

周波数スペクトルの時間変化に着目した足音の解析

Analysis of Audible Footstep Signal by Frequency Spectrum Shift with Time

安田浩大, 田中元志, 井上 浩

Kohdai Yasuda, Motoshi Tanaka, and Hiroshi Inoue

秋田大学 工学資源学部

Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード: 足音 (footsteps), 時間 - 周波数解析 (time-frequency analysis),
線形予測分析 (linear predictive coding analysis), 特徴抽出 (feature extraction)

連絡先: 〒010-8502 秋田市手形学園町1-1 秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科
安田浩大 Tel.: 018-889-2492, Fax.: 018-835-4651

E-mail: {yasuda, tanakam}@venus.ee.akita-u.ac.jp

1. はじめに

人間は, 足音を聴くことによって人の存在を感じ個人を識別を行うことが可能な場合がある。これは, 足音が個人の特徴などの情報を含んでいることを示唆している。足音の特徴抽出を行い, 歩行の認識を実現することにより, 離れた場所から高齢者の活動状態を把握する新たな在宅ライフサポートやセキュリティシステムへの利用が期待できる。

足音は歩行者の身体的特徴(身長, 体重, 歩き方, 他)などによって異なり, また, 同一人物であってもその時の状況(体調, 歩く目的, 場所, 履物, 他)によって異なる場合があるなど, パラメータが非常に多いため, いかにして目的の特徴を取り出し, それを利用するかが問題となる。

筆者らは, 足音のパワースペクトル解析を行い, 簡単な認識から歩行認識の可能性を示してきた^{1)~5)}。同一の歩行者でも左右の足の違いによって足音の周波数特性が異なることから, 1歩の足音信

号波形が含まれる時間長の窓で足音を切り出し, 短時間フーリエ変換(Short Time Fourier Transform: STFT)を用いて周波数スペクトルの時間的な変化を特徴として抽出し, ニューラルネットワークによる認識を試みた⁴⁾。一方, 足音の周波数解析による検討⁶⁾⁷⁾, 人間の聴覚特性⁸⁾, DPマッチング⁹⁾, ウェーブレット変換¹⁰⁾などを利用した足音による個人識別の検討が報告されている。また, 足圧による個人識別の検討¹¹⁾, 歩行による建物の振動についての検討¹²⁾も行われている。しかし, これらの検討では, 歩行認識や足音の個人識別に有効な特徴が抽出されているとはいえず, また認識・識別アルゴリズムについても検討が必要である。

そこで, 人間は足音の周波数的な特徴およびその時間変化から, 歩行の認識や個人の識別を行っていると考え, 足音1歩の継続時間よりも十分に短い時間窓で足音と打音, 生活音それぞれに対しての時間 - 周波数解析を行った結果, スペクトル包絡から得られた足音のピーク周波数とその時間変化は打音や生活音とは異なり, また被験者や履

物の違いによっても差異が見られた⁵⁾。

本研究では、足音の1歩分を取り出し、周波数スペクトルの時間変化に着目し、そのピーク周波数の時間変化を特徴パラメータとして定量的に抽出することを検討した。具体的には、足音の音響信号波形からしきい値処理によって取り出した1歩の足音について、STFTおよび線形予測 (Linear Predictive Coding: LPC) 分析を用いて、時間 - 周波数解析を行った。

2. 足音の採取

足音 (歩行時の音響信号) の採取条件をTable 1に示す。採取場所 (鉄筋コンクリート建て, 床: タイル, 秋田大学工学資源学部1号館3F廊下) に、マイクロホンを床から15 cmの高さに固定して、約8 m先からマイクロホンに向かって歩き、DATレコーダで収録した。録音された足音は、DATレコーダからインターフェースを介してコンピュータに取り込まれる。今回の実験では、同一の履物 (サンダル) で足音を収録した。被験者数は12名で、1名で10回の測定を行い、結果の再現性も確認した。足音の時間波形例 (example 1, 被験者K, 4歩分) をFig. 1に示す。

Table 1 Recording conditions of footsteps.

