

ダイナミックレンジを拡大するアダプティブゲイン 歩行振動センサシステムの検討

吉田 誠^{1,2,a)} 馬越 圭介¹ 藤本 まなと¹ 三崎 慎也¹ 松井 智一¹
諏訪 博彦^{1,3} 安本 慶一¹

概要：歩行振動を用いた人物推定や歩行方向の検知は、家庭内や施設においてカメラ映像等を用いずにプライバシーに配慮して見守りを行うことが可能であるため、様々な研究がなされている。しかしながら、歩行振動は、靴、靴下、裸足など歩行者の履物の条件や床の材質、歩行状況により激しい振動を生ずる可能性があり、振動振幅の大きが大きく異なることがわかってきた。より遠くの歩行振動を取り込むには、センサアンプのゲインを高く設定する必要がある一方、近くの歩行振動を飽和させずに取り込むには、ゲインを低く設定する必要がある。本研究では、ゲインの異なる2つの信号を動的に切り替えるアダプティブ処理の可能性について検討した。結果として、振動が大きく異なる場合においても選択的にゲインの異なる信号を切り替えることにより、信号を飽和させることなく、また、微弱な信号は大きく増幅して取り込むことができることがわかった。さらに、実験により履物の違いによる振動センサからの出力レベルの差の数値化と、入力信号のカバー範囲の設計・検証方法を提案することができた。

キーワード：振動センサ、機械学習、ダイナミックレンジ、歩行振動

1. はじめに

人の行動認識や個人識別は、高齢者の見守りや防犯分野などでの活用を目指し、盛んに研究と実用化が進められている。例えば、図1に示すように、ウェアラブル機器[1]やカメラ用いた手法[2]、Wi-Fi等の電波を用いた手法[3][4]などが研究されている。

ウェアラブル機器を用いる場合、デバイスの装着を行う事で個人識別は容易となる反面、デバイス装着による見守り対象者への負担が大きくなる課題がある。カメラを用いた個人識別や行動認識は、情報量も多く識別が容易であるが、プライバシー侵害の懸念がある。また、障害物で遮られた場合の認識率の低下や照明が暗い場合などは、フレームレートを上げにくく、またノイズで画像が不鮮明になりやすいため、識別が困難になる課題がある。さらに、プライバシーに配慮し画像を匿名化する場合は、扱うデータ量が多いため、前処理に計算コストがかかるという課題もある。近年、研究が進んでいるWi-Fi等の電波を用いた行動認識は、プライバシー侵害の懸念が少ないメリットがある。しかし、扱うデータ量が比較的多いため、前処理の計算コストがかかることや、携帯型の無線機器の使用頻度増加に伴う電波環境の変化の影響を受ける懸念がある。

振動センサを用いた歩行振動による人の行動認識や個人識別は、プライバシー侵害の懸念が少なく、かつ扱うデータ量も少ない。このため、データに対する前処理の計算コストも低く、またセンサデバイス自体も低コストであることから様々な場所で活用の可能性があり、盛んに研究がなされている。しかし、歩行による振動の性質として、靴、靴下、裸足など、歩行者の履物や床環境などの条件により、小さい振動しか生じない場合や、逆に激しい振動を生ずる



図1 行動認識や個人識別に使用されるデバイスと課題

可能性があり、振動振幅のダイナミックレンジが非常に大きい場合信号の取得に課題がある。

具体的には、システムとしてより遠くの歩行振動を取り込むためには、センサアンプのゲインを高く設定する必要があるが、アンプのゲインを高くすると、センサ近くを歩行者が通過したとき、歩き方や履物の種類により振動が激しくなり、歩行振動でアンプが飽和を起こしてしまう場合がある。逆に近くの歩行振動を飽和させずに取り込むため、ゲインを低く設定しすぎると、信号レベルが小さくなり遠くの振動を取り込むのが難しいという課題がある。信号の飽和や、信号レベルの極端な低下が起こるとセンサ信号の特徴量が失われるため、行動認識や個人識別の際に用いる機械学習等での精度の低下が懸念される。

