

個人特性適応型歯音インターフェースの開発と ECSへの応用

葛目 幸一*・森本 猛**

An Individual Characteristic Adaptive User Interface Using Tooth-touch Sound and Application to ECS

Koichi Kuzume* and Takeshi Morimoto**

Abstract

This paper presents the realization of a hands-free man-machine interface using tooth-touch sound. The proposed device has several advantages, including low price, ease of handling, and reliability. It may be used as an Environmental Control System (ECS) and communication aid for disabled persons. We analyzed the characteristics of the tooth-touch sound, obtained using a bone conduction microphone. We then designed the device using VHDL (Hardware Description Language) and a simulation of the FPGA (Field Programmable Device) in practice. We applied our device to the ECS to demonstrate its usefulness and evaluate its performance. The results confirmed that the proposed device had superior features to comparable devices, such as those utilizing voice control or eye blinks, chin operated control sticks, mouth sticks, or a brain computer interface (BCI) for severely disabled persons.

Keywords : hands-free man-machine interface, tooth-touch sound, communication aid, environment control system (ECS).

1. はじめに

厚生労働省・社会援護局・障害保健福祉部の調査によると、平成13年6月の時点で重度の四肢麻痺患者数は約42,000人であり、前回の調査(平成8年11月)と比較すると5.6%増で、延命治療の技術が進歩した反面、障害を抱えながら生活する人は年々増加の一途をたどっている^[1]。

身体障害者が自立した生活を送り、かつ生活の質(QOL: Quality of Life)を向上させるためには障害者の障害のレベルに合致した環境制御機器(ECS: Environment Control System)の開発が必要である。ECSとは重度の四肢麻痺患者がその残存機能を活用して、身の回りの電化製品や住宅設備を電氣的に遠隔操作するものである。既存のECSとして、ベッドの上で口を使って、「噛む」「吸う」「くわえて引く・押す」などの動作を行うことで、操作するものや、ユーザの可動部位から発生する生体信号によって間接的に制御する方法がある^[2]。生体信号による制御を行うECSでは、脳波、筋電信号、眼電信号、などを用いたものがある。これらは、

ユーザの可動部位にセンサを装着し生体信号を読み取り、制御信号として家電機器を操作するものである。

しかしこれらの装置は①小型で装着が容易、②誤動作が少ない、③ユーザの肉体的負担が小さい、④低価格、⑤介護者が管理しやすいというECSに必要な条件すべてを満足しているとは言いがたい。具体的には、入力端にユーザに装着する際、非常に大掛かりな装置を用いているために簡単に取り外しができない、使いこなすまでに多くの訓練を行わなければならないなどの欠点がある。またECSユーザはそれぞれ異なる障害を持っており、ユーザに対するカスタマイズの必要性から高価格化は大きな問題となっている^[3]。

本研究では生体信号として、歯の接触音を用いたユーザインターフェースを開発し、ECSへの応用を検討した。また評価プログラムを作成し、開発したインターフェースの性能評価を行いマンマシンインターフェースの有用性を確認した^[4,5]。

2. 歯音の音響特性の解析

2.1 音響特性解析の必要性

提案するシステムではECSの入力インターフェース信号として、ユーザが歯を噛み合わせる際に生じる歯音を用いる。歯音に限らず生体信号をインターフェースの制御信号として用いるためには、ユーザの個人差を調査し、個人差によるシステムの誤動作を防止しなければならない。本システムでは、歯を噛むリズムや強さ、センサの装着具合などにより歯音信号に個人差が生じることが予想される。そこで歯音の音響特性の解析を行い、ECSの制御信号としての有用性を検討し、システムのハードウェア化に必要な設計パラメータを導出する。