場所	鉄筋コンクリート建ての廊下, 床: タイル, 幅: 約2 m (秋田大学工学資源学部1号館3F廊下)
履物	サンダル
被験者	男性12名 (21 ~ 25歳)
録音装置	マイクロホン (周波数帯域幅: 0.05-18 kHz, Sony ECM-959A) DATレコーダ (標本化周波数: 48 kHz, Sony TCD-D7)

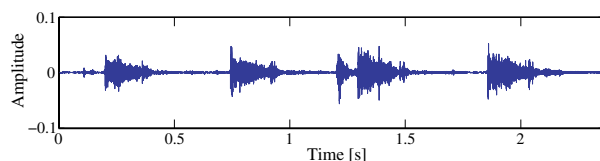


Fig. 1 An example of audible footstep signal waveform (example 1 : Subject K with Sandals).

3. 解析方法

3.1 時間 - 周波数解析

本研究における時間 - 周波数解析の流れをFig. 2に示す。採取した音響信号には、採取場所で周囲から定常的に発生していると思われる雑音が見られるため、スペクトル減算 (Spectral Subtraction: SS) 法¹⁴⁾を用いて音響信号から背景雑音の除去を行った。

この後、STFTによる時間 - 周波数解析を行う。解析時の分析フレーム長については、使用したマイクの周波数帯域幅の下限である50 Hz (データ点数: 960点) の信号がフレーム内に1波長以上含まれるように21.3 ms (データ点数: 1024点) とした。周波数分解能は46.9 Hzである。また、フレーム間隔については、時間分解能を出来るだけよくしたいと考え、5 msとした。フレーム長21.3 msのハミング窓で波形を切り出し、LPC分析を行った後に高速フーリエ変換 (FFT) を行い、周波数スペクトルの包絡線を求める。ここで、LPC分析は音響信号処理においてよく用いられる方法であり、時間 n における足音の振幅値 x_n 、その線形予測値を \hat{x}_n とすると、

$$x_n = \hat{x}_n + \varepsilon_n = - \sum_{m=1}^M a_m x_{n+m} + \varepsilon_n \quad (1)$$

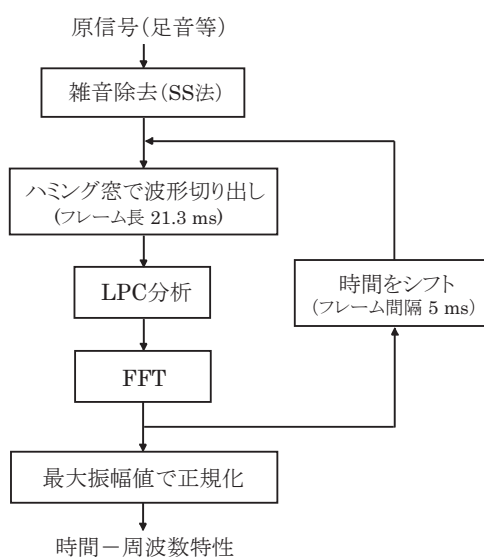


Fig. 2 Flow of time-frequency analysis.

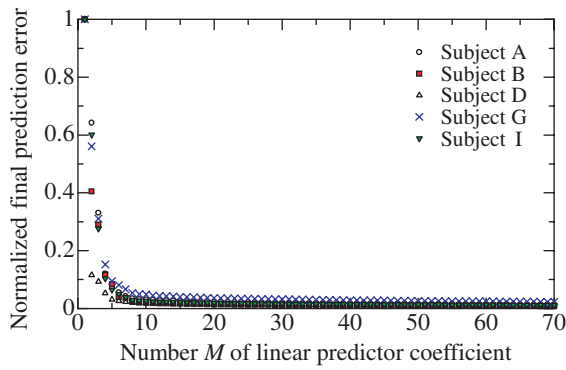


Fig. 3 Normalized final prediction error

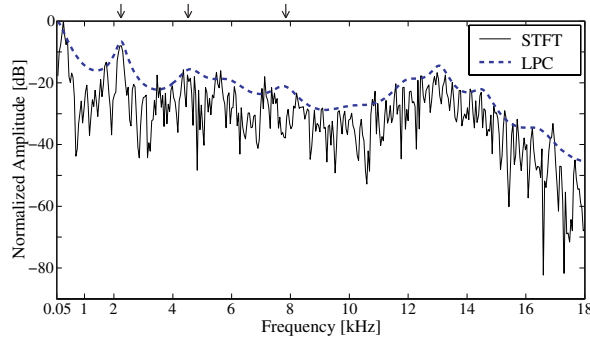


Fig. 4 Frequency spectrum of an analysis frame, and its envelope by LPC.

