

視覚障害者のための高分解能超音波視覚代行システムに用いるハイブリッド方式とセンサの検討

瀧 宏文^{†a)} 八島 秀旭^{††} 佐藤 亨[†]

Study of the Hybrid Method and the Sensor for a High-Resolution Ultrasound Vision Substitute System for Visually Handicapped

Hirofumi TAKI^{†a)}, Hideaki YASHIMA^{††}, and Toru SATO[†]

あらまし 視覚障害者用視覚代行システムに必要なセンサを実現するシステムにおいて、指向性の低い送信波を測定方向へ送信し、目標からの反射波を凹面鏡を用いて集中させ、センサアレーで受信するハイブリッド方式を用い、センサアレーを固定しセンサアレーで受信される情報からバックプロジェクションを用いて像を再構成するオフフォーカス方式を提案した。凹面鏡形状の最適化を行い物理光学法を用いて特性評価を行った結果、送信周波数 170 kHz、開口幅 20 cm の凹面鏡、3 cm × 4 cm の楕円形センサアレーを用いて視野角が縦方向 ±15 度、横方向 ±30 度をもち中心方向の角度分解能が 1 度となり、同等の分解能をもつデジタルビームフォーミング方式に比べて 8 分の 1 の素子数で済むことが分かった。また、90 MByte 程度のメモリを使用することでハードディスクを使用せずデータアクセス時間を大幅に短縮できるため、測定距離が 15 cm から 4.5 m の 29 点で各距離で 430 方向を測定する場合、全観測点を測定する所要時間が反射波の到達時間も含めて約 0.1 秒となりリアルタイム信号処理が十分実現できることが分かった。

キーワード 超音波、ハイブリッド方式、凹面鏡、デジタルビームフォーミング、視覚障害者

1. ま え が き

現在、視覚障害者用の歩行補助器具として最も身近なものは杖だが、高い位置（胸の位置程度）の障害物や突起などが分かりにくいという問題点がある。レーザ検出器具や超音波眼鏡などが開発されているが、進路上に障害物があるかどうかを知らせるだけで、障害物の形状や障害物同士の相対位置などの詳細な情報を知らせることはできない。つまり、多数の障害物が混在する日常生活では効果が限られる。

視覚障害者用視覚代行システムに求められる機能は、高い時間分解能をもち、多数の障害物の相互位置を認識し、かつ障害物の種類を特定できることである。つまり、短い測定時間で机の上のコップを認識したり、

壁が途切れている位置、つまり出口を見つけたりする必要がある。この用途には超音波ソナー方式が有効であり、多くの研究がなされているが十分な分解能を得るに至っていない ([1] ~ [3])。

高分解能の画像を得るために、主として電磁波の分野で実用化されている方式として、フェイズドアレー方式やデジタルビームフォーミング方式がある。フェイズドアレー方式では 1 回の送信で 1 方向を測定するので、一定空間を短時間で測定するにはビーム走査を極めて高速度に行う必要がある。そのため並列に走査する手法が存在するが、空気中の音速と測定距離から十分な時間分解能を実現することは困難である ([4], [5])。一方デジタルビームフォーミング方式では 1 回の送信で全方向を測定できるが、約半波長ごとに素子を敷き詰めるため膨大な数の素子が必要であり、フーリエ変換に要する計算のため演算部分が大型化する。送信、受信に使用する素子群を変えることで空間分解能を維持して使用素子数と演算量のある程度低減することが可能であるが、素子数をデジタルビームフォーミング方式の 1/2 以下にすることは難し

[†] 京都大学大学院情報学研究所通信情報システム専攻, 京都市 Department of Communications and Computer Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{††} 京都大学工学部, 京都市 Faculty of Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

a) E-mail: taki@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

い ([6]~[9]) .

そこで本研究では、指向性の低い送信波を測定方向へ送信し、目標（または障害物）からの反射波を凹面鏡を用いて集中させ、センサアレイで受信するハイブリッド方式を提案する .

本章ではハイブリッド方式の基本構成について提案し、3. では計算原理を示す . 4. ではセンサアレイを固定し、受信される情報からバックプロジェクションを用いて像を再構成するオフフォーカス方式を提案する . 5. では凹面鏡形状の最適化を行い、6. では最適化後のシステムを物理光学法を用いて評価する . 7. ではリアルタイム信号処理について提案する .

2. ハイブリッド方式

この装置の概略を図 1 に示す . 装置は送信器と凹面鏡、センサアレイ、刺激装置からなり、送信器は超音波パルスを測定空間全体に放射する .

センサアレイ上には素子が送信波の半波長ごとに敷き詰められている . センサアレイで受信した信号から像の再構成を行う . 刺激装置は頭部に装着することを想定しているが、これは額の感覚が鋭敏で、広い面積を確保できるからである . 目標の方向に対応した額の位置を刺激し、目標方向及び形状を装着者へ伝達する .

視野全体を 1 度の送受信で観測できるため、ビーム走査法 [10] より測定時間が大幅に短縮できる . また、凹面鏡で反射される情報の多くを集中して配置したセンサアレイで受信する . 詳細は後述するが、提案方式を用いることで視野の中心方向に対して同等の分解能をもつデジタルビームフォーミング方式と比較して素子数を 8 分の 1 に減らすことができる .