本研究では、アンプゲインの異なる2つの信号を動的に切り替えるアダプティブ処理を提案し、この可能性について検討した。具体的には、振動が大きい場合には低いアンプゲインの信号を、振幅が小さい場合は高いアンプゲインの信号を選択的に切り替えることにより、振動振幅が大きく変化した場合においても、信号を飽和させることなく取り込むシステムの検討を行った。また、履物による振動の大小の変化がどの程度起こるかを数値化することも検討した。

1 奈良先端科学技術大学院大学
2 オンキヨー株式会社 開発部
3 理化学研究所
a) yoshida.makoto.yn3@is.naist.jp

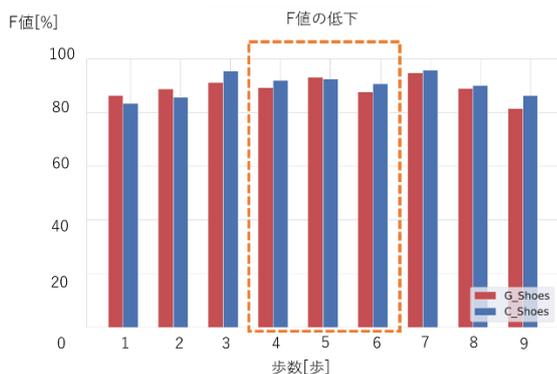


図2 歩数ごとの個人識別の F 値の変化(靴での歩行)

以下、本稿の第2章では、本研究に関連する既存研究について紹介する。第3章では、提案するシステム構成と原理について述べ、第4章では、実際の歩行振動における評価と結果およびシステムにおけるデータの活用方法についての考察。最後に、第5章では、まとめと今後の取り組みについて述べる。

2. 関連研究

本章では、本研究に関連するいくつかの既存研究について紹介するとともに、それらの問題点をまとめ、本研究において取り組むべき課題について述べる。

2.1 歩行振動波形の変化に関する研究

Pan ら[5]は、同じ人でも踏み込みにより振動波形が変わる問題を、歩行速度を検出したうえで反復変換学習アルゴリズム (ITSVM) を導入して、限られたラベル付きトレーニングデータを用いて、学習モデルとは異なった振動波形に対してラベル付けを行い高精度な学習モデルを構築する FootprintID 提案している。しかし、このシステムのアンプの増幅度の設定については、様々な踏み込み強度であらかじめ試し、最も大きな振動信号において飽和しないように固定させており、これにより遠方や弱い振動信号の取り込みに関して制限を受けている。

2.2 ダイナミックレンジ拡大に関する研究

我々の先行研究[6]では、 piezo 式の振動センサと両電源システムおよびレール to レールのオペアンプ回路を用いて、ハードウェア的にダイナミックレンジの拡張に挑戦し、人物の特定において1歩目の歩行振動のみを用いて F 値 70.8% を達成している。しかし、増幅回路のゲイン設定は1つに固定されているためダイナミックレンジのさらなる拡張にはシステムの電源電圧を上げる必要があり、感度を上げてより遠くの歩行振動を取り込むには限界がある。

図2は我々の先行研究で歩行振動に対して DNN+CNN のアンサンブル学習を行った場合の歩数ごとの個人識別の F 値である。なお、同図は2名の歩行者識別の結果で C_shose, G_shose は個人 G, C の結果である。この実験は、