で表される¹³⁾。ここで、 a_m は線形予測係数、 ε_n は線形予測残差を表す。被験者9名の足音について、最終予測誤差規範 (Final Prediction Error: FPE) 法¹⁵⁾を用いて予測残差の分散 (最終予測誤差) を求めた。5名の結果をFig. 3に示す。縦軸は各データの最大値で正規化した値であり、横軸は次数 M (予測係数の数) である。図に示していない4名の結果においても同様の特性を示していた。次数が約20以降では最終予測誤差が収束し、十分に小さくなっていることから、本研究では $M=25$ とした。分析フレームにおける周波数スペクトルと、LPC分析を用いて求めたスペクトル包絡の例をFig. 4に示す。

そして、時間を5 ms (データ点数: 240点) だけシフトし (フレーム間隔5 ms)、同様の処理を順次行い、時間 - 周波数特性を求めた。Fig. 1の足音の解析結果例をFig. 5に示す。足音の発生に伴い、スペクトルも時間的に変化しているのが視覚的にわかる。しかし、時間波形において振幅が小

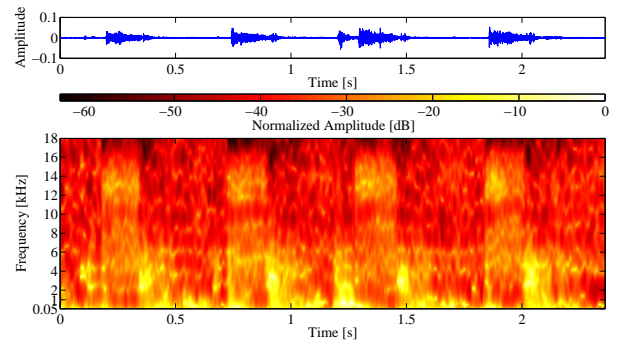


Fig. 5 Time-frequency characteristics of example 1, in which the top is the footstep waveform and the middle is the scale of the amplitude for the time-frequency characteristics.

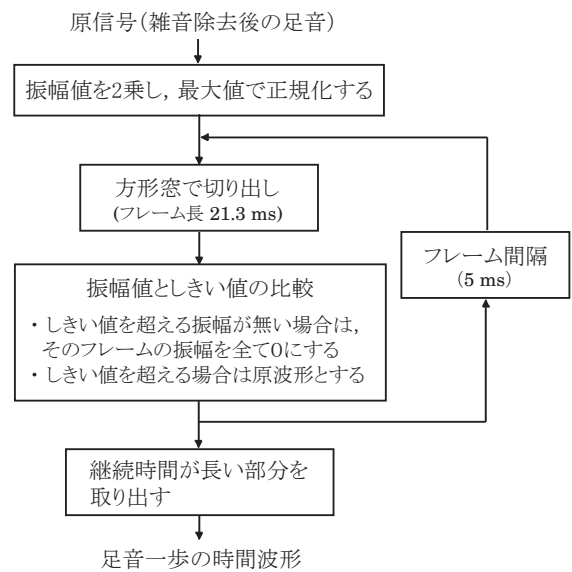


Fig. 6 Flow of threshold processing.

