

Dyadic wavelet 変換を前処理に用いた 微小歯音信号の検出

葛目 幸一*・渡邊 文治**

Small Tooth-Touch Sound Detection Using Dyadic Wavelet Transform As Preprocessing

Kouichi Kuzume* and Fumihiro Watanabe**

Abstract

A hands-free man-machine interface using tooth-touch sound has several advantages, including low price, ease of handling, and reliability. It may be used as an input device for wearable computing. We analyzed the characteristics of the tooth-touch sound, obtained using a bone conduction microphone to utilize as a control signal of the input device. In practical application, since the amplitude of the tooth-touch sound signal varies between people, it is required for detecting even small signal as accurately as possible, moreover eliminating voice signal. We propose the novel method for eliminating these noise by adaptive threshold technique in conjunction with dyadic wavelet transform. It is shown that our method has excellent performance by computer simulation.

Keywords : hands-free, user interface, tooth-touch sound, noise suppression, dyadic wavelet transform, signal detection.

1. はじめに

近年、コンピュータをいつでもどこでも使うユビキタスコンピューティングに関する研究が盛んに行われている。ユビキタスコンピューティングとは、人間の生活環境の中にコンピュータチップとネットワークが組み込まれ、ユーザはコンピュータの所在を意識することなく、コンピュータの機能を利用できる環境のことである。主なものとして、コンピュータを身につけるウェアラブルコンピューティングがある。ウェアラブルコンピューティングとは、コンピュータを常に持ち歩く究極の形態として、「着ている」状態のことであり、携帯電話、PDAの進歩に見られるコンピュータの小型化にともない、将来的にコンピュータを着る形態が考えられたものである。このウェアラブルコンピューティングの実現にはいくつかの課題があり、着用に適したハードウェア、ヘッドマウントディスプレイの小型化や、入力装置、消費電力の少ないCPU、長時間動作可能な電源などが挙げられる。従来技術には、キーボード、

マウス、タッチパネルなど手による操作を必要とするものや、ハンズフリーのインタフェースを実現するために大掛かりな装置を用いて脳波や眼球運動などを利用するものなどがあるが、これらはまだウェアラブルコンピューティングに適したものであるとはいえない^{[1][2][3]}。

そこで、本研究室ではウェアラブルコンピューティングの入力装置に着目し、装着・操作性に優れた低価格な歯音信号を用いたユーザインターフェースを開発している^{[4][5]}。まず、歯音信号を生体信号として用いるため、歯音信号の周波数スペクトル、持続時間、振幅などを計測し解析した。その結果、歯音信号の持続時間は短く、周波数スペクトルのピークは600Hz付近に存在することがわかった。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。しかし、ウェアラブルコンピューティングでは会話や音楽など日常的な行動を制限することなく入力インターフェースとして正確に動作することが必要である。また歯を噛む強さ、即ち歯音信号の振幅は年齢や使用時間に依

*情報工学科

**専攻科生産システム工学専攻

存するため、できる限り小さい振幅の歯音信号でも正確に検出することが求められる。

よって本研究では、音声信号が含まれる骨伝導信号から歯音信号を検出する音声除去フィルタの開発、歯を噛む強さが弱いユーザに対して正確に歯音信号を検出するためのホワイトノイズ除去処理をウェーブレット変換を用いて行った。

本研究で提案した方法で10名の被験者に対して歯音信号検出の評価を行った結果、正検出95%、誤検出5%の精度で歯音信号を検出することができた。

本論文では以下の章からなる。2章では歯音の音響特性の解析、3章では音声の除去、4章ではホワイトノイズの抑圧、5章では総合評価結果、6章で結論について述べる。

2. 歯音の音響特性の解析

2. 1 音響特性解析の必要性

本研究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、ユーザインターフェース用の制御信号としての有用性について検討した。

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。骨伝導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デジタルボイスレコーダ（オリンパス製 Voice-Trek V-50）により1000倍に増幅された後、その出力を通過域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、「1時間使用することを前提として歯を噛む」よう指示を出し、連続して8回歯を噛んでもらいデータを収集した。なお、被験者はいずれも20代の成人男性9名、女性8名、計17名である。

