

第 3 章

球面アレイ型基本システムの設計と構築

球面アレイ型マイクロフォンシステムの基本特性に関する理論・数値解析結果により、本提案基本システムは、高感度、鋭指向特性、高 SNR、合焦機能を有することが分かった [15]。しかし、このような理論・数値解析の結果が実験的にも妥当かどうか、加えて妥当な場合には更に如何なる精度で成立するかを、実験的に評価する必要がある。また、球面アレイ型マイクロフォンシステムの実用化へ向けて、設計・構築手法を具体的に明らかにする必要もある。これらの目的のため、本章では、実時間性、可搬性に重点を置いて実験評価用の簡単な実験系を設計・構築する。

実験系の設計・構築に際しては、使用目的に合わせてシステム仕様を決め、その上で、システム全体の構成、球面アレイとマイクロフォン配置、制御回路などの部分構成について検討し、具体的に構築する。以下、本章ではシステムの設計仕様の明確化から始め、システムの設計・構築について述べた後、実験上重要な使用マイクロフォンの校正について述べると共に、その基礎的実測結果の一例を示す。

3.1 システムの設計仕様

野外での野鳥鳴声音の採取を念頭に入れると、構築システムには可搬性がまず要求される。この意味では、球面上アレイは単なる円弧状あるいは十字交差円弧アレイより、バランスがよく、しかも曲がりやすく、野外での使用に適する。しかし球面アレイの開口直径が大きくなると、搬送・設置し辛くなることもあるから、当然、ある程度の制約が有り得る。逆に開口直径を小さくすると、合焦空間分解能が劣化するので、これらのトレードオフでアレイの開口直径を決めることになる。

野鳥の棲息状況を乱さず、その鳴声音を高感度で採取すること、並びに多数の廉価な市販マイクロフォン素子を使用しざる得ない事情から、球面アレイ型マイクロフォンシステムの焦点走査範囲を野鳥の棲息範囲の中、マイクロフォン素子の感度限界近くと思われる 10m~30m とし、アレイの曲率半径を焦点走査範囲の midpoint 20m に設定する。また、採取音源の周波数範

囲を 100Hz~5kHz と想定し，前章の理論・数値解析の結果に基づき，方位，距離両方向の分解能を，それぞれ $\pm 13.5\text{deg/kHz}$ と 1.0m/kHz 以下とする．焦点近傍の感度，SNR 向上率をいずれも最低 45dB，相対受信 RMS 誤差の上限を 1.6dB とする．このように設定した球面アレイ型マイクロフォン実験系の仕様を表 3.1 に示す．

表 3.1: Designed specifications of the microphone system with a spherical array.

No.	項目	規格値
1	焦点走査範囲 R	10m~30m
2	球面曲率半径 R_0	20m
3	球面開口直径 L_{\min}	1.472m
4	マイクロフォン設置間隔 Δd_{\max}	3.2cm
5	受信周波数範囲 $f_{\min} \sim f_{\max}$	100Hz~5.3kHz
6	方位分解能 θ_{\max}	$\pm 13.5\text{deg/kHz}^*$
7	距離分解能 Δr_{\max}	1.0m/kHz^*
8	感度向上率 S_{\min}	$\geq 45\text{dB}^{**}$
9	SNR 向上率 SNR_{\min}	$\geq 45\text{dB}^{**}$
10	相対受信 RMS 誤差 RMS_{\max}	$\leq 1.6\text{dB}$

*: 半値幅に当たる角度或は距離で，ほぼ帯域幅に逆比例

** : 焦点近傍の値

音源から放射する音波は，球面上配置のマイクロフォンアレイという空間フィルタに通され，システムの出力として，合成される．従って球面アレイの曲率半径並びに開口直径，マイクロフォンの配置方法と配置間隔，使用マイクロフォンの個数等はシステムの感度，指向特性，空間分解能，SNR，相対受信 RMS 誤差に密接に関連し，後者に複雑な影響を与える．以下，これらの仕様設定について，簡単な説明を加える．

3.1.1 球面アレイの曲率半径

球面アレイの曲率半径の設定に置いて，野鳥の棲息状況を乱さず，その鳴声音の高感度採取を念頭に置いた．また多数のマイクロフォン素子を実装する都合上，コスト的な制約から，1個当たり 300 円程度のマイクロフォン素子を用いることにした．そのため，より高級なマイクロフォン素子に比較して感度不足が否めない．さらに基礎実験ということもあって，野鳥は 10m から 30m の範囲にいるものと想定し，当球面アレイ型マイクロフォンシステムの焦点走査範囲をこの範囲に設定した．それ故，球面アレイの曲率半径は焦点走査範囲の midpoint までの距離 20m とした．このように曲率半径と選定することにより，軸上走査焦点と各マイクロフォ

ン素子間の距離の差の変化範囲を小さくできるので、その分だけ高精度な振幅減衰補正と遅延時間補正も実現できることになる。

3.1.2 球面上マイクロフォンの配置

前章で述べたように、機械的な回転と首振りに加えて、軸上焦点電子走査の球面状アレイ採用システム構成では、3次元空間内に於て対称性があり、球面アレイ軸からの距離という方位方向の1変数と球面アレイ中心軸に沿う方向の距離という2変数だけでシステムの基本特性を評価できる。

球面型アレイの構成方法としては、一般に同心リング上にセンサを等間隔に配置し、各リングを連結して球面を構成する方法と、極座標域で円弧状1次元センサアレイを角度方向に等間隔に配置する方法とが考えられる。その対称性からいずれの場合も、多数センサを配置する限り、アレイ軸からの距離とそれに沿う方向の距離という2変数で種々特性を評価可能である。

しかし、前者の場合には、システムの上記特性の解析的評価が複雑になる。これに対して後者では、アレイの開口直径に比較して焦点走査範囲が十分に大きい場合には、アレイ球面は近似的にアレイ軸近傍の局所的な音源分布のフーリエ変換面になる。それ故、アレイ開口サイズで採取空間周波数の上限が定まることになり、設計が極めて単純化される。

そこで本研究仕様では、後者のマイクロフォン配置を採用することにした。また、基礎実験システムを設計・構築するという立場から、球面開口の角度方向に45度の等間隔で、4本の1次元円弧状アレイを配置することにした。

3.1.3 マイクロフォンの配置間隔

動径方向に等間隔にマイクロフォンを実装した場合、空間的サンプリング定理により、マイクロフォン設置間隔が信号に含まれる上限周波数に相当する空間周波数の2倍の逆数以下でないと、Aliasing error(ゴースト)が発生する [1]。本基礎実験系で扱う信号の周波数範囲は100Hz~5.3kHzとしているので、動径方向のマイクロフォン設置間隔は $\lambda/2 \simeq 3.2\text{cm}$ 以下に選択する必要がある。ここでは、その配置間隔を3.2cmとした。

3.1.4 球面アレイの開口直径

野鳥の鳴声採取の目的では、システムの可搬性要求から、球面アレイの開口直径は1.5m以内に収める必要があると思われる。また、焦点にある音源に対してシステムの最低感度は45dB以上必要とする場合、前章の理論・数値解析の結果により、このような最低感度を満たすためには、180個以上のマイクロフォンを球面アレイに配置する必要となる。これらのマイクロフォンを前述のマイクロフォン配置手法で、球面アレイ中心にマイクロフォン1個を、各円

弧上に46個のマイクロフォンを配置すると、合計185個のマイクロフォンの使用となり、必要とする最低感度にも満足する。それ故、各円弧上に3.2cmの等間隔で46個のマイクロフォンを配置する場合、球面アレイの開口直径は1.472mとなり、可搬範囲のサイズにもある。また1.472mの開口直径設定では、理論・数値解析的に試算した結果から、空間分解能も設定仕様を満足する。そこで、球面アレイの開口直径を1.472mとした。

3.2 システムの設計

球面アレイ型マイクロフォンシステムの実験系の設計・構築に当たっては、システム本来の使用目的と合わせ、システムの特性を十分に評価できるように設計する必要がある。一方、システムの簡便性と実現性の観点から、簡単かつ実現可能なシステム、実用化へ向けての有用なデータが収集できるシステムを設計することも要求される。このような要求と前節の設計仕様にに基づき、以下、まずシステム全体を設計し、その後で、システム各部を具体的に設計する。