図3 歩数ごとの認識率の実験状況

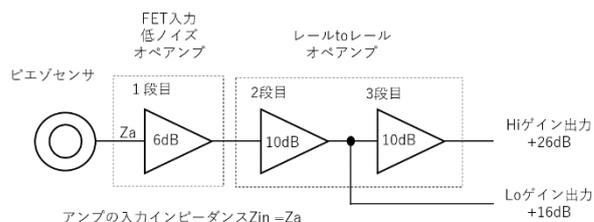


図4 アンプシステムのブロック図

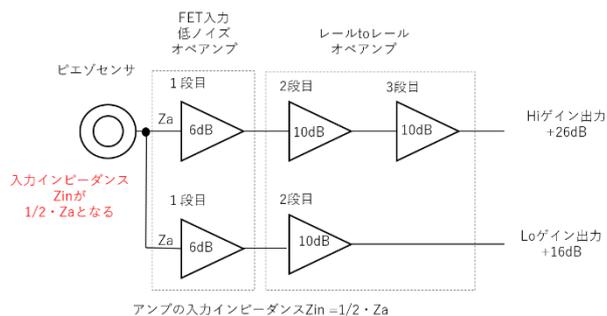


図5 入力部を並列にしたマルチゲインアンプの例

図3のように、センサ遠方から靴をはいてセンサに近づいて歩いてきた歩行者が、センサを通り越して再び遠方へ遠ざかる実験を行っている。図2からセンサの近傍を歩行した4歩から6歩目の歩行は、それよりも遠い3歩目と7歩目の歩行とくらべ F 値が低下しており、センサ近傍の強い振動により、アンプのダイナミックレンジを超え、信号の品質が低下していることが考えられる。

2.3 本研究の位置付け

本研究では、本節で述べた既存研究の問題点を解決するため、2つの異なるゲインを持つ振動センサアンプを開発し、弱い振動に対するアンプ信号と、強い振動に対して用いるアンプ信号を動的に選択するアダプティブゲイン振動センサシステムの実現性について検討を行った。

3. システム構成と原理

3.1 アンプシステム

図4に開発したアンプシステムのブロック図を示す。振動センサには piezo 素子を用いている。一般に2つのゲイ



図6 製作したアンプ基板

ンを持つアンプを構成する場合、図5に示すように、パラレルに2つのアンプを設ける手法が考えられるが、ピエゾ素子は出力インピーダンスが高いため、信号レベルを高く維持するには、アンプの入力インピーダンスも高くする必要があります。しかし、並列にアンプを接続すると、アンプの入力インピーダンスを下げってしまうことから、本研究では、多段直結型のアンプ構成として、初段、2段、3段とゲインを段階的に上げていき、途中の出力を取り出す方式とした。また、データ取得のADコンバータのサンプルレートは、10kHzに設定した。

3.2 使用デバイスとゲイン設定

図6に制作したアンプ基板を示す。回路には、先行研究[6]と同様にアンプシステムに使用するオペアンプは、レールtoレールのデバイスを使用し、電源供給はバッテリーによる両電源駆動方式を採用した。ただし、先行研究[6]では、初段増幅回路に、ディスクリート部品のFET (Field effect transistor)を使用していたが、ディスクリート部品のFETは、製造ロットによる電流ゲインのばらつきが大きいため、本研究では、FET入力タイプのオペアンプ(アナログデバイス社LT6241HV)を使用することでばらつきを改善した。アンプのゲインは、先行研究アンプの20dBよりも小さい16dBと、大きい26dBとし、従来アンプより入力レベルのカバー範囲をそれぞれ+4dB, -6dB範囲を広げることにより、入力のダイナミックレンジを+10dB(約3倍)確保できるよう設計した。

3.3 アンプシステムの基本性能とクリップ電圧

図7は、本システムに正弦波1kHz, 100mVp-pの信号を加えたときの出力波形である。黄色が高ゲインアンプ、水色が低ゲインアンプの出力波形で、同一入力信号に対して2種類のゲインでの増幅が行われていることがわかる。

システムの電気的基本性能を数値評価するため、先行研究で使用されたアンプと、本研究のアンプそれぞれが飽和するポイントでの入力レベルを比較した。その結果を表1に示す。なお最大入力電圧の定義は、JEITA規格CP-1105を参考に出力信号の歪であるTHD+Nが1%(LPF 30kHz)となる入力レベルとした。このように、2つのゲインを持