2. 3 骨伝導マイクについて

人間が音を感じる経路には空気の振動で伝わる経

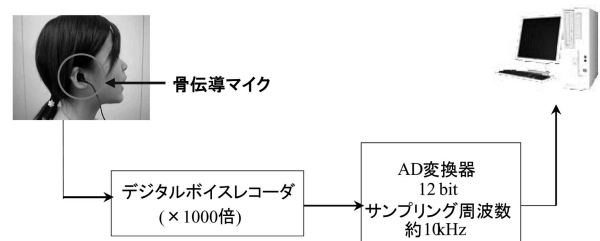


図1 歯音信号計測システムの概略

路で気導音、それ以外にも骨や皮膚組織の振動で伝わる経路があり、これを骨導音と言う。骨伝導マイクは骨導音をひろうので、骨に伝わってくる声帯の振動を集めてこれを高感度な振動センサ素子で集め、音声信号に変換する。装着位置は頭部の比較的固い場所ならどこからでも声帯の振動をピックアップできる。骨伝導マイクのメリットは①防水化が容易である（屋外や水中でも使用できる）②耐騒音性に優れている（外部の騒音・雑音に影響されにくい）③装着位置の自由度が高い（口の近くにマイクがなくてもよい）などが挙げられる。

これらのメリットから骨伝導マイクはウェアラブルコンピューティングのための有用なユーザインターフェースであると考えられる。

2. 4 音響特性の解析結果

図2は計測した歯音信号の波形の一例である。歯音信号の周波数特性、図中に示す歯音の持続時間、歯音振幅の計3項目について以下の解析を行った。

- ①FFT (Fast Fourier Transform) 解析による歯音信号の周波数スペクトルのピーク (F_p) の推定とバラつき
- ②歯音信号の振動の持続時間 (T_d) のバラつき
- ③歯音信号の最大振幅 (V_i) のバラつき

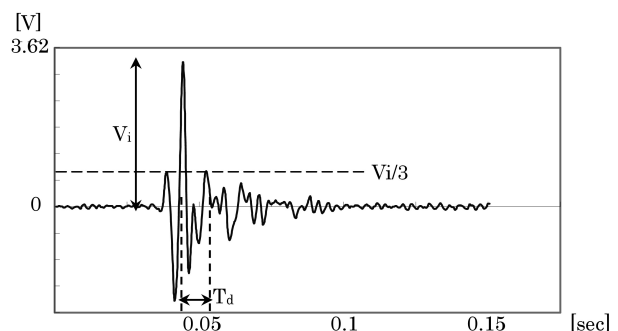


図2 歯音導信号と解析項目

2. 4. 1 歯音信号の周波数スペクトルのピーク

歯音信号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。歯音信号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。

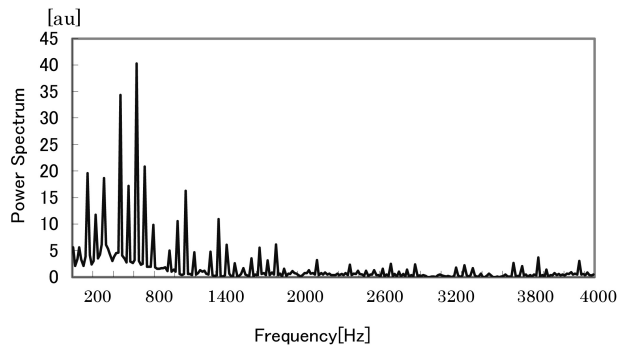


図3 歯音信号の周波数スペクトル

2. 4. 2 歯音信号の持続時間

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信号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、歯音信号の持続時間の最長値は10msecを越えないことがわかった。歯音信号の持続時間にバラつきが生じる原因は、前歯と奥歯の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. 4. 3 歯音信号の最大振幅

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、一人の被験者に対して歯音振幅の最大バラつきは30%程度であることが分かった。歯音振幅の最大バラつき η を (1) 式に定義する。ここで x_i はデータ値、 μ は平均値を示す。

