



高周波振幅変調波に対するしびれ感を低減する 振動提示条件の評価

赤井峻真¹⁾, 高橋哲史¹⁾, 昆陽雅司¹⁾

Ryoma AKAI, Akifumi TAKAHASHI, and Masashi KONYO

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, konyo@tohoku.ac.jp)

概要: 連続した高周波振幅変調波を身体へ提示すると、しばしばしびれ感が生じ、不快に感じることもある。そこで我々は、このしびれ感を軽減する手法として、振幅変調波生成時にそのキャリア振幅を 2 周期の内 1 周期を低減させる手法を提案した。本研究では、被験者実験を通して提案手法における最適な振幅の低減率を調査した。また、提案手法を用いた場合と、波形全体の振幅を一様に低減させた場合とで、振動の知覚強度を比較検証した。その結果、提案手法の方が主観的な知覚強度が大きい傾向がみられた。

キーワード: 触覚, 振動触覚, しびれ感

1. はじめに

近年、振動を用いた触覚提示技術は、映像コンテンツにおける臨場感の向上や、遠隔地への体感伝達など、多様な分野で注目を集めている。我々の研究グループでも、スポーツの技能習熟支援を目的として身体に作用する力を振動で表現する手法 [1] や、VR コントローラにおける写実的な振動フィードバック手法 [2] の開発など、体感を効果的に表現するための振動活用に取り組んできた。

しかし、デジタルデバイスを用いて振動刺激を提示する際、日常的な物理現象とは異なる不自然な体感が生じる場合がある。特に、高周波成分を含む振動波形を人工的に生成した場合には、「しびれ感」と形容される特有の知覚が生じ、長時間の使用が不快感をもたらすという課題があった。

この課題に対し、我々は先に、高周波振動に起因するしびれ感を低減する新たな波形生成手法を提案した [3]。本手法は、振動アクチュエータの共振周波数において振幅変調波のキャリア振幅を周期的に減衰させるもので、元の波形が持つ知覚的特徴を維持しつつ、しびれ感のみを選択的に低減できる可能性が示唆されている。

そこで本研究では、提案手法における最適な振幅の減衰率を明らかにすることを目的として、被験者実験を行う。さらに、提案手法の有効性を検証するため、本手法を適用した振動と、振幅変調波のキャリア振幅を一様に低減させた場合との振動の知覚強度を比較する。

2. 提案手法

本研究で用いる手法は、我々が前報 [3] で提案した、振幅変調 (AM) 波のキャリア振幅を周期的に減衰させることでしびれ感を低減する手法である。本稿では、このキャリア振幅を周期的に減衰させた波形を、Periodic Attenuated

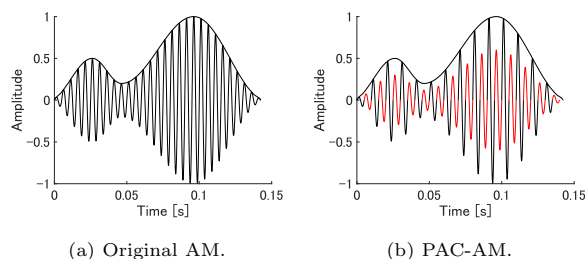


図 1: An example AM and a PAC-AM.

Carrier AM (PAC-AM) と呼称する。例を図 1 に示す。

本手法は、しびれ感の発生原因に関する以下の仮説に基づいている。人工的な振動提示で多用される連続的な高周波キャリア波は、皮膚に過剰な振動エネルギーを蓄積させ、組織の意図しない共振を引き起こす。この現象が、「しびれ感」と形容される不快な知覚の要因であると我々は考える。指先の振動解析により、皮膚に共振モードがあることが発見されている [4]。

この仮説に基づき、本手法では入力波形のキャリア波形の振幅を 1 周期ごとに減衰させる。この処理は、皮膚へのエネルギー入力を抑制し、過剰なエネルギー蓄積とそれに伴う共振を防ぐことを目的とする。これにより、元の AM 波が持つ知覚的印象を大きく損なうことなく、しびれ感のみを選択的に低減できると期待される。

前報 [3] では、振動アクチュエータと指の皮膚の運動を 2 自由度の振動系により近似し、皮膚の変位を解析した。アクチュエータの共振周波数である 142 Hz において、低減率 40 % の PAC-AM を入力したところ、皮膚の変位の低減率は 3 % と変動がほとんどなくなっていることが確認された。