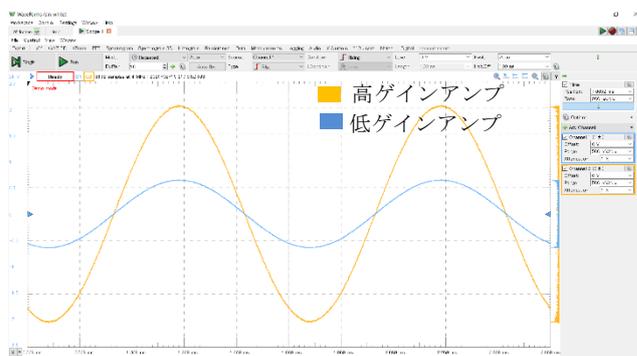


図7 正弦波 100mV 入力によるゲイン比較

表1 アンプ飽和電圧の実測値の比較

アンプ	ゲイン [dB]	THD+N=1% (LPF 20kHz) 最大入力 [mVrms]	最大出力 (THD+N=1%) (LPF 20kHz) [Vrms]	先行研究アンプと入力可能レベル差 [dB]
先行研究アンプ	18.2 (約 8.1 倍)	139.6 (-17.1dBV)	2.271	---
本研究アンプ 高ゲイン	23.9 (約 15.7 倍)	73.3 (-22.7dBV)	2.302	-5.6
本研究アンプ 低ゲイン	13.9 (約 4.95 倍)	231.7 (-12.7dBV)	2.279	+4.4