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

2. 4. 4 解析結果のまとめと考察

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。

音声信号の周波数帯域は一般に200~4000Hzの帯域をもっているといわれている。

表1の結果から音声信号と歯音信号の周波数スペクトルがオーバーラップしていることがあきらかになった。このことより、通常のHigh Pass Filter

(HPF), Low Pass Filter (LPF), Band Pass Filter (BPF) 等の単独使用では歯音信号のみを正確に検出することができないことが明らかになった。

3. 音声の除去

3. 1 音声について

図4に音声信号と歯音信号の測定波形を示す。これはサンプリング周波数2kHz、分解能8bit、基準電圧±5Vの条件でAD変換を行っている。本研究では、歯音信号を用いたユーザインターフェースを用いており、音声信号が雑音になる。

第2章の解析結果より音声信号と歯音信号の周波数スペクトルがオーバーラップしていることがあきらかになった。このことより、通常のHigh Pass Filter (HPF), Low Pass Filter (LPF), Band Pass Filter (BPF) 等の単独使用では歯音信号のみを正確に検出することができない。それゆえ骨伝導信号に含まれる歯音信号と音声信号を正確に識別し、音声信号のみを除去するためのフィルタを開発する必要がある。

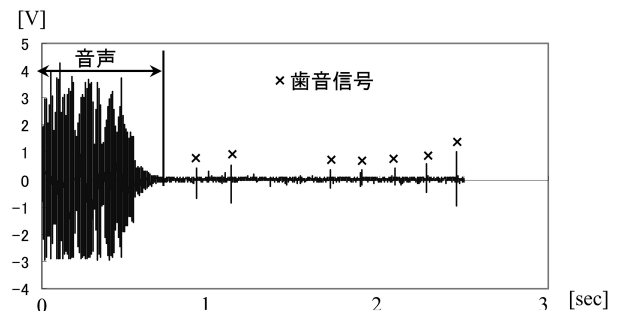


図4 音声信号と歯音信号

3. 2 歯音信号検出アルゴリズムとシミュレーション結果

図5に図4の音声信号の振幅の分布を示す。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^[6]。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 σ 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う。正規分布におい

表1 歯音信号の音響特性の解析結果

歯音信号の持続時間 T_d (個人差)	周波数スペクトルのピーク F_p	歯音信号の最大バラつき η_{Vi} (一人の被験者に対して)
10msec以下	約600Hz	30%以内

て標準偏差と振幅の絶対値の平均値との間には係数約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} との関係を調べたところ、(2)式の関係がほぼ成立することが分かった。

$$\sigma \doteq 1.5\bar{x} \tag{2}$$

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。図6に音声振幅の絶対値の分布を示す。

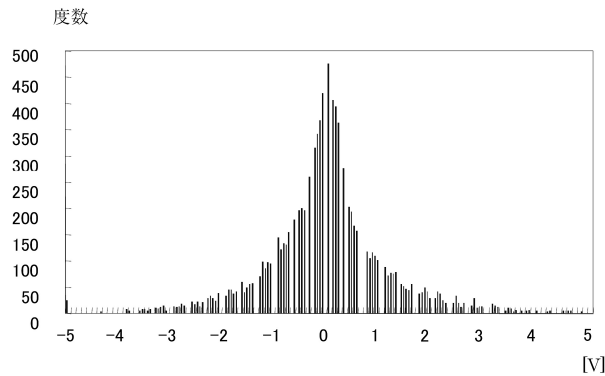


図5 音声信号の振幅の分布

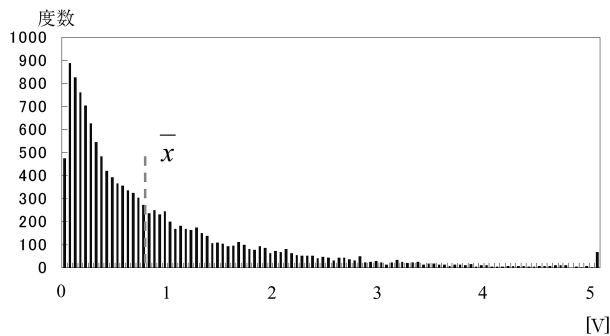


表6 絶対値化した振幅の分布

信号の絶対値の平均時間Tは、歯音信号の持続時間が10msec以下であることから、持続時間の約25倍、すなわち256msec (512サンプル) とすれば、その平均値は (3) 式で表される。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^{2^9-1} |V_i|}{2^9} \tag{3}$$

