

テルミンの夢

金野茂男

Tepmin's Dream

KINNO Shigeo

1. はじめに

楽器の一つとして「テルミン」という楽器がある。が、一般にはなじみが薄く、知っている人は少ないような気がする。エレクトローン似の電子音が出る電子楽器（歴史的には電気楽器と言った方がよいのかもしれない）である。近年ではエレキギター、エレクトーン、シンセサイザ等をはじめ、各種・多様な電子楽器がある。実のところ、このテルミンという楽器は電子音を世界で初めて出した楽器なのである。電子デバイス応用開発の課題として、今回は、光センサ、ワンチップマイコンであるPIC、V/F変換器等を使用して、現代風のテルミンを作り上げた。テルミンのアイデアを取り入れているが、テルミンとはやはり違っている点も多いので、今回製作したこの装置を「テルミン擬き」と呼ぼう。

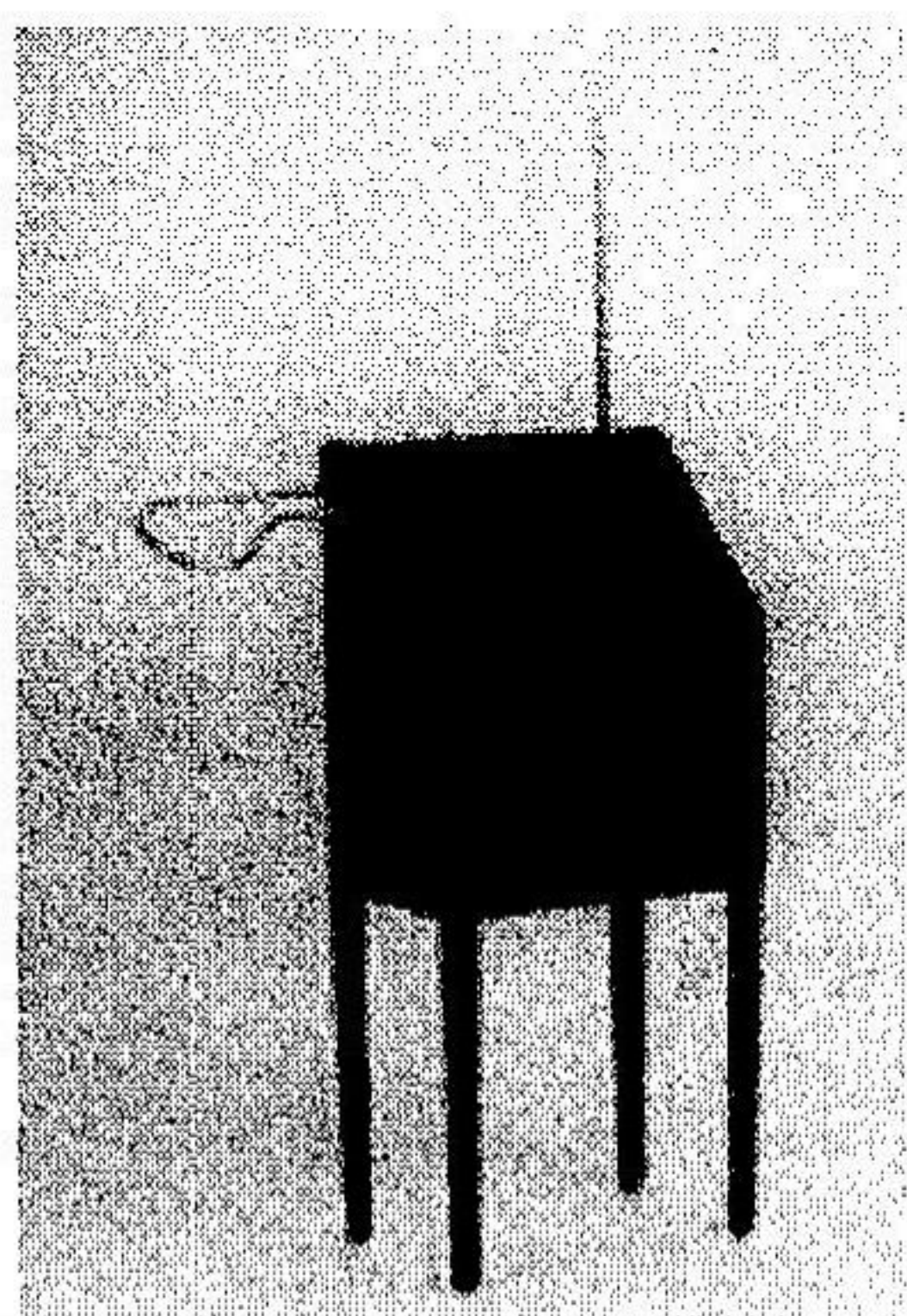
テルミンはどのような楽器なのか分からないと如何ともし難い。テルミンに知見のない読者のために、テルミンの説明を行おう。楽器テルミンは、1920年、ロシア人のレフ・セルゲイヴィッチ・テルミンという電気技術者自身が開発した、世界初の電子楽器の名称である。制作者の名前がそのまま楽器の名前となっている。この点からもテルミンという楽器は独創的な新しい楽器であったことがわらう。

