

# 総合制作実習における超音波を応用した教材開発

## Development of Teaching Materials using Ultrasonic Techniques for the Production Practice

五十嵐 茂\*  
Shigeru Igarashi\*

専門課程 2 年生の総合制作実習における超音波を応用した教材開発について、動作原理を示しながら紹介する。これらの教材は、①超音波パルスの直接波や反射波の伝搬時間により距離を計測する応用、②ドップラ効果により移動体の速度を計測する応用、③超音波を搬送波として音声等の通信を行う応用に分類される。これらによって学生は、これまでの学科の知識や実習の体験が活用でき、設計、試作、評価を繰り返して問題解決力を養い、興味に応じて創造力を発揮し、期限までに完成するための工程を管理する等ものづくりの総合力が習得でき、さらに達成感も得ることができる。

キーワード：超音波、パルス反射法、ドップラ効果、変調・復調、教材開発

### 1. はじめに

ポリテクカレッジは実践技術者の育成を担っており、専門課程 2 年生の総合制作実習は、企画、設計、組立、調整、評価の一連のプロセスと工程管理を通じて、ものづくりの総合的な技能・技術を習得する実習科目である。

そこで、電子系の学生が興味を持ちながらものづくりの総合力を習得できるよう、これまで超音波を応用した教材を考案してきた。これらは、①距離計測応用、②ドップラ応用、③通信応用の 3 つの基本原理に分類できる。

市販の超音波センサは、周波数 40kHz が主流であり、安価で入手性がよい。電子回路の設計や組立が比較的容易で、オシロスコープでの観測もしやすいので、学生には、授業で習った電子回路の知識や実習の体験を活用でき、アイデア次第でユニークな教材へと発展する。

本稿は、これまで学生が製作してきた超音波を応用した主な教材について、基本原理別にブロック図を示し、動作原理や完成品について紹介する。

### 2. 基本原理と実習方針

#### 2.1 基本原理の分類

表 1 に主な超音波応用の基本原理の分類と、それぞれの概要を示す。

#### 2.2 実習の方針と利点

総合制作実習を実施する際の方針として、まず、テーマ名と共に製作仕様やブロック図を掲げ、これから作ろうとする製作物の概要や機能について学生と相談しながらスタートする。

表 1 基本原理と概要

距離計測応用	超音波パルスの直接波、反射波の伝搬時間から距離を計測
ドップラ応用	移動体から反射した超音波のドップラ効果により速度を計測
通信応用	超音波を搬送波とし、音声信号等を変調・復調して送受信

各ブロックは、学生の知識、技能、興味を盛り込みながら設計、試作、実験を積み上げ、各ブロックの改良やプリント基板化の設計、製作して、時には学生のアイデアを盛り込みながら、それらを組み合わせて総合的な組立を行う。完成した製作物は、スタート時の製作仕様を検証し、最終的には、展示会等で製作物の実演ができる完成度を目指した。

このように、製作仕様によって目標が明確になり、ブロック化で回路設計の自由度が大きく、学生が習ったアナログ、デジタル、マイコン、プログラミング、プリント基板、工具や測定器の取り扱い等が、学生の興味や能力に応じて柔軟に活かせ、かつ学生のアイデアを盛り込むこともできる。完成品は、製作仕様の検証により仕上がり状態を確認でき、実演することで達成感が生まれる等の利点が考えられる。

以下に、総合制作実習において学生が製作した主な事例を紹介する。なお、紙面の都合により、テーマ・教材名は省略名称にて記載する。

### 3. 総合制作実習の教材事例

#### 3.1 距離計測応用

距離計測の基本原則を、一般の超音波距離計に使われ

るパルス反射法で説明する。

図1に反射波の伝搬時間による距離計測の原理を示す。

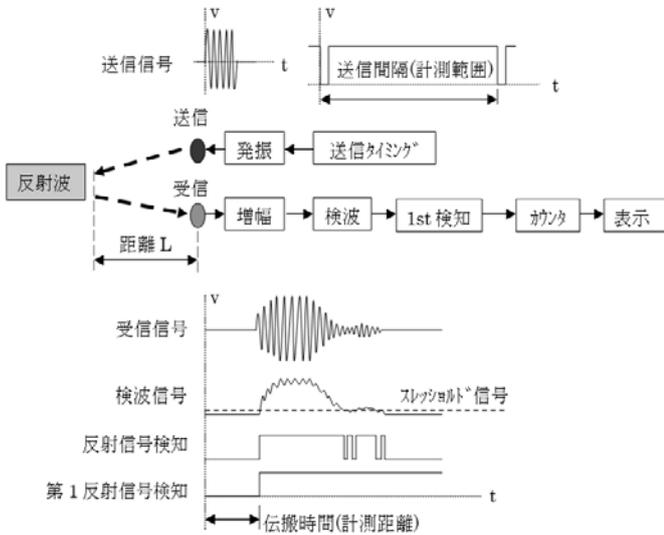


図1 反射波による距離計測の原理

送信部は、最大計測範囲以上の伝搬時間毎に、送信タイミング信号を発生し、それに同期して、超音波周波数40kHzの送信パルスを発生する。超音波センサは狭帯域なので、送信パルスは正弦波でも矩形波でもよい。