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 (2) 式を考慮すれば、閾値 V_{TH}' は (4) 式で表される。

$$V_{TH}' = 2^3 \sigma \doteq 1.5\bar{x} \cdot 8 = 12\bar{x} \tag{4}$$

ここで (4) 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、(3) (4) 式より閾値 V_{TH} が (5) 式

より計算できる。

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

(5) 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信号のみを取り出すことができる。図7 (a) に絶対値化した骨伝導信号と閾値、図7 (b) に図7 (a) の歯音信号付近の拡大図、図8に歯音信号検出のシミュレーション結果を示す。

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。しかし、この音声除去の方法では図8の結果を見る限り、小さい振幅の歯音信

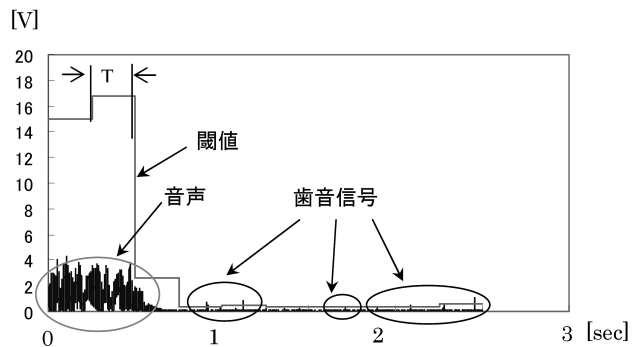


図7 (a) 絶対値化した骨伝導信号と閾値

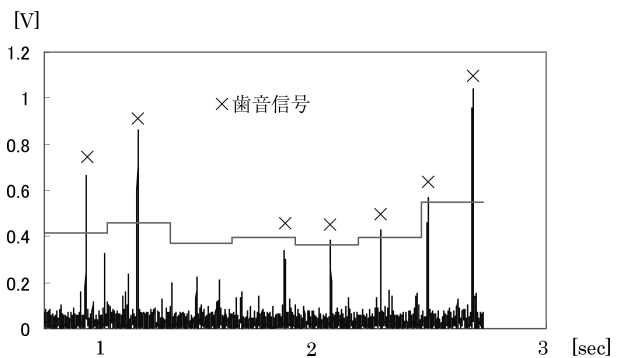


図7 (b) 歯音信号付近の拡大図

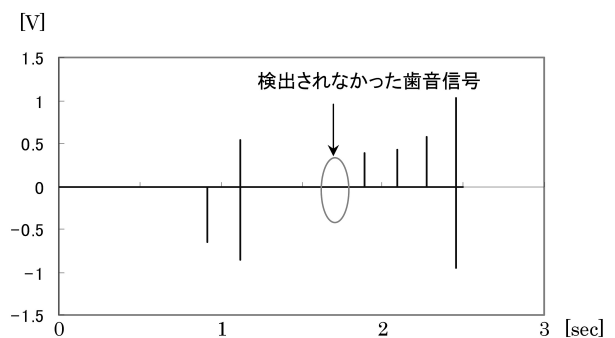


図8 歯音信号検出のシミュレーション結果

号が検出されていないことがわかる。この原因としてホワイトノイズの影響が考えられる。次章ではこの問題を解決するためにホワイトノイズを抑圧するフィルタを提案する。

4. ホワイトノイズの抑圧

4.1 ホワイトノイズについて

ホワイトノイズとは、音声などに混入するノイズの中で、全ての周波数帯域においてエネルギーが均一に混入した雑音のことである。音の周波数をグラフで表現すると、ホワイトノイズでは雑音が均一に混入しているため平坦に近いグラフとなる。このグラフを光の波長に置き換えると、白色を示すのでホワイトノイズと呼ばれている。このホワイトノイズが原因で第3章で述べた方法では、小さい振幅の歯音信号を検出できない。よって、ホワイトノイズを抑圧するフィルタを考案した。図9に歯音信号とホワイトノイズを示す。