2.2 歯音の計測方法

歯音の検出には、骨伝導マイクを用いた。マイクはイヤホンのように耳に装着するタイプで、マイク内の高感度な小型振動センサによって、歯音の振動を頭蓋骨の伝播を介して検出する。本システムでは株式会社テムコジャパン製の「VOICE DUCER」を使用した。マイクより得られた骨伝導信号は生体アンプにより1000倍に増幅された後、通過域5 Hz~2 kHzの帯域通過フィルタを介して、サンプリング周波数10kHzでデジタル化し、コンピュータに取り込み信号解析を行った。図1に歯音計測システムの概略図を示す。実験では骨伝導マイクを装着した被験者に対して、「できる限り等間隔かつ同じ強さで8回歯音を鳴らす」よう指示を出し、データを収集した。なお、被験者は成人男性9名、女性7名、計17名(いずれも20代)である。

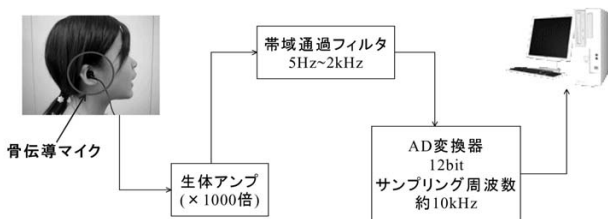


図1 歯音計測システムの概略

2.3 音響特性の解析結果

図2は計測した骨伝導信号の波形の一例である。歯音の周波数特性、図中に示す歯音の持続時間、歯音振幅、歯音間隔の計4項目について以下の解析を行った。

- ①FFT (Fast Fourier Transform) 解析による歯音の周波数スペクトルのピーク (F_p) の推定とバラつき
- ②歯音振動の持続時間 (T_d) のバラつき
- ③歯音の振幅 (V_i) のバラつき
- ④歯音と歯音の間隔 (τ) のバラつき

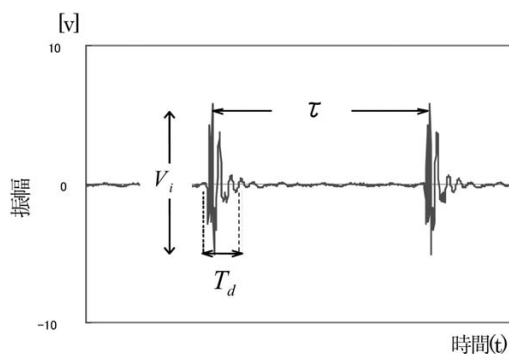


図2 骨伝導信号と解析項目

2.3.1 歯音の周波数スペクトルのピーク

歯音に含まれる周波数成分を高速フーリエ変換 (FFT) によって求めた周波数スペクトルを図3に示す。歯音の周波数スペクトルのピークは約600Hzであり、個人差はあまり観測されなかった。

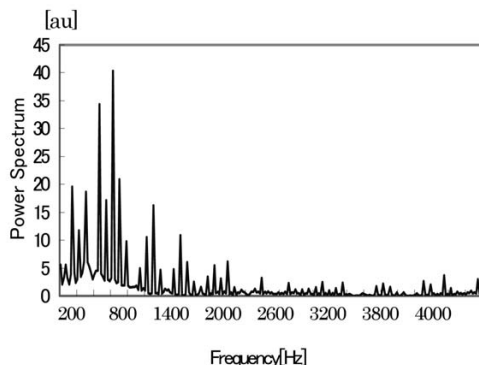


図3 歯音の周波数スペクトル

2.3.2 歯音振動の持続時間

歯音信号の最大振幅が検出されてから、振幅が最大振幅の1/3にまで減少する時間を歯音振動の持続時間と定義し、そのバラつきを解析した。解析結果から、歯音振動の持続時間の最長値は10msecを超えないことが分かった。歯音振動の持続時間にバラつきが生じる原因は、前歯、奥歯など噛み合わせる場所や頭蓋骨の形による歯音信号の伝播の違いによるものと考えられる。

