
論文審査委員 (主査) 教授 古橋 秀夫<sup>1</sup>  
(審査委員) 教授 森 正和<sup>1</sup> 教授 小塚 晃透<sup>1</sup> 教授 津田 紀生<sup>1</sup>

## 論文内容の要旨

### Development of a long-range ultrasonic imaging system in air using an array transmitter (アレイ送信機を用いた長距離空中超音波イメージングシステムの開発)

Recently, ultrasonic sensing techniques are widely used in various scientific ultrasonic instruments and sophisticated software has already been commercialized for many industrial and medical applications. One of the great advantages of ultrasonic sensing is its outstanding capability to probe inside objectives non-destructively because ultrasound can propagate in all kinds of media (solids, liquids, and gases), except vacuum.

In addition, ultrasonic sound systems in air are often used for distance measurements, range image measurements, etc., because they are simple to use and inexpensive. However, they offer only a short measurable range (only up to a few meters) because of the large absorption of ultrasonic sound and are large in size. These systems comprise an array receiver with multiple receiver elements. Due to the large inter-element spacing, grating lobes appear and the ghost image problem occurs, which hinders the production of these systems. However, because of the recent progress of micro-electro-mechanical systems (MEMS) technologies, it became possible to develop a

considerably small microphone array with multiple elements in a very small area. To extend the measurable range, some approaches such as using high-power large-scale transmitter elements, improving the signal-to-noise ratio through the pulse compression technique, etc. were reported. In this dissertation, a range imaging system using a high-power ultrasonic phased-array transmitter and an ultrasonic array receiver using MEMS microphones is investigated.

In Chapter 1, the background of the field of the range imaging sensor is provided and comparisons are made with other conventional techniques for the 3D measurement of an object with range-imaging sensor systems using ultrasound. The motivation and purpose of this study is also described. Here, an ultrasonic range imaging system using a high-power array transmitter for long-range measurement is investigated.

The principles and configurations of the array transmitter are described in Chapter 2. The characteristics of the transmitter (number of elements, modulated pulse width, etc.) are investigated theoretically. Experimental investigations are also performed and compared with the theoretical results. Thus, it is clear that sharp directivity and high sound pressure are obtained by the array transmitter. An

---

<sup>1</sup> 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

ultrasonic array comprising 144 ( $12 \times 12$ ) elements is constructed. It is controlled using four FPGAs, and a sound pressure level ( $>30$  dB) higher than that of the single transmitter is obtained. The performance of the transmitter on the range imaging system is also discussed theoretically.

Chapter 3 describes the principles and configuration of the long-range imaging system using an ultrasonic transmitting array and an ultrasonic receiver array. The positions of the objects are measured by beam forming of the receiver using delay-and-sum operations. The characteristics of the receiver array are also discussed. The performance of the imaging system is compared with that of the system using a single transmitter. A measurable range greater than 25 m is obtained by this new system. The view angle of the system is also discussed.

Chapter 4 describes the improved 3D measurement field of an object by controlling the sound divergence of the ultrasonic transmitting array to improve the view angle of the system. In the previous chapter, it became clear that the directivity of the array transmitter is considerably narrow (a few degrees). Although the measurable range increases significantly, the object detection view angle becomes narrower in the transmitter in-phase. In some applications, a wide view angle is required. Therefore, an imaging system using a phased array transmitter with a control of the sound divergence of the transmitter is proposed. The principle of the divergence control of the transmitter is described and confirmed by numerical simulation. The system is constructed and investigated experimentally. The divergence of the transmitter is successfully controlled until  $30^\circ$  (half width), and the experimental results show good agreement with the theory. Although the sound pressure of the transmitter with the divergence of  $30^\circ$  is 15 dB less than that of the array transmitter in-phase, it is approximately 7 dB higher than that of a single transmitter. Image detection is demonstrated and the measurable range decreases from 16 m in the array transmitter in-phase to 11 m in the divergence-controlled array transmitter ( $30^\circ$ ) for an object. The view angle increases with the divergence of the transmitter.

In Chapter 5, a range imaging system using an array transmitter with an anisotropic divergence control is

discussed. In the previous chapter, it became clear that although the view angle is improved by the divergence control of the array transmitter, the measurable range decreases. In some applications, a wide horizontal measuring field and a narrow vertical measuring field is required with a long range measurement. Therefore, an imaging system is proposed that uses an ultrasonic array transmitter with the anisotropic divergence control system, controlling the horizontal and vertical divergence angles independently. The horizontal divergence is made wider and the vertical divergence is made narrow to prevent the decrease of the sound pressure by the spread of the sound. The principle of the anisotropic divergence control of the transmitter is described and confirmed by numerical simulation. The system is constructed and investigated experimentally. The divergence of the transmitter is successfully controlled. Although the sound pressure when the divergence is controlled at  $20^\circ \times 5^\circ$  is approximately 6 dB lower than that of the transmitter in-phase, it is 10 dB higher than that of the transmitter with the isotropic divergence control and 26 dB higher than that of a single transmitter. The performance of the range-imaging sensor system using the transmitter is investigated. It is compared with the system using an array transmitter without the sound divergence control and that with isotropic divergence control. The measurable range of the system with anisotropic divergence control is improved over that of the system with isotropic divergence control by more than 2 m. The view angle in the horizontal direction becomes wider.

A summary of the dissertation is offered in Chapter 6. The developed system can accurately detect an object at different locations up to 25 m range and also be useful under natural interferences, e.g., smoke, rain, fog, and darkness, thereby making it a unique novel long-range ultrasonic imaging sensor. Further, scope for future research is given.