3.2.1 システム全体の設計

焦点走査により3次元空間内の音源位置を探索し、検出加法ノイズから目的音源を分離聴取することは、球面アレイ型マイクロフォンシステムに持たせたい基本的な機能である。システムの焦点を目的音源に絞ることにより、高感度、高SNR、忠実性を有するシステムが期待できることは、前章の理論・数値解析の結果からすでに分かった。しかし、3次元空間に渡って、電子的に焦点を走査することは、システム自体が複雑になり、実現可能であるとしても現実的には得策でない。それ故、球面アレイの機械的な回転と首振りに加えて、コンピューター制御の下で、球面アレイ軸上における焦点の電子走査という簡単な仕組みが有望であると考えた。これにより球面アレイ軸から同一円周上のマイクロフォンは、軸上の焦点まで等距離であるため、それらに同一のゲインと時間遅延を与えれば、合焦走査が簡単に実現できるからである。加えて、このようなシステム構成の下では、合焦走査の制御も非常に簡単となる。

一方、システムの可搬性と移動性の要求から、球面アレイには簡単に取り付け、取り外しができる構造を採用する必要がある。そのため、野外において設定しにくい場所でも、システムを簡単に設置できるように、ここでは、測量用の三脚台を使用し、現場でシステムを組み立てる仕組みを採用することにした。これ以外にも、野外での使用に合わせてシステムの電源はバッテリーにより供給する。そのため、電気回路の電源供給はできるだけ少ない容量に控えることも必要となる。

3.2.2 システムの部分設計

以上のような全体設計の下では，球面アレイ型マイクロフォンシステムは主に球面アレイ，電子制御回路，機械的回転と首振り並びに固定部，取り付け台の四大部分からなる．この内の取り付け台は，測量用の三脚台をそのまま使用できるため，その設計を省略し，以下，球面アレイ，電子制御回路，機械的回転と固定部の各部を具体的に設計する．

(1) 球面アレイの設計

提案したマイクロフォンシステムの基本特性の実験的評価を意味あるものにするためには，仕様に定められた曲率半径 20m，開口直径 1.47m の球面状アレイの上の所定位置にマイクロフォン素子を高精度で取り付けなければならない．また，球面アレイの搬送，取り付けなどによるマイクロフォン素子間の相対位置変動を生じないように，球面アレイの一体化が望ましい．そのため，図 3.1 に示すようにマイクロフォン素子取り付け用フレームを用意し，その上に放電加工機で仕様に定められた設置間隔のマイクロフォン素子取付け穴を正確に開けることにした．その後，マイクロフォン素子を埋め込んだアルミパイプを穴に通し，パイプの長さの調整で，所望の曲率の球面アレイを構成する方法を採用した．フレームの軽量化と撓みの少量化を総合的に考える必要があるが，放電加工機を用いる必要上，フレーム材料にはある程度の厚みを有するステンレス板を採用することにした．また，穴を通すアルミパイプの垂直度を保つため，フレームの片側上面にさらに 15x10mm のアルミ角材を張り合わせ，同様な間隔でアルミ角材の上にも穴をあけて，同パイプを通すことにした．

(2) 電気回路系の設計

3次元空間に於て焦点走査を行うため，機械的な回転と首振り（水平方向と上下方向2次元）走査に加えて，ノートタイプパソコン制御の下で，球面アレイ軸上で電子的に焦点を走査して，音源位置を探索することは，全空間に渡る電子走査の構成より簡単に実現できることは既に述べた．球面アレイ軸上の焦点設定位置情報に基づき，球面上に配置された各マイクロフォンの出力に適切な遅延時間を与えることで，各マイクロフォンの出力の位相を同相化することにより，球面アレイ軸上の焦点走査は実現される．実時間システムの要求に対しては，アナログとデジタル混合の電子回路で，焦点の電子走査を実現するため，デジタル制御可能なポテンショメータ，オペアンプと遅延素子 BBD(バケツブリゲートデバイスの略称)を用い，球面伝播に伴う振幅減衰と時間遅延を補正する．以下，アナログ並びにデジタル混在の電子回路設計について述べる．

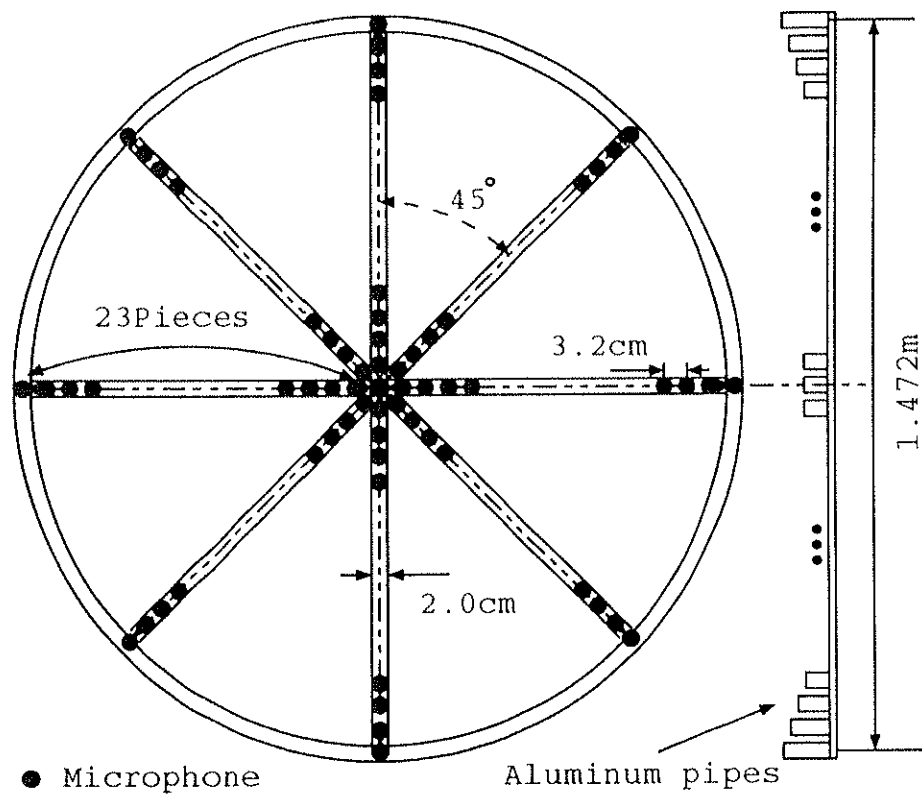


図 3.1: Arrangement of the microphones on the frame of the spherical array.

(i) 制御回路の設計

図 3.1 に示した球面アレイの設計では、焦点走査を球面アレイの軸上に限定する場合、球面アレイの中心から、同一円周上の 8 個のマイクロフォンは軸上の焦点までの距離が同じであるため、それらの出力は理論的には同相である。そのため、この 8 個のマイクロフォンの出力を先に加算して、その後、振幅減衰補正、遅延補正を行えば、1 個の可変ゲイン要素と可変遅延要素で、1 チャンネル分の 8 個マイクロフォン出力の振幅、遅延補正を実現できることになる（ただし、球面アレイ中心の 1 個のマイクロフォンの出力を 1 チャンネル分とする）。この発想により、計 185 個のマイクロフォンの制御は 24 チャンネルに分け簡単に実現できる。このように考えたシステム全体の制御を、図 3.2 に示す。計 185 個のマイクロフォンの制御を 24 チャンネルに分けて実現する場合、当然、システムの感度、SNR、相対受信 RMS 誤差の分布特性には影響がないはずである。ただしシステムの制御は約 8 分の 1 の簡単さとなる。

図 3.2 に示した球面アレイ型マイクロフォンシステムの制御設計では、アルミパイプの先端に取付けたマイクロフォンの出力をパイプの中に取り付けた前置増幅器で増幅し、各チャンネルに於て、同円周上の 8 個のマイクロフォン出力をオペアンプによる加算器で加算し、一つの

チャンネルの出力とする。この出力に対して、該当チャンネルのゲインユニットで振幅補正、遅延ユニットで遅延補正を行う。ゲインユニットのゲイン並びに遅延ユニットの遅延時間は、走査焦点の位置に応じてパソコン上で計算し、デジタル量としてデジタルポテンショメータの制御端子に与える。各チャンネルに於て振幅、遅延補正を行った24チャンネルの出力を最終的に加算して、システムの出力とする。このように、ノートブックパーソナルコンピュータによる中央制御でシステムの焦点を走査し、音源を探索することができる。以下、各チャンネルのゲインユニットと遅延ユニットの設計について述べる。