さく、足音が含まれていないと考えられる時間帯においても信号が現れているように見える。微小な足音以外の成分と考えられるので、これを取り除くために、足音1歩分の波形のみを取り出すこととした。

3.2 足音波形のしきい値処理

記録した全ての波形から、足音と足音が含まれていない部分を分離するために、Fig. 6に示す手順でしきい値処理を行った。振幅値を2乗して最大値で正規化し、正規化電力を求める。次に、方形窓で波形を切り出し、各フレーム内の正規化電力としきい値を比較する。しきい値以上の振幅が存

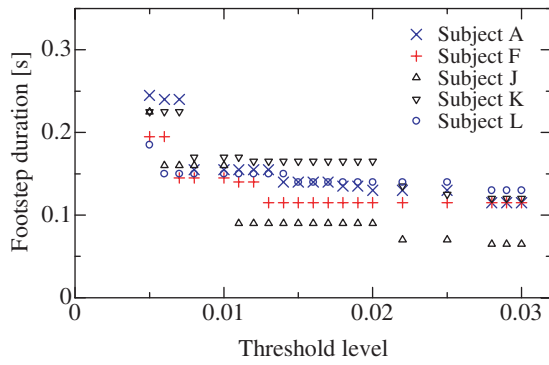


Fig. 7 Threshold level vs. footstep duration.

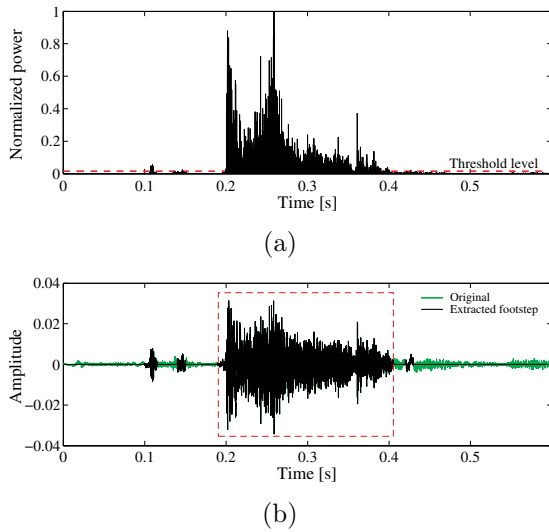


Fig. 8 Extracting one footstep from waveform of example 1. (a) Normalized power of footstep waveform and threshold level, and (b) extracted footstep waveform.

在しない場合は、そのフレームの振幅値を全て0とする。波形を切り出す時間をシフトし、繰り返す。そして、振幅値が0でない部分から、継続時間が最も長い部分を足音として取り出した。

しきい値を決定するため、被験者5名の足音について、しきい値を変えたときの足音の継続時間を求めた。結果をFig. 7に示す。しきい値が0.014~0.02では足音の継続時間の値の変化が小さいことから、本研究におけるしきい値を0.015とした。

Fig. 8は、Fig. 1の足音に対してしきい値処理を行った結果である。(a)は時間波形の正規化電力としきい値を示しており、(b)はしきい値処理を行った時間波形であり、破線で囲まれた部分(約0.2~0.4 sの波形)が「足音1歩の波形」として取り出さ