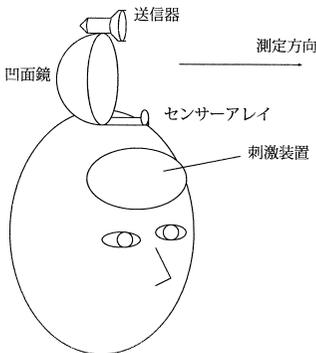


図 1 装置の全体像

Fig. 1 Transmitter, concave mirror, sensor array and stimulator.

3. 音場分布の理論式

提案方式の角度分解能を数値計算により検討する . 図 2 のように座標を定め、 z 軸上を視野の中心方向と定義する . センサアレイが xz 平面に関して対称であるとしても一般性を失わないので、センサアレイの中心を $(x_s, 0, z_s)$ 、センサアレイ面の法線ベクトルを $(-\sin \theta_s, 0, \cos \theta_s)$ とする . ただし、 θ_s はセンサアレイ面の法線ベクトルと z 軸とのなす角である . また反射鏡の反射率は 1 とする . 目標を点 $T_1(x, y)$ 、送信器から T_1 までの距離を r とし、 α を吸収係数とする . 送信電力を W 、送信器のゲインを G_r とし、 k を波数、 ω を送信角周波数、 ρ を媒質の密度、送信素子の指向性関数を $R_r(x, y, z)$ とすると $(0 \leq R_r(x, y, z) \leq 1)$ 、 T_1 における送信波の媒質速度は次式で与えられる .

$$v_{T_1 0} = \sqrt{\frac{W}{2\pi k \rho \omega}} G_r R_r(x, y, z) \frac{1 + jkr}{r^2} \cdot e^{-(\alpha + jk)r} \quad (1)$$

ただし、半径 l_t の円形送信素子としたとき、 $l_t^2 \ll r^2$ を満たす必要がある . 本研究では送信素子を点波源とした . T_1 における目標の音波反射率を $A(x, y)$ 、 T_1 近傍の微小面積を $\Delta S'$ とし、 T_1 から鏡面上の点 M_1 へのベクトルを r_1 、点 M_1 からセンサアレイ面上の点 N_1 へのベクトルを R_1 、及び点 M_1 における鏡面の法線ベクトルを n_1 とする . また、 $r_1 = |r_1|$ 、 $R_1 = |R_1|$ 、 $n_1 = |n_1|$ とし、目標表面の微小領域の法線ベクトルを n_0 、 $n_0 = |n_0|$ 、送信器から T_1 へのベクトルを r とすれば、 T_1 近傍の微小面積 $\Delta S'$ における体積速度は、 $v_{T_1 0} \Delta S' (\frac{n_0 \cdot r}{n_0 r})$ となるため、 T_1 近傍の微小領域による点 M_1 における速度ポテンシャル、媒質の速度はそれぞれ

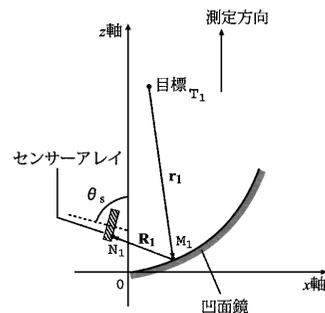


図 2 反射鏡及びセンサアレイの配置

Fig. 2 Arrangement of sensor array and mirror.

$$\phi_{M_1} = A(x, y) \frac{v_{T_1 0}}{2\pi r_1} \frac{\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{r}}{n_0 r} e^{-\alpha r_1 - jkr_1} \Delta S' \quad (2)$$

$$v_{M_1} = \frac{1 + jkr_1}{r_1} \phi_{M_1} \quad (3)$$

与えられる．よって，点 M_1 付近の微小面積 ΔS における体積速度は， $v_{M_1} \Delta S \left(\frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{r}_1}{n_1 r_1} \right)$ となるので，各微小面積から半球面波が作られると考えることにより，点 N_1 における速度ポテンシャルは，

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \int_{S'} \int_S \frac{v_{M_1}}{2\pi R_1} \left(\frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{r}_1}{n_1 r_1} \right) e^{-\alpha R_1 - jkR_1} dS dS' \\ &= \int_{S'} \int_S \frac{jkA(x, y) v_{T_1 0} (1 + jkr_1)}{4\pi^2 r_1^2 R_1} \left(\frac{\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{r}}{n_0 r} \right) \\ &\quad \cdot \left(\frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{r}_1}{n_1 r_1} \right) e^{-(jk+\alpha)(r_1+R_1)} dS dS' \quad (4) \end{aligned}$$

となる．

媒質の x, z 軸方向の速度はそれぞれ $v_{1x} = -\frac{\partial \phi_1}{\partial x}$ ， $v_{1z} = -\frac{\partial \phi_1}{\partial z}$ となり，センサアレー面に垂直な媒質の速度は

$$v_1 = -v_{1x} \sin \theta_s + v_{1z} \cos \theta_s \quad (5)$$

与えられる．圧力の増分は $p_1 = \rho \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = j\rho\omega\phi_1$ ，音波強度 I_1 は， p_1 と v_1 が同位相ならば， $I_{1m} = \frac{1}{2} p_1 v_1^*$ により求められる．

送信周波数 $f = (\omega/2\pi)$ が十分高く， $kR_1 \gg 1$ のとき， p_1 と v_1 はほぼ同位相となる． $R_1 > 3\text{cm}$ ，音速 $c = 340\text{m/s}$ とすると，この条件は $f \gg 1.8\text{kHz}$ となり，超音波については常に成立する．本研究では分解能と減衰率の観点から，使用周波数を $f = 170\text{kHz}$ としており，このとき $I_1 = 0.99994I_{1m}$ である．したがって，以下では， $I_1 = I_{1m}$ として計算する．受信電力 W_R は，素子の有効開口面積を D とすると $W_R = I_1 D$ となるので，送信受信電力比 W_R/W は $I_1 D/W$ で与えられる．また，送信素子，受信素子ともに無指向性であるとして計算機シミュレーションを行った．