#### 論文審査結果の要旨

今日、超音波を用いた様々なセンサーシステムが考えられている。その1つに、レンジイメージセンサーがあり、液体中や固体中などではすでに実用化され、人体内部の計測、水中ソナー、非破壊検査などには広く使われている。一方、空气中

では受信アレイによるビームフォーミング技術を用いたセンサーが考えられているが、その実用化には様々な課題が存在する。その1つが、そのサイズの大きさである。受信アレイでは多数のマイクロフォンをアレイ状に配置するために、そのサイズが大きくなる。また、各マイクロフォン素子の間隔が超音波の波長、数ミリより広いことにより、複数のゴーストイメージの発生という問題が生じる。しかしながら、MEMS テクノロジーの進歩により、超小型のマイクロフォンやマイクロフォンアレイの製作が可能となり、実用化に向けての大きなブレイクスルーとなった。

一方、そのほかの課題としては、超音波は空気による吸収が大きいため、空中での測定では測定距離が数十 cm から数 m に限られ、応用分野によっては短すぎるということがある。単素子の高出力送信機を使用する例もみられるが、その場合画角が狭くなる。そこでこの研究では、MEMS マイクロフォンアレイ受信機と高出力超音波フェーズドアレイ送信機を用いた長距離レンジイメージングシステムの開発を行っている。このシステムでは長距離の測定が可能であるとともに、画角も広いイメージングシステムの開発を目指している。

本論文は6章からなり、第1章では、イメージセンサーシステムの背景と現状、他のシステムとの比較を行っている。また、空中超音波イメージングシステムについて、他の研究の現状をまとめている。そのことから、本研究の目的、概要を述べている。

第2章「3Dレンジイメージングのための高出力アレイ送信機」では、高出力アレイ送信機の構成を述べ、数値シミュレーションによりその特性について議論している。さらに、144素子のマイクロフォンを用いた送信機を製作し、FPGA によりコントロールを行って特性を調べ、理論との比較を行っている。素子数、パルス幅などのパラメータに対し、音圧や指向性、パルス波形にどのような特性が現れるかを詳細に議論している。開発したアレイ送信機により、単素子よりも 30dB 高い音圧を得ることに成功している。

第3章「超音波アレイ送信機とレンジセンサーを用いた空中長距離レンジ測定システム」では、2章で製作した送信機をMEMS マイクロフォンアレイ受信機と組み合わせたレンジイメージングシステムについて述べている。受信機は遅延加算技術によるビームフォーミングにより方位を、また TOF(time of flight)法を用いて距離を同時に測定し、レンジイメージを得ている。アレイ受信機の基本的特性を数値シミュレーションおよび実験で確かめ、各ビームフォーミングの方位に対して受信機の感度特性やゴーストイメージの発生について明らかにしている。また、空気中での超音波の吸収を考慮して、高出力アレイ送信機を用いたシステムにより、測定範囲がどれだけ伸びるかについて理論的に予測し、実際の実験結果との比較を

行っている。その結果、実験と理論の良い一致が見られ、理論の正しさが証明されている。最終的に、構築したシステムは単素子の送信機よりも測定距離が大幅に伸び、25m の距離の物体の計測に成功している。

第4章「レンジイメージングのための等方性広がり角コントロール方式超音波アレイ送信機」は、フェーズドアレイ送信機を用いたイメージングシステムの開発について述べている。前章で、すべての素子が同位相で超音波パルスが発生するアレイ送信機を用いた場合は、計測距離が大幅に伸びる一方で、画角が数度と非常に狭くなることが明らかとなった。そこで、フェーズドアレイ構造とすることにより各素子の位相を別々に制御し、送信音波の広がり角を広くすることを提案、その理論を構築、実際に製作した。送信機の各素子の位相をFPGAによりコントロールし、指向性を任意の広がり角にコントロールするシステムと成っている。シミュレーションおよび実験によりその理論の正当性を評価するとともに、位相やパルス幅等のパラメータに対する音圧や指向性などの特性について議論している。開発した送信機により、指向性の広がり角を任意にコントロールすることに成功している。また、実際にアレイ受信機と組み合わせることに成功している。

第5章「レンジイメージングのための異方性広がり角コントロール方式超音波アレイ送信機」では、異方性フェーズドアレイ送信機を用いたイメージングシステムの開発について述べている。前章で、垂直・水平が同じ広がり角を持つ等方性フェーズドアレイ送信機を用いた場合、画角は広がるものの、音圧が低下し測定距離が短くなってしまいう問題が明らかとなった。一方、多くのアプリケーションにおいては、垂直方向の画角は狭く水平方向の画角が広いことが要求されることが多い。そこで、水平方向のみ画角が大きくなるように送信機を制御し、音圧の低下を抑えて測定距離を長くすることを提案した。その理論を述べるとともに、実際にイメージングシステムを構築、垂直・水平で異なる広がり角を持つ音波の発生に成功している。また、アレイ受信機と組み合わせたイメージングシステムを構築し、広い画角で、等方性フェーズドアレイシステムより長い測定可能距離を得ることに成功している。

6章では、本論文を総括している。この論文において開発されたイメージングシステムは、従来の超音波イメージングシステムよりも大幅に測定距離が長く、様々な場面への応用に有効だと認められる。

よって本論文を査読審査した結果、博士論文として受理するのに適格であると判定する。