

セルブリッジ音響システム

CellBridge Acoustic Device

○岡田明正 牧野泰才 篠田裕之（東京大学）

Akimasa Okada, Yasutoshi Makino and Hiroyuki Shinoda
The University of Tokyo
okada@alab.t.u-tokyo.ac.jp

We propose a method to fabricate sensor/actuator arrays on various materials and its application to a flexible speaker array. The speaker system is constructed by locating communication devices called “cell bridges” between two adjacent conductive sites forming electrostatic speakers. In this system, the conductive sites for vibrating air also work as communication medium for transmitting driving signals by multi-hopping. The proposed system realizes a flexible array, because it doesn't require wirings. The prototype speaker array made of conductive fabrics is flexible and thin. We examined the acoustic beam forming with the prototype speaker array.

Key Words: flexible speaker array, sensor networks

1. はじめに

人工皮膚や、圧力検出シートなど、柔軟なセンサ・アクチュエータアレイが多くの場面で必要とされている。これらを実現する上で問題となるのが、デバイスの各要素とホスト間の物理的なネットワークの構築方法である。配線を用いた場合、配線数の増大と共に、製造工程が煩雑になり、デバイスの柔軟性も失われてしまう。また、断線の危険性も生じてしまう。解決方法として無線技術が期待されている[1]。しかし、高密度実装かつ高速伝送が必要な場合には、単位情報伝達量あたりの消費電力が大きいことや、ノード間の干渉により得られるスループットの低下などの問題があり、全ての場合において有効な実現方法ではない。

我々は、これらの問題に対して、センシングやアクチュエーティングの要素がネットワークの媒体を兼ねるセルブリッジシステムを提案している[2]。本手法では、静電型センサ・アクチュエータのアレイにおいて、2つのアレイ要素の境界に通信素子であるセルブリッジを接続して電気的接点を持たせる。通信素子を接続した導電領域を通信路としても利用し、パケットを通信素子間でホップさせることでネットワークを実現する。マルチホップを行うことで任意の場所にパケットを届けることができる。

個別配線が不要なため、アレイ要素が柔軟であれば、その柔軟性を保ったアレイシステムが可能となる。文献[2]において通信の原理確認を行うために、通信素子とそれを用いた柔軟な通信シートを試作した。通信シートに接続した2台のPC間で、リアルタイムに画像転送を行い、PC間の遅延時間が8.81 μ s、スループットが2Mbpsという結果を得た。

本論文では、セルブリッジシステムを用いたアプリケーションとして柔軟なスピーカアレイを試作し、その性能評価を行う。スピーカアレイに関する研究[3]は、既に非常に多く行われているが、それらの研究では、硬いスピーカを用いて、配線で接続を行っている。柔軟なスピーカで、それらの接続に配線を用いないスピーカアレイに関する研究はほとんど行われていない。柔軟なスピーカは導電性の布で試作した。薄く柔軟な特徴を持っているため、自動車の内装や、カーテン型スピーカ等、従来では考えられなかった場所へのスピーカアレイの実装が可能となる。試作スピーカ

ーカアレイの性能を評価するために音響ビームを作成し、音場を制御可能なことを確認した。

2. セルブリッジシステム

セルブリッジシステムは、図1のようにアレイ要素の導電領域の境界に通信素子であるセルブリッジを接続し、通信素子への電源供給用の層を加えた構造となっている。通信素子の接続した導電領域を特にセルと呼び、通信媒体としても利用する。デバイスの機能に加え、その一部を通信にも利用することで、センシング・アクチュエーティングとネットワークを兼ねるシステムを実現する。アレイ要素の形は、図1のように矩形である必要は無く任意の形状でよい。

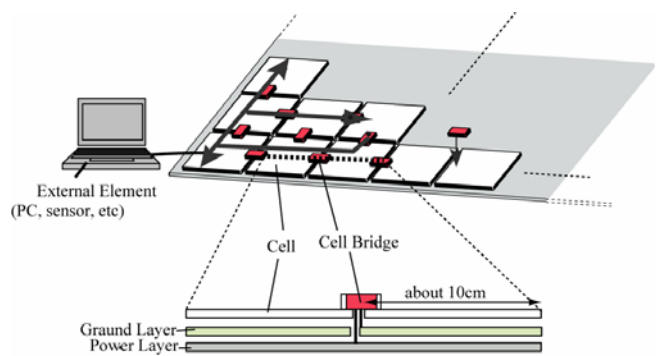


Fig. 1 Concept of cell-bridge.