2.3.3 歯音の振幅

歯音信号の最大振幅を歯音振幅と定義し、収集したデータより振幅のバラつきを解析した。計測の結果、歯音振幅のバラつきは30%程度であることが分かった。各項目の最大バラつき η を (1) 式に定義する。ここで x_i は各項目のデータ値、 μ は各項目の平均値を示す。

$$\eta = \frac{|x_i - \mu|_{\max}}{\mu} \times 100(\%) \tag{1}$$

2. 4 歯音間隔・リズムの解析

1 発目の歯音の最大振幅が検出されてから次の歯音の最大振幅が検出されるまでの間隔を歯音間隔と定義し、個人のバラつきを解析した。また、システム制御に用いるコードを判別するため、個人の歯音を鳴らすリズムの解析もあわせて行った。歯音リズムとは制御コードの作成に用いる歯音と歯音の間隔のことである。

歯音リズムは、被験者に対して「短いリズムで4回歯音を鳴らしたのち、続けて短いリズムの2倍の長さのリズムで4回歯音を鳴らす」という指示を出し計測した(図4参照)。ここで短いリズムで鳴らしたときの歯音間隔を短歯音間隔、2倍のリズムで鳴らしたときの歯音間隔を長歯音間隔と定義する。収集したデータより平均短歯音間隔、平均長歯音間隔、歯音間隔のバラつき、短歯音間隔に対する長歯音間隔の比の計4項目について解析した。

解析結果より、平均短歯音間隔のバラつきは20%程度、短歯音間隔に対する長歯音間隔の比は、1.4~3倍で、一人の被験者に対するバラつきはそれほど大きくないことが分かった。表1は歯音の音響特性の解析結果をまとめたものである。

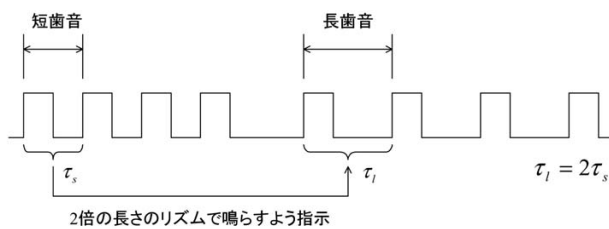


図4 歯音リズム計測の概略図

表1 歯音の音響特性の解析結果

T_d^*	F_p^{**}	$\eta_{V_i}^{***}$	η_τ^{****}	歯音リズム
10msec以下	約600Hz	30%以内	20%以内	1.4~3倍

*歯音の持続時間(個人差)

**周波数スペクトルのピーク

***歯音振幅の最大バラつき(一人の被験者に対して)

****歯音間隔の最大バラつき(一人の被験者に対して)

3. システムのアーキテクチャ

3. 1 歯音特性の計算方法と制御コード

2章でも述べたとおり、歯音に限らず生体信号には個人差があり、ECSにおいては通常、使用者に対するカスタマイズを行わなければならない。そこで本研究で

は、個人に対するカスタマイズを、使用時に個人特性を解析・記憶することで実現する。歯音インターフェースは解析用事前データ(以下プリアンプルコードと記す)として、制御コードの入力前に短歯音間隔の歯音を5回鳴らし、システムに歯音リズムや歯音振幅などを解析させる。図5にプリアンプルコード入力について、制御コードを入力した図を示す。プリアンプルコードより歯音間隔 τ_i と歯音振幅 V_i を計測し、(2)(3)式を用いて平均歯音間隔 τ_a と、平均歯音振幅 V_a の個人特性を解析する。これらの個人特性は制御コードと歯音入力判別に用い、システムに記憶される。

$$\tau_a = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \tau_i \tag{2}$$

$$V_a = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 V_i \tag{3}$$

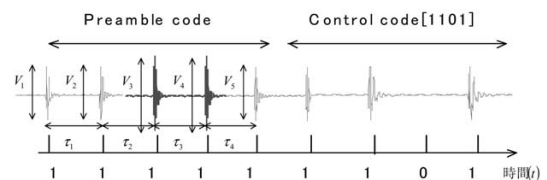


図5 プリアンプルデータと制御コード

表2 制御コードと対応動作

動作	制御コード
処理A	1010
処理B	1011
処理C	1100
処理D	1101
処理E	1110
処理F	1111

次に具体的な制御コードの構成について述べる。制御コードはある程度の処理の数を実現しなければならないこと、実験段階のシステムであることなどから4bitで表される6種類に限定した。表2に制御コードを示す。