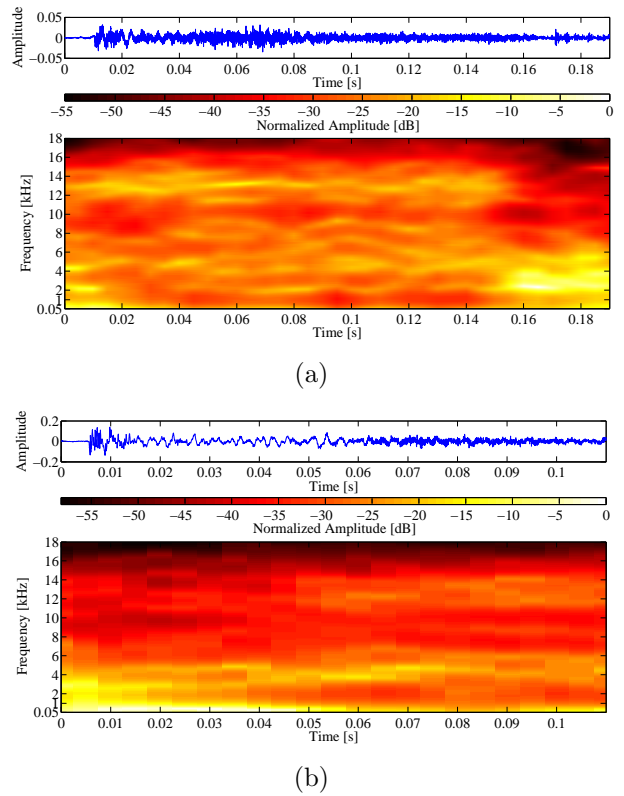


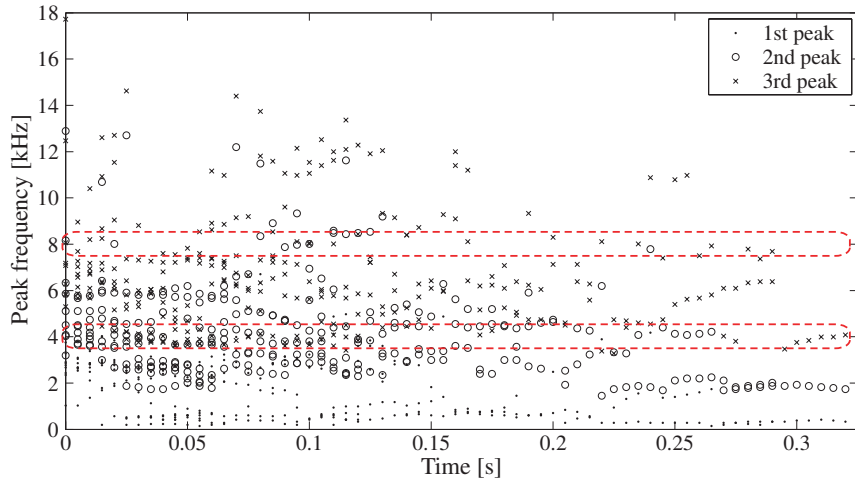
Fig. 9 Examples of waveform and time-frequency characteristics of one footstep. (a) Example 2 (Subject K), and (b) example 3 (Subject L).

れる。このしきい値処理の後、時間 - 周波数解析を行った。

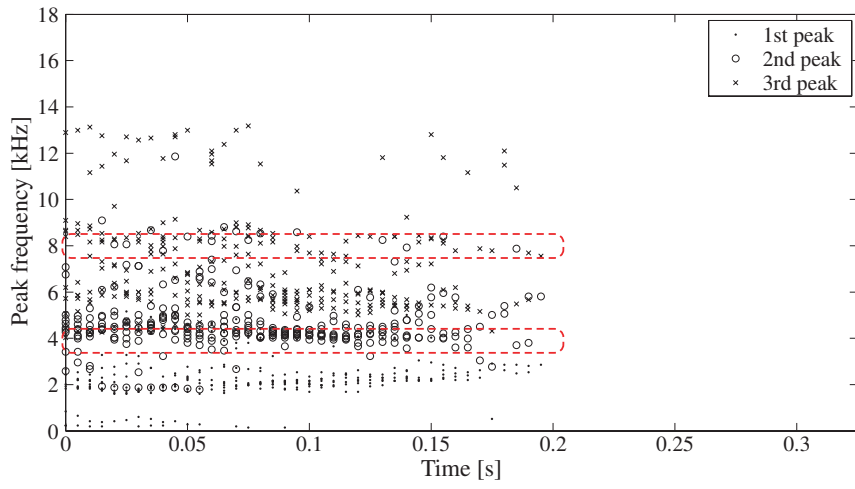
4. 周波数スペクトルの時間変化に着目した足音の解析

被験者12名で10回測定した各足音波形から右足の足音1歩分を取り出し、時間 - 周波数解析を行った。結果の例(例2, 3)をFig. 9に示す。(a)は被験者K、(b)は被験者Lの解析結果であり、各図の上段は時間波形、下段が時間 - 周波数特性である。被験者の違いによって、周波数スペクトルの時間変化に差異が見られる。