4. オフフォーカス方式

センサアレー上に得られる像から直接目標位置を推定するためには，センサアレーの位置を目標までの距離に応じてセンサアレー上に結像するように調節する必要がある．これをオートフォーカス方式とする(図3)．オートフォーカス方式では機械的な駆動が必要で，システムが複雑となる．そのためセンサアレー上に分布した像をバックプロジェクションを用いて波

Regulated mechanically

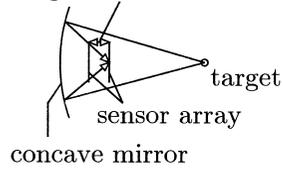


図3 オートフォーカス方式
Fig. 3 Auto-focus method.

fixed sensor array

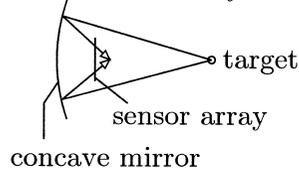


図4 オフフォーカス方式
Fig. 4 Off-focus method.

動光学的に再構成する方式を提案する．これをオフフォーカス方式と呼ぶ(図4)．

バックプロジェクションで画像再構成を行うため，センサアレーの各素子から測定点への到達電力を求め必要がある．受信素子 U が点 N_2 に存在するとし，鏡面上の点を M_2 ，観測点を T_2 ，素子 U での受信信号の振幅を A_U とする．素子の中心 N_2 から鏡面上の点 M_2 へのベクトルを \mathbf{R}_2 ，点 M_2 から観測点 T_2 へのベクトルを \mathbf{r}_2 ，及び点 M_2 における鏡面の法線ベクトルを \mathbf{n}_2 とする．また， $r_2 = |\mathbf{r}_2|$ ， $R_2 = |\mathbf{R}_2|$ ， $n_2 = |\mathbf{n}_2|$ とし，前節と同じく α を吸収係数とする．素子 U による観測点 T_2 での推定速度ポテンシャル ϕ_{2U} は前節と同様に

$$\begin{aligned} \phi_{2U} &= \frac{A_U^*}{2\pi} \int_S \frac{1 + jkR_2}{R_2^2 r_2} \left(\frac{\mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{R}_2}{n_2 R_2} \right) \\ &\quad \cdot e^{-(jk+\alpha)(r_2+R_2)} dS \quad (6) \end{aligned}$$

と表せる．観測点 T_2 での推定速度ポテンシャルは $\phi_2 = \sum_U \phi_{2U}$ で求められる．得られたセンサアレーの各素子の受信信号を用いて，各素子に波源が存在するとして再輻射して目標画像の再構成を行う．このとき波源の位相は受信信号の逆位相を与える．

オフフォーカス方式を採用した場合，目標像はセンサアレーで受信される情報から再構成されるため，センサアレー上に像を結ばせる必要はない．センサアレーを焦点に対してどういう位置に置くのが適当かを調べるため，センサアレー位置による推定精度変化を

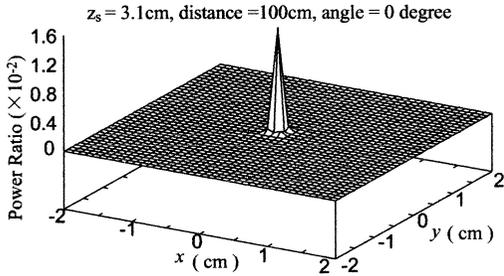


図 5 正面方向目標に対するセンサアレイ上の受信電力分布 ($z_s = 3.1$ cm)
 Fig. 5 Receiving power distribution map on the sensor array. (target direction: center, $z_s = 3.1$ cm)

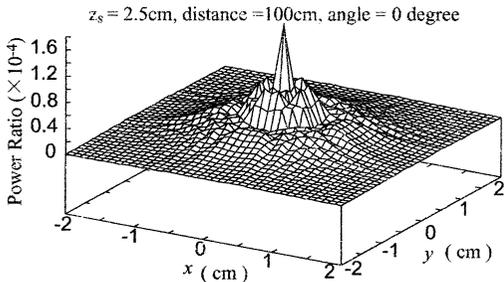


図 6 正面方向目標に対するセンサアレイ上の受信電力分布 ($z_s = 2.5$ cm)
 Fig. 6 Receiving power distribution map on the sensor array. (target direction: center, $z_s = 2.5$ cm)

考察する．本章では簡単のためセンサアレイによる反射鏡のブロッキングを無視し，凹面鏡を回転放物面とした．

数値計算を行うにあたって，センサアレイを幅 4 cm の正方形，中心を $(0, 0, z_s)$ とし，凹面鏡の直径を 10 cm，鏡面が $z = \frac{1}{12}(x^2 + y^2)$ により与えられる回転放物面鏡を想定した．また素子の有効開口面積 $D = 0.01 \text{ cm}^2$ ，送信周波数 $f = 170 \text{ kHz}$ ，吸収係数 $\alpha = 3 \times 10^{-8} f \text{ neper/cm}$ とし，目標からの反射波を球面波とした [11]．ただし，像再構成における分解能を検証するため，空間的広がりが無視できる点目標の撮像を評価する．