細々と言っては現在のテルミンの関係者には礼を失

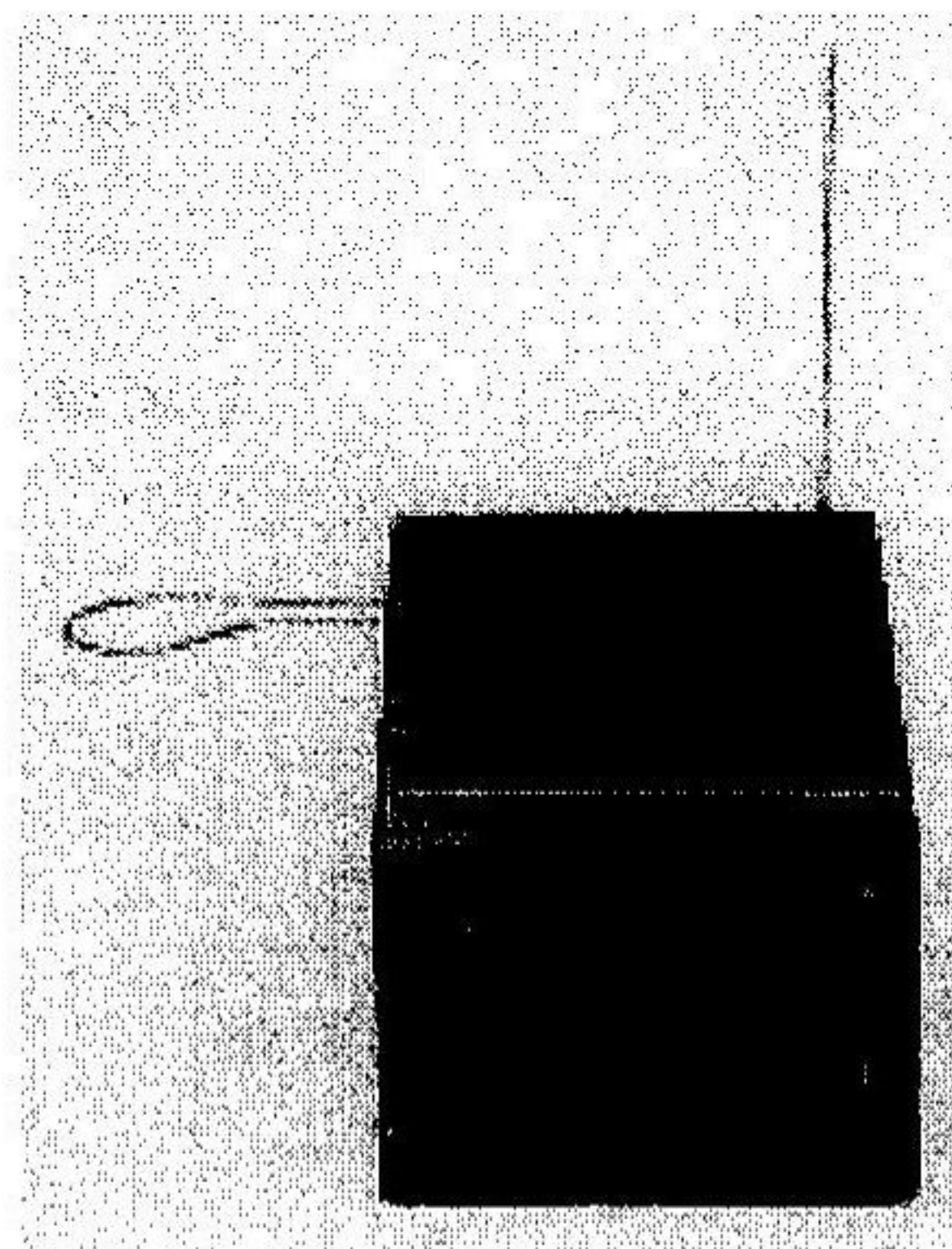
するような気がするが、テルミンは現在でも生きている。インターネットを経由して、入手した楽器テルミンの外観写真を写真1に示す。弦もなければ、鍵盤も、ピストンもない。その1, 2はテルミンが製作したものと外観がほぼ同じである。近年では、その3のように外観が原型とは異なったものも見受けられる。音は楽器に内蔵されたスピーカから出力される。

参考文献^{(1),(2)}等も参考にしながら、テルミンの動作及び構造の詳細を説明しよう。楽器正面に向かって右肩から垂直に真っ直ぐ伸びたアンテナと、左側面から水平に伸びたループ上のアンテナが、演奏者との楽器との接点である。接点とはいうが、アンテナに触れることなく演奏をする。両方のアンテナ付近にかざした両手の動きに従って、テルミンは音程を変え、音量を変えるのである。右手を垂直アンテナに近づければ、音程が高くなり、遠ざけると低くなる。左手をアンテナに近づければ、音量は減少し、遠ざけると増大する。通常のテルミンでは、音域幅は4オクターブ半であり、最低音から最高音まで、切れ目が無く連続的な音程及び音量変化を得ることができる。このような楽器は現代でもテルミン以外には見あたらない。この点に、テルミン擬きを製作する意欲がかき立てられたのである。

楽器に全く触れることなく、非接触で演奏するとい



その1



その2



その3

写真1 テルミンの外観

うテルミン独自のこの方法は、テルミン本体に内蔵している、ラジオなどで用いられている高周波発振回路を応用することで実現している。これを、図1に示しているテルミンのブロック図をもとに説明をする。

音程及び音量用の高周波発振器の発振周波数は、演奏者の手とアンテナの間にできる浮遊コンデンサの容量変化に対応して変化する。これらの発振信号 (f_v , f_s) と局部発振器からの発振信号 (f_0) を混合器で混合する。混合波 ($f_v \pm f_0$, $f_s \pm f_0$) を低域濾過器を通し、中間周波数成分 ($f_v - f_0$, $f_s - f_0$) を取り出す。音程側ではこの中間周波数が可聴音帯域となるように回路パラメータを設定しておく。得られたこの可聴音帯域の信号を増幅し、スピーカに送り出す。こうすれば、右手とアンテナとの距離に依存して、スピーカから音程が変化した音が鳴り響く。

音量の変化は、得られた中間周波数信号を、周波数—電圧変換回路を用い、電圧変化に変換し、この電圧で増幅器の利得を変化させるようにする。これで、スピーカから出力される音の音量も、左手のアンテナとの間隔に依存して変化することになる。テルミン自身はこの回路を真空管で作りを上げた。当時はもちろんトランジスタや、ICはなかった。現代で復元されているテルミンは写真1のその3のように、トランジスタやICを用いたものが主流のようである。

2. 設計・製作

ツマミ、キー、鍵盤やピストンは無く、楽器本体にも全く触れることなく、鳴り響く音の音程及び音量を連続的に変化させて演奏できる点が、テルミン独特の奏法である。現在において作られているテルミンの複

製楽器は、昔と同じようにアンテナと高周波発振回路を用い、この演奏方法を踏襲している。

音が途切れることなく、音程及び音量を連続して変化させることができ、かつテルミンのように、「手で空間を摘んで音を出している」様ならば、或いは物理学をかじったことのある読者向けには「手でエーテルをかき混ぜている」様ならば、アンテナを用い、空間容量の変化を利用した発振方式にこだわることもないであろうと考えた。この発想に基づいて、テルミン擬き電子楽器の製作を試みたのである。

図2にそのブロック図を示す。主要部品として、光センサ、V/F (電圧/周波数) 変換器、ワンチップマイコン、D/A (デジタル/アナログ) 変換器を用いている。アンテナや真空管はない。全て1920年代にはなかった、あるいは予想もしていなかった電気部品である。

テルミンのアンテナと発振回路の代わりとなるのが、光センサである。これに入射する光量の大小 (光センサの上にかざした手の位置や形状を変えることでできる) は電圧の大小に変換され、V/F変換器 (バーブラウン VFC110) に入力される。入力電圧値をパルスの周波数に変換する機能を有するこのV/F変換器からは、入力電圧に比例した周波数のクロックパルスが出力される。光センサに対する手の位置・形状の変化量が、パルスの周波数の大小に変換されるのである。装置に全く手を触れることなくである。テルミンらしくである。