通信素子はアナログデジタル混載プロセスのCMOS LSIで実現される。各通信素子は、独立のクロックで動作し、OSI参照モデルでのネットワーク層までの機能を持ち、ルーティングや信号の送受信のタイミングの制御などプロトコルに従った動作を行う。通信は同じ極板に接続する通信素子間で非同期に行われ、パケットは、マルチホップして任意の場所に伝達される。

アレイ要素とホストPC間の個別配線を必要としないので、デバイスの柔軟性を活かしたアレイシステムを作ることができる。また、信号はシステム内に局在化するため、

原理的には無線よりも少ない消費電力で信号伝送することができる。

3. システムの仕様

本節では、布状スピーカアレイを実現する上で必要な仕様について整理する。

アクチュエータアレイでは、1つのアレイ要素に1つの通信素子がアクチュエート信号を出力できればよいので、通信素子数を最少にする通信経路として、例えば図2のように複数の行を端で1列にまとめた形を想定すればよい。各セルブリッジにはグローバルなIDをつけて区別する。図2のトポロジーではホストPCから通信素子へのパケットの経路は1つしかないが、全ての境界に通信素子を配置し、経路に冗長性を持たせ、より安定したシステムにすることも可能である。各通信素子は独立して動作するので、出力のタイミングを調整するプロトコルが必要である。

次に、出力信号を制御できる通信素子数の最大値 n について考える。各サイトでの出力のサンプリング周期を T_{sample} とし、隣接素子間のスループットを f [bit/sec]、パケット長を L [bit]とする。一つのパケットが一つのサイトの k サンプル分の出力データを含むものとする、独立に制御できる通信素子数の最大値は

$$n = T_{sample} \frac{f}{L} \cdot k \quad (1)$$

で与えられる。ただし、転送による遅延をあらかじめ考慮したデータが送信されるものと仮定している。

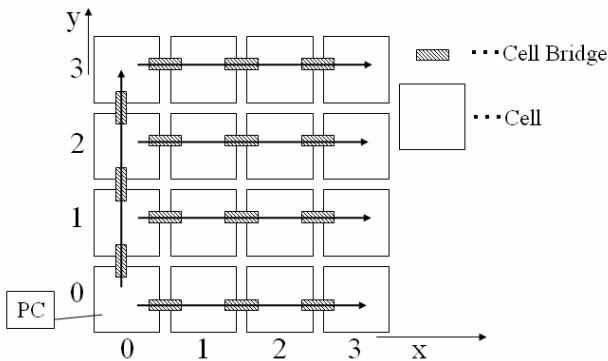


Fig. 2 The topology and the routing of the actuator array.

4. 音響システムの試作

本章では、試作した布状スピーカアレイに関し、アレイ要素となる布状スピーカの構造と周波数特性、試作したLSIチップ、最終的に試作されたスピーカアレイの構造と位相制御の精度について報告する。

4.1 布状スピーカ

試作システムに用いたスピーカは、静電型スピーカの一種であり、図3のように、導電性の布と導電性の不織布で、絶縁層であるポリイミドフィルムを挟む構造となっている。各サイトの一边は12cm四方であり、厚さは $184\mu\text{m}$ である。導電性の布は絶縁層と全面で接着し、不織布は半径

2mmの円形接着点を2cm間隔で設け、振動が可能ないように固定した。

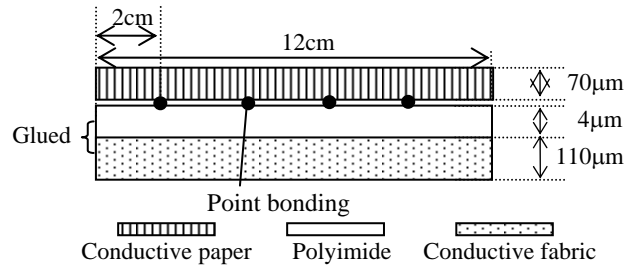


Fig.3 The cross section of the cloth speaker.