受信部は、対象物からの反射波パルスを増幅、検波し、信号とノイズを区別するスレッシュド信号を超えた信号を反射信号として抽出し、RSフリップフロップにて第1反射信号を検知する。送信からそこまでの伝搬時間tをカウンタで測り、音速cとして、 $L = c \cdot t / 2$ の計算により対象物までの距離Lを算出する。

同様に、図2に直接波の伝搬時間による距離計測の原理を示す。基本的な波形は図1と同様であるが、受信した直接波までの伝搬時間tと音速cとして $L = c \cdot t$ の計算により距離Lを算出する。

以下に、距離計測応用について6つの事例を示す。

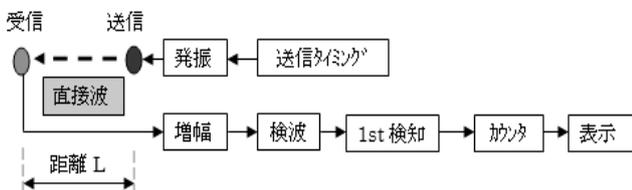


図2 直接波による距離計測の原理

3.1.1 「3次元マウス」<sup>1)</sup>

直接波を利用した事例として、「3次元マウス」は、3つの受信センサで1つの送信センサ(マウス)の3次元空間座標を算出し、パソコン画面上にその軌跡を表示する。図3にブロック図、図4に座標と計算式を示す。

1辺2aの正三角形上に置いた各受信センサと送信セ

ンサとの距離 $r_1, r_2, r_3$ から、パソコンによって送信センサ(x, y, z)の座標を算出し、画面上にマウスの軌跡を表示する。図5に製作物の外観を示す。

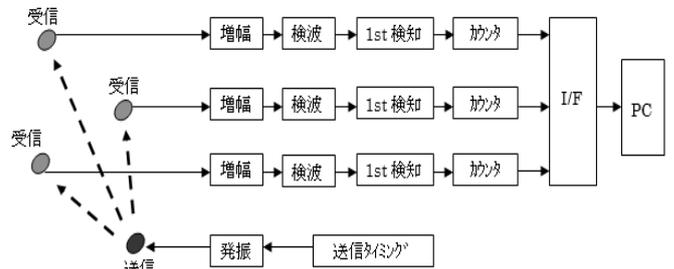
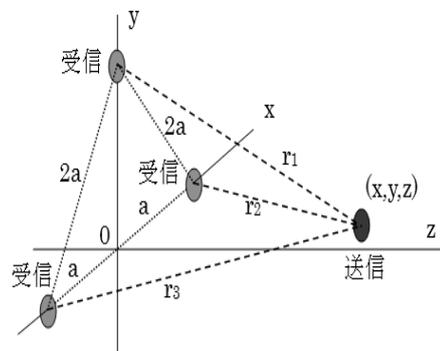


図3 「3次元マウス」のブロック図



$$\begin{aligned}
 r_1 &= \sqrt{x^2 + (y - a\sqrt{3})^2 + z^2} & x &= (r_3^2 - r_2^2) / 4a \\
 r_2 &= \sqrt{(x - a)^2 + y^2 + z^2} & y &= (r_1^2 + r_2^2 - 2r_1^2 + 4a^2) / 4a\sqrt{3} \\
 r_3 &= \sqrt{(x + a)^2 + y^2 + z^2} & z &= \sqrt{r_3^2 - y^2 - x^2 - 2ax - a^2}
 \end{aligned}$$

図4 「3次元マウス」の座標と計算式

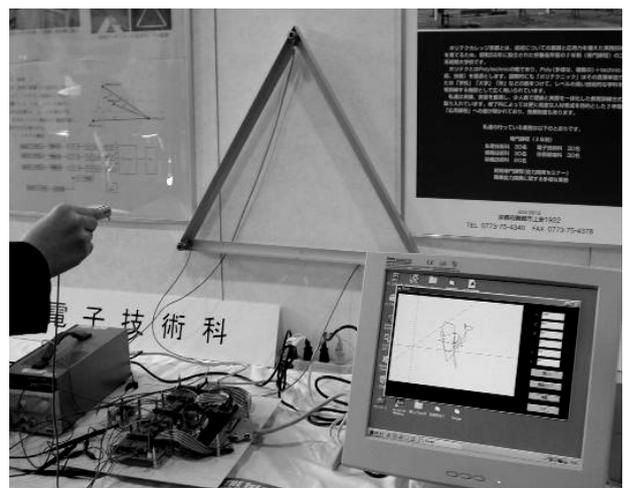


図5 「3次元マウス」の外観

3.1.2 「空中マウス」<sup>2)</sup>

「空中マウス」は、マウスを送信とし、上下方向および左右方向それぞれの受信信号の振幅を比較し、振幅の大きい方向にパソコンのポインタが動き、同程度ならば停止する。マウスI/Fは市販のボール式マウスを利用し、