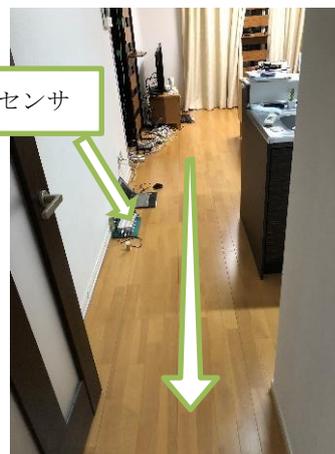


図8 マートホームでの歩行経路

たせることで、入力信号のカバー範囲を先行研究のアンプと比べ実測値で約10dB(約3倍)増加させることができた。

4. 実際の歩行振動による評価

4.1 評価条件

図8に実験に使用した奈良先端科学技術大学院大学のスマートホーム内の写真にセンサ位置および歩行経路を追記

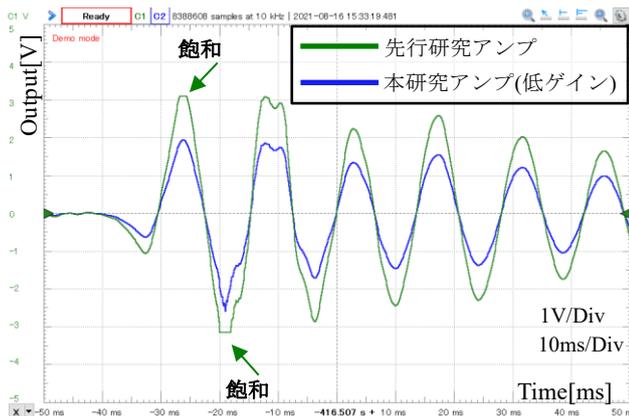


図9 研究アンプと開発アンプ(低ゲイン)の取得波形比較

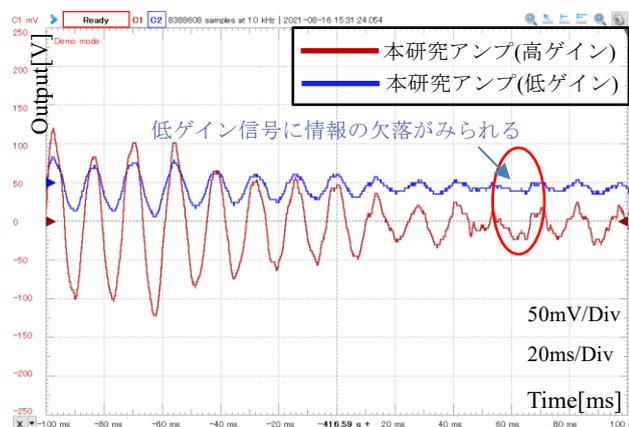


図10 微弱信号に対する高ゲイン/低ゲインアンプの出力

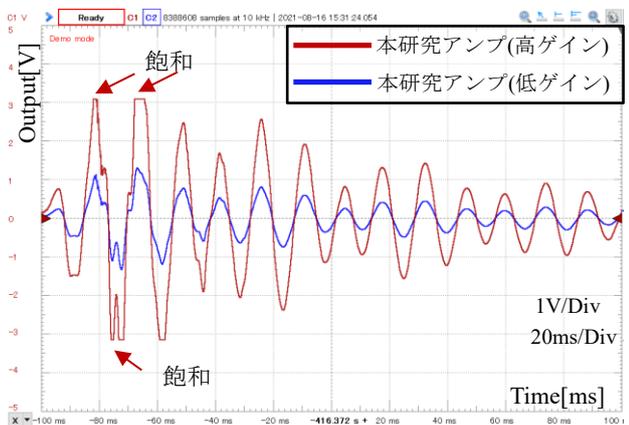


図11 高ゲイン/低ゲインアンプの出力 (センサ近傍 1V/div)

したものを示す。歩行は靴、靴下、裸足の3通りで複数回の歩行を直線に沿ってこない、2つのゲインをもつアンプで増幅した振動波形および先行研究のアンプにより増幅した振動波形のデータを取得した。このうち最も振動センサ出力が大きかった、靴および裸足の振動波形にて飽和の評価を行った。

4.2 先行研究のアンプ評価

先行研究のアンプと、我々が本研究で提案したアンプの

信号飽和状況を比較するため、1つの振動センサ信号を分岐しそれぞれのアンプに接続して、歩き方を意識的に変えながら歩行実験を計10回行った。なお、相対評価のため、この実験に限りセンサ出力を分岐している、また、本研究アンプが飽和を防ぐことができているかを確認するため、アンプは2つのゲインのうち低ゲイン側のアンプの出力を観測している。

その結果、裸足、および靴での歩行において、センサ近傍を歩行した際、先行研究のアンプにてクリップが確認された場合においても、本研究アンプの低ゲインアンプの出力は飽和をせず振動波形を増幅できている事がわかった。図9に本実験で飽和が発生した裸足の歩行振動波形の一例を示す。緑色の波形が先行研究アンプ、青色の波形が本研究アンプにおける低ゲインアンプの出力となっており、この波形データから本研究アンプは、同じ歩行イベントに対して飽和が発生していないことがわかる。

4.3 2つのゲインによる効果の確認

次に、高ゲインアンプと低ゲインアンプの組み合わせにより、広い入力レンジで歩行振動が捉えられるかを確認するため、同一の歩行イベントに対して2つのゲインを持つアンプそれぞれの出力波形を同時記録し比較をおこなった。

図10は、歩行による振動が減衰しセンサ信号が微小信号となったときの高ゲインアンプの出力波形と低ゲインアンプの出力波形である。なお、振幅が非常に小さいため電圧レンジを50mV/Divとし低ゲインアンプの信号に+50mVのオフセットをかけて2つの信号間の差異を確認しやすくしている。この結果より高ゲインアンプの出力波形(赤色)と、低ゲインアンプの出力波形(青色)とを比較すると、高ゲインアンプの出力波形は全体として振幅を大きく記録できており、特に赤丸で示した区間においては、低ゲインアンプからの出力が単調で振幅の変化の情報が見られなくなっている区間においても、高ゲインアンプ側は微小な振幅の変化を記録できていることがわかる。このように微小な振動において、高ゲインアンプ側の信号を選ぶことで歩行個人識別に必要な信号情報を維持できることがわかる。

次に、センサが大きな振動を受けた場合の比較を行った。

図11は、センサ近傍の大きな歩行振動により得られた振動波形である。高ゲインアンプの出力波形は先行研究アンプよりもさらにゲインが高いための出力信号は飽和しているが、低ゲインアンプの出力は飽和していない。このように飽和が発生した場合は歩行振動による個人識別には低ゲインアンプ側の信号を選択し利用すればよいことがわかる。