このパルスを、マイクロチップ社製ワンチップマイコンPIC16F876のクロック入力端子に入れる。PICの通常使用では、この端子にセラロック発振器

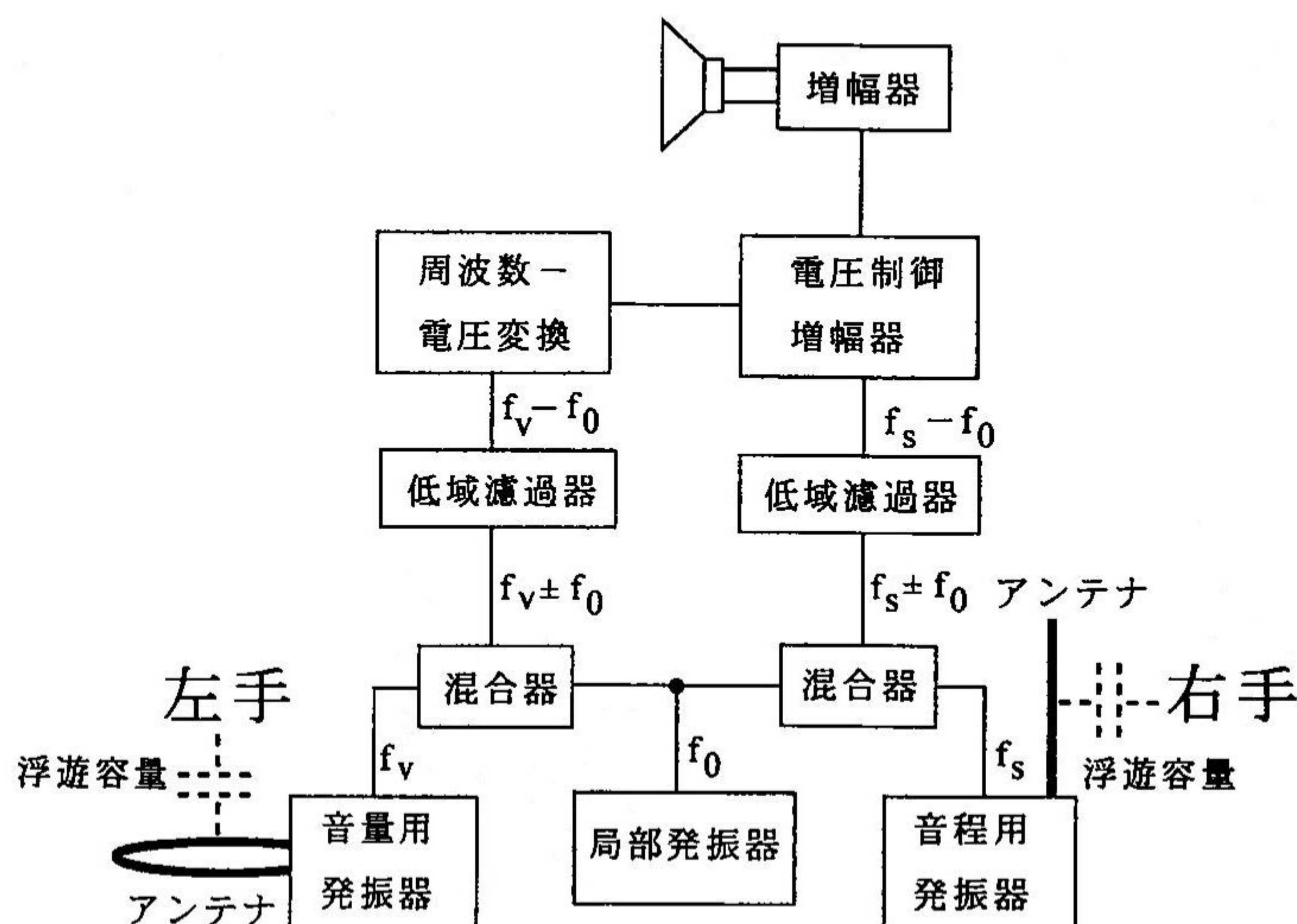


図1 テルミンのブロック図

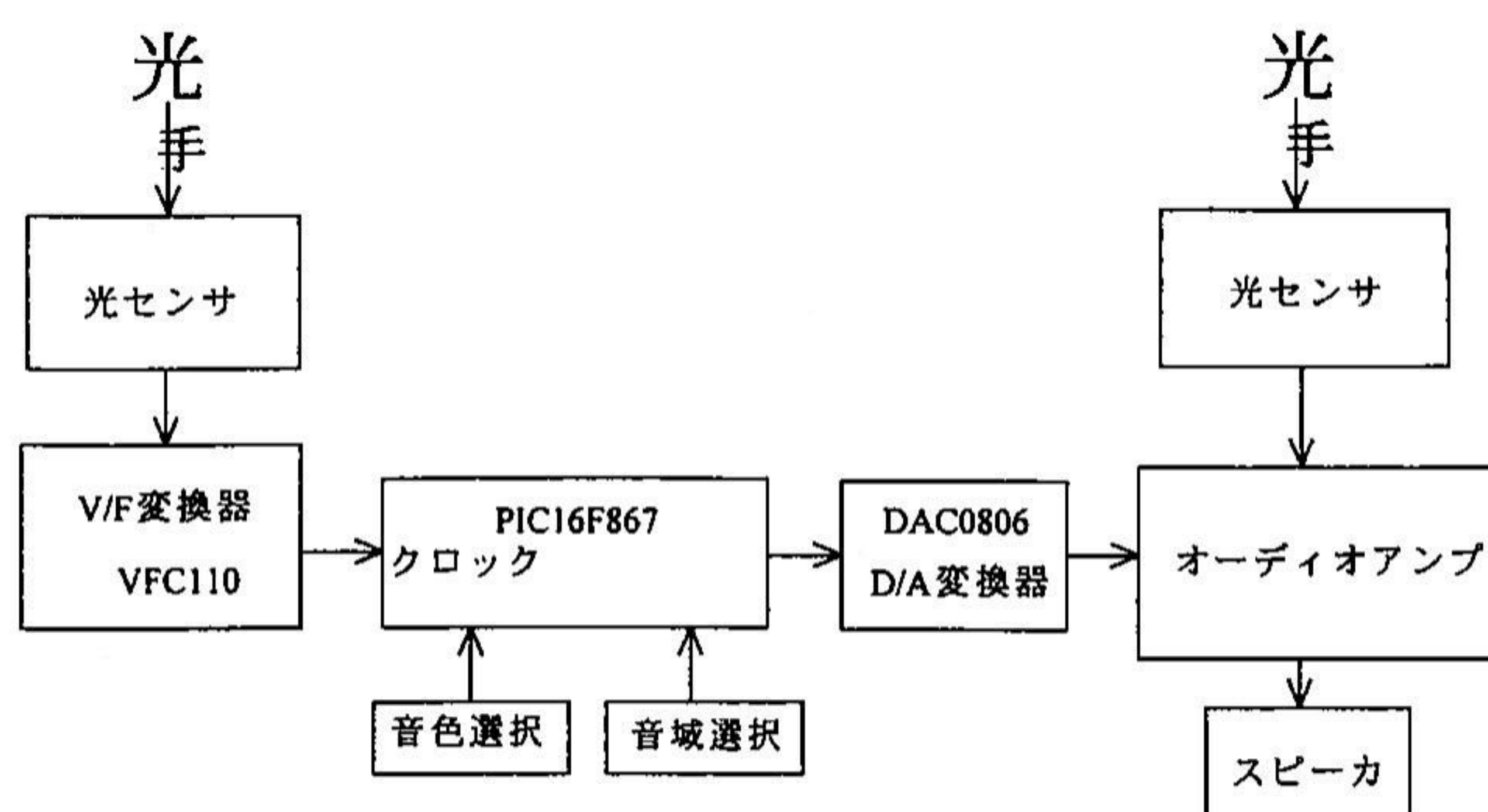


図2 テルミンもどきのブロック図

等を外部接続し、その基本発振周波数に基づいてPIC内のプログラムカウンタを動作させる。従って、通常使用では、プログラムカウンタの動作速度は一定である。例えば、プログラムに何らかの音データを8ビットで、いくつかのステップ数で1周期分書き込む。その部分をエンドレスで実行させ、その値を8ビットポートに出力し、この8ビット出力をD/A変換し、スピーカを駆動すれば、プログラムされている音が再生される。が、この方法では、クロックが一定なので、固定周波数の音だけが出力される。

このクロックパルスを外部から供給し、その周波数を可変とすれば、プログラムカウンタの動作速度、即ち命令の実行時間も可変となるので、音データの1周期分を出力する時間を変化させることができる。このような方法を採用すれば、外部クロックパルスの周波数に比例して、音程を自在に変化させることができるようになる。なをかつ、この方法の好都合な点は、プログラム中に音のデータを任意に書き込むことができるので、自在な音色の音を出力させることもできる。

PICから出力される音の8ビットデジタルデータをD/A変換専用IC（ナショナルセミコンダクタDAC0806）でアナログデータに変換する。これからの出力をオーディオ・アンプに inputs し、スピーカを駆動させる。音量変化にも、音程変化と同じ方法を採用する。光センサに入射する光量の大小で出力変化が自動的に行えるようにするのである。