目標が中心方向に存在し，目標までの距離が 100 cm，送信周波数が 170 kHz の場合において前述のシミュレーションを用いて得られたセンサアレイ上の受信電力を図 5，図 6 に示す．センサアレイと凹面鏡の距離 z_s を凹面鏡の焦点距離 (3.1 cm) にしたときが図 5，焦点距離より短くしたときが図 6 である．

以上のシミュレーションにより得られた測定空間上での送受信電力比を図 7 に示す．図のようにセンサア

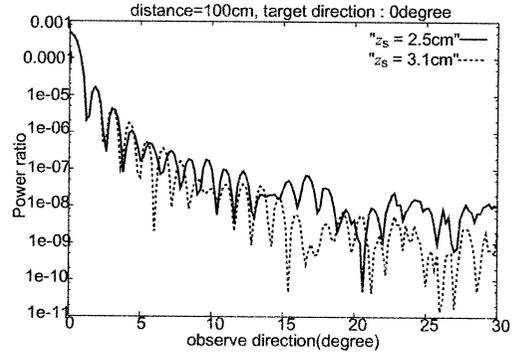


図 7 正面方向の目標の再構成像
 Fig. 7 Reconstructed figure. (target direction: center)

レイと凹面鏡の距離 (z_s) に関係なく推定電力が大きい範囲において，つまりメインローブの広がり，第一，第二サイドローブの分布，高さが一致した．よって焦点距離にセンサアレイを移動させる必要がないため，構造が簡単で軽量化できるオフフォーカス方式を採用する．

5. 反射鏡形状の最適化

前章では凹面鏡の形状として回転放物面鏡を想定した．しかしオフフォーカス方式ではセンサアレイ上に像が焦点を結ぶ必要がないので，焦点を有する鏡面が最適とは限らない．また広い観測方向をカバーするためには中心軸方向から離れた方向に対しても高い解像度と感度を有することが必要となる．本章では本方式に適した鏡面を検討する．

5.1 最適化の手法

図 8 のようにセンサアレイによる受信波のブロッキングを考慮してセンサアレイと反射鏡をオフセット配置した． z 軸方向が測定空間で，視野の中心を xz 平面内で z 軸と 15 度をなす方向とし，視野の中心方向から縦方向に ± 15 度，横方向に ± 30 度の視野角をもつとした．また，センサアレイを縦方向 3 cm，横方向 4 cm の幅をもつ楕円とし，凹面鏡の幅を x 軸， y 軸方向に対してともに 20 cm とした．凹面鏡，センサアレイを xz 平面に関して対称とし， xz 平面 (縦方向) の断面を OQ，センサアレイの中心を S_c とする． $\angle OS_cP = \angle PS_cQ$ となるよう OQ 上に点 P をとり，点 P を通り y 軸に平行となるよう y' 軸を定める．また， $O'P$ が曲線 OQ の法線となるよう z 軸上に O' をとり，PC が視野の中心方向となるよう xz 平面内に点 C をとる．

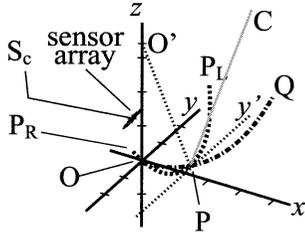


図 8 鏡面及びセンサアレイの座標系
Fig. 8 Reference frame of concave mirror and sensor array.

幾何光学法 ([13]) を用いてセンサアレイ上に効率的に電力が集まるように鏡面の形状を設計する．まず xz 平面 (縦方向) の断面である QO の形状最適化を行い，次に $O'P-y'$ 平面 (横方向) の断面である $P_L P_R$ の形状最適化を行う．その後内挿により三次元鏡面の形状を決定する．

5.2 縦方向の曲率最適化

鏡面を定めるには，センサアレイ中心の座標，凹面鏡の形状，センサアレイの傾きを決定する必要がある．鏡面を xz 平面に関して対称とし，センサアレイの中心 S_c を $(-1.5 \text{ cm}, 0, z_s)$ とした．

縦断面でのセンサアレイと x 軸とのなす角は θ_s であり，また凹面鏡の断面を四次関数とした．凹面鏡の開口下端 O からセンサアレイ中心までの z 軸方向の距離 z_s が 4 cm から 9 cm の範囲における縦方向，横方向断面の形状関数と θ_s の最適値を求め，その評価値の積が最大となるときを最適値とする．

目標方向が視野の中心方向から縦方向のみに ν 度傾いた場合について，提案方法によるセンサアレイ上での受信電力合計 $I_{1\nu}$ と，凹面鏡を用いずセンサアレイのみでデジタルビームフォーミング方式で受信したときの受信電力合計 $I_{DBF1\nu}$ との比 $E_{1\nu}$ を提案方式の効率と定義し，以下の評価関数 V_{ver} を最大化する．

$$V_{\text{ver}} = \prod_{\nu=-15}^{15} E_{1\nu}^{1+2(15-|\nu|)/15} \quad (7)$$

$$E_{1\nu} = I_{1\nu} / I_{DBF1\nu} \quad (8)$$

ここで評価関数は，分解能が悪い方向が 1 方向でも存在すると評価値が下がるように相乗的関数とした．ただし視覚情報と同様に中心方向分解能には高い分解能が必要となるため，相乗的指数型関数を採用した．中心方向の重み付けを 2 乗から 5 乗と比較したが，最適となる断面の形状関数， θ_s に差が生じなかったため 3 乗とした．各センサアレイ位置における断面形状関数