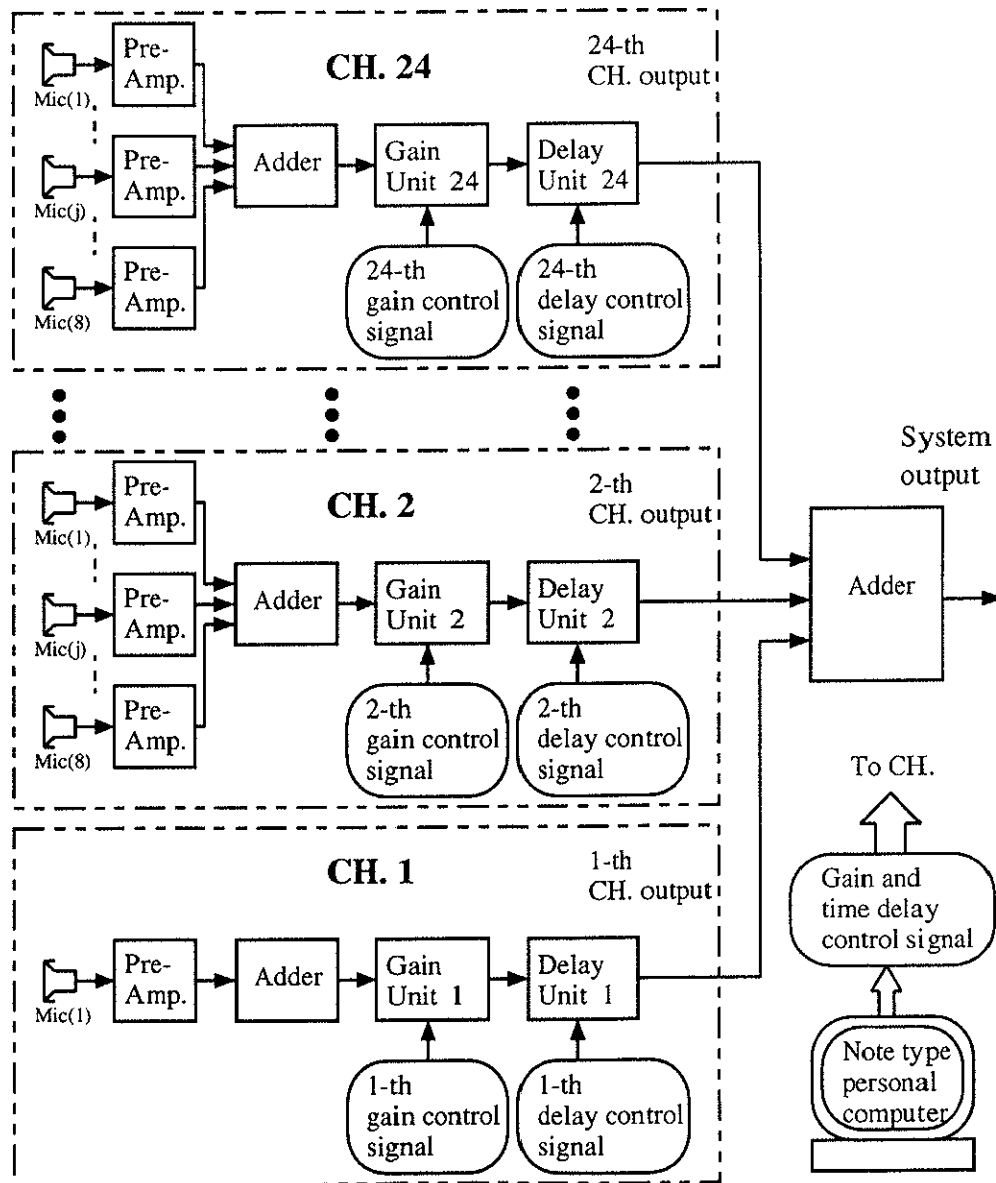


図 3.2: A block-diagram of the designed electronic circuits of the microphone system with a spherical array.

(ii) 可変ゲインユニットの設計

各チャンネルのゲインユニットの可変ゲインは、前章の理論・数値解析に述べたように、球面アレイ軸上の焦点の設定位置に対して、焦点と各チャンネルのマイクロフォン間の距離に応じて制御し音波の球面伝播に伴う振幅減衰を補正する。ノートタイプパーソナルコンピュータ上で、焦点位置を半自動で設定し、各チャンネルに必要な振幅補正量をコンピュータに計算させ、その結果を該当チャンネルのゲインユニットに出力する。コンピュータが出力するデジタルの振幅補正量をアナログのゲインに変換するには、可変抵抗として知られる8bit デジタルポテンショメータを用い、送られてきたデジタル振幅補正量を抵抗値に変換する。また、この抵抗値をゲインに変換するには、オペアンプを利用した帰還増幅回路を用い、ポテンショメータの抵抗をオペアンプの入力抵抗として用いた。帰還抵抗を固定した上で、入力抵抗を走査焦点に応じて変化させ、可変ゲインユニットを構成する。その構成を図3.3に示す。

図3.3に示したオペアンプによる反転帰還増幅回路では、マイクロフォンシステムの焦点走査範囲10m~30mに応じて、ゲインユニットのゲインを変えるため、帰還抵抗 R_f を75k Ω に固定し、入力抵抗 R_i として使うポテンショメータ(定格値10k Ω)の抵抗を2.5k Ω から7.5k Ω まで変えれば、焦点走査範囲に応じる必要な可変ゲインが実現される。

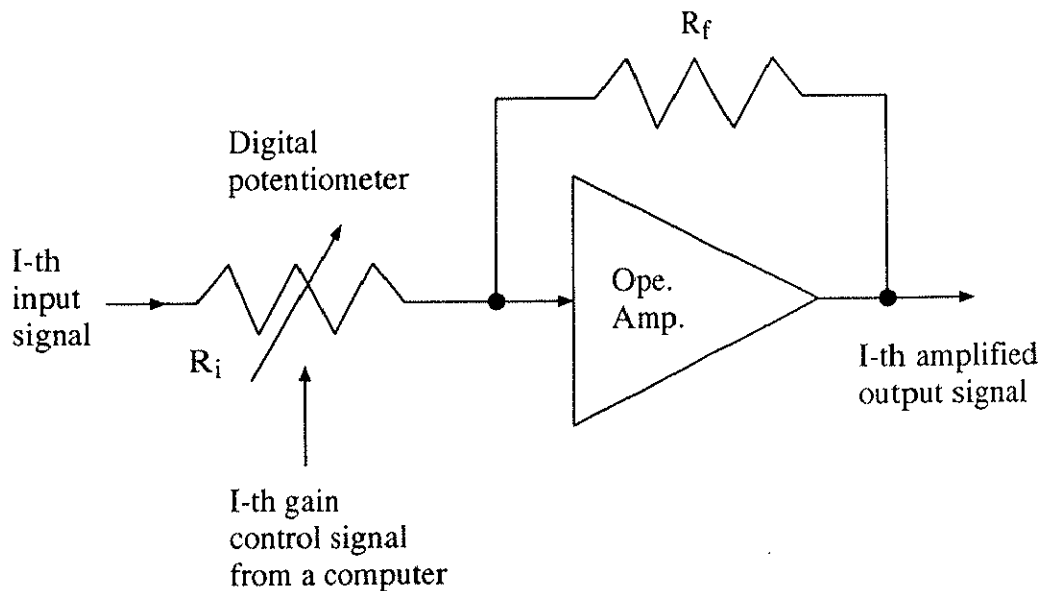


図 3.3: Construction of the gain unit in the microphone system with a digital potentiometer and an operational amplifier.