試作したスピーカの周波数特性を図4のような方法で測定した。壁から1m離れたところで、スピーカの一边を固定して吊るし、下辺は自由にさせた状況で行った。スピーカの2層の導電層にバイアス電圧100Vを印加し、振幅10Vの正弦波を入力する。マイクをスピーカに近接させて計測した結果が図5である。低周波数の出力が小さい、1kHz以上では80dB程度の音響出力が得られていることが分かる。

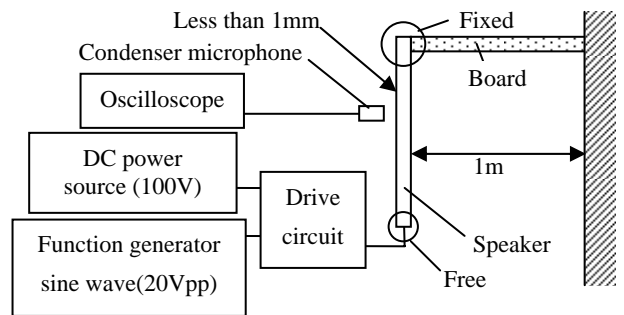


Fig.4 Experimental setup of the sound measurement.

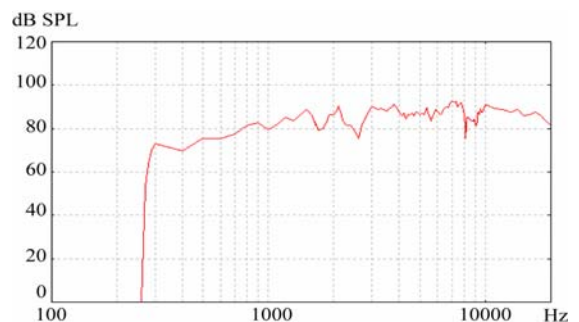


Fig. 5 The frequency property of the cloth speaker.

布状スピーカは図4のように、空中に垂らして用いた場合、両面が振動しうるため、振動の様子を考える必要がある。スピーカを構成する各要素の振動振幅は、各要素のインピーダンス（圧力の振動速度に対する比）に着目することで推定できる。空気で満たされた自由空間の場合は、圧力 P 、固有音響インピーダンスを z_0 、振動速度を v とすると

$$P = z_0 \cdot v \quad (2)$$

と書ける．極板に注目した場合，運動方程式より，極板に加えられる単位面積あたりの外力 P_{plate} と振動速度 v_{plate} の関係は

$$P_{plate} = j(\rho \cdot \omega) \cdot v_{plate} \quad (3)$$

と書くことができる．ただし ω は角周波数， ρ は極板の面積密度である． $j\rho\omega$ が極板単独のインピーダンスである．導電性布と不織布の間に生じる静電気力（+空気層および接合点からの反力の合力）を，斥力側を正として P とすると，導電性布の振動速度は（不織布から遠ざかる方向を正として） $P/(z_0 + j\rho_f\omega)$ で与えられる．ここで ρ_f は導電性布の面積密度である．一方，不織布の振動速度は， ρ_p を不織布の面積密度とし，（導電性布から遠ざかる方向を正として） $P/(z_0 + j\rho_p\omega)$ で与えられる．試作スピーカに用いた導電性布と不織布の面積密度は，それぞれ $\rho_f=0.07\text{kg/m}^2$ ， $\rho_p=0.03\text{kg/m}^2$ である．周波数を，4kHzとすると，導電性布と不織布のインピーダンス $z_i = j\rho_i\omega$ ($i = f, p$)の絶対値はそれぞれ， $|z_f| = 1759 \text{Ns/m}^2$ ， $|z_p| = 754 \text{Ns/m}^2$ となる．この周波数において導電性布のインピーダンスは， $z_0(=420\text{Ns/m}^2)$ よりも十分大きく，不織布では，ほぼ同じ値となる．従って，この場合は，導電性布側は剛体壁とみなせて，不織布のみが振動していると考えることができる．