制御コードはプリアンプルデータより算出した歯音間隔を用いて判別する。表1に示す歯音特性の解析結果より、一人のユーザに対しての短歯音間隔のバラつきは20%以内に収まる事が分かっている。そこで平均歯音間隔 τ_a に対して25%の余裕を持たせ、入力されたデータが(4)式を満足するときは短歯音間隔 τ_s と判別し入力値“1”を立てる。一方、長歯音間隔は短歯音間隔の1.4~3倍の範囲に収まることより、(5)式を満足するとき長歯音間隔 τ_l と判別し入力値“0”を立てる。さらに(4)

(5) 式ともに満たさない場合は入力なしと判別し、次の制御コードの入力待ち状態となる。図6に歯音間隔による入力データの判別原理を表した図を示す。

$$0.75\tau_a \leq \tau_s \leq 1.25\tau_a \dots \dots "1" \quad (4)$$

$$1.25\tau_a < \tau_l \leq 3.5\tau_a \dots \dots "0" \quad (5)$$

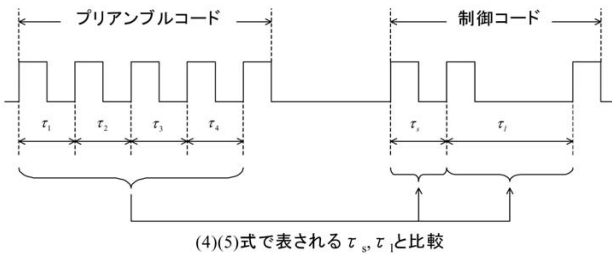


図6 制御コード判別の原理

3.2 FPGAチップによるシステムの実現

本システムはシステムの小型化及びユーザーに対するカスタマイズの必要性を考慮して、FPGAを用いたLSI化を検討した。FPGAとは、ユーザーによって書き換え可能なLSIのことで、一般のゲートアレイとは異なり、電気的にロジックの実現や各ロジック間の配線を行うことができるデバイスである。FPGAを用いることで、ECSカスタマイズに必要な機能別ライブラリ（例えばUSBインターフェースや音、光出力回路など）を作成しておくことができ、簡単なプログラムの修正で、さまざまな電化製品の制御や会話装置などへの利用が可能になる。なお、回路設計にはHDL (Hardware Description Language)、回路シミュレーションソフトにはModel Simを用いた^[6]。図7に、第2章の解析結果から得られた歯音持続時間、歯音間隔、歯音振幅などのパラメータを元に設計したシステムのブロック図を示す。骨伝導マイクで検出された

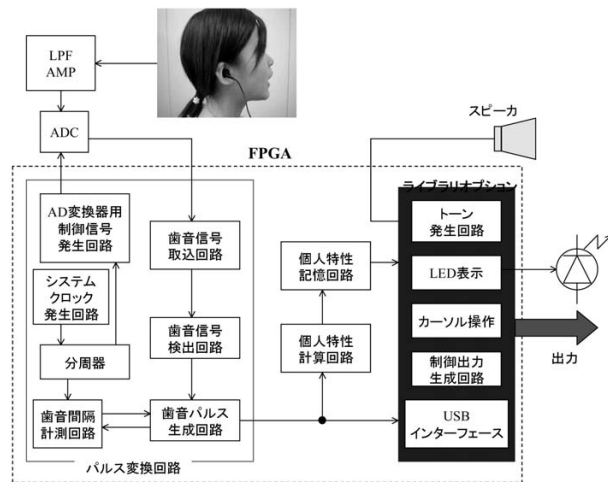


図7 システムブロック図

表3 設計したシステムのロジック量

ハードウェア	使用量	使用率
消費ロジック量	154 out of 1920	8%
入出力ポート	24 out of 97	24%
クロックライン	3 out of 8	37%