(iii) 可変時間遅延ユニットの設計

マイクロフォンシステム所望の合焦機能とズーム機能実現のためには、焦点走査に応じて、各チャンネルでは振幅補正後の出力に対して適切な時間遅延を与えなければならない。尚、球面アレイの曲率半径を 20m とした場合、球面中心から 10m の最近点と 30m の最遠点の球面軸上の焦点に対して、遅延補正の時間範囲はそれぞれ $0\sim 13.3\mu\text{s}$ と $0\sim 39.8\mu\text{s}$ となっている。この広範囲の遅延時間を高精度で実現するため、クロック周波数により遅延時間を任意に変えられる遅延素子 BBD（バケットブリゲートデバイス）を用いる。

BBD 遅延素子を用いた遅延ユニットのブロック図を図 3.4 に示す。BBD 遅延素子の駆動クロック周波数制御は、図 3.5 中の CR 回路から成るクロック発生器とポテンショメータで行う。コンピュータから送られてきたデジタルな遅延時間を一旦ポテンショメータで抵抗値に変換し、CR 回路の抵抗を変えることによって、クロック周波数を変え、遅延時間を変える。焦点走査範囲 10m~30m に渡って、遅延時間 $0\sim 39.8\mu\text{s}$ を高精度で制御するため、単一 CR 回路で当該の広範囲なクロック周波数発生は困難であると予想された。そこで、固定のコンデンサ C、抵抗 R を 8 組用意し、コンピュータ制御のアナログスイッチで切り替え、これに上記と同じポテンショメータを直列に付加して制御することにした。つまり、広周波数範囲を複数領域に分け、個々の周波数範囲内で 8 ビットのデジタルポテンショメータにより、高精度な可変遅延ユニットを実現する。このようなクロック発生器を図 3.5 に示した。

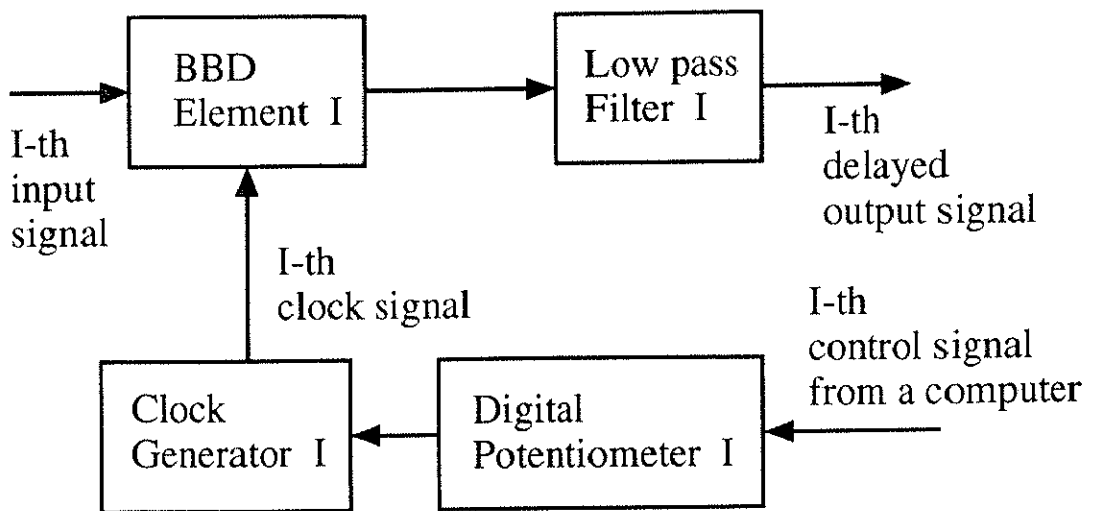


图 3.4: Construction of the time delay unit in the microphone system with a digital potentiometer and a BBD time delay element.

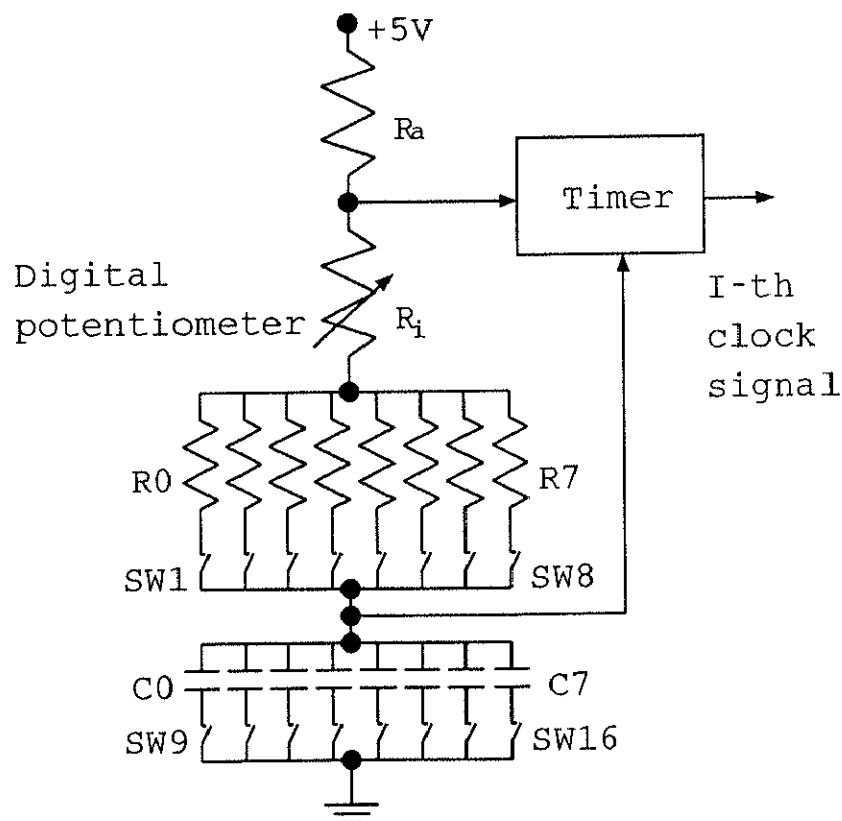


图 3.5: Construction of the variable clock generator in the time delay unit, with a digital potentiometer and 8 group CR elements.

(3) 機械回転と固定部の設計

システム全体の設計個所で述べたように、システムの可搬性や、特に野外で移動しながら、使用することを勘案すると、測定場所の変更などに応じて、球面アレイフレームを簡単に測定台に取り付け、取り外す構造が望ましい。ここでは、取り付け用測定台として測量用の三脚を用いることにした。該当三脚に球面アレイを装着するため、図 3.6 のような構造を採用し、連接皿、アーム及びバランス等の部品は、すべて材料部材を購入し設計・自作した。

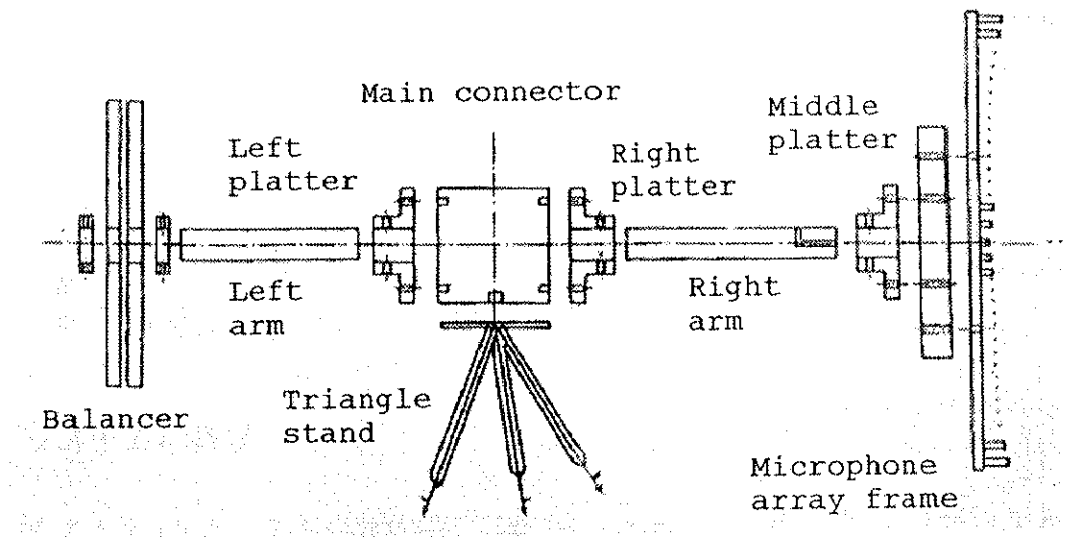


図 3.6: Designed join parts for to fix the microphone frame on the triangle stand.