なを、ブロック図中の16F876の所に外付けしている音色選択、及び音域選択機能については後述している。

図3が完成した回路図である。光センサとして、直径20mmの大型のCdSセルを使用している。光量に対するこの素子の抵抗値の変化は、粗い測定で、暗

黒時には凡そ $+\infty\Omega$ （少し正確に言えば、数十 $M\Omega$ 以上）、普通の室内での明るさでは約1k Ω 、明るい電球下では100 Ω 以下までの抵抗値をとる。

VFC110の出力はTTL、CMOSロジック互換なので、そのままPICのクロック端子に入力させることができる。テクニカルノートによれば、VFC110の最高出力周波数は4MHzである。これは一定のリニア特性保証値でのものである。本回路ではVFC110にリニア特性をそれほど要求はしない。実際において、出力周波数が高いほど好都合である。入力電圧が約0V～+10Vで、出力パルス周波数は4kHz以下～5.2MHzの幅で変化させることができた。なを、出力パルス波形は低周波になるに従って鋸状パルスとなる。また、高周波端に近づくに従って出力電圧値も低下していく。PICのクロック信号としては、パルス波形が鋸状であることは何ら問題はない。高周波端におけるパルスの電圧低下も本回路では問題はなかった。

PICはプログラムされている1周期分の音データをエンドレスで出力し続ける。16F876のポートBからの音データの8ビット出力はDAC0806に送られ、アナログ信号に変換される。DACは電流出力モードであり、これにOPアンプを接続し、電圧に変換している。このOPアンプの出力信号を抵抗と音量変化用センサであるCdSで分圧する。入射する光量に応じて、CdSの分圧値は変化する。これで音量の変化を実現させている。この分圧をOPアンプのバッファで受け止め、オーディオ・アンプに送る。この回路ではCdSに手を近づけると音量は大となるようにしている。