移動方向による 2 相パルスを供給した。図 6 にブロック図、図 7 に外観を示す。

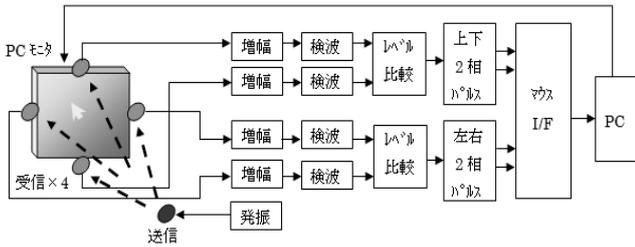


図 6 「空中マウス」のブロック図



図 7 「空中マウス」の外観

### 3.1.3 「追従ロボット」<sup>3)</sup>

反射波を利用した事例として、「追従ロボット」は、人との距離を計測しながら前後に追従する。図 8 にブロック図、図 9 に外観を示す。

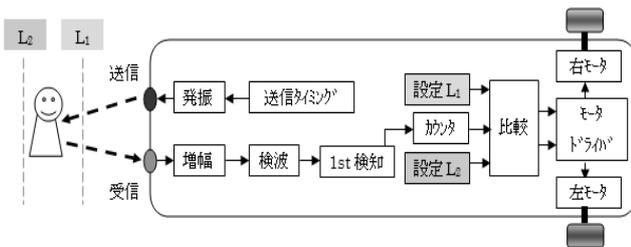


図 8 「追従ロボット」のブロック図

これは、人との距離が、設定値 L1 より近づくと後退し、設定値 L2 より遠ざかると前進し、L1 と L2 の間にあると停止するよう DC モーターを制御し、人の動きに前後に追従する自走ロボットである。



図 9 「追従ロボット」の外観

### 3.1.4 「追従照明」<sup>4)</sup>

同様に、「追従照明」は、人の位置を 3 つの領域にて検知し左右に回転して人に追従する。図 10 にブロック図、図 11 に外観を示す。

中央の送信センサから、送信後の反射波を左右の受信センサで受信し、それぞれの距離カウント値の比較から人のいる領域を判断して、ステッピングモーターによる回転によって人に照明をあてる。

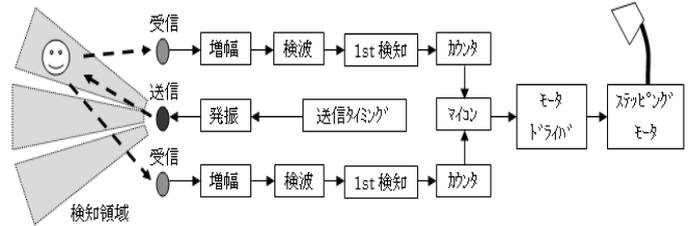


図 10 「追従照明」のブロック図



図 11 「追従照明」の外観

### 3.1.5 「非接触ギター」<sup>5)</sup>

「非接触ギター」は、学生の興味により、アミューズメント分野に応用した事例である。図 12 にブロック図、図 13 に外観を示す。

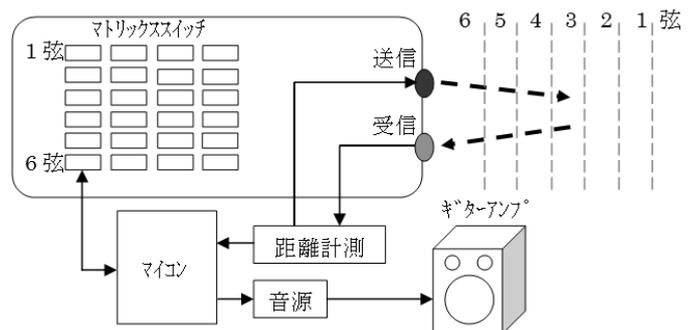


図 12 「非接触ギター」のブロック図

これは、ボディのないネックだけのギターで、空間の手の位置を距離計測してギターのコイルに対応し、ネック上に配置したマトリクススイッチをスキャンして押されているスイッチを検知する。これらの情報をマイコンにより処理し、和音やアルペジオの演奏モード、サステイン（残響）等の機能に対応した音源の制御によってギターアンプを鳴らす。

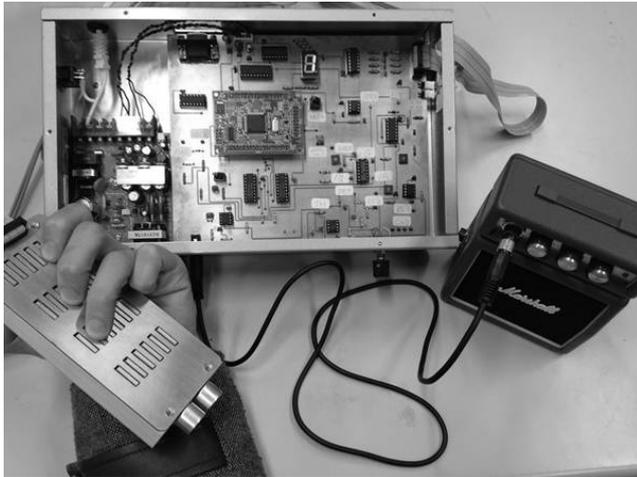


図 13 「非接触ギター」の外観

3.1.6 「非接触ドラム」<sup>6)</sup>

同様に、「非接触ドラム」は、4つの送受センサの各上方空間で、かつ設定された検知領域にて手を振るとそれぞれのドラム音が鳴る。図 14 にブロック図、図 15 に外観を示す。