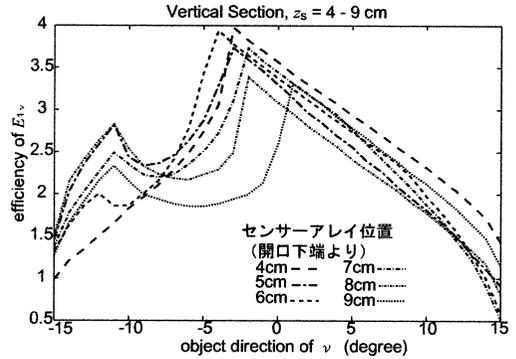


図 9 縦方向の効率の角度特性
Fig. 9 Angular characteristics of efficiency. (vertical section)

及び θ_s の最適値を求め，その値における効率を図 9 に示す．

5.3 横方向の曲率最適化

鏡面を xz 平面に関して対称としているため，センサアレイの横断面は y 軸に平行である．横断面においても，縦断面と同様に z_s が 4 cm から 9 cm における形状関数の最適値を求める．ここで凹面鏡の横断面の形状関数を八次の偶関数とした．評価関数を以下の式で定義する．縦方向での最適化と同じく目標方向が中心方向から横方向のみに ν 度傾いた場合におけるセンサアレイでの受信電力比 $E_{2\nu}$ を効率と定義し，以下の評価関数 V_{hor} を最大化する．

$$V_{\text{hor}} = \prod_{\nu=0}^{30} E_{2\nu}^{1+2(30-\nu)/30} \quad (9)$$

$$E_{2\nu} = I_{2\nu} / I_{DBF2\nu} \quad (10)$$

横方向においても各センサアレイ位置における形状関数， θ_s の最適値を求め，その値における効率を図 10 に示す．

5.4 幾何光学法による三次元鏡面の決定

凹面鏡に対する点 P での接平面を π とし， π 平面上に $x'y'$ 座標系を設定し， x' 軸は xz 平面内に， y' は y 軸に平行に決める． z' 軸は $x'y'$ 平面に垂直で正方向を上とする．縦方向の断面は xz 平面より xyz 座標系，横方向の断面は $O'P-y'$ 平面より $x'y'z'$ 座標系を用いる．

各センサアレイ位置 z_s に対する縦方向，横方向の評価値の積から z_s ，断面の形状関数及び θ_s の最適値を決定し，縦方向，横方向断面の形状関数から中間方向を内挿して三次元鏡面を作成した．

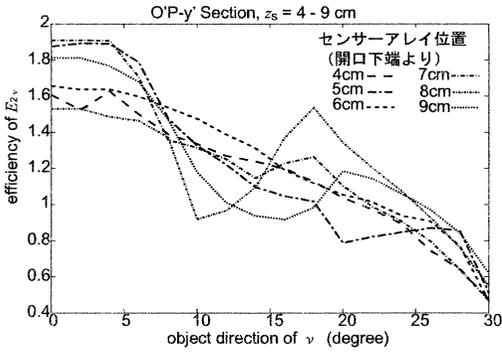


図 10 横方向の効率の角度特性
Fig. 10 Angular characteristics of efficiency.
(horizontal section)

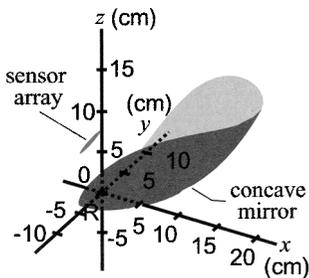


図 11 内挿により作成した三次元鏡面
Fig. 11 Figure of 3-D mirror made by interpolation.

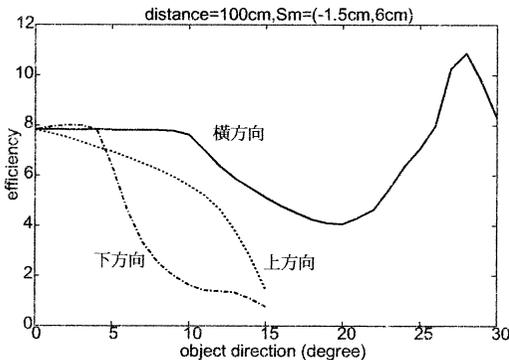


図 12 三次元鏡面の効率の角度特性
Fig. 12 3-D mirror angular characteristics of efficiency.

内挿により決定された三次元鏡面を図 11 に示す。この鏡面を用いて、目標が各方向に存在するときの提案方法の効率を図 12 に示す。

5.5 三次元鏡面の最適化

縦方向、横方向断面の形状関数最適化と内挿により三次元鏡面を作成したが、最適な鏡面を決定するためには三次元で特性評価を行い z_s 、形状関数、 θ_s の最適値を調べる必要がある。そのため作成した鏡面を初

期値として、更に三次元の幾何光学法による最適化を行った。ここで幾何光学法を用いた計算で反射波がセンサアレイに到達する鏡面上の領域を鏡面の使用領域と呼ぶ。使用領域が複数の集団に分かれている場合それらによる像が干渉してメインローブが分裂する問題を生じるため、受信電力を大きくまた使用領域が 1 集団に集まるよう評価関数を設定した。