VFC110に必要な電源は $\pm 15V$ 、+5V。これから、16F876は+5V、OPアンプは ± 15

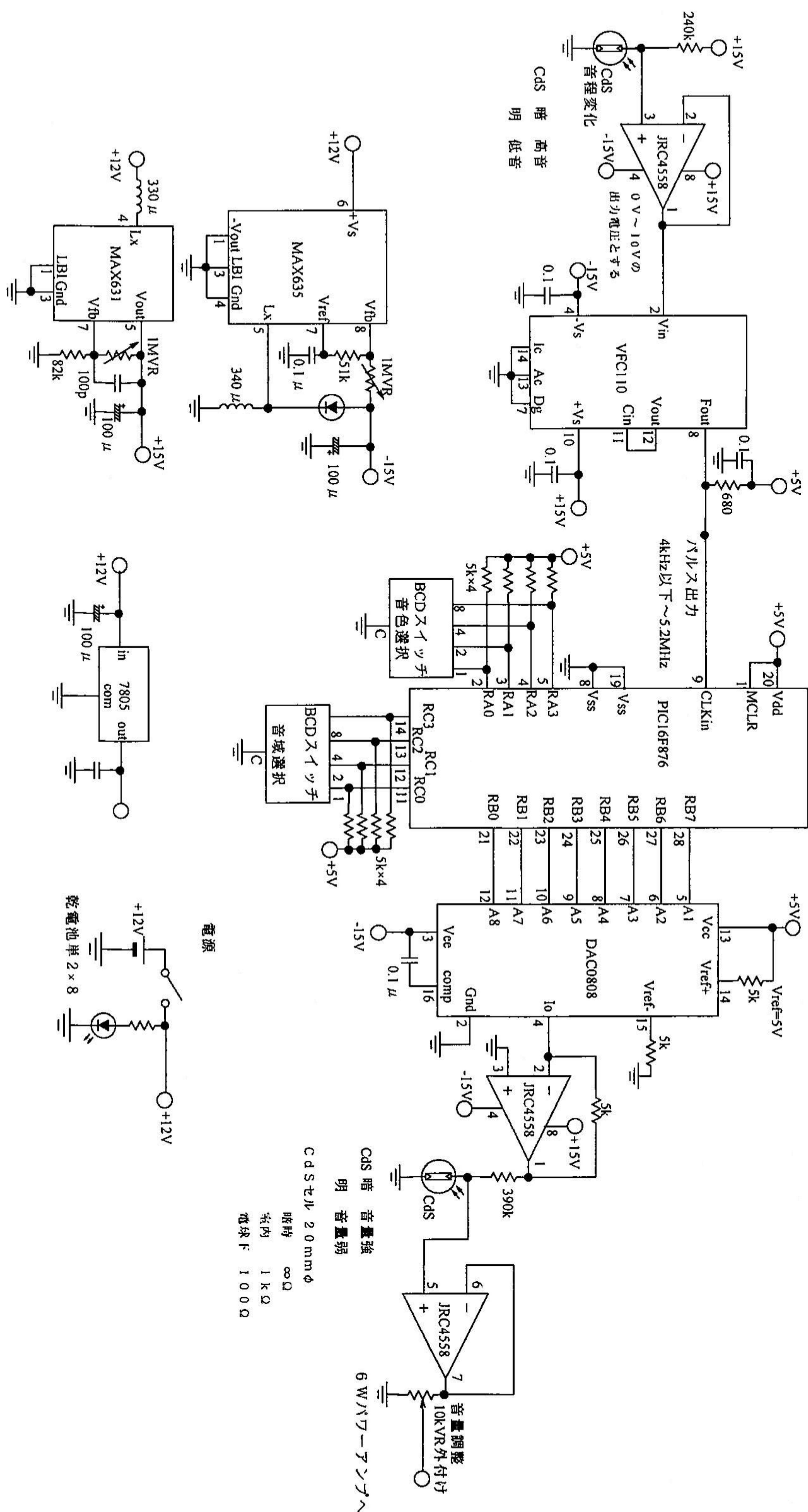


図3 テルミンもどきの回路図

テルミンの夢

Vで動作させることにした。今回使用したオーディオアンプは6Wのキット製品であり、電源定格はDC12V～24Vのものである。電源として単2乾電池8本で12Vを供給し、3端子レギュレータ7805で+5Vを、マキシム社のDC-DCコンバータ素子MAX631, 635を利用し、各々+15V、-15Vを供給している。主基板、オーディオアンプ基板、乾電池を全て1つのシャーシに収め、ケースの両側にはCdSセンサを両耳の如く取り付けた。

スピーカは8Ωのものである。数Wのスピーカの種類はたくさんある。音特性の良好なものに越したことはない。出力音域幅が非常に広いので低音用、中音用、高音用のスピーカがセットになっている3ウェイスピーカーが望ましい。

写真2～4に、完成したテルミン擬きの様子を示す。写真2がシャーシケースの蓋を取り外した内部の様子である。真ん中の大きい方の基板が図3の回路図から作成した基板である。その上の黒く小さい基板がオーディオアンプ基板である。電池は単2が8本納まっている。ケースの両側のパイプ内にCdSセンサが納まっている。前面の様子を示している写真3から、CdSの納まっているパイプの程度が見て取れる。シャーシ

前面には、右から電源スイッチ、パイロットランプ、音域設定スイッチ、音色設定スイッチ、音量ボリューム、離れてスピーカ端子がある。回路図中の右端にあるVRが音量ボリュームである。音量ボリュームは装置の電源を入れ、音量CdSセンサ上に手をかざさないで、最大の光が入射している状態で、スピーカからほとんど音がでない状態となるように調節しておくのが良い。写真4がデモ演奏中の様子である。両CdSセンサの上に手をかざしている。素手より、手に黒い手袋をはめている方が、手を大きく動かすことができる。写真では室内の蛍光灯下で演奏しているが、白色電灯下の方が、より綺麗な音色となる。蛍光灯ではどうしても50Hzの点滅特性が光にのり、雑音となるからである。

CdSの取り付け台には、ホームセンターで売られているパイプ棚用の基台を転用している。それに内側を黒く塗りつぶした直径24mmφ、長さ5cmまたは、10cmのアルミパイプを被せている。