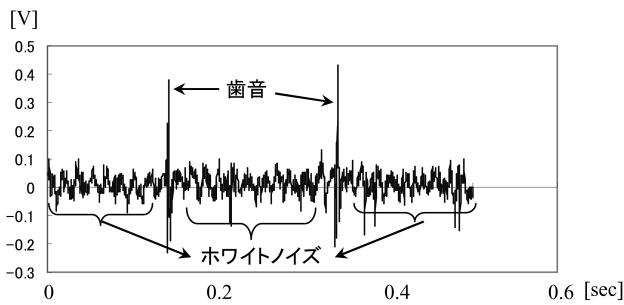


図9 歯音信号とホワイトノイズ

4.2 Dyadic ウェーブレット変換について

本研究ではホワイトノイズを抑圧する方法としてDyadicウェーブレット変換を用いた [7]。ホワイトノイズを抑圧するために、測定した骨伝導信号をDyadicウェーブレット変換し、閾値処理を施したのち逆変換を行う。また、本研究では処理の高速性とハードウェア量の削減のため分母が2のべき乗であるハールウェーブレットフィルタを用いた。表2にハール

ルウェーブレットフィルタのフィルタ係数を示す。

Dyadicウェーブレット変換式を (6) (7) 式に示す。

$$a_{j+1}[n] = \sum_k h[k] a_j[n+2^j k] \quad (6)$$

$$d_{j+1}[n] = \sum_k g[k] a_j[n+2^j k] \quad (7)$$

逆変換式を (8) 式に示す。

$$a_j[n] = \frac{1}{2} \left(\sum_k \tilde{h}[k] a_{j+1}[n-2^j k] + \sum_k \tilde{g}[k] d_{j+1}[n-2^j k] \right) \quad (8)$$

ただし、 a_0 : 骨伝導信号, a_j : 第 j 低周波成分, d_j : 第 j 高周波成分,

$h[k]$: 低周波分解フィルタ, $\tilde{h}[k]$: 低周波復元フィルタ,

$g[k]$: 高周波分解フィルタ, $\tilde{g}[k]$: 高周波復元フィルタ

ハールウェーブレットフィルタは図10のHPF, 図11のLPFの特性をもっているフィルタである。

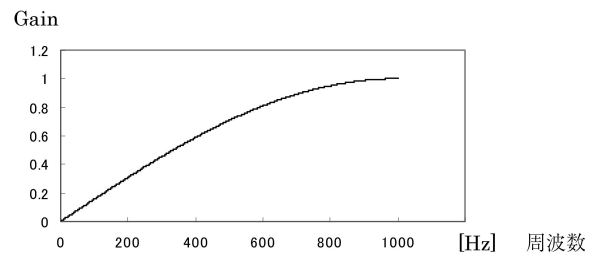


図10 高周波分解フィルタ周波数特性

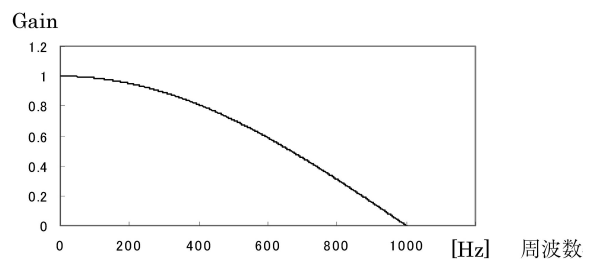


図11 低周波分解フィルタ周波数特性

表2 ハールウェーブレットフィルタ係数

k	$g[k]/\sqrt{2}$ 高周波分解フィルタ	$h[k]/\sqrt{2} = \tilde{h}[k]/\sqrt{2}$ 低周波分解フィルタ 低周波復元フィルタ	$\tilde{g}[k]/\sqrt{2}$ 高周波復元フィルタ
0	-0.5	0.5	0.5
1	0.5	0.5	-0.5

次にDyadicウェーブレット変換の計算過程について説明する。 a_0 は測定した骨伝導信号で、この信号を高周波分解フィルタにより(7)式で計算する。これを第1高周波成分 d_1 と呼ぶ。 a_0 を低周波分解フィルタにより(6)式で計算する。これを第1低周波成分 a_1 と呼ぶ。同様な計算方法で第2高周波成分 d_2 、第2低周波成分 a_2 が計算できる。図12にDyadicウェーブレット変換の計算過程を示す。