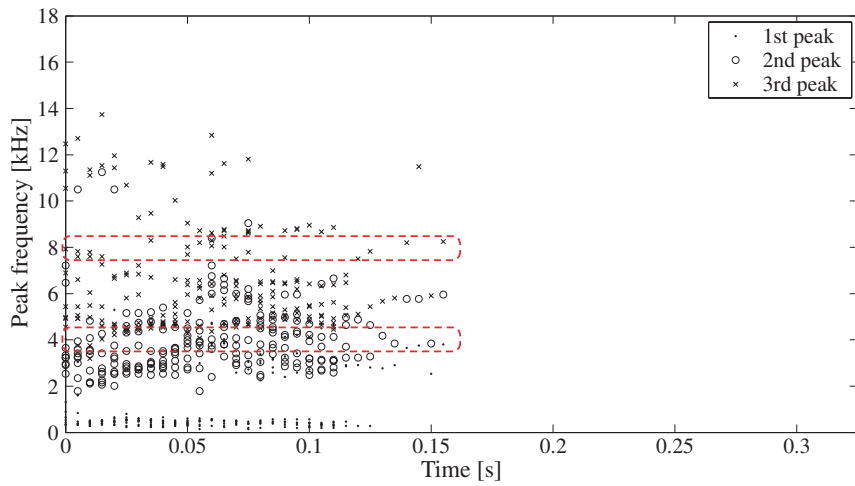
1歩分の足音の時間 - 周波数特性から、各分析フレームにおけるピーク周波数を低い方から3つ検出し(例えば、Fig. 4の上部に矢印で示した3周波数)、その時間変化をプロットした図をFig. 10に示す。図は被験者3名の結果であり、測定回数10回分について重ねて表示している。検出されたピーク



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Examples of peak frequency shift with time, in which the data measured 10 times are plotted. (a) Example 4 (Subject J), (b) example 5 (Subject K), and (c) example 6 (Subject L).

Table 2 Summary of extracted peak frequencies.

周波数 [kHz]	被験者											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
0.05 ~ 0.5		-			-							
0.5 ~ 1.5							-				-	-
1.5 ~ 2.5												-
2.5 ~ 3.5												
3.5 ~ 4.5												
4.5 ~ 5.5												
5.5 ~ 6.5		-										
6.5 ~ 7.5												
7.5 ~ 8.5												
8.5 ~ 9.5		-				-						
9.5 ~ 10.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10.5 ~ 11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11.5 ~ 12.5												
12.5 ~ 13.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13.5 ~ 18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

周波数にばらつきがあり、幾つかの周波数に分布しているように見える。例えば、図中に破線で囲んだ4, 8 kHz付近のピークは3人の被験者に共通して見られ、場所及び履物などの実験条件が関係していると考えられる。ピークが現われた周波数を被験者ごとにまとめた表をTable 2に示す。表では、ピーク周波数が多く分布する周波数とそのばらつきを考慮して、1 kHzの帯域幅をもつ周波数帯に分け、ピーク周波数の有無を印(有り)と-印(データ点数の1%未満)で示した。被験者によって異なる周波数にピークが現れており、この周波数を特徴パラメータとして検出することにより、足音を用いた歩行の認識や個人の識別が可能になると考えられる。Table 2では、周波数帯ごとのピーク周波数の有無の組み合わせが同じ被験者がある。認識・識別においては、被験者の特徴を示す特徴パラメータは多い方が望ましい。被験者によって右足と左足のスペクトルが異なる場合があることから、今後、左足についても本研究と同様の解析を行う必要がある。

また、1歩の足音の継続時間が被験者および測定毎に異なっていた。これも個人の特徴パラメータとなり得る。被験者毎の足音(10回)の継続時間および平均値をFig. 11に示す。被験者によって平均継続時間とそのばらつきは異なっているが、継続時間は場所や履物などの測定条件だけでなく、

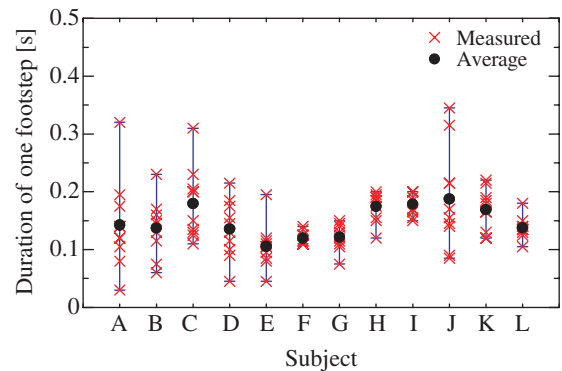


Fig. 11 Duration of one footstep.