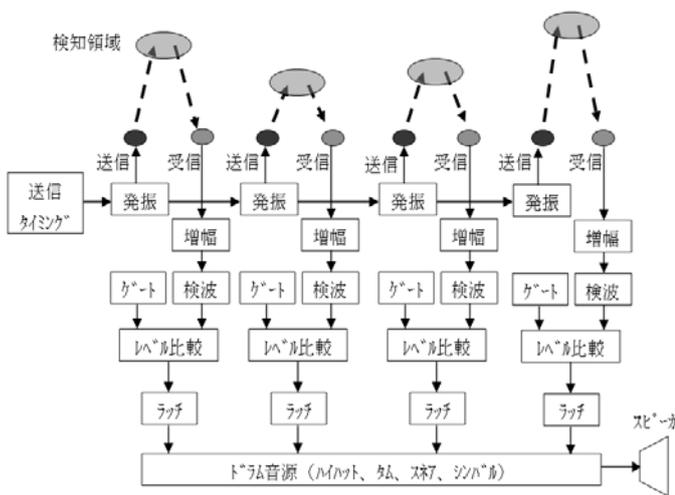


図 14 「非接触ドラム」のブロック図

検知領域の設定は、図 16 に示すようなゲート機能により実現できる。これは、図 1 の反射信号を検知するスレッショルド信号をゲート化して、設定された時間範囲の反射信号のみを検知する。反射検知は一瞬なのでラッチし、市販キーボードのドラム音源に接続して鳴らす。

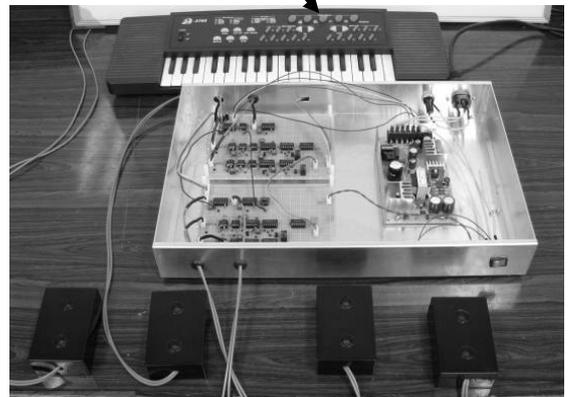


図 15 「非接触ドラム」の外観

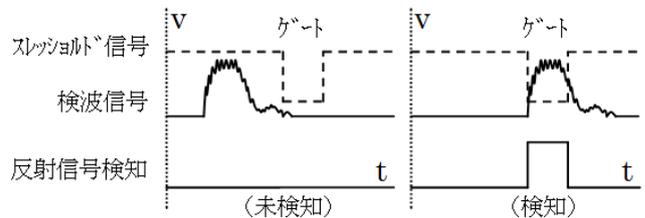


図 16 ゲートによる検知領域の設定

3.2 ドップラ応用

移動体に連続超音波を照射すると、その反射波はドップラ効果により受信周波数が変化する。この変化したドップラ偏移周波数を抽出して移動体の速度が算出できる。

一般に、ドップラ偏移周波数  $f_d$  と移動速度  $v$  は、 $f_d = (2 \cdot f_c \cdot v \cdot \cos \theta) / c$  となる。ここで、 $f_c$  は送信周波数、 $\theta$  は移動体との角度、 $c$  は音速である。

表 2 に  $\theta = 0^\circ$  の時の移動体速度とドップラ偏移周波数について数値例を示す。ドップラ偏移周波数  $f_d$  を抽出し、移動速度に換算することで移動体のスピードが計測できる。

図 17 にドップラ偏移周波数の抽出原理を示す。

移動体への送信信号を  $\cos \omega_c t$  とすると、ドップラ効果によって受信信号は、 $\cos(\omega_c \pm \omega_d)t$  となる。ここで、物体が近づけば  $+\omega_d$ 、遠ざかれば  $-\omega_d$  である。

復調信号が  $\cos \omega_c t$  のとき、受信信号との乗算は式(1)のように、和と差の信号が発生する。これらの周波数成分から、ローパスフィルタ（以降 LPF）によって和の周波数成分を除去すれば、ドップラ偏移周波数が抽出できる。

$$\begin{aligned} & \cos \omega_c t \cdot \cos(\omega_c \pm \omega_d)t \\ &= 1/2 \{ \cos(\omega_c + (\omega_c \pm \omega_d))t \\ & \quad + \cos(\omega_c - (\omega_c \pm \omega_d))t \} \\ &= 1/2 \{ \cos(2\omega_c \pm \omega_d)t + \cos(\mp \omega_d)t \} \end{aligned} \quad (1)$$

表 2 移動体速度とドップラ偏移周波数 ( $\theta = 0^\circ$ )