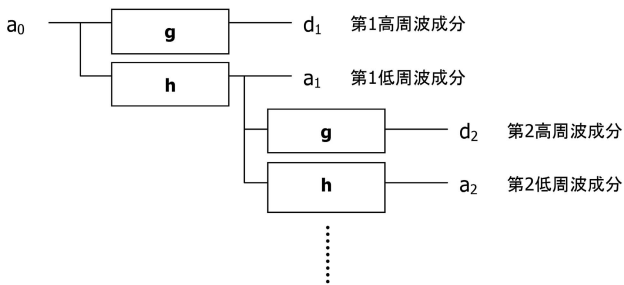


図12 Dyadicウェーブレット変換

4. 3 ホワイトノイズを抑圧するフィルタ

ホワイトノイズより僅かに大きな振幅の歯音信号を検出するためDyadicウェーブレット変換により得られた d_1 に対して閾値を設定し、歯音信号とホワイトノイズを分離する。Donohoらの研究によればガウス雑音に対する閾値は(9)式で与えられる^[7]。ただし、 σ^2 はホワイトノイズの分散値、 N はデータ数である。

$$V_{TH} = \sqrt{\sigma^2 2 \log_e N} \quad (9)$$

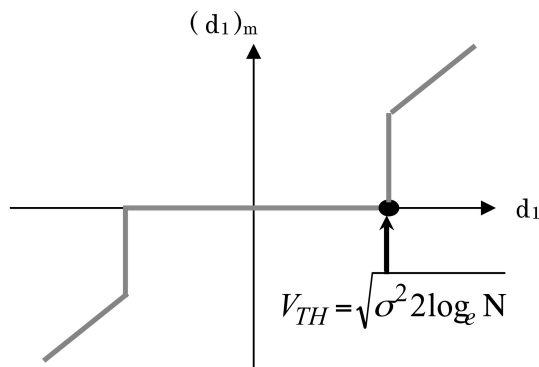


図13 閾値特性

$\pm V_{TH}$ 内に含まれる d_1 を雑音とみなし0として、含まれないデータを歯音信号とみなしデータを残す処理を行う。この処理により歯音信号の成分は残るがホワイトノイズの成分は抑圧されることになる。図14にDyadicウェーブレット変換、閾値処理、逆変換の過程、図15(a)～(e)に図14の各部のシミュレシ

ョン結果を示す。

図15(a)の歯音信号付近の拡大図 a_0 とホワイトノイズを抑圧した信号の拡大図図15(e)に示す a_0' の波形を比較するとホワイトノイズが抑圧されていることがわかる。

4. 4 歯音信号検出アルゴリズムとシミュレーション結果

ホワイトノイズを抑圧した信号 a_0' に第3章で述べた音声除去の方法を適用する。図16(a)に絶対値化した骨伝導信号と閾値、図16(b)に歯音信号付近の拡大図、図17に歯音信号検出のシミュレーション結果を示す。

この結果からわかるように第3章の音声除去フィルタでは検出できなかった小さな振幅の歯音信号も、Dyadicウェーブレット変換、閾値処理、逆変換でホワイトノイズを抑圧することによって正確に歯音信号を検出できることがわかる。

5. 総合評価結果

本研究で提案した手法の精度を確認するため以下の評価実験を行った。

「おはようございますと音読した後、普通の状態(歯を噛む強さと間隔は任意とする)で歯を噛む」ように指示し、20回歯を噛んだときの正しく検出された回数、誤って検出された回数をカウントした。その結果、正検出95%、誤検出5%になった。なお、被験者はいずれも20代の成人男性5名、女性5名、計10名である。