歯音信号は、LPF (Low Pass Filter) により帯域制限された後、A/D変換器 (ADC) によりデジタル化され、閾値処理で歯音パルスが生成される。FPGA内ではプリアンプルデータをもとに個人特性の解析を行うとともに、処理コードに変換され、比較判定回路によって登録コードに対応した信号を出力する。図のライブラリオプションとは、ユーザーのニーズに応じてシステムをカスタマイズするための機能ライブラリである。本ライブラリを組み込むことで拡張性と柔軟性を持ったECSを構築することが可能になる。

3.3 シミュレーション結果

FPGAはデバイスの中で信号が変化しているため、テスターやオシロスコープを使った検証を行うことができない。そのため、シミュレーションによって仮想的な入力信号に対する出力信号を観察し、システム設計の妥当性を検証する。なお使用したFPGAはXILINX社製のSPARTAN-3シリーズXC3S200-4TQ144Cで、内蔵ロジック量は200,000ゲートである^[7]。シミュレーションの結果、5回の歯音によるプリアンプルコード入力の後、表2に示す6種類の制御コードを入力するとそれに対応した制御信号が出力され、設計どおり動作していることがわかった。

また、表3に設計したシステムのロジック量を示す。表より回路の消費のロジック量はわずか8%であり、ユーザーニーズに応じてカスタマイズするためのライブラリオプションをさらに組み込むことができることが明らかとなった。ただし、設計したシステムにはカーソル操作、USBインターフェースは含まれていない。

4. 環境制御機器への応用

4.1 応用例

実際のECSとして、以下に示す応用例が考えられる(図8参照)。

- ①照明機器のON/OFFなど、さまざまな家電機器のコントロール
- ②病院でのナースコールへの利用
- ③文字盤上を移動するカーソルによる会話装置
- ④噛み数計測によって、噛む回数を意識的に多くするためのダイエット補助装置
- ⑤デジタルカメラの手ぶれ防止のためのシャッターボタンへの応用

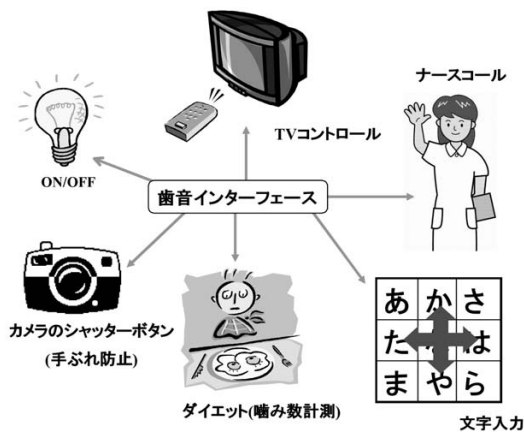


図8 ECSとしての応用例

4.2 評価実験

本研究では、今後のECSへの応用を視野に入れ、歯音インターフェースの評価用プログラムを作成し、歯音インターフェースによるECS制御の有用性の評価実験と改善点の解明を行った。

4.2.1 評価プログラム

図9に評価実験の概略図、図10に試作した歯音インターフェースを示す。評価プログラムは、被験者の入力した制御コードが、第3章で述べた判別規則を組み込んだプログラム上で、正しく入力されているかを自動的に検証するものである。被験者はプリアンブルデータの入力を行ったのち、ディスプレイに提示された各動作に対応した制御コードを入力する。プリアンブルデータはリセット信号が入力されるまで保持されるので、その後は制御コードのみを入力するだけでよい。入力する制御コードは、プログラム内でランダムに発生する。被験者は提示されるコードを次々と入力し、20回の制御コードの入力で1サイクルのテストが終了する。これを5サイクル