移動速度 $v$	ドップラ偏移周波数 $f_d$
1 km/h	65.4 Hz
10 km/h	654 Hz
20 km/h	1.3 kHz
30 km/h	1.9 kHz

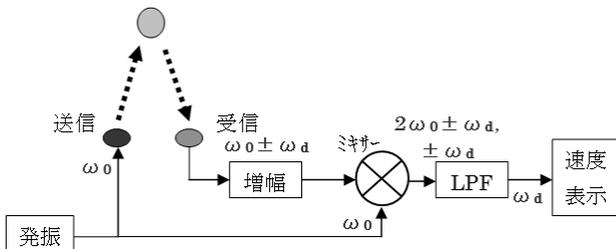


図 17 ドップラ偏移周波数の抽出原理

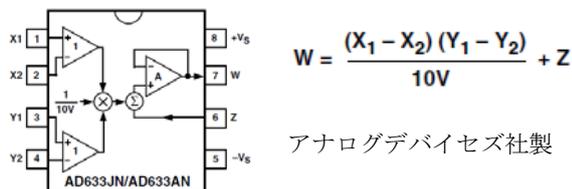


図 18 乗算器 AD633 の内部ブロック図

なお、ミキサーとして使用した乗算器 IC を図 18 に示す。  
以下に、ドップラ応用について 3 つの事例を示す。

### 3.2.1 「スピードガン」<sup>7)</sup>

ドップラ効果を応用した事例として、「スピードガン」は、図 17 の速度表示ブロックをカウンタと 7 セグメント LED に置き換えたもので原理は同様である。図 19 にブロック図、図 20 に外観を示す。

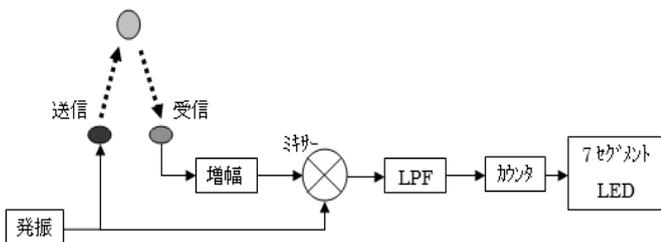


図 19 「スピードガン」のブロック図



図 20 「スピードガン」の基板と送受センサ

速度の表示は、速度 1km/h が周波数 65.4Hz に対応するので、 $1/65.4 = 15.3\text{ms}$  の時間間隔毎にドップラ偏移信号の波数をカウントし表示することで、時速換算の表示となる。また、速度表示は瞬時に変化するので、図 21 に示す速度の最大値をホールドする機能を追加した。これは、現在の表示カウント値と次のカウント値を比較し、次カウント値が表示カウント値より大きい時のみラッチ信号を通過させて、最大値を更新しホールドする。

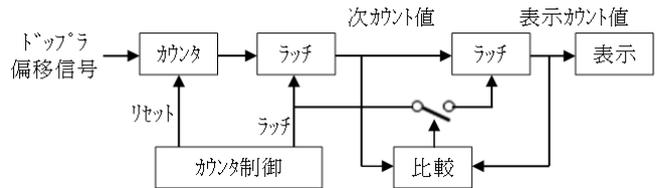


図 21 最大値ホールドの原理

速度計測の評価として、図 22 のように、ひもでつるしたボールをある高さから離し、位置エネルギー (mgh) が運動エネルギー ( $mv^2/2$ ) に変換されることによって検証とした。

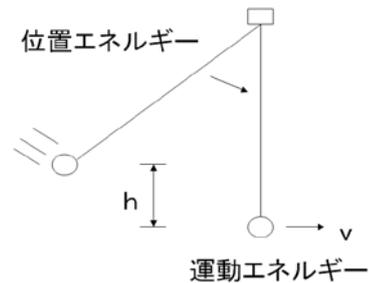


図 22 スピードガンの速度検証

### 3.2.2 「方向検知付スピードガン」<sup>8)</sup>

さらに、「方向検知付スピードガン」は、直交信号を用いた検波によって移動体の移動方向が検知できる。図 23 にブロック図、図 24 に外観を示す。

これは、式(1)によるドップラ偏移周波数の抽出に、復調信号  $\sin \omega_0 t$  を加え、直交する信号による 2 系統の復調を行う。復調信号が  $\sin \omega_0 t$  のとき、

$$\begin{aligned} & \sin \omega_0 t \cdot \cos(\omega_0 \pm \omega_d) t \\ &= 1/2 \{ \sin(\omega_0 + (\omega_0 \pm \omega_d)) t \\ & \quad + \sin(\omega_0 - (\omega_0 \pm \omega_d)) t \} \\ &= 1/2 \{ \sin(2\omega_0 \pm \omega_d) t + \sin(\mp \omega_d) t \} \end{aligned} \quad (2)$$

となり、式(1)の LPF 後の cos 信号を基準にして、式(2)の LPF 後の sin 信号の位相 (符号) によって、移動体が近づくのか、遠ざかるのか、すなわち移動の方向が検知できる。