4.4 評価結果と考察

実験を行う中で振動センサの出力レベルは全体としてセンサ付近を歩行するほど高くなる傾向はあるが、必ずしも最もセンサに近い1歩が最も振動レベルが高いわけではないこともわかった。これは、床の材質が均一媒質ではないことや、歩行先の障害物の有無、床にかかる力の差、利

き足かどうかなど、歩行の癖も関わってくるためと考える。

次に、同一人物の歩行において靴、靴下、裸足それぞれの歩行によりどの程度の振幅レベル差が現れるか確認した。比較データはセンサ近傍の振幅で、かつ飽和していない低ゲインアンプの信号を用いた。その結果、最大振幅は靴では 1080[mV]、靴下では 941[mV]裸足では 1299[mV]となっていた。この結果から最も低い靴下の振幅と、裸足の振幅を比較すると、約 2.8dB の差があることがわかった。さらに複数回実験をすることで履物だけでなく歩行者の位置、歩き方などの要素でも、出力信号レベルが大きく変化することが観測された。以上の結果から歩行振動はレベルの変化幅の大きい信号を発生させ、特に振幅が大きくなりやすい、靴、裸足においては、アンプのゲインによりセンサ近傍の歩行でアンプが飽和を起こしてしまう可能性が高く、2.2 節で述べた靴での歩行におけるセンサ近傍での F 値の低下の原因となっていると考えられる。以上のことから歩行振動による大小の変化の激しい信号に対して、2 つの異なるゲインを持つセンサアンプを用いることで、幅広い入力信号に対応することが可能になるとともに、信号レベルに応じて最適なゲインの信号を選択することにより、遠方の微弱な歩行振動や、近くの強い歩行振動を低ノイズで飽和させることなく取得することができるとわかった。また、ゲインの異なる信号を選択する前提であれば高ゲインアンプを、飽和を気にすることなくより高いゲインに設定できることから、歩行振動取得の距離的なレンジを広げることができる。

4.5 機械学習のための波形活用方法の検討と考察

2 つの異なるゲインを持つアンプにより増幅された歩行振動を有効に活用する方法について、以下の検討を行った。判断の基準は、飽和したことが検出されるかどうかであり、これにより採用する信号を取捨選択することが考えられる。このことからまず歩行振動波形において信号が飽和したことを検出する方法について検討した。

4.5.1 FFT および時間軸信号による検出と切替え

2 つのゲインの異なるアンプ信号の活用方法の 1 つとして、通常は大きい振幅が得られるゲインの高いアンプを選び、信号が飽和した場合のみゲインの低いアンプからの信号データに切り替えるアルゴリズムが考えられる。一般に飽和した信号は、飽和していない信号と比べ高調波成分が多くなる傾向があることが知られている。そこで、それぞれの信号を FFT し、高調波成分を比較することで判定し切り替える方法を検討した。図 12 は、実際の歩行実験で得た同一の歩行振動において、アンプが飽和した場合と飽和していない場合の FFT によるスペクトログラムの比較図である。また、図 13 はどちらのアンプも飽和せず、ゲインだけが異なる状態でのスペクトログラムの比較である。(使用したアンプのゲインは表 1 とは異なり、高ゲイン 24dB、低ゲイン 18dB で予備実験を行ったときの波形を用いている)