6. 結論

本研究では、ウェアラブルコンピューティングの入力装置に用いることができる装着・操作性に優れた低価格な歯音信号を用いたユーザインターフェースの開発に取り組んだ。まず、音声信号が含まれる骨伝導信号から歯音信号を検出するために、音声信号の振幅に適應して閾値を変化させる音声除去フィルタを考案し、シミュレーションを試みた。その結果、音声信号を除去し歯音信号を検出することが検証できた。次に、小さい振幅の歯音信号が検出されない原因がホワイトノイズであることが判明し、ホワイトノイズを抑圧するフィルタを考案した。まず、ホワイトノイズと音声信号が含まれる骨伝導信号からDyadicウェーブレット変換、閾値処理、逆変換を用いてホワイトノイズを抑圧した。ホワイトノイズを抑圧したデータに音声除去フィルタの手法を適用した結果、音声除去フィルタのみで検出できなかった小さい振幅の歯音信号でも検出できるという良好

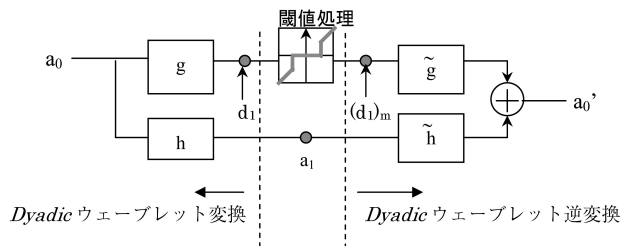


図14 Dyadicウェーブレット変換, 閾値処理, 逆変換の過程

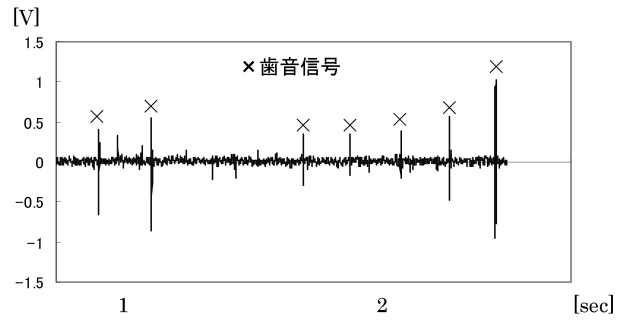


図15(e) ホワイトノイズを抑圧した信号の拡大図 a_0'