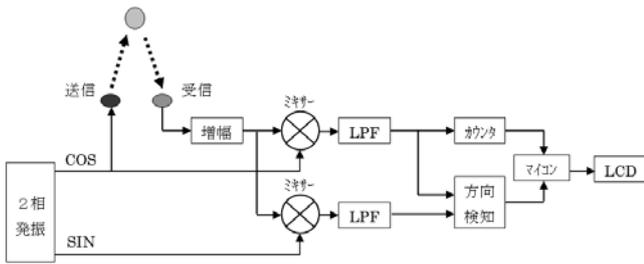


図 23 「方向検知付スピードガン」のブロック図

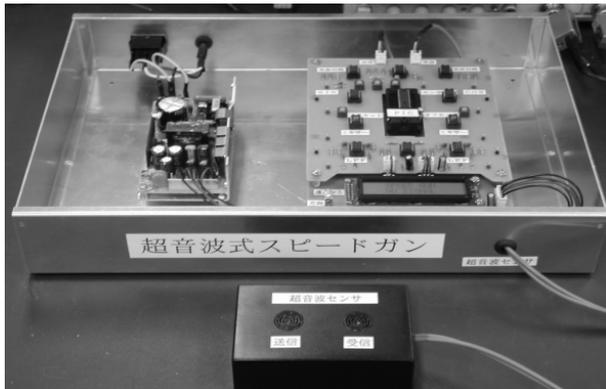


図 24 「方向検知付スピードガン」の外観

### 3.2.3 「非接触パンチングマシン」<sup>9)</sup>

ドップラ応用のアミューズメント分野への応用事例として、「非接触パンチングマシン」は、図 17 のブロック図と同様の原理で、拳の速度をパンチ力とみなし計測する。非接触なのでケガすることなく安全に、しかも最大値ホールドを使用すれば、最大パンチ力を競い合うことができる。図 25 に外観を示す。

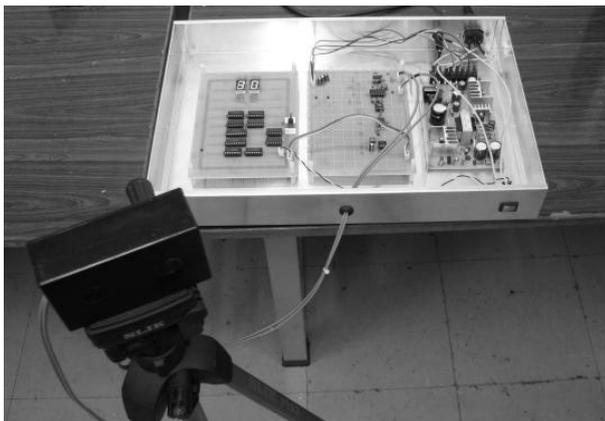


図 25 「非接触パンチングマシン」の外観

## 3.3 通信応用

超音波は波動の一種なので、電波と同様、超音波を搬送波（キャリア）として音声信号等を載せて送受信することができる。一般に、電波の通らない水中での通信に役立っている。

図 26 に通信応用の原理を示す。マイクからの音声信号は、40kHz の超音波を搬送波として変調し、受信信号を

復調して音声信号を取り出してスピーカを鳴らす。

以下に、通信応用について 5 つの事例を示す。



図 26 通信応用の原理

### 3.3.1 「水中 AM 通信機」<sup>10)</sup>

通信応用の事例として、「水中 AM 通信機」は、振幅変調 (Amplitude Modulation) により、水を伝搬媒質として音声通信を行う。図 27 にブロック図、図 28 に外観を示す。

これは、超音波の送受センサを水中にて対向させ、マイクからの音声信号を、40kHz 搬送波の超音波に AM 変調して送信し、受信信号をダイオード検波し、LPF によって搬送波成分を除去してスピーカを鳴らす。

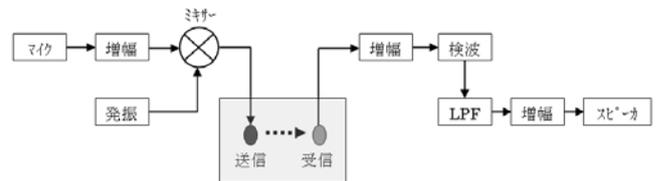


図 27 「水中 AM 通信機」のブロック図

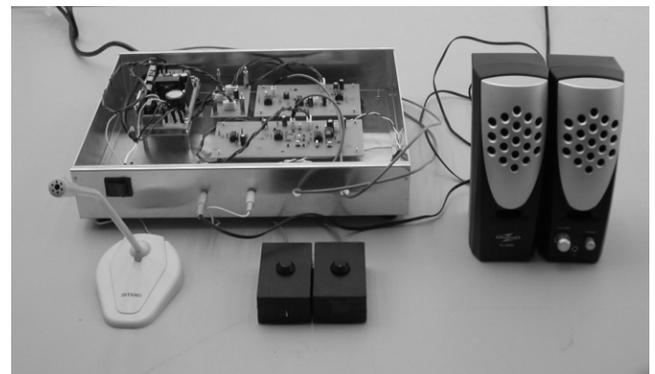


図 28 「水中 AM 通信機」の外観

### 3.3.2 「キャリア復調型 AM 通信機」<sup>11)</sup>

「キャリア復調型 AM 通信機」は、ダイオード検波ではなく、搬送波信号を復調に用いた空中 AM 通信機である。図 29 にブロック図、図 30 に外観を示す。

変調は、超音波の搬送波信号  $\omega_c$  と音声信号  $\omega_d$  を乗算した和・差信号  $\omega_c \pm \omega_d$  を送信し、復調は、式 (1) と同様に、受信信号と搬送波信号の乗算で発生する和・差信号から、LPF にて音声信号  $\omega_d$  を抽出する。