4. 2 試作LSIチップ

LSIチップはCMOSの0.35 μm ，アナログデジタル混載プロセスで試作した．図6(a)はLSIチップのレイアウト図，図6(b)はセルブリッジとスピーカ駆動回路を搭載した基板を示している．表1は試作LSIチップの主な仕様である．大きさは全体で5mm角，デジタル回路だけでは1.2mm角である．動作周波数は50MHzで設計した．通信素子間の非同期通信を行うために，通信素子は1クロックを16分割し，その中から信号の立ち上がり，立下りを検出することで，10%までのクロックの差を許容する．通信機能に加えて，分解能が8bit，サンプリング周波数が24.2kHzのD/Aコンバータ搭載している．このLSIチップが扱うパケットのサイズは85bitで，その中には16bit，つまり2回分の出力データが含まれている．これらの仕様を式(1)に代入すると， $n = 48$ となり，48chまでは制御できることになる．今回の試作では，周辺の通信素子と出力のタイミングを制御するプロトコルは実装しておらず，その実装は今後の課題である．

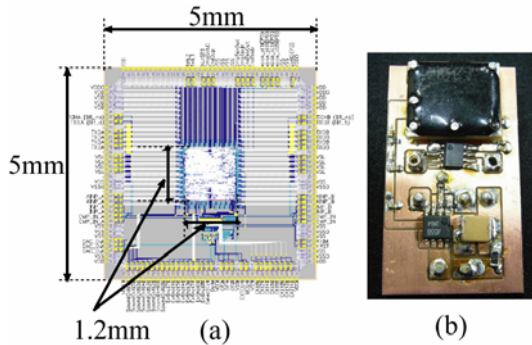


Fig. 6 (a) The prototype LSI chip. (b) The cell-bridge with the peripheral circuits used in the cloth speaker array.

Table1. Specification of the prototype LSI chip.

operating frequency f	50MHz
sampling frequency f_{sample}	24.2kHz
resolution of DAC	8bit
length per packet L	85bit
data size per packet	16bit ($k = 2$)
time for one hop	1.7 μs
consumption current	30mA

4. 3 試作布状スピーカアレイ

布状スピーカとLSIチップを用いて，図7に示す布状スピーカアレイを試作した．原理確認の段階であるため，通信用のサイトとスピーカ用のサイトは異なる独立な層として作製した．図7(a)は通信部，図7(b)はスピーカアレイ部を示している．大きさは，47cm \times 33cm \times 2.2mmである．通信部は，導電性フィルムを用いて作成し，導電領域の大きさは12cm四方である．アレイのサイズは2 \times 3で，ホップ数は最大で3である．最もPCから遠い部分でデータの遅延時間は5.1 μs となる．スピーカ部は，3.1節と同じ素材を用いて作り，スピーカ一つあたりの大きさは10cm \times 13cmである．

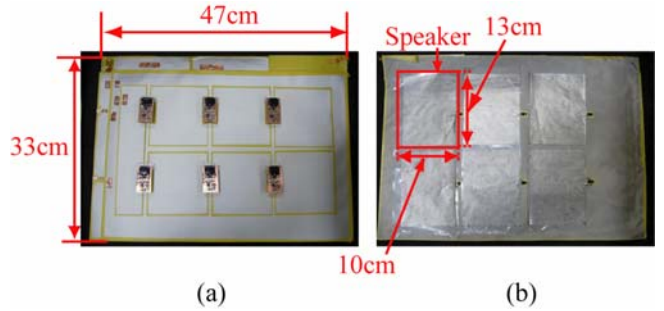


Fig. 7 Photograph of (a) the communication section and (b) the speaker array section.