また、簡易的な実験系であるため、本系では、水平方向に関する焦点走査は球面アレイフレームと固定部の全体的回転（三脚台の中心を軸とする）で実現し、上下方向に関する焦点走査は三脚台の脚の前後移動による球面アレイフレームの首振りで実現する。野鳥の鳴声採取に於ては、調査地によって予め野鳥の棲息地点が定まっているため、水平、上下方向における焦点走査はダイナミック性が必ずしも要求されない。それ故、本論文では、両方向ともに、焦点走査を手動で行うことにした。尚、上下方向の首振りには三脚の足の移動で実現できるため、現段階では、水平方向回転の機械部分だけを設計し、上下方向の首振りの機械部分を、今後必要に応じて付加することにした。水平方向に関する全体的回転はギアボックスに装填の 1 組のかさ歯車とギアをハンドルで駆動して実現した。その際ギアボックスに取りつけた回転数メーターで角度設定できるように配慮することにした。その構成の設計図を図 3.7 に示す。

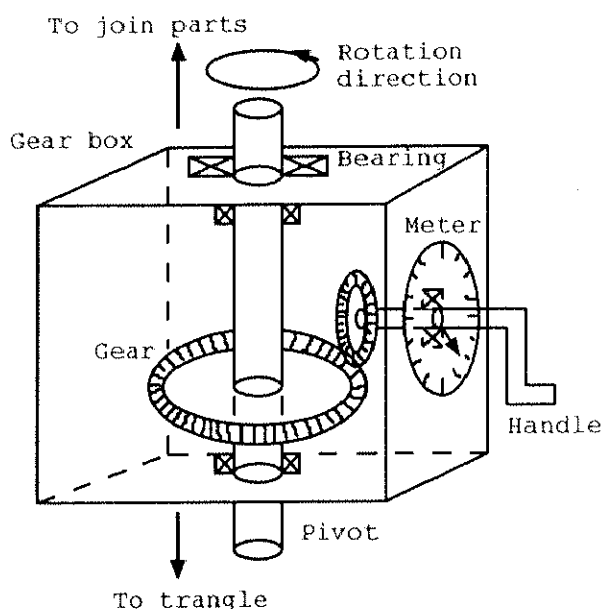


図 3.7: A gear box for rotation of microphone array frame around the axis of trangle stand in horizontally direction.

3.3 システムの構築

以上のようなシステム各部の設計結果に基づき，球面アレイ型マイクロフォンシステムの実験系を構築する．システムの基本特性を評価することは実験系を構築する主な目的であるが，球面アレイ型マイクロフォンシステムの実用化へ向けて，有用なデータを収集することも構築のもう一つの目的である．従って，構築に際しては，できるだけ実用に近い部品，素子を使い，システムの今後の拡張性，修理の簡易性を考慮してこれを行うことは言うに及ばないことである．このような考えで，以下，まずシステム各部の構築結果について示し，最後に各部をまとめてシステム全体の構築結果を示す．

3.3.1 部分ユニットの構築

システムの設計で示したように，球面アレイ型マイクロフォンシステムは主に球面アレイ，制御回路と機械的回転部からなる．機械的回転部，制御回路における加算器，アナログフィルタ，クロック発生器，インターフェイス等の構築は一般的な手法を採用したので，この部分に関する記述を省略する．尚，マイクロフォンのチャンネル化に伴い，制御回路も極めて簡単化され，各マイクロフォンチャンネルボード用にユニット化して装填できた．ここではモジュール化して構成した一つのチャンネルについてその構築結果を示す．各チャンネルにおいては，ゲインユニットと遅延ユニットの構築が重要である．従って制御回路の構築については，中心

の単一マイクロフォン素子から成るチャンネルではなく、他の一般的チャンネルについての構築結果を示す。

(1) 球面アレイの構築

球面アレイの構築では、以下の材料、寸法、加工法を用いた。

マイクロフォン素子は市販の小型 ($\phi 6\text{mm}$)、高感度、廉価 (300 円 / 個) なコンデンサマイクロフォン (National Panasonic 社の WM-61A) を採用した。

アルミパイプは内径 $\phi 6\text{mm}$ 、外径 $\phi 8\text{mm}$ のものを採用した。

アルミ角材は $15 \times 10\text{mm}$ 、厚さ 1mm のものを採用した。

フレームは厚さ 5mm のステンレス板を採用し、図 3.1 に示した 4 本交差の直径細板と外縁の固定用帯の幅を 20mm とし、中心の連結部分に直径 $\phi 160\text{mm}$ の部分を残し、 $\phi 8.2\text{mm}$ の穴 185 個を開けるようにプラズマ放電加工機でカットした。

フレーム上の穴に通す各アルミパイプの長さを調整し、曲率半径 $R_0 = 20\text{m}$ の球面アレイを構築した。

マイクロフォンに混入する加法的ノイズ低減のため、マイクロフォン出力増幅用の前置増幅器をマイクロフォン素子のすぐ近くのアリミパイプ上に付着させ、その電源と出力を多芯のケーブルで、バッテリーと各チャンネルの加算器の入力端子にそれぞれ繋いだ。

以上のように構築した球面アレイの写真を図 3.8 に示す。

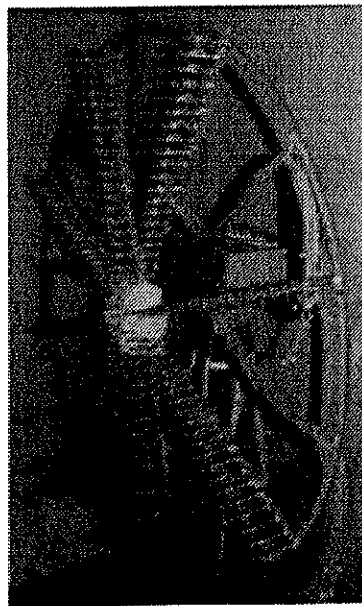


図 3.8: A photo of the constructed spherical array frame.

(2) ゲインユニットの構築

Analog devices 社のデジタルポテンショメータ AD8402 は、8bit、256 ポジション、デジタル制御、良線形性可変抵抗デバイス (VR) である。このチップには2個分ポテンショメータが実装されており、遅延ユニット部のデジタルポテンショメータに1個を利用できるので、これをデジタル・アナログ変換用のキーデバイスとして用いた。定格値 $10k\Omega$ の AD840210 を用いゲインユニットを構築した結果、焦点の走査範囲 $10m\sim 30m$ に応じて、各チャンネルユニットに与えるゲインの理論値と実機構築ユニットを用いた測定値との比較を図 3.9 に示す。設計仕様で示した焦点走査範囲では、約 2% 以内の精度で、振幅減衰補正用ゲインが実現できている。

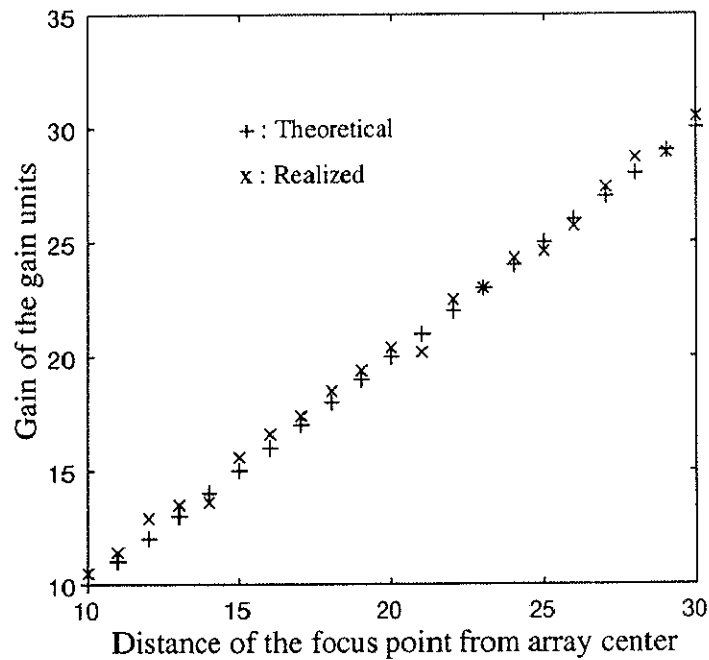


図 3.9: Measured gain of the constructed gain unit, where the focus point being 10m to 30m apart from the array center.