目標方向を ν 、鏡面上の点 $M'(x'_m, y'_m, z'_m)$ 近傍の微小領域 $\Delta S(x'_m, y'_m)$ からセンサアレイに到達する反射波の電力を $I_{m\nu}(x'_m, y'_m)$ とし、 $x'y'$ 平面における全使用領域の重心を $G_\nu(x'_{G\nu}, y'_{G\nu}, z'_{G\nu})$ 、面積を S_ν とする。このとき電力を次式で重み付けする。

$$V_\nu = \sum W_\nu(x'_m, y'_m) I_{m\nu}(x'_m, y'_m) \quad (11)$$

$$d_\nu(x'_m, y'_m)^2 = (x'_m - x'_{G\nu})^2 + (y'_m - y'_{G\nu})^2 + (z'_m - z'_{G\nu})^2 \quad (12)$$

$$W_\nu(x'_m, y'_m) = S_\nu - d_\nu(x'_m, y'_m)^2 \quad (13)$$

使用領域を 1 集団に集めるためには使用領域全体の重心からの二次モーメントを小さくすればよいが、使用領域の面積が大きくなれば二次モーメントも大きくなるため、使用領域の面積を大きく、かつ二次モーメントが小さくなる重み付けを設定した。目標が xz 平面 ($-15 \leq \nu_1 \leq 15$)、 $CP-y'$ 平面 ($0 \leq \nu_2 \leq 30$) に存在するときの V_ν の値を求め、その積 V_{3D} を最大化する。

$$V_{3D} = \prod_{\nu_1=-15}^{15} V_{\nu_1}^{1+2(15-|\nu_1|)/15} \cdot \prod_{\nu_2=0}^{30} V_{\nu_2}^{1+2(30-\nu_2)/30} \quad (14)$$

最適化後の鏡面を次章で検討する。

6. 物理光学法による評価

以上では、計算時間短縮のため幾何光学法を用いて凹面鏡の最適化を行った。しかしこの方法は厳密には鏡面寸法が波長に比べて無限に大きい場合のみ成立する。以下では鏡面外周による回折の影響を考慮して、鏡面上の音圧分布を数値積分する物理光学法 ([14]) で提案法をより詳細に評価する。

物理光学法を用いて提案方式の角度分解能を求めた結果を図 13、図 14 に示す。送信周波数 f を 170 kHz としたときに得られた角度分解能は、縦方向では -10

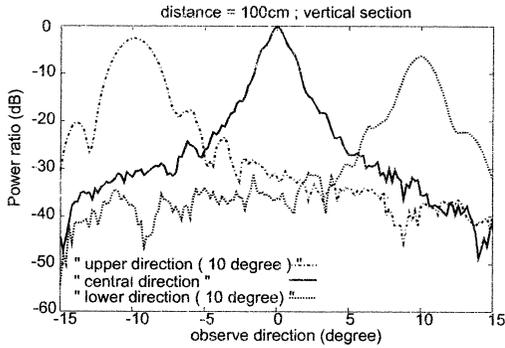


図 13 物理光学法による結像の縦方向角度特性
Fig. 13 Angular characteristics of imaging calculated by physical optics. (vertical section)

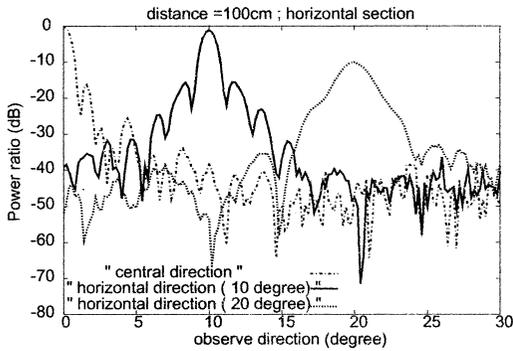


図 14 物理光学法による結像の横方向角度特性
Fig. 14 Angular characteristics of imaging calculated by physical optics. (horizontal section)

度方向で 2.52 度, 0 度方向で 1.16 度, 10 度方向で 1.88 度, 横方向では 0 度方向で 1.20 度, 10 度方向で 0.98 度, 20 度方向で 1.78 度であった。これは電力半値幅, つまり -3 dB 半幅を図 13, 図 14 から読み取った値である。また, 図 15 は幾何光学法を用いた場合での, 目標が中心方向に存在するときの凹面鏡の使用領域である。幾何光学法によって定められた鏡面の使用領域から推測される角度分解能と, 物理光学法を用いて求められた角度特性により判明した角度分解能はよく一致している。

最適化後の三次元鏡面を用いて, 目標が縦断面の -15 度から 15 度, 横断面の 0 度から 30 度に存在するときのセンサレーの効率を, 物理光学法と幾何光学法で比較したものが図 16 である。ここでは, 提案法での受信電力と, 同一の開口面積をもつセンサレーを用いてデジタルビームフォーミング方式を適用した場合の電力の比を効率と定義する。図のように,

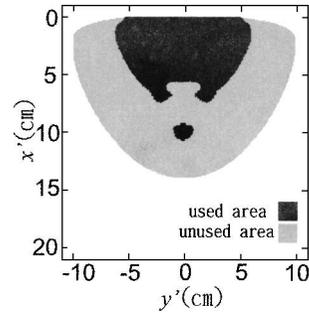


図 15 正面方向目標に対する幾何光学法による凹面鏡の使用領域

Fig. 15 Used area on the mirror by using geometric optics. (target direction: center)