図9 評価実験の図

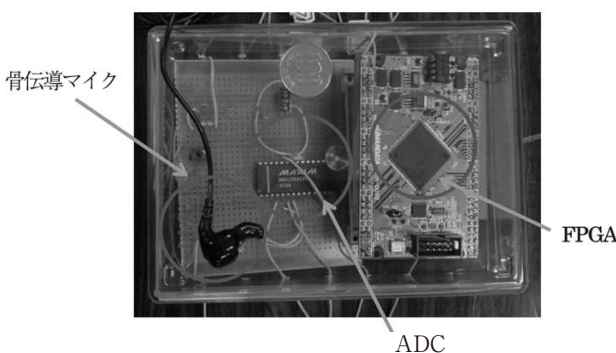


図10 試作した歯音インターフェース

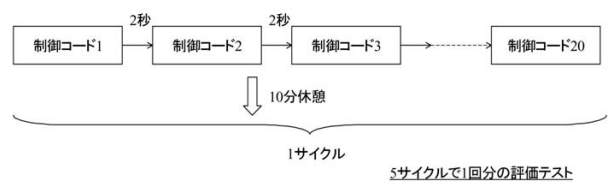


図11 評価プログラム

(計100回)繰り返して一回分の評価テストとする。ただし、コード間には2秒、1サイクル毎には10分のインターバルをおくこととする。図11に評価プログラムの概略図を示す。

4.2.2 実験方法

被験者に対して、歯音インターフェースの使用方法を説明し、評価プログラムを用いて5サイクル×5回の評価テストを実施し、エラー率を求めた。

4.2.3 実験結果

評価プログラムによる実験の結果、第3章に示す制御コードの種類によって、個々のコードに対するエラー率が異なることがわかった。具体的には入力値“1”が連続する制御コードC, E, Fについてはエラー率はほぼ0%であるが、制御コードA, B, Dのように入力値“1”の間に“0”が入力されたときのエラー率は、個人差が大きかった。

4.3 既存機器との比較

表4は、ECSの入力信号に生体信号を用いたときの、各種信号に対する特長を比較したものである。ECSの入力インターフェース信号に歯音を用いた場合、特に装着性、価格面で他の生体信号よりも優れていることが分かった。

表4 生体信号別の問題点解決度

生体信号	脳波	筋電信号	眼電信号	歯音
操作性	×	△	○	△
装着性	○	○	×	○
使用条件	意思がある	体の一部が動く	眼球、まぶたが動く	噛める
価格	¥40万円	¥25万円	¥25万円	¥3万円

5. 音声雑音の除去

5.1 音声雑音について

4章に示す評価実験を行った際、音声による誤動作が確認された。本来、骨伝導マイクが検出する音は音声で

あるが、本システムのように歯音をシステムの制御信号として用いる場合、マイクからの音声は歯音に対する雑音となる (図12参照)。そこで骨伝導信号に含まれる歯音と音声を識別し、音声を除去するためのフィルタを設計した。また設計したフィルタを用いて音声除去のシミュレーションを行い、提案手法の有用性を確認した。

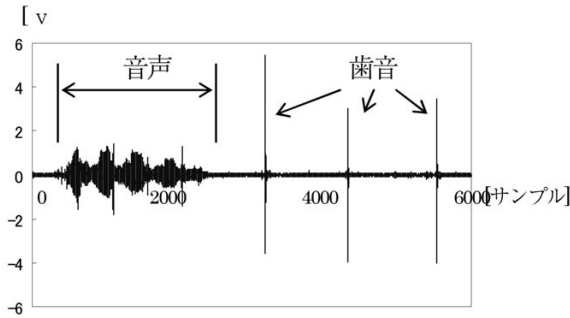


図12 音声と歯音信号

5. 2 歯音検出アルゴリズムとシミュレーション結果

図13に図12の音声データの音声振幅の分布を示す。音声信号の振幅はほぼ正規分布に従うことが知られている [8]。統計学によると正規分布では $\mu \pm 2^3\sigma$ (但し μ は平均値, σ は標準偏差) 内に収まらないデータはわずか $6.7 \times 10^{-14}\%$ である。これらの事実をもとに音声除去フィルタの閾値を設定する方法を検討したが、標準偏差の計算には乗算器が必要で、計算量とロジック量が大きくなってしまふ。正規分布において標準偏差と振幅の絶対値の平均値の間には係数約1.5の線形な関係があり、実験値における標準偏差 σ と音声振幅の絶対値の平均値 \bar{x} との関係調べたところ、(6) 式の関係がほぼ成立することが分かった。

$$\sigma \doteq 1.5 \bar{x} \tag{6}$$

そこで標準偏差の代わりに平均値を用いて音声振幅の変化に適応して閾値を変化させるフィルタを提案する。信号の絶対値の平均時間 は、歯音の持続時間が10msec以下であることから、持続時間の約5倍、すなわち51.2msec (512サンプル) とすれば、その平均値は (7) 式で表される。図14に音声振幅の絶対値の分布を示す。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^{2^9-1} |V_i|}{2^9} \tag{7}$$