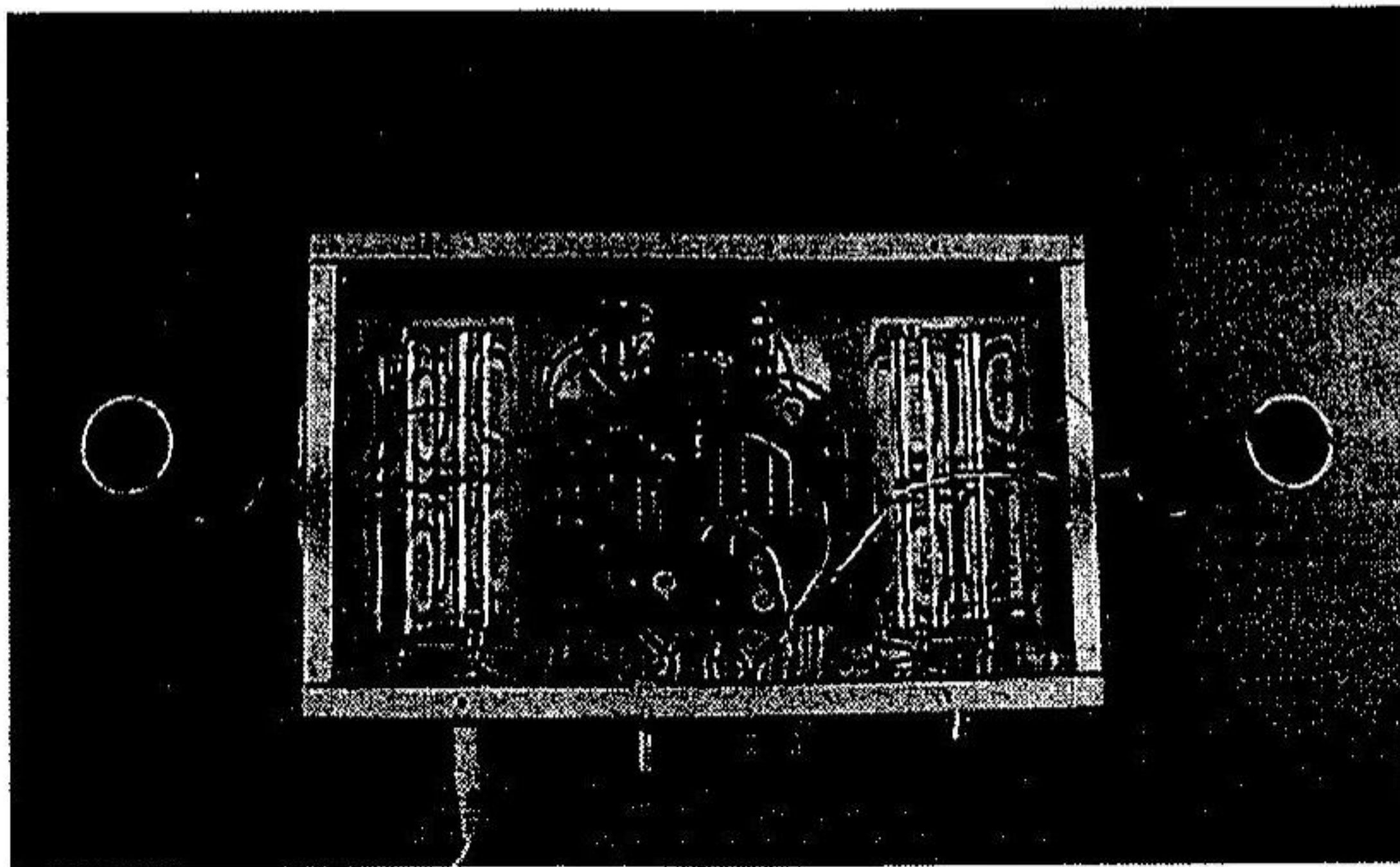


写真2 内部の様子

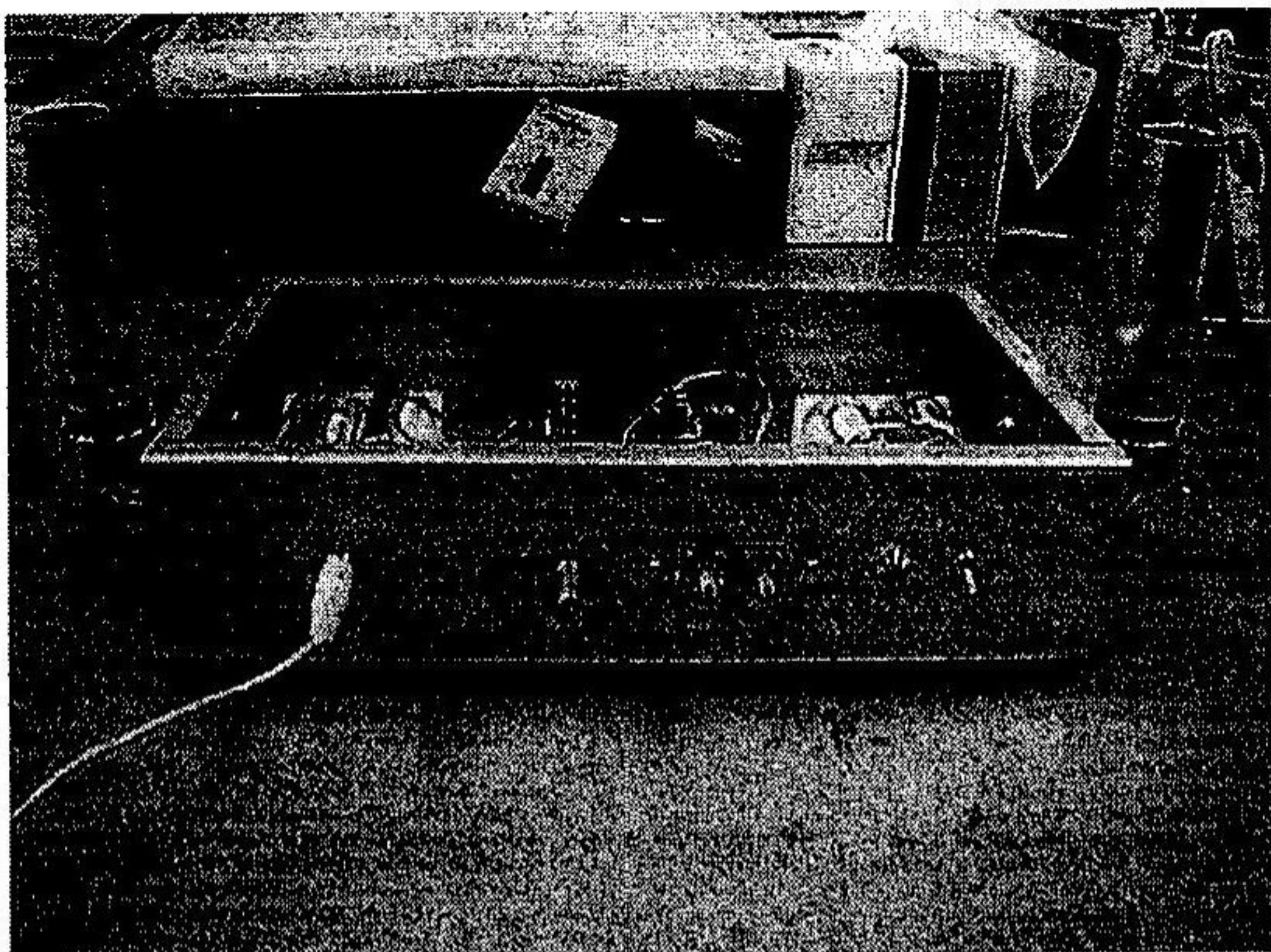


写真3 全面の様子

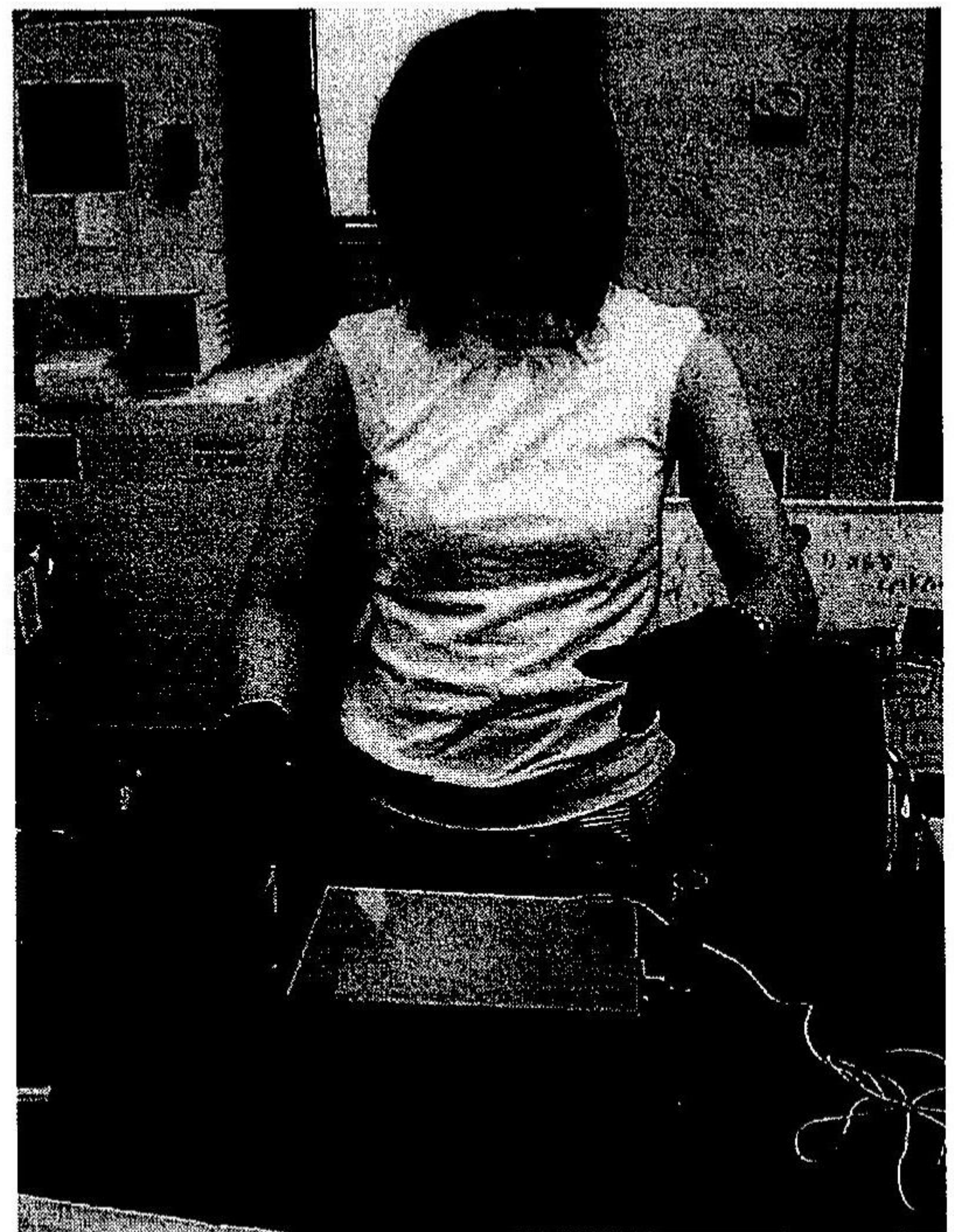


写真4 デモ演奏

3. アセンブラプログラム

PICに書き込んだアセンブラプログラムはマイクロチップ社純正のアセンブラMPASMで書き上げた。プログラム量は膨大であり、その大半は単調な音データの箇所である。このソース・プログラムは著者のホームページからダウンロードできる。

プログラミングに幾つかの方法を採用している。アセンブラプログラム中で8ビットの(音)数値データを処理する方法として、`movlw`、`movwf`を繰り返して使用することにし、プログラム実行速度を極力早くする方法を採用している。通常では、連続した数値データを取り扱うときには、命令`retlw`を用いたデータテーブル形式が採用される。が、この方法は採用しない。後者の方法は前者と比較すると数倍以上、プログラムの実行速度が遅くなるからである。本システムでは実行速度が遅くなることは、低音帯域における音質の悪化と同意義となるからである。

16F876のプログラムメモリは1FFFワード(約8kワード)あり、7FFワードづつ、0ページ~3ページまで4つのページに分割されている。現時点では各ページに1種の音データだけを入れ、4ページ分で4種の音データがプログラムされている。音色は単純なサイン波、三角波、サインの適当な合成波2種を用意している。どのページの音データを出力するかは、音色選択スイッチで決定する。各音色とも1周期を最大として360点で分割している。

360点の波形データから均等に抜き出した180点、90点、45点からなる音データも用意している。1周期を360点、180点、90点、45点とするかは、音域選択スイッチで決定する。1周期の出力点数が少なければ少ないほど、高音領域が出力されるようになる。即ち、1オクターブづつ高い高音帯域が出力可能となる。これは音域設定スイッチで選択する。

電源スイッチが入ると、PICはポートAの4ビットとポートCの4ビットの状態を読みに行き、音色と音域を決定し、それに従って、対応するプログラムの所にジャンプし、エンドレスで音データを出力する。実行中に音色や音域のスイッチの切り替えをしても、切り替わらない。設定を変更したければ、電源を一端切ってから、設定を変更して行う。

4. 動作特性

1周期を360点で演奏すると、出力音の高音側の最高周波数は約1.8kHzである。1周期180点

では3.6kHz、90点では7.2kHz、45点では15kHzとなる。低音側は50Hz以下の周波数にどの場合でも下がる。従って、サンプリング点数が少なくなればなるほど、出力音域幅は拡大する。が、サンプリング点が少なくなるほど、当然音質は劣っていく。

4通りの音域幅設定において、低音側が50Hzまで音がでる(音の劣化は無視する)ものとするれば、概算値であるが、1周期360点では出力音域帯域は5オクターブ、180点では6オクターブ、90点では7オクターブ、45点では8オクターブとなる。スピーカはやはり3ウェイ式が最適であろう。