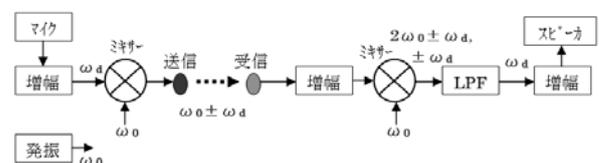


図 29 「キャリア復調型 AM 通信機」のブロック図

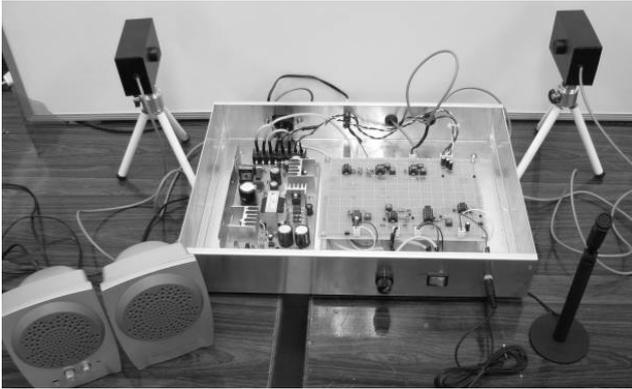


図 30 「キャリア復調型 AM 通信機」の外観

3.3.3 「AM ステレオ通信機」<sup>12)</sup>

「AM ステレオ通信機」は、図 29 を拡張し sin 波と cos 波の直交する搬送波信号で変調・復調を行う。図 31 にブロック図、図 32 に外観を示す。

変調は、ステレオ R 信号を搬送波の sin 波に乗せ、L 信号を cos 波に乗せて送信し、復調は、受信信号に sin 波と cos 波をそれぞれ乗算し、LPF にて R、L 信号を抽出する。

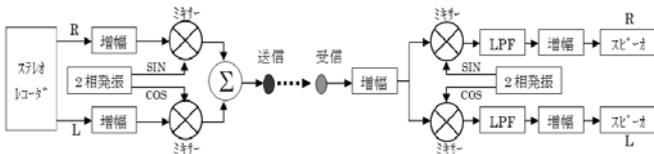


図 31 「AM ステレオ通信機」のブロック図



図 32 「AM ステレオ通信機」の送受信基板とセンサ

3.3.4 「BPSK 通信機」<sup>13)</sup>

デジタル変調の事例として、「BPSK 通信機」は、2 位相偏移変調(Binary Phase Shift Keying)により音声通信を行う。これは図 33 のように、デジタル信号の

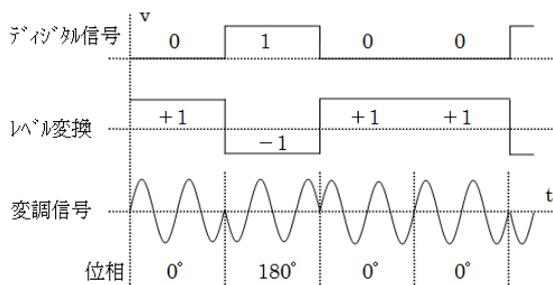


図 33 2 位相偏移変調 (BPSK) の原理

0、1 をそれぞれ位相  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  に対応して変調する。図 34 にブロック図、図 35 に外観を示す。

これは、音声信号を 8kHz、4 ビットの A/D 変換後、パラレル/シリアル変換、レベル変換して搬送波と乗算し送信する。復調は、その逆を行って音声信号に戻す。

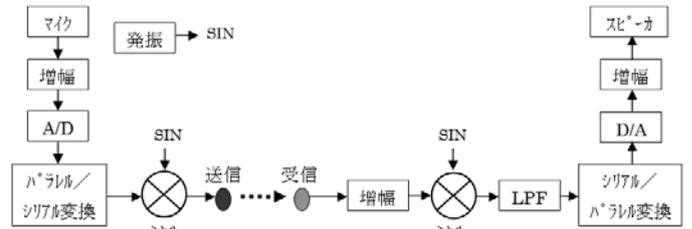


図 34 「BPSK 通信機」のブロック図



図 35 「BPSK 通信機」の外観

3.3.5 「QPSK 通信機」<sup>14)</sup>

さらに拡張して、「QPSK 通信機」は、4 位相偏移変調 (Quadrature Phase Shift Keying) であり、音声通信を直交している同振幅の搬送波 sin 波、cos 波によって、それぞれ BPSK 変調して合成する。