ここで V_i は時刻 i における骨伝導信号の振幅値である。閾値 V_{TH} を σ の 2^3 倍にとり (6) 式を考慮すれば、閾値 V_{TH}' は (8) 式で表される。

$$V_{TH}' = 2^3 \sigma \doteq 1.5 \bar{x} \cdot 8 = 12 \bar{x} \tag{8}$$

ここで (8) 式の $12\bar{x}$ の演算を設計マージンを考慮して $2^4\bar{x}$ とすれば、(7) (8) 式より閾値 V_{TH} が (9) 式より計算できる。

$$V_{TH} = \sum_{i=0}^{2^9-1} |V_i| \cdot 2^{-5} \tag{9}$$

(9) 式は 2^9 サンプルの和を計算したのち、5ビット右にシフトするだけで閾値 V_{TH} が容易に計算できることを示している。区間 T 内で逐次、振幅の絶対値の最大値を求め V_{TH} と比較することで歯音のみを取り出すことができる。図15に絶対値化した骨伝導信号と閾値、図16に歯音信号検出のシミュレーション結果、図17に音声雑音対策を施した歯音検出回路の概略図を示す。

提案した手法により、歯音信号のみが検出されていることが確認できた。

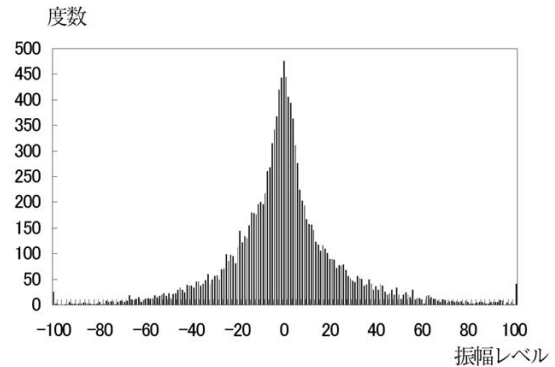


図13 音声振幅の分布

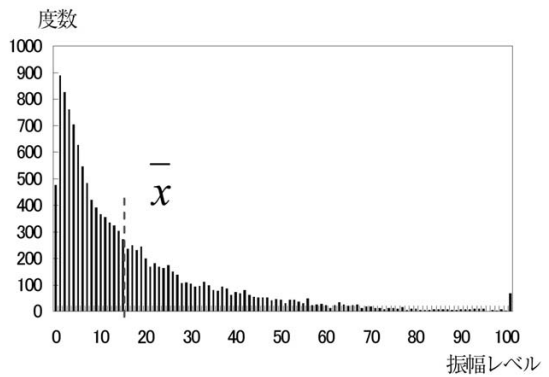


図14 絶対値化した振幅の分布

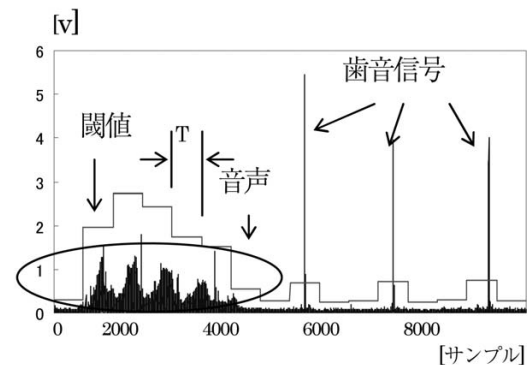


図15 絶対値化した骨伝導信号と閾値

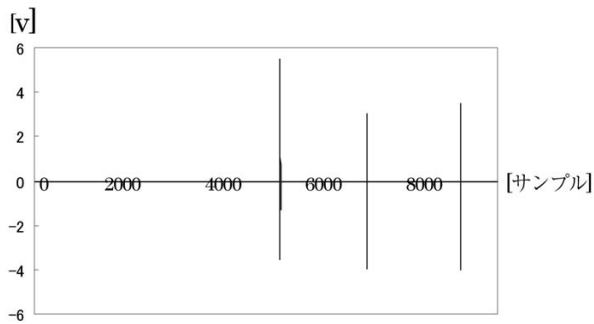


図16 歯音信号検出のシミュレーション結果

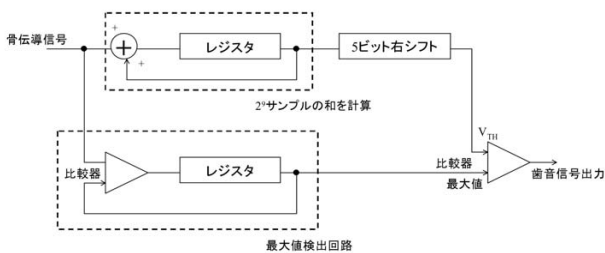


図17 歯音検出回路

6. 結論

本研究では、装着・操作性に優れた低価格な歯音を用いたユーザインターフェースを開発した。まず、歯音を生体信号として用いるため、歯音の音響特性と歯音のリズムの特性を計測・解析した。その結果、歯音信号の持続時間は短く、歯音振幅の個人のバラつきは30%以内、短い歯音間隔に対する長い歯音間隔の比は3倍以内であることが分かった。これらのことから歯音が入力インターフェースの制御信号に適することを明らかにした。