本システムの室内での演奏環境としては、天井とは言わないが、装置の上方に白色電球があり、装置全体を明るく照らしており、周りは暗い方がよい。両手には黒い手袋をはめた方がよい。素手では、素手の明るさがCdSに入射する。黒い手袋にすると、反射光が小さくなるので、手の移動範囲を大きく、即ち、手の動きが大きくとれるからである。手の動きの範囲はCdSに被せているアルミパイプ長、及びその直径にも大きく依存もしている。試行の上適当な形状のパイプにしてよい。

出力される音色のD/A変換方式による特性を比較するため、D/A専用ICのDAC0806ではなく、抵抗群を用いたR-2R方式D/A変換による回路も作成した。著者は音色識別能力が特に優れていると思っていないが、聞いた耳ではほとんど音色の差異は聞き分けられなかった。

その他に、音色の特性試験として、音データを16ビットとした回路も作成した。この時のD/A変換はR-2R方式である。出力される音色は8ビットと比較して格段に良くなったような気はしなかった。音データを16ビットすると、2バイトのデータを扱わなければならないので、周波数特性は半分になる。周波数特性を半分に落としてまで、8ビットを16ビットにするだけ音色が良くなったと思われなかった。なを、16ビット専用D/A変換器ICは手元にないので、試験はしていない。それ故、本システムでは完成品として音データを8ビットとしたわけである。又、DAC0806は手元にあり、R-2R方式で抵抗群を基板上に多数配置するよりコンパクトになることから選択した。

音データとして、文献^{(3),(4)}に提示されている各種楽器の周波数スペクトルデータをもとに、Visua

1 Basicでサイン波の合成プログラムを作成し、バイオリン、フルート、アルトの音色データを作り上げ、アセンブラプログラムに張り付けた。フーリエ級数の理論からすれば、全ての任意波形はサイン波の合成波である。即ち、サイン波の適当な重ね合わせで、任意の波形が作れる。得られた音色はもとになった楽器に似ていると言えは似ているが、違うと言えはやはり違うのである。スピーカから出力される音色は、高音帯域ではどの音も似ている。中音から低音帯域では少しはそれらしい楽器の音色は醸し出すが、いまいちであった。

文献⁽³⁾では、楽器の各倍音の時間的關係（位相のこと）は、一般的に音色に関係が無いと断定している。それをもとにサイン波を合成したわけであるが。著者の知識では、通常の音の周波数分析では、位相まで分析してはいない。通常のスペクトラムアナライザにはそれまでの機能がない。得られる結果は周波数—相対強度の比だけであると理解している。

本装置では合成波の1周期分をエンドレスで繰り返して出力している。実際の楽器の音色は、微妙な位相のズレ、倍音周波数の微妙なずれ、更には、それらの時間的な変動が楽器特有の音色を醸し出しているような気がする。即ち、倍音間の周波数の微妙なズレ、位相のズレ及びそれらの時間変化を無視して、音色は語れないと考える。

しかし、同じ電子音を出力するシンセサイザ等が比較的本物の楽器に似た音を響かせているのは何故か？

シンセサイザの音は倍音のサイン波の合成音である。同じサイン波の合成音を出力しているのに、今回のテルミン擬きの音色と、シンセサイザの音色との相違はどう説明されるのであろうか。次のような解釈をする。テルミン擬きはサイン波を合成した1周期分を全く同じ波形で、繰り返して出力している。全くのクローン音である。それに対して、シンセサイザは幾つもの発振器を持っており、それらを合成して疑似音を作り上げている。各倍音が発振される各発振器からの信号の位相、信号の周波数の微妙なズレは時々刻々と変化する。これは真の楽器の発音方式に近い。