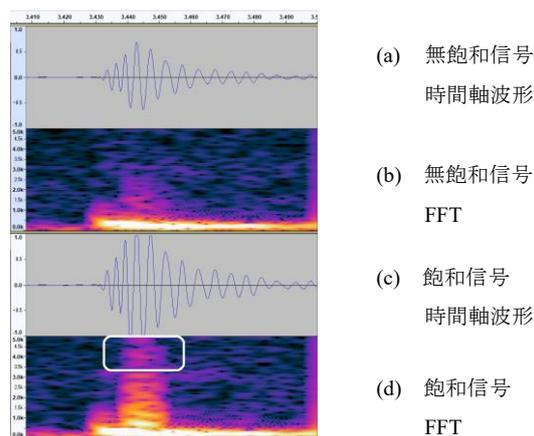


図 12 信号の飽和の有無によるスペクトログラムの変化

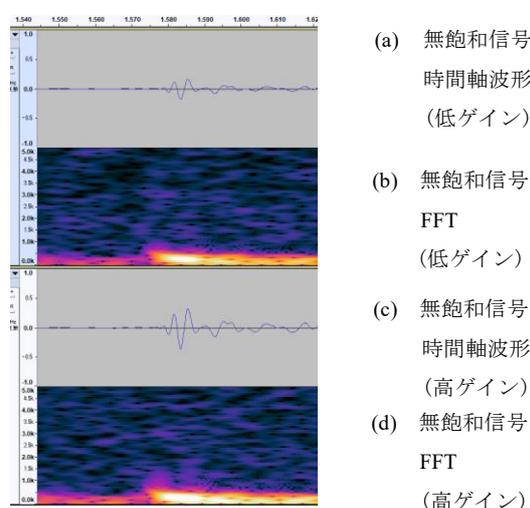


図 13 高・低ゲインアンプ共に無飽和の場合のスペクトログラム

同図からわかるように信号に飽和が発生すると、飽和していない信号と比べて特に 4kHz 以上の高調波成分が急激に増加することがわかる。

このことから判定方法として、振幅の実効値がある一定以上を超えた場合、FFT によりスペクトログラムを求めて 2 つの信号の高調波成分を比較し、画像による判断により高調波成分のより少ないほう方を選択するアルゴリズムが考えられる。しかし、飽和はごく短時間で発生する可能性があるため、時間軸が平均化されることが考えられる FFT においては、わずかな区間の飽和を見逃してしまう可能性が懸念される。これを検証するため、極短時間 (3 サンプル) だけ飽和した信号を疑似的に作成し、同様の処理を行い高調波成分の認識・検出が可能か FFT のウィンドウサイズを設定できる最小の 8 として確認した。しかし、結果的には、スペクトラム変化では、ほとんど識別できないことがわかった。

そこで、FFT の結果を用いた判定ではなく時間軸信号に注目したアルゴリズムで判定処理を行うことを検討した。

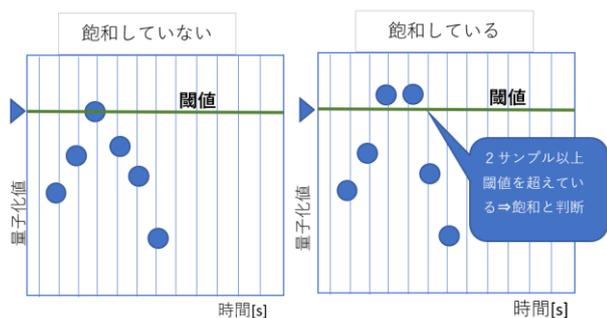


図 14 飽和の判定

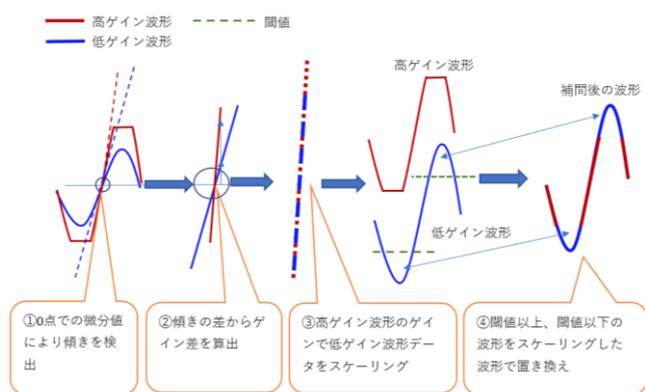


図 15 高ゲインアンブ信号データの飽和部分の補間処理

信号に飽和が発生した区間の波形データは、振幅上限値にぶつかるため値の変化がなくなり直流成分となる。そこで、図 14 に示すように、サンプルデータに対する閾値を振幅上限値付近に設け、その閾値を 2 サンプル以上連続して超えている場合、信号波形がクリップしたものととして、低ゲインアンブの信号を選択する手法を考案した。これにより、ごく短時間のクリップであっても検出することが可能になり、波形の選択が可能になる。