次に歯音信号の計測・解析結果をもとにハードウェア設計に必要なパラメータを導出し、歯音を入力するタイミングの組合せによって6種類の制御コードを生成することで、ECS制御に用いるインターフェースの開発に取り組んだ。インターフェースは小型化、ユーザカスタマイズを容易に実現するため、FPGAによるLSI化の検討を行った。プリアンプルデータを用いた個人特性の解析と記憶機能をシステムに組み込むことによりユーザカスタマイズにかかる費用を抑え、低価格化を実現した。

また試作したインターフェースの評価実験を行った結果、制御コードの種類によるが短い訓練時間で使いこなすことができるシステムであることが判明した。さらにシステムの信頼性を向上させるために、音声の振幅に適応して閾値を変化させる音声除去フィルタを考案し、音声雑音が含まれる骨伝導信号から歯音検出のシミュレーションを試み、良好な結果を得た。今後、実用化に向けて以下の項目についてさらに研究を進める必要がある。

- ・身体障害者を対象にした使いやすい制御コードの検討
- ・制御コード判別のアルゴリズムの検討
- ・音声除去フィルタのハードウェア化
- ・長時間使用のための個人差の逐次解析・記憶機能付加
- ・身体障害者が残存機能の有効利用のための他の入力インターフェースとの併用の検討

参考文献

- [1] 厚生労働省「身体障害児・者実態調査結果」：
<http://www.dinf.ne.jp/doc/japanese/resource/handicap/koseisho/h0411-2.html>
- [2] 井手将文：「環境制御装置 Environmental Control System」
<http://www.asahi-net.or.jp/~YS2K-SIK/01editor/ide/ide-ecs.htm>
- [3] 栗本, 大枝, 河野, 鳩飼, 田中, 今井：「神経難病と人工物コミュニケーション」生体機能・情報処理シンポジウム(2005)
- [4] 森本猛, 葛目幸一：「歯の接触音を用いたユーザインターフェースの開発」電子情報通信学会四国支部連合大会講演論文集 p.243 (2005)
- [5] 森本猛, 葛目幸一：「歯の接触音を用いた学習機能を有するハンズフリー型ユーザインターフェースの開発」電子情報通信学会総合大会講演論文集 p.329 (2006)
- [6] Model Technology：<http://www.model.com/>
- [7] Xilinx：<http://www.xilinx.com/>
- [8] 齊藤収三, 中田和男：「音声情報処理の基礎」オーム社 (1990)