5. 使用方法

至って簡単である。

- (1) 適当な台上に置く。向きは限定されないが、ツマミのある面を演奏者に向けた方が操作しやすい。
- (2) 照明は室内の明かりでも、太陽光でも良い。蛍光

灯より白熱電球を勧める。装置全体が一様に、できるだけ明るく照明されているのがよい。

- (3) 音色及び音域選択スイッチを0位置、ボリュームは左回り一杯とし、電源スイッチを入れる。CdS上にはまだ手をかざさない。
- (4) スピーカから少し音が出てくるまで、ボリュームを右側に回す。演奏中に変更もできる。
- (5) 両CdSに手をかざせば、演奏が開始される。
- (6) 終了したければ、電源スイッチを切る。

音色及び音域を切り替えたければ、電源スイッチを切り、各設定スイッチを他のモード（0～3内）に切り替える。そして電源スイッチを入れる。

6. 終わりに

本装置の開発当初はV/F変換器として手持ちのアナログデバイス社のAD650（出力最高周波数1MHz）を使用し、回路の変更・調整、音色の特性の改善等を何回も行った。やはり出力最高周波数が低い事が気になった。規格表などを調べて、最高周波数が4MHzのVFC110を見出した。このVFC110を用いたのが本回路である。製作は完了したが、いろいろな課題がでてきている。特に、音色の改善が一番大きい。著者としては、テルミンが夢見たように、このシステムで「バイオリン」の音色を出したかったのである。今後の改良製作のために、考えている点を列挙する。

(1) より性能の良いV/F変換器はないのか

本システムの特性はV/F変換器の出力最高周波数と出力周波数可変範囲の大きさに大きく依存している。リニアIC規格表などを参考して、高い発振周波数を有するV/F変換器を探しているが、現時点では、VFC110の4MHzが最高のものである。10MHz以上のV/F変換器があれば、或いは開発販売されれば好都合なのであるが。

(2) 音データを16ビットにしたかどうか

市場に出回っているデジタルオーディオは16ビットである。従って、本テルミン擬きの音データは16ビットの方が望ましいと思う。前述したとおり、今のところは8ビットを16ビットにしても期待したほど音色は良くならなかった。周波数特性を優先して8ビットとしている。16ビットを捨てたわけではない。考慮中である。その際には、D/A変換方式もR-2R方

式ではなく16ビット専用ICを用いた方が無難のような気がする。

(3) R-2R方式D/A変換はどうか

当初、回路にR-2R方式を採用していた。どうも期待していたほど特色のある音色が出ないのである。それ故、専用のD/A変換器にした。が、音色はほとんどR-2R方式と変わらなかった。逆に考えると、8ビット音データならば、特別に専用D/A変換器にこだわらず、R-2R方式でもかまわないような気がしている。16ビットについてはR-2R方式は試してはいるが、16ビット専用D/A変換器は手元ないので、音色の比較はしていない。予想するに、8ビットでの対比を参考にとすると、高価な16ビット専用D/A変換器を用いなければならぬほど、音色が改善されるかは疑問である。16ビットのR-2R方式ならタダみたいなものである。

(4) 大きさについて

ケースの大きさは両端のCdSセンサー部を除けば、25cm×15cm×6cmである。写真4から見て取れるように、空中で両手を動かして演奏する楽器としては少し小さめである。写真1のように、内部はがらんどうになるが、より大きなケースに入れ、スピーカも内蔵されるようにすれば、一体型となり取扱も容易になろう。収納に場所をとるが。

(5) 光センサ、その他について

空中で手を動かすことで、楽器と手の相対距離を電気的物理量に変換（テルミンはアンテナを用いたコンデンサの容量変化、テルミン擬きは光を用いたCdSの電圧変化）するセンサとして、人体赤外線センサ、超音波センサを考え、試験回路で試してみた。結果は芳しくなかった。結局、CdS光センサが今のところ最良のセンサとして、応用した次第である。

テルミンと同じように、アンテナと高周波発振回路を採用し、音質回路ではIF信号から波形生成回路でパルスを作る。音量回路では周波数を電圧に変換し、増幅器の利得を変える。その他は本回路と同じようにする方法がある。これはこれとして一回路である。が、発振回路で発振素子（例えば、L、C）パラメータのハード的な切り替えなしで、連続可変出力できる周波数帯域巾は余り大きくない。これは極ありふれた市販の発振器が発振帯域の切り替えスイッチをもうけていることからわかって。従って、このような方式では出力音域は昔と変わらず4オクターブ半止まりであろう。

(6) ROMの使用

音データの保存場所として、PICではなく、RO

Mを用いる方法が考えられる。PICは全体の制御に用いる。音データはROMに書き込んでおくのである。V/F変換器からの出力パルスを実アドレスカウンタに入れ、それでメモリのアドレスをアップさせる。メモリからの出力の取扱は本装置の通りでよい。

このようにROMを用いるならば、音データとして十分な量のデータを保存しておくことができる。また、V/F変換器からの出力周波数と同じ速さで、メモリからデータを出力させることになるので、PICに音データを書き込んでいる場合と比較して、8倍ほど周波数特性が良くなる。PICでは1命令4サイクルを必要とし、2命令で1データを出力しているからである。

更に良さそうなのは、最近のROMメモリ容量は結構大きいので、メモリに1周期だけの音データを入れて、それをアドレスで出力させる（これを本システムは採用している）のではなく、本物の楽器で基本音を演奏させ、それを生録音し、AD変換したデータを1周期分とは言わず、何周期にもわたってROMに書き込んでおくのである。それをアドレスで出力させる。このようにすれば、前述した倍音の周波数のズレ、位相のズレもデータとして入っていることになる。より本物らしい音色をスピーカから出力できそうな気がする。バイオリンで行えば、テルミンの夢（テルミンはテルミンからバイオリンの音色を出したかったそうである）が叶うことになる。

ROMを用いれば、テルミンの夢が叶えられそうである。

7. 参考文献

- (1) 「テルミン—エーテル音楽と20世紀ロシアを生きた男」 竹内正実著、岳陽舎
- (2) 「作りながら学ぶ初めての高周波回路（第2回）簡易テルミンの製作」 渡辺 明禎、トランジスタ技術2002年2月号、131頁～136頁、CQ出版社。
- (3) 「新版 楽器の音響学」 安藤由典、音楽之友社。
- (4) 「実用理工学入門講座 音響学入門」 吉久信幸他、日新出版。

E-mail kinno@oyama-ct.ac.jp

URL <http://www.oyama-ct.ac.jp/D/kinno>

「受理年月日 2002年9月25日」