(3) 遅延ユニットの構築

前述のように遅延ユニットの構築では、BBD素子を使うことにした。BBD素子とは、外部の駆動クロックパルスの周期に比例して、入力信号の振幅に比例した電荷量を所定のシフトレジスタの段数分バケトリレー式に順次転送し、ある入力信号に対して、等価的に供給クロックパルス周期の整数倍だけアナログ信号を遅延させるデバイスである。従って、その遅延時間は加えるクロック周期により、任意に変化させることができるアナログ遅延素子である。

松下電気産業のBBD素子MN3012は3出力端子付、190段、5段、3段並列構成で、外部クロック入力端子付の低ノイズ特性の遅延素子である。3段目からの出力を利用すれば、駆動クロックの周波数可変範囲である10kHzから200kHzにわたって、焦点の走査範囲に対応する遅延時間を発生することができる。

設計段階で述べたように、このような広範囲の周波数範囲を1組のCRクロック発生回路で代用することは難しく、精度的にも期待できないので、既に触れたように図3.5に示した8組の固定コンデンサCと抵抗Rを用意し、走査焦点の位置に応じて、アナログスイッチでCR回路を切り替え、周波数範囲を分けて、その中心周波数の周りでデジタルポテンシオメータの抵抗値を有効に制御し、BBD素子を介して高精度な遅延時間を実現するように工夫した。図3.5に示したクロック周波数発生回路のTimer素子に555を用いる場合、発振周波数は次式で算出できる。

$$f = 1.44 / C_{fk}(R_a + 2(R_v + R_{fk})) \quad (3.1)$$

ここでは、 R_a と $R_{fk}(k=0,1,\dots,7)$ は固定抵抗、 $C_{fk}(k=0,1,\dots,7)$ は固定コンデンサ、 R_v はデジタルポテンシオメータの可変抵抗である。このような構成では、256ポジションの抵抗で小範囲に分けられた周波数を高精度で実現できる。

走査焦点を球面アレイの軸上10mと30mに設定した場合に、各チャンネル遅延ユニットに与える相対遅延量の理論値と実機構築ユニットを用いた測定値との比較を、それぞれ図3.10と図3.11に示す。走査焦点10mの場合、相対遅延時間0~39.8 μ sの範囲に渡り、相対精度約7%、走査焦点30mの場合、同じく0~13.3 μ sに渡り、相対精度約8%以内で実現できている。

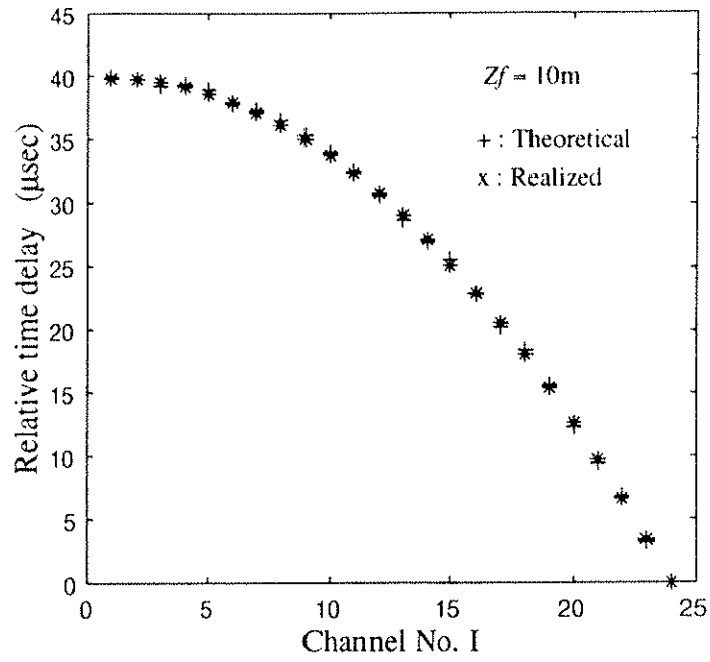


Figure 3.10: Measured time delay of the constructed time delay unit, where the focus point being 10m apart from the array center.

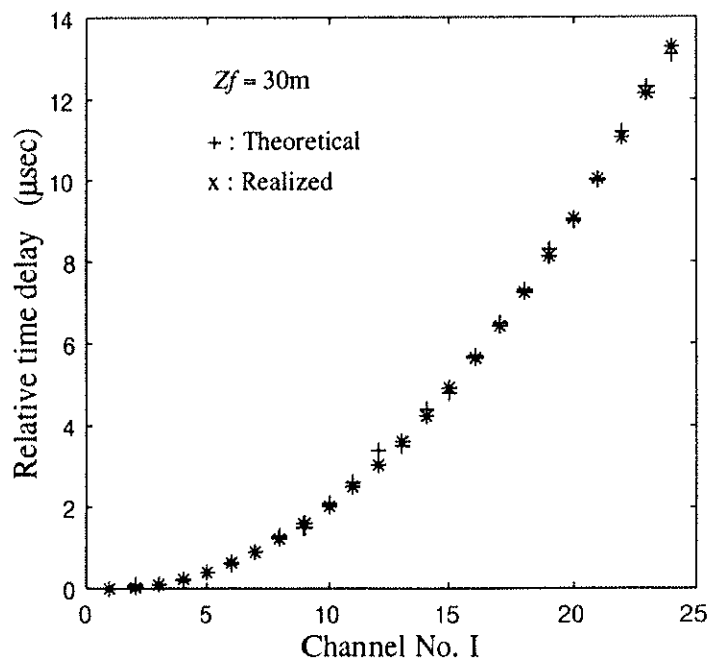


Figure 3.11: Measured time delay of the constructed time delay unit, where the focus point being 30m apart from the array center.

3.3.2 制御系の構築

システムの拡張性と故障が起きた場合の対処の簡易性を考慮して、制御系全体をチャンネル毎に分けて、1枚の基板に実装し、計24枚の基板と1枚のインターフェイス機能の基板に実装・構築した。コンピュータから送られてきたチャンネル選択データをデコードし、該当チャンネル選択機能をインターフェイス基板上で実現した。また、送られてきた該当チャンネルのゲインデータをポテンショメータでアナログゲインに変換する機能、アナログスイッチ用の切り替えデータを用い各チャンネルのクロック発生器のCR回路を切り替える機能、遅延時間用データをポテンショメータでクロック周波数に変換し、該当チャンネルのBBD素子に供給する機能等を各チャンネル基板上で実現した。振幅、遅延補正を行った各チャンネル出力を加算しシステムの出力とする機能もインターフェイス基板上で実現した。このように構築した24チャンネル用の基板とインターフェイス基板1枚をケースに実装した。その様子を図3.12に示す。

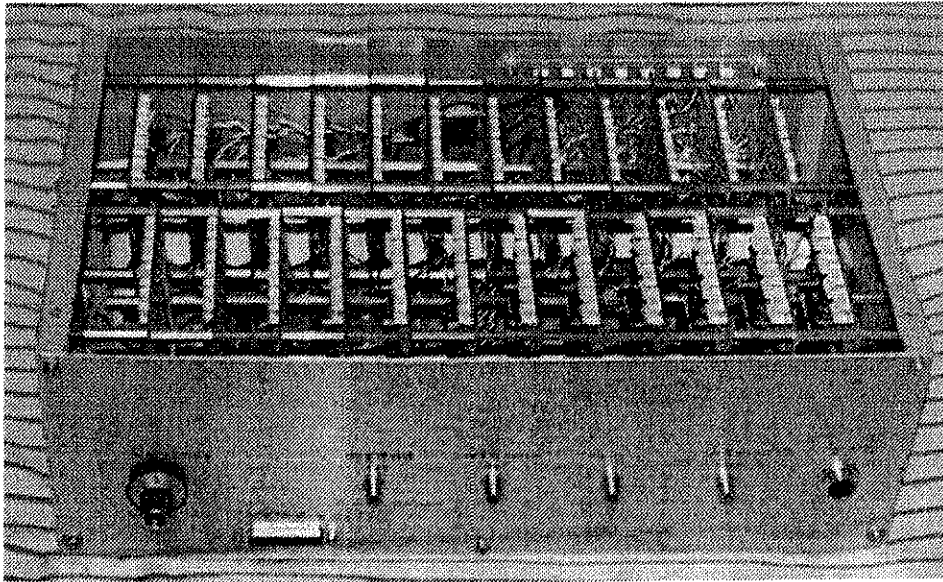


図 3.12: A photo of the constructed control box including the electronic control circuits used in microphone system.