歩行速度にも関係する。歩行速度および歩行間隔は、本検討のしきい値処理を用いることによって抽出できるので、複数歩の足音に対してしきい値処理および解析を行い、個人識別のための特徴パラメータとしてこれらを取り出すことが今後の課題の1つとして挙げられる。

5. まとめ

本研究では、足音1歩内における周波数スペクトルの時間変化に着目し、足音の音響信号波形からしきい値処理によって取り出した1歩の足音について、LPC分析を用いたSTFTによる時間-周波数解析を行った。その結果、周波数スペクトルの時間変化は被験者によって差異が見られ、また被験者によっては特有のピーク周波数が見られた。

一方，場所や履物に関係すると考えられる共通のピーク周波数も得られた．

今後は，多くの足音データに対して，足音1歩の周波数スペクトルの時間変化だけではなく，右足と左足でのスペクトルや歩行間隔の差異など，被験者間で異なると考えられるパラメータについての検討，および歩行認識・個人識別のための特徴抽出し，認識・識別への適用を行う予定である．

謝辞 足音の採取に協力頂いた方々に感謝する．

参考文献

- 1) 田中元志, 井上浩: “周波数解析による足音の特徴抽出に関する一検討”, 電学論, **117-C**, 4, pp.483-484 (1997).
- 2) M. Tanaka and H. Inoue: “A study on walk-recognition by frequency analysis of footsteps”, IEEJ Trans. EIS, **119-C**, 6, pp.762-763 (1999).
- 3) 田中元志, 井上浩: “足音スペクトルの比較による木造家屋内の歩行認識に関する一検討”, 電学論 C, **122-C**, 3, pp.525-526 (2002).
- 4) 田中元志, 森俊彦, 井上浩: “木造家屋内における足音の認識に関する一検討”, 音講論, 1-5-21 (Sep. 2002).
- 5) 安田浩大, 田中元志, 井上浩: “足音の特徴抽出のための時間-周波数解析の一検討”, 第46回 日本生体医工学会大会, PS3-7-4 (2007).
- 6) B. She: “Framework of footstep detection in indoor environment”, Proceedings of ICA2004, **1**, pp.715-718 (2004).
- 7) 高須賀崇, 丹羽伸二, 小路康弘, 安川博: “聴覚特性を考慮した足音による人物の同定に関する一検討”, 2004信学総大, p.242 (2004).
- 8) Y. Shoji, A. Itai, and H. Yasukawa: “Personal identification using footstep detection in in-door environment”, IEICE Trans. Fundamentals, **E88-A**, 8, pp.2072-2077 (2005).
- 9) 野村祐基, 磯村太郎, 板井陽俊, 安川博: “DPマッチングを用いた歩行足音の個人識別”, 2007信学総大, A-4-37 (2007).
- 10) 板井陽俊, 安川博: “ウェーブレット変換とSVMによる歩行足音を用いた個人識別”, 2007信学総大, A-4-38 (2007).
- 11) 関 進, 藤井崇介, 沢田篤史, 美濃導彦: “歩行時の両足床反力を用いた個人識別”, 信学論D, **J90-D**, 2, pp.441-449 (2007).
- 12) 井上勝夫, 木村翔: “住宅床の床衝撃音と歩行感覚評価”, 音学誌, **55**, 2, pp.112-118 (1999).
- 13) 古井貞熙: “音響・音声工学”, pp.96-219, 近代科学社 (1992).
- 14) 池原雅章, 島村徹也, 真田幸俊: “MATLABマルチメディア信号処理 下”, 培風館 (2004).
- 15) 中溝高好: “信号解析とシステム同定”, コロナ社 (1988).