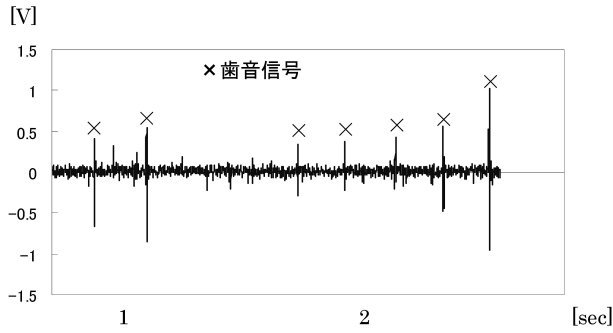


図15(a) 歯音信号付近の拡大図 a_0

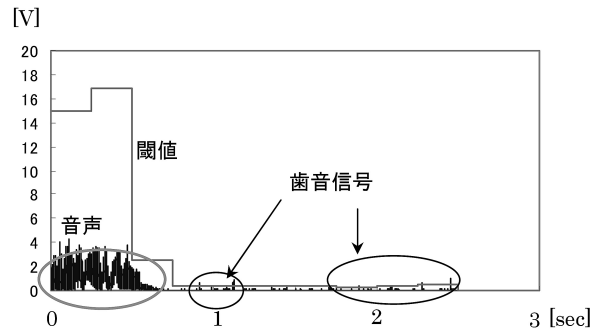


図16(a) 絶対値化した骨伝導信号と閾値

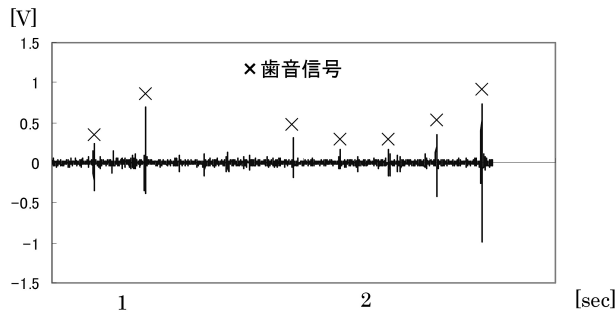


図15(b) d_1 の波形

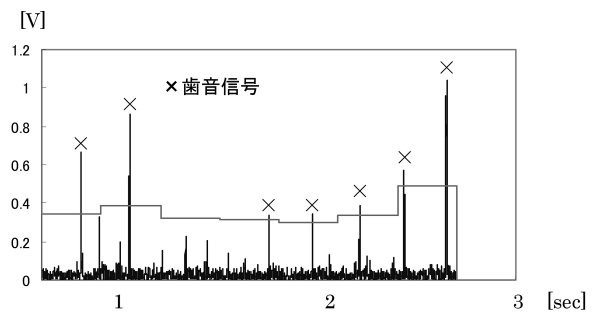


図16(b) 歯音信号付近の拡大図

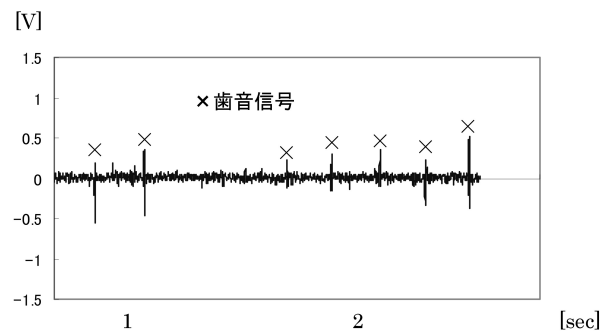


図15(c) a_1 の波形

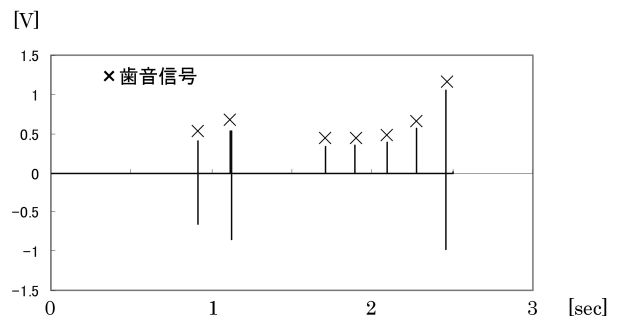


図17 歯音信号検出のシミュレーション結果

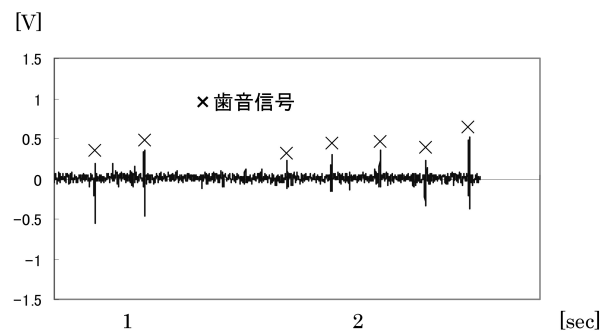


図15(d) $(d_1)_m$ の波形

な結果を得た。

最後に本研究で提案した手法により評価実験を行った結果、高い精度で歯音信号を検出することが可能でウェアラブルコンピューティングの入力装置として有用な装置であることが明らかになった。

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。

- ・雑音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
- ・厳密な総合評価

参考文献

- [1] 谷口 和弘, 西川 敦, 河西 清一郎, 宮崎 文夫, “生体情報を利用したウェアラブルコンピューティングのためのヒューマンマシンインタフェースの開発”
Proceedings of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Akita, Japan, May 10-12, 2007
- [2] IT情報マネジメント用語事典
<http://www.atmarkit.co.jp/im/>
- [3] フリー百科事典「ウィキペディア (Wikipedia)」
<http://ja.wikipedia.org/wiki>
- [4] 渡邊 文浩, 葛目 幸一, “Wavelet変換による歯音の検出とハードウェア化に関する研究”, 電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集 p33, (2006)
- [5] 渡邊 文浩, 森本 猛, 林 恭平, 葛目 幸一, “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” 電子情報通信学会福祉工学研究会技術報告 p121-126, (2007)
- [6] 齊藤 収三, 中田 和男, “[音声情報処理の基礎]” オーム社 (1990)
- [7] G. ストラング, T. グエン, “ウェーブレット解析とフィルタバンク II 応用編” 培風館