3.3.3 システム全体の構築

以上のように構築した球面アレイフレームを機械的回転と固定用部品で測量用三脚台に取り付け、球面上の各マイクロフォン出力を電気制御部の対応チャンネル基板上4pin コネクターに接続した。また、ノートタイプパーソナルコンピュータの平行ポートと電気制御部ケース上に取りつけた25pin コネクターをD-sub ケーブルで繋ぎ、音源信号の採取に備えた。野外での使用のために、システム用電源はポータブル型電池を採用した。このように構築したシステムでは、三脚の足の傾きの調整で、上下方向の焦点走査を、また、機械的回転部のハンドル操作で、水平方向の焦点走査を手動で行うことができた。一旦上下と水平方向の所定焦点走査角度を設定した後は、コンピュータ内部の制御プログラムを起動し、球面アレイ軸上の焦点設定を半自動的に行うことができた。当システムの本学講堂内設置の様子を、図3.13の写真に示す。

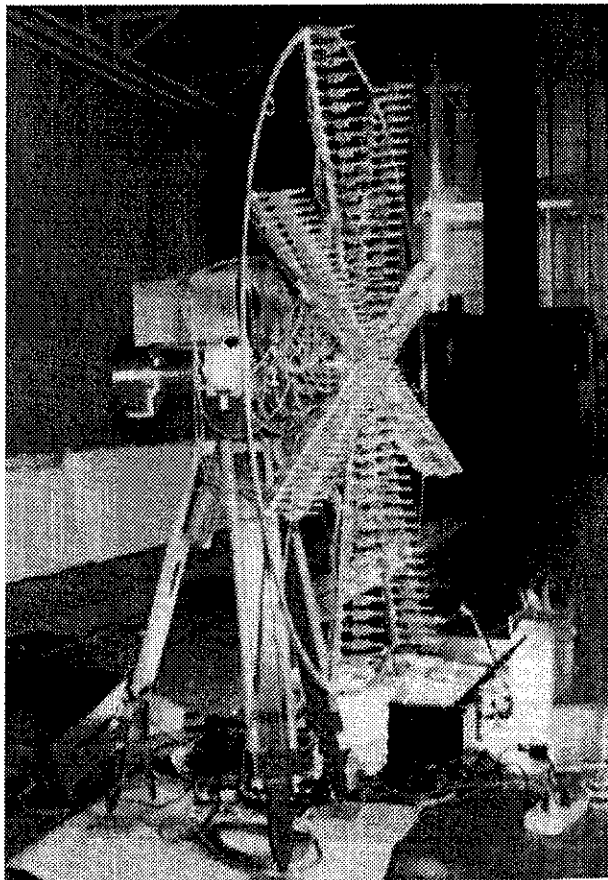


図 3.13: A photo of the constructed microphone system setting in the auditory room of the university.

3.4 使用マイクロフォン素子の校正

前述の球面アレイ型マイクロフォンシステムの設計・構築では、球面アレイ軸から、同距離である円周上にある8個のマイクロフォンの出力を先に加算し、同一のゲインユニットと遅延ユニットで振幅補正と遅延補正を行うことにより、システムの制御を極めて簡単に実現できた。しかし、この種の構成では、各チャンネルで用いる加算用8個のマイクロフォンの周波数特性の同一性が要求される。高価なマイクロフォン素子の使用では、これは可能かも知れないが、本研究で使用の廉価な市販マイクロフォン素子では、マイクロフォン素子特性間のバラツキが付き物であり、その同一性は期待できない。このような事情で、この節では予想されるマイクロフォン特性のバラツキの実験的検証法とその適用結果を示す形で、使用マイクロフォンの校正法について述べる。

実験方法としては、球面アレイの軸上、球面中心から2m離れた所に設置の小型スピーカから100Hzから6.0kHzまでの周波数帯域幅を有するFM変調信号を放射し、音源の正面でそれから1m離れた所で校正用高性能マイクロフォンによる受信信号と球面上同一円周上の8個のマイクロフォンの受信信号を同時に記録し、コンピュータ上で、各マイクロフォンの周波数特性を求めた。即ち、音源信号参照用高性能マイクロフォン出力に対して、各マイクロフォン出力の相対的伝達関数を求め、その振幅特性と遅延（位相）特性のバラツキを評価した。

図3.14は、以上に示した実験方法を用い、第2チャンネル分の8個のマイクロフォン素子の周波数振幅（上）と遅延特性（下）を音響測定室内（長:3.4m、幅:3.2m、高:3.0m）で測定し、A/D変換してコンピュータに取り組み、デジタル的に評価した結果である。左側の(a)、(c)は、それぞれ8個のマイクロフォンの測定ゲインと時間遅延の多重描きで、右側の(b)、(d)はそれらの平均特性である。8個のマイクロフォンの周波数特性はかなり似ているが、バラツキも見られる。350Hzから6.0kHzまでの周波数範囲では、8個のマイクロフォンの振幅特性の変動はその平均値レベルの廻り約0.5dBの範囲内に分布している。これに対し、350Hz以下の周波数範囲では、大きく変動している。同様に相対遅延時間特性も高周波数範囲においての分散が小さいに対して、低周波数範囲では、その分散が大きくなっている。特に300Hzから1.2kHzまでの範囲の間では、相対遅延時間の分布はかなり大きなバラツキを示している。

マイクロフォン素子の相対遅延時間特性のバラツキを残したままで、8個のマイクロフォン出力を加算すると、バラツキにより、加算出力波形は歪んでしまい、忠実なデータ採取が期待できない。以下、該当バラツキ校正法とその効果について述べる。

図3.14から分かるように、1kHz~5kHzの範囲では8個のマイクロフォンの特性はほぼ一定と見做された。そこで、この周波数範囲に渡る平均値をさらに8個のマイクロフォンにより平均して得たスカラー量を、該当チャンネルの振幅と遅延時間のバイアス値として使うことに

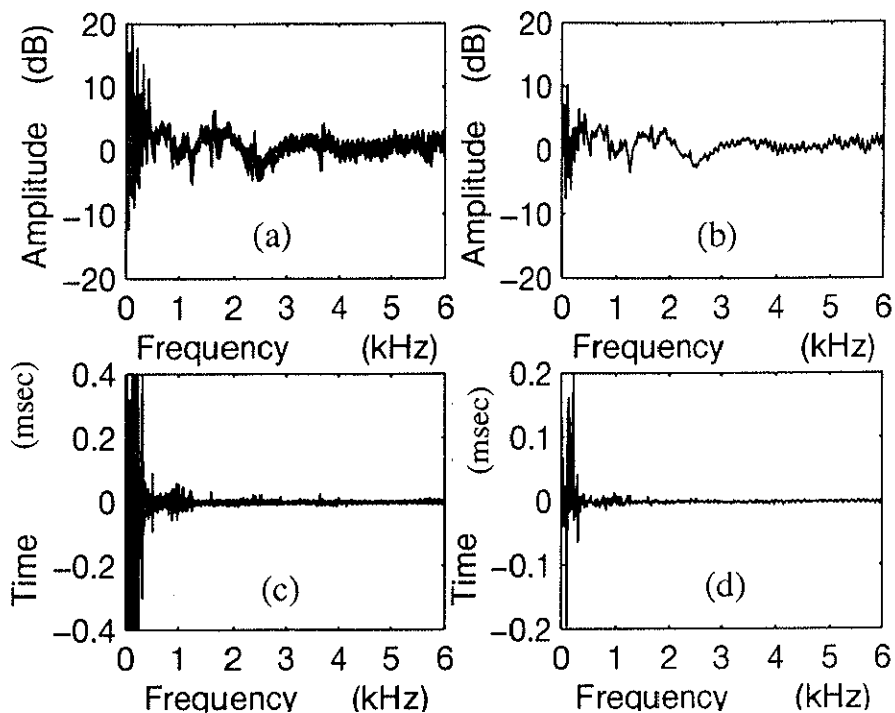


図 3.14: An example of the estimated relative amplitude and time delay characteristics of microphones used in the 1st channel. (a) is an overlaid display of 8 relative frequency amplitude characteristics, (b) is the mean, (c) is an overlaid display of 8 relative time delay characteristics, and (d) is the mean.

した、これにより該当マイクロフォンのバラツキを簡潔に校正できると考えた。以下では、この校正法を簡易校正法と呼ぶ。明らかに平均により、バラツキの影響が小さくなり、加算後の出力信号の波形は元の音源信号の波形に近くなる。このようにして実験結果から算出した各チャンネルの相対ゲインと遅延時間の平均値を表 3.2 に示す。

しかし、簡易校正法は解析周波数範囲に渡る各マイクロフォンのゲインと遅延特性をそれらの平均レベルというスカラー量で代表したものである。従ってこれらを振幅と遅延時間のバイアス補正量として予め CPU 内に記憶しておき、焦点走査に必要なゲインと遅延補正に利用できる。反面、使用マイクロフォンの周波数特性そのものの校正としては、やはり周波数特性全体により詳細なバラツキ校正をする必要がある。これを本論文では、高精度構成法と呼ぶ。

以上の 2 種校正法の校正検証効果をチャンネルマイクロフォンの合成システム出力波形の形で簡易的に図 3.15 に示す。(a) は音源から 1m 離れた所で高性能マイクロフォンにより検出受信信号、(b) は校正を行わない場合のシステム出力、(c) は簡易校正法を用いた場合のシステム出力、(d) は高精度校正法を用いた場合のシステム出力である。

図 3.15 (a) から分かるように、受信信号の低周波数域では、スピーカの低周波数域での放

表 3.2: Mean relative gains and time delays of all the microphone channels.