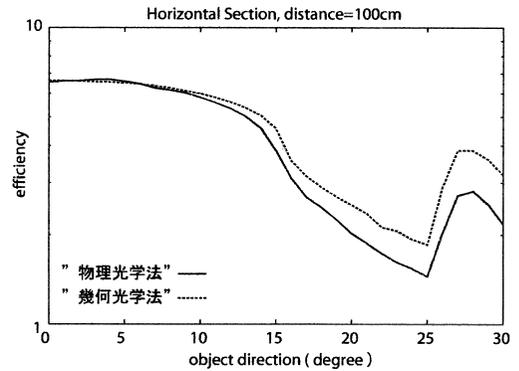


図 16 センサレーでの受信電力効率 (水平方向)

Fig. 16 Receiving power efficiency on the sensor array. (horizontal section)

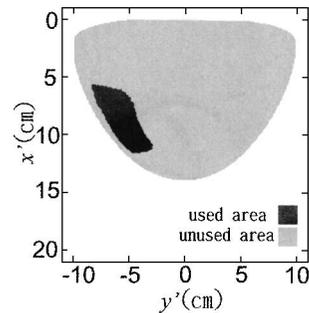


図 17 側方目標に対する幾何光学法による凹面鏡の使用領域

Fig. 17 Used area on the mirror by using geometric optics. (target direction: 30 degrees away from center)

中心方向から 15 度以内では両者はよく一致している。横方向の 15 度以上離れた範囲では結果に隔たりが存在するが, 増減の傾向は一致している。図 17 は目標が横方向 30 度に存在するときの凹面鏡の使用領域である。このように周辺方向では主に鏡面の周辺部にお

ける反射波がセンサアレーで受信される．よってフレネル領域程度の広さの鏡面が存在すると仮定している幾何光学法では実際よりも広い鏡面での受信電力を求めるため、両者に差が生じると考えられる．しかし両者の比は目標方向に対する単調な関数であり、図 16 を用いて容易に補正可能である．

これらの結果から、幾何光学法による鏡面最適化の妥当性を示すことができた．また、中心方向の効率は幾何光学法で 6.62、物理光学法で 6.56 であり、中心方向角度分解能が縦方向 1.16 度、横方向 1.20 度となる．デジタルビームフォーミング方式を用いた場合、送信波長を λ 、アレーの直径を D_1 とすると、円形のセンサアレーによる電力半値幅 $\theta_{1/2}$ (degree) は次式で与えられる．

$$\theta_{1/2} = 58.4\lambda/D_1 \quad (15)$$

そのため提案法と同等の分解能を実現するには縦方向 10.07 cm、横方向 9.73 cm の楕円形センサアレーが必要となる．提案法では縦方向 3 cm、横方向 4 cm の楕円形センサアレーを使用しているためセンサアレーの面積は 8.17 分の 1 となり、センサアレー上の素子間隔を同じとすれば必要とする素子数も 8 分の 1 以下となる．更に、縦方向 ± 15 度、横方向 ± 30 度の視野角をもち、ほぼ全方向で 2 度以上の角度分解能をもつため視覚代行システムとして十分使用可能であることが分かった．

7. リアルタイム信号処理

リアルタイム処理を行うため、4. に示した式 (6) の一部 $L_{UT_2} = \phi_2 U / A_U^*$ をあらかじめ計算し、ライブラリとして用意しておく．観測時にはセンサアレー上での受信信号を用いて推定速度ベクトル $\phi_2 = \sum_U A_U^* L_{UT_2}$ を求め、推定電力を導く．

ライブラリには、各素子から全観測点への関数 L_{UT_2} が必要である．3 cm \times 4 cm の楕円センサアレー面に 0.1 cm 間隔で素子を並べるとして素子数は 942 となる．また視野角を横方向 ± 30 度、縦方向 ± 15 度とし、中心方向を 1 度間隔、30 度方向を 3 度間隔で観測するとすると測定方向は約 430 方向となる．測定距離を 15 cm から 4.5 m とし、15 cm のとき 1 cm 間隔で、4.5 m のとき 30 cm 間隔で測定する場合、測定レンジサンプル数は 29 個となる．

以上よりライブラリは約 1200 万種用意すればよく、ライブラリの値を単精度複素数浮動小数点値とすれば

ライブラリは約 90 MByte となる．よって装置の起動時にメモリにすべて読み出すことができるため、ハードディスクを使用せずデータアクセス時間を大幅に短縮できる．また、Xeon Pentium4 2.8 GHz を使用した際全観測点の推定電力を求める所要時間は約 0.07 秒であった．2 cm のパルス波を送信し各レンジで 4 回ずつサンプリングする場合、サンプリングレートは 14 μ s となるため、942 個の素子をマルチプレックスするとき 64 MHz サンプリングの A-D コンバータ一つで処理可能である．またサンプルホールドは 14 μ s となり超音波の目標からの反射波到達時間に比べて無視でき、受信と並行して処理可能である．よって目標からの反射波到達時間を加えても約 0.1 秒となる．このことから、リアルタイム信号処理が十分実現できることが分かる．

8. むすび

高い時間分解能、空間分解能をもち安価な超音波視覚代行システムを実現するため、凹面鏡とセンサアレーを組み合わせたハイブリッド方式を用い、数値的に結像させるオフフォーカス方式を提案した．ハイブリッド方式は測定空間全体に広いビームを送信し、目標からの反射波を凹面鏡で反射した後センサアレーで受信する．凹面鏡で反射することによりセンサアレー上に信号を集めることができる．オフフォーカス方式ではセンサアレーと凹面鏡との距離を固定しセンサアレー上の受信電力からバックプロジェクションを用いて再構成像を作成する．

凹面鏡の曲面を幾何光学法で最適化し、物理光学法を用いて本方式の特性評価を行った．その結果、送信周波数を 170 kHz、開口幅 20 cm の凹面鏡、3 cm \times 4 cm のセンサアレーを用いて視野角が縦方向 ± 15 度、横方向 ± 30 度をもち中心方向の角度分解能が約 1 度となり、同等の分解能をもつデジタルビームフォーミング方式に比べて 8 分の 1 の素子数で済むことが分かった．更に、リアルタイム信号処理が十分実現できることが分かった．

謝辞 本研究の一部は 21 世紀 COE プログラムによる．

文 献

- [1] H.R. Everett, Sensors for Mobile Robots, Theory and Application, pp.139–150, A K Peters, 1995.
- [2] L. Korba, "Variable aperture sonar for mobile robots," Proc. IEEE International Conference on RA, pp.3136–3141, San Diego, USA, 1994.