4.5.2 波形の有効部分を合成する手法

さらに、提案システムでは高ゲインアンブと低ゲインアンブの信号が同期され同時に記録されていることを活かし飽和が発生していない区間の高ゲインアンブの信号と、飽和点から再び飽和が解消するまでの区間の低ゲインアンブの信号を合成し 1 つの波形データを再生成する方法も検討した。

図 15 に示すように低ゲインアンブと高ゲインアンブの増幅度の差を同期した 2 つデータの 0 点通過時の傾きの差から算出し、低ゲイン側の信号の高ゲイン側と同じ増幅度にスケールリングする。そのうえで飽和レベル付近に閾値を設けそれ以上の信号となった所だけ低ゲイン波形をスケールリングした信号でおき替える。なお閾値としては、波形の連続性を維持しやすいよう飽和点から 3dB 以上離れた位置など閾値より少し前の点を設定する。以上により 2 つの信

号波形を 1 つにまとめることができ、イベント検出ごとの判定処理を省略することができる。この方式は、低レベル信号の波形に含まれる微小信号を残したまま、振幅の大きいクリップ部についてのみ、低ゲインのアンブ信号で補間できる特徴がある。

5. おわりに

本稿では、強弱の変化の大きい歩行振動によるセンサ信号をカバーするため、幅広いレベルの信号を取得できる 2 つのゲインを持ったセンサアンブシステムを提案し入力信号のカバー範囲の設計・評価方法を含めて提案・検証した。また、測定対象である歩行振動信号レベルの靴、靴下、裸足での振幅の変化について実測を行い数値化した。ただし、今回の評価は 1 名の人物のみで行っているため、今後は、人によるばらつきや履物の種類を増やした評価を行い、歩行振動の信号レベル変化範囲がどの程度に及ぶのかさらなる調査を進めていく予定としている。また、飽和検出による信号切り替えや 2 つの信号を補完して活用するアルゴリズムを実際に歩行認識のプログラムに実装し、個人識別で活用した場合の精度改善効果について検証する。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 (B) (No. 20H04177) の助成によって行った。

参考文献

- 1) 今野慎介, 中村嘉隆, 白石陽, 高橋修. ウェアラブルセンサを用いた歩行動作による本人認証法の検討. 信学技報, Vol. 114, No. 479, pp. 115–122, 2015.
- 2) Robert T Collins, Ralph Gross, and Jianbo Shi. Silhouette-based human identification from body shape and gait. 5th IEEE international conference on automatic face gesture recognition, pp. 366–371. IEEE, 2002.
- 3) Belal Korany, Chitra R. Karanam, Hong Cai, and Yasamin Mostofi. Xmodal-id: Using wifi for through-wall person identification from candidate video footage. New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- 4) Teruo Higashino, Akira Uchiyama, Shunsuke Saruwatari, Hirozumi Yamaguchi, and Takashi Watanabe. Context recognition of humans and objects by distributed zero-energy iot devices. 2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), pp. 1787–1796, 2019.
- 5) Shijia Pan, Tong Yu, Mostafa Mirshekari, Jonathon Fagert, Amelie Bonde, Ole J. Mengshoel, Hae Young Noh, and Pei Zhang. Footprintid: Indoor pedestrian identification through ambient structural vibration sensing. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., Vol. 1, No. 3, 2017.
- 6) Keisuke Umakoshi, Tomokazu Matsui, Makoto Yoshida, Hyuckjin Choi, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, and Keiichi Yasumoto. Non-Contact Person Identification by Piezoelectric-based Gait Vibration Sensing, The 35th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Tronto, Canada, 2021.