Channel No.	Rel. gain (dB)	Rel. delay (μ sec)
1	2.83	4.22
2	2.87	3.05
3	2.82	-9.55
4	3.15	-14.5
5	3.05	-12.3
6	3.09	4.33
7	3.08	4.53
8	3.07	14.2
9	2.74	-22.8
10	2.87	5.84
11	2.91	4.73
12	2.88	11.8
13	2.71	19.6
14	2.87	3.41
15	3.32	13.6
16	2.63	16.8
17	2.74	27.3
18	3.09	36.3
19	2.63	40.1
20	2.64	26.3
21	2.64	38.7
22	2.45	58.8
23	2.34	30.5
24	2.57	53.0

射特性が著しく低下していることから、高性能マイクロフォンによる受信波形の包絡線も、振幅が非常に小さくなっている。このような音源信号に対して、システムの各チャンネルマイクロフォン素子特性バラツキを校正しない場合には、各マイクロフォンの振幅と遅延の両特性の変化の影響で、システム出力は (b) のようになってしまう。しかし上で述べた簡易校正法を用い、これらをその平均レベルで補正すれば、システム出力の包絡線形状は (c) のようになり、より (a) と似た形状となっている。また、高精度校正法を適用した場合には、(d) のようにシステム出力はさらに音源信号の包絡線形状とよく似た結果を与えている。これらより、使用マイクロフォン素子についての簡易校正法と高精度校正法の有効性が実証された。しかし、高精度校正法実践のためには高速デジタル処理が必要であり、現段階ではアナログデバイスで高精度校正法を実現することが極めて困難な状況にある。実時間システムの開発としては、以下、マイクロフォンシステムの諸特性の実験的評価に際しては、簡易校正法を使用することにし、高精度校正法の実現可能性については、第 7 章で考察を加える。

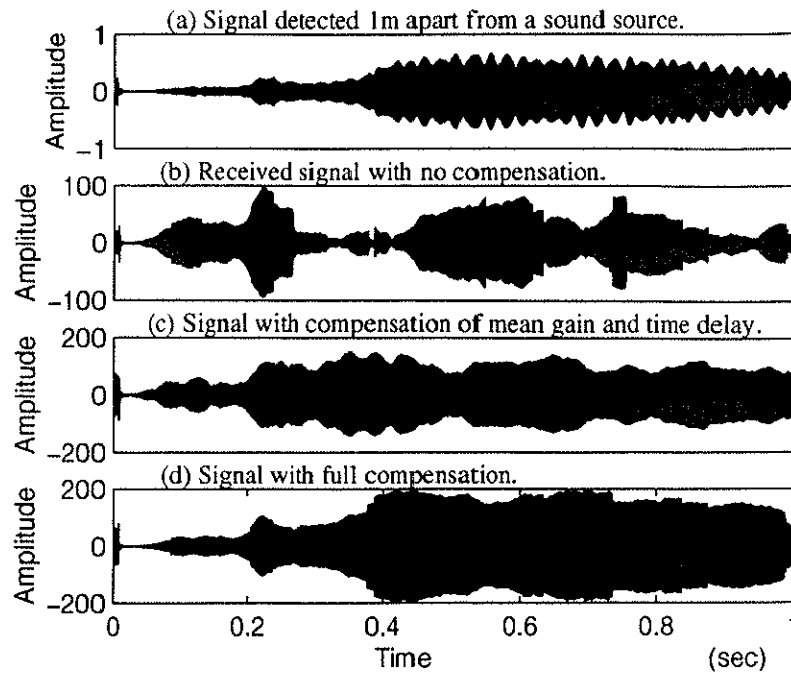


図 3.15: Received waveforms of an FM signal, where (a) is the result by a reference microphone of high performance set 1m apart from an FM point like source of instantaneous frequency 100Hz to 6.0kHz, (b) is a direct output signal of the constructed microphone system set 2.5m apart from the source, (c) is the simply compensated output with mean relative gains and time delays, and (d) is the fully compensated output with mean relative amplitude and time delay characteristics.

3.5 基本システムの設計と構築に関する考察

球面アレイ型マイクロフォンシステムの設計・構築に際し最も重要な点は、使用目的に合わせて、システムを設計・構築することである。本論文では、提案システム基本特性の実験評価と実用化へ向けての有用な基本資料を得るため、実時間可搬型の基礎的実験系を設計・構築した。その際、特にシステムの簡易性と実現可能性の観点から、3次元空間に渡る焦点走査を球面アレイ全体の機械的回転と首振りによる2次元空間走査に加え、球面アレイ軸上電子走査により、システム全体を極めて簡便にまとめることができたことは、本設計・構築の第一ポイントである。その結果、球面アレイ軸上の焦点から同一円周上にある8個のマイクロフォンまでの距離が同じとなり、それらの出力を先に加算し、各1つのゲイン補正と遅延補正ユニットで音波の球面伝搬に伴う振幅減衰と時間遅延の両補正が実現でき、使用マイクロフォンやシステム全体の制御のチャンネル化、モジュール化が促進されたことが本設計・構築の第二ポイントである。

構築に関しては、球面アレイフレームの加工にプラズマ放電加工機を利用し、一枚の薄ステンレス板の所定位置に所望サイズのマイクロフォン取付け穴を開けると共に、先端にマイクロフォン素子を嵌め込んだアルミパイプをその穴に通した後、その長さを調整して、球面アレイを高精度で構築できた。制御回路の構築では、デジタル制御アナログデバイスである 8bit 制御のポテンショメータの採用によって、高精度でゲインユニットを構築できた。遅延ユニットについても、ポテンショメータと BBD 遅延素子の採用により、十分とは言えないまでも、広範囲に渡る遅延時間の相対精度を極力向上した形で実現できた。これらの点は球面アレイ型マイクロフォンシステムの実用化へ向けての有意義な設計資料を提供するものと考えられる。

球面アレイ上に配置されたマイクロフォン素子特性バラツキの校正については、実時間アナログシステムにとって、簡易校正法は有効であるが、忠実に音源信号を採取する場合には、高精度校正法が要求されることを基礎的な実験結果により実証した。しかし、高精度校正法には高速デジタル処理が必要であり、その実現可能性については別途第 7 章で考察することにした。

3.6 本章のまとめ

本章では、前章の理論・数値解析結果に基づき、提案球面アレイ型マイクロフォンシステム基本特性の実験評価、実用化システム構築へ向けての有用な基礎資料収集という二つの目的のため、実験系を設計・構築した。その際、システムの簡易性と実現可能性の観点から、3次元空間に渡るシステムの焦点走査を球面アレイ全体の機械的回転と首振りによる 2次元走査に加えて、球面軸上の電子走査で実現することを考案した。この考案に基づいた球面アレイの設計・構築では、野鳥の生活範囲と使用市販マイクロフォン素子の感度範囲を考慮して焦点走査範囲を 10m から 30m とし、球面アレイの曲率半径を焦点走査範囲の中点までの距離 20m に設定した。このような設定仕様では後の構築結果から分かるように、軸上走査焦点と各マイクロフォン素子間の距離差の変化範囲が小さいので、その分だけ高精度な振幅減衰補正と遅延時間補正が実現できた。

設定仕様に従い、システムの簡易性、実現可能性、可搬性の観点から、球面アレイの構造、マイクロフォンの配置、高精度な加工方法について、詳しく述べた。また、システム全体の制御の設計・構築では、球面アレイの構造とアレイ軸上の焦点走査の設計特徴から、アレイ中心から同一円周上の 8 個のマイクロフォンの出力を先に加算し、1つのゲイン補正と遅延補正ユニットで音波の球面伝搬に伴う振幅減衰と時間遅延を補正する方法を採用した。各チャンネルのゲインユニットと遅延ユニットの構築について使用デバイスを選定し、構築の結果を示した。特にデジタルポテンショメータ、オペアンプ、BBD 遅延素子、CR クロック発生回路の採

用により、高精度でゲインユニットと遅延ユニットを実現した。

球面アレイ上に配置されたマイクロフォン素子特性のバラツキを基本的な実験で実証し、その校正の必要性を明確した。簡易校正法と高精度校正法を考案した末、実時間アナログシステムにとっては、簡易校正法が十分有効であることを明らかにした。また、計算機上での高精度校正のテストでは、簡易校正法より、優れた校正効果が得られた。

この章で得られたデータは今後実用化システムの構築にとって、重要であると思われる。次章では、本章で構築した球面アレイ型基本マイクロフォンシステム実験系を用いてシステムの基本特性を実験的に評価したが、その評価の方法と結果について述べる。