- [3] 矢田晃子, 大矢晃久, 油田信一, “高速・高精度に反射点群を計測可能なソナーリングシステム?” 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1173-1182, 1999.
- [4] S.R. Freemam, M.K. Quick, M.A. Morin, R.C. Anderson, C.S. Desilets, T.E. Linnenbrink, and M. O'Donnell, “Delta-sigma oversampled ultrasound beamformer with dynamic delays,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.46, no.2, pp.320-331, March 1999.
- [5] M. Inerfield, G.R. Lockwood, and S.L. Garverick, “A sigma-delta-based sparse synthetic aperture beamformer for real-time 3-D ultrasound,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.49, no.2, pp.243-254, Feb. 2002.
- [6] S.W. Smith, H.E. Pavy, Jr., and O.T. von Ramm, “High-speed ultrasound volumetric imaging system — Part 1: Transducer design and beam steering,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.38, no.2, pp.100-108, March 1991.
- [7] O.T. von Ramm, S.W. Smith, and H.E. Pavy, Jr., “High-speed ultrasound volumetric imaging system — Part 2: Parallel processing and image display,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.38, no.2, pp.109-115, March 1991.
- [8] G.R. Lockwood and F.S. Foster, “Optimizing the radiation pattern of sparse periodic two-dimensional arrays,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.43, no.1, pp.15-19, Jan. 1996.
- [9] A. Austeng and S. Holm, “Sparse 2-D arrays for 3-D phased array imaging — design methods,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.49, no.8, pp.1073-1086, Aug. 2002.
- [10] 福地弘道, “近距離視覚センサ装置,” 日本ロボット学会誌, vol.9, no.5, pp.126-129, 1991.
- [11] 瀧 宏文, 佐藤 亨, “視覚障害者のための反射鏡とセンサアレイを用いた高分解能超音波誘導システム,” 信学技報, AI2001-3-2, 2001.
- [12] 瀧 宏文, 八島秀旭, 佐藤 亨, “視覚障害者のための高分解能超音波誘導システムに用いるセンサーアレイ位置の最適化と再構成像の検討,” 信学総大, A-11-13, 2003.
- [13] 山下榮吉, 電磁波問題の基礎解析法, 電子情報通信学会, 東京, 1987.
- [14] 山下榮吉, 電磁波問題解析の実際, 電子情報通信学会, 東京, 1993.

付 録

式(1)の係数

送信素子を点波源とすれば, $v_{T_1 0}$ は定数 b_v を用いて以下のように表せる.

$$v_{T_1 0} = b_v \frac{1 + jkr}{r^2} e^{-(\alpha + jk)r} \quad (\text{A}\cdot 1)$$

遠方界, つまり $kr \gg 1$ のとき媒質速度 $v_{T_1 0}$ と圧力の増分 $p_{T_1 0}$ は同位相で $p_{T_1 0} = \frac{\rho \omega}{k} v_{T_1 0}$ となるので

音波強度 I は

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} p_{T_1 0} v_{T_1 0}^* \\ &= \frac{k \rho \omega b_v^2}{2r^2} e^{-2\alpha r} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 2)$$

減衰係数 $\alpha = 0$ のとき, 送信電力 W は $W = 4\pi r^2 I$ と表せるので

$$W = 2\pi b_v^2 k \rho \omega \quad (\text{A}\cdot 3)$$

$$b_v = \sqrt{\frac{W}{2\pi k \rho \omega}} \quad (\text{A}\cdot 4)$$

以上より次式が導出できる.

$$\begin{aligned} v_{T_1 0} &= \sqrt{\frac{W}{2\pi k \rho \omega}} G_r R_r(x, y, z) \frac{1 + jkr}{r^2} \\ &\cdot e^{-(\alpha + jk)r} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 5)$$

(平成 16 年 4 月 22 日受付, 10 月 6 日再受付,
17 年 1 月 19 日最終原稿受付)



瀧 宏文 (正員)

平 12 京大・医・医卒・平 14 同大大学院情報学研究所通信情報システム専攻博士課程入学・超音波を用いた視覚障害者誘導システムの研究に従事.



八島 秀旭

京大・工・電気電子工学科 4 回生・超音波を用いた視覚障害者誘導システムの研究に従事.



佐藤 亨 (正員)

昭 51 京大・工・電気第二卒・昭 56 同大大学院博士課程了. 同超高層電波研究センター助手, 工学部講師, 同助教授を経て, 平 10 より同大学院情報学研究所通信情報システム専攻教授. レーダによる降雨, 中層・超高層大気, 軌道運動物体のリモートセンシング並びに地下探査等のレーダ信号処理の研究に従事. 日本航空宇宙学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 文化財探査学会, IEEE, 米国気象学会会員・工博.