これは、音声信号を 8kHz、8 ビットの A/D 変換した後、上位 4 ビット、下位 4 ビットを組合せて 2 ビットにシンボル化し、表 3 のように、sin 波で 0, 1 を位相  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  に、cos 波で 0, 1 を位相  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  に変調し、それらを加算すると位相はベクトル合成される。すなわち 2 ビット 4 位相の送信となる。復調は、その逆を行って音声信号に戻す。図 36 にブロック図、図 37 に外観を示す。

図 34 の BPSK 変調では A/D 変換を 4 ビットに制限したが、この QPSK 変調では 2 倍の 8 ビットが扱える。

表 3 BPSK 変調から QPSK 変調の合成

SIN 波		COS 波		加算合成	
ビット	位相	ビット	位相	シンボル	位相
0	$0^\circ$	0	$90^\circ$	00	$45^\circ$
0	$0^\circ$	1	$270^\circ$	01	$315^\circ$
1	$180^\circ$	0	$90^\circ$	10	$135^\circ$
1	$180^\circ$	1	$270^\circ$	11	$225^\circ$

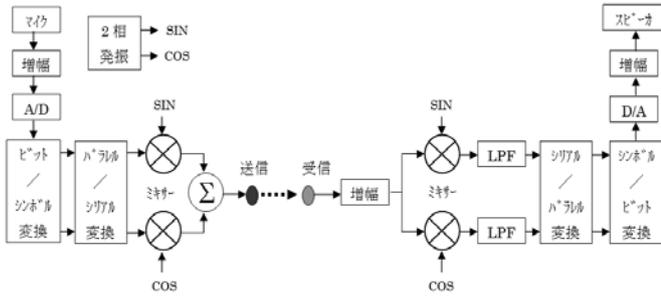


図 36 「QPSK 通信機」のブロック図



図 37 「QPSK 通信機」の外観

#### 4. あとがき

専門課程 2 年生の総合制作実習における超音波を応用した教材開発について、ブロック図等による動作原理と、外観写真による完成品を示しながら、①距離計測応用 6 件、②ドップラ応用 3 件、③通信応用 5 件を紹介した。

これらは、学生が授業で習った電子回路の知識や実習の経験を応用として活かしながら、設計、試作、評価を繰り返して問題を解決し、個々の興味に応じて創造性を発揮し、工程を管理しながら完成を目指すことで、応用力、問題解決力、創造力、工程管理力と共に、ものづくりの総合力が習得できたのではないかと考えられる。

また、学生個人の独自テーマを、考え、悩み、努力して期限までに製作し、完成品を実演することは、他の実習にはない達成感が得られたものと確信する。

しかし技術的には、超音波の空中伝搬は 1m 程度の距離でも、減衰や反射物の形状、材質、角度の影響を受け、反射波の振幅が 20~40dB (1/10~1/100) と大きく変化する。そのため距離計測の直線性が悪くなることや、近距離でない反射波やドップラ信号が得にくいことが起こる。

通信応用では、送信側のクロックに同期して、受信側のクロックを再生させることが難しく、復調に変調のクロックをそのまま使用して送・受信が完全に分離できていない事例もある。

これらの改善は、距離感度補正、FFT による周波数分析、PLL 等によるクロック再生等が考えられるが、今後の課題としたい。

#### 参考文献

1. 中橋達哉、前昌樹、超音波式 3 次元マウスの製作、平成 14 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科
2. 尾崎和之、超音波式空中マウスの製作、平成 16 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科
3. 末安達哉、人の動きに追従する自走ロボットの製作、平成 23 年度総合制作実習発表予稿集、総合大東京校制御技術科
4. 西出学人、人の動きに追従する照明器具の製作、平成 23 年度総合制作実習発表予稿集、総合大東京校制御技術科
5. 石川幸助、非接触ギター製作の製作、平成 24 年度総合制作実習発表予稿集、職業大電子情報技術科
6. 對馬由人、非接触ドラムの製作、平成 23 年度総合制作実習発表予稿集、総合大東京校制御技術科
7. 石塚正和、加藤純一郎、嵐達也、寺島秀崇、超音波式スピードガンの製作、平成 15 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科
8. 吉岡亮平、直交検波を用いた超音波式スピードガンの製作、平成 17 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科
9. 市川亮一、非接触バンチングマシンの製作、平成 23 年度総合制作実習発表予稿集、総合大東京校制御技術科
10. 國兼英司、AM 変調を用いた超音波水中通信機の製作、平成 17 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科
11. 高寺力、超音波をキャリアとした音声通信機の製作、平成 23 年度総合制作実習発表予稿集、総合大東京校制御技術科
12. 石井雄太、超音波による AM ステレオ送受信機の製作、平成 16 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科
13. 齊藤文生、BPSK 変調を用いた超音波式デジタル通信機の製作、平成 17 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科
14. 濱崎健次、QPSK 変調を用いた超音波式デジタル通信機の製作、平成 17 年度総合制作実習発表予稿集、京都短大電子技術科

(原稿受付 2014/01/15、受理 2014/03/25)

\*五十嵐茂,  
職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川  
西町 2-32-1 email:s-igarashi@uitech.ac.jp  
Shigeru Igarashi,  
Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira,  
Tokyo 187-0035