本システムを用いて音響ビームを生成する場合，通信素子間の動作周波数のばらつきを原因とする遅延変動が，音響信号の位相の誤差となる．以下ではその精度を検討する．

ここで，1次元のアレイにおいて，アレイのピッチを D ，ビームの方向のずれを微小角 δ だけ許容すると仮定する．この場合，許容できる位相差は， $D \cdot \delta / c$ となる．ただし， c は音速である．クロックには最大10%の差が生じるので，1ホップに要する時間の T_d とすると，遅延変動は最大で $\Delta T = 0.1 \cdot T_d$ だけ生じる．許容できる位相差と遅延変動が

$$\frac{D \cdot \delta}{c} \geq \Delta T \quad (4)$$

の関係であれば，精度 δ で位相制御することができる．

仮に， $D=0.13\text{m}$ ， $T_d=2\mu\text{s}$ ， $\delta=0.01\text{rad}$ とした場合，

$$\frac{D \cdot \delta}{c} = 3.8\mu\text{s} \geq 0.2\mu\text{s} \quad (5)$$

となり、十分な精度で、位相制御を行えることが分かる。

5. 評価実験

試作したスピーカアレイを、音響ビームを形成して性能評価を行った。スピーカからは、4kHzの矩形波を36ms出力し、次の36msは無音区間とするバースト音を出力させ、位相制御をしてビームを 0° 、 19° の方向に生成した。測定は、図7に示すように、スピーカから50cm離れた片側 90° の範囲で行った。

図8 (a) は 0° 、図8 (b) は 19° にビーム生成した場合の結果である。音圧振幅と、計測位置の関係を極座標表示で示している。半径方向は、ビームの主方向の音圧振幅を1として正規化している。緑色の線がシミュレーション結果、赤色の線が実験結果である。 0° の場合は、ほぼシミュレーションと同じ結果が得られた。約 40° の方向にたっているピークは、グレーティングローブである。 19° の場合はシミュレーション結果と 7° 程度のずれがあるが、近い方向に強いピークがたっていることが分かる。これより、試作した柔軟な布状スピーカアレイを用い、位相制御によって音響ビームを生成可能であることが確認された。

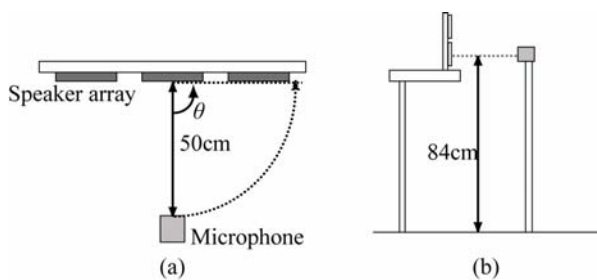


Fig. 7 Setup of the sound beam measurement. (a): Top view and (b): side view.

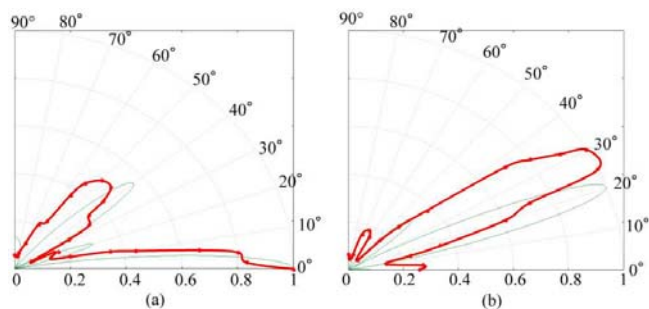


Fig. 8 Measured sound amplitude for the (a) 0 degree and (b) 19 degree radiations. The red lines represent the experimental results. The green ones show the simulation results.

6. まとめ

本論文では、セルブリッジシステムを用いて、柔軟な布状スピーカアレイを試作し、性能を評価した。セルブリッジLSIと布状スピーカを試作し、それらを組み合わせることでスピーカアレイを実現した。柔軟で薄いため、自由曲面への実装など従来にないスピーカアレイを実現できる。性能評価実験として、音響ビームを生成し、シミュレーション

と同じ傾向をもつ結果が得られた。これより、布状スピーカアレイが、柔軟で薄いという特徴を持ち、さらにスピーカアレイとしての機能も持つことが確かめられた。

文献

- [1] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks Fourth Edition," Person Education International, 2003.
- [2] A.Okada, Y.Makino, and H.Shinoda, "Cell-Bridge-Based Connection of High Density Sensor Elements," The 22nd of Sensor Symposium, pp.425-428, 2005.
- [3] M.R.Bai, and K.Chung, "Optimal design of panel speaker array with omnidirectional characteristics," Journal of the Acoustical Society of America, Vol.112, NOV. 2002.