また、PAC-AM のキャリア波の周波数と低減率を変えて入力したときのアクチュエータの出力加速度を計測した。共

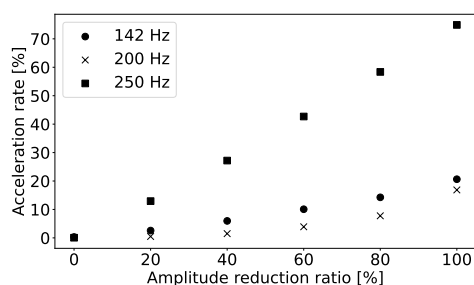


図 2: Relationship between amplitude attenuation rate of input wave and output acceleration ratio

振周波数の 142 Hz とそれ以外の 200 Hz, 250 Hz を用いた。図 2 に計測結果を示す。250 Hz では低減率を上げるにつれて、出力加速度の割合が顕著に増大することが観察された。一方で、142 Hz と 200 Hz は同じような傾向を示し、250 Hz ほど増大しなかった。元の波形の感触を保つためには、共振周波数付近の周波数を適用することが有効であると考えられた。

3. 実験

3.1 概要

本研究では、提案手法の有効性を検証するため、2つの目的を以て主観評価実験を行った。第1の目的は、提案手法 PAC-AM においてしびれ感を効果的に抑制できる低減率を調査することである。第2の目的は、PAC-AM を適用した振動と、キャリア振幅を一律に低減させた振動とで、知覚強度を比較評価することである。被験者は 20 代の男性 6 名であった。

振動提示には、アクチュエータ（アクーヴ・ラボ, Vp210）を用いた。本アクチュエータの共振周波数は 142 Hz である。刺激の生成および提示は、PC 上で生成した波形を USB オーディオインターフェース（ZOOM, AMS-44）およびオーディオアンプ（Syntacts, v3.1）を介してアクチュエータに出力した。実験参加者には、外部からの聴覚的影響を遮断するため、イヤホンからピンクノイズを提示した。また、疲労の影響を避けるため、各実験セッションの間に 2 分間の休憩を設けた。

本実験では、以下の 4 種類の振幅変調波を評価刺激として用いた。

- 基準刺激 A: 一定振幅のキャリア波を持つ振幅変調波。キャリア周波数はアクチュエータの共振周波数である 142 Hz、刺激長は 0.5 秒とした。デジタル信号の振幅を 1.0 とし、アクチュエータの出力ピーク加速度が 150 m/s^2 となるように設定した。この刺激はしびれ感を生じさせることが確認されている。
- 提案手法刺激 B (PAC-AM): 基準刺激 A に対して提案手法 (PAC-AM) を適用した振動。キャリア振幅の減衰率は、後述する心理物理実験（階段法）により、各参加者の「しびれ感の知覚閾値」となるように個別に調整した。

- ピーク加速度統制刺激 C: 刺激 B と、アクチュエータの出力加速度のピークが等しくなるように調整された、一定振幅のキャリア波を持つ振幅変調波。
- 振幅調整刺激 D: 基準刺激 A のキャリア振幅全体を一律に低減させた振動。振幅の大きさは、刺激 B と同様に階段法を用い、各参加者の「しびれ感の知覚閾値」となるように個別に調整した。

実験は 2 つの段階で実施した。

まず、刺激 B における最適な「低減率」と、刺激 D における最適な「振幅」を決定するため、心理物理学的測定法の一つである 1-up-3-down 階段法を用いた。参加者には刺激を 1 回ずつ提示し、「しびれ感を感じるか、感じないか」を強制二択法で回答させた。「感じる」と 3 回連続で回答した場合に刺激の変化量（減衰率または振幅）をしびれ感が弱まる方向に 1 ステップ変化させ、「感じない」と回答した場合はしびれ感が強まる方向に 1 ステップ変化させた。この手続きにより、しびれ感を 79.4 % の確率で知覚する閾値を推定できる。試行は、刺激の変化方向の反転が 6 回生じるまで継続し、平均値をその試行の閾値とした。各参加者に対し、刺激 B と D それぞれについて 3 試行実施し、その平均値を個人の閾値として採用した。

次に、段階 1 で決定された各参加者の閾値を用いて生成した刺激 A, B, C, D の 4 種類について、知覚強度の評価を行った。評価には一対比較法を用い、4 つの刺激から 2 つ（全 6 組）をランダムな順序で提示した。参加者は「どちらの振動がより強く感じたか」を回答した。各組について、各参加者 3 回ずつ評価を行った。

3.2 結果

階段法により測定した、各参加者のしびれ感の知覚閾値（刺激 B の減衰率、刺激 D の振幅）を表 1 に示す。また、一例として参加者 f について生成された 4 種の刺激波形（A, B, C, D）を図 3 に示す。閾値には参加者間で個人差が見られた。

しびれ感が生じると判断された閾値における刺激のピーク加速度を比較した結果、全参加者（6 名）において、提案手法である刺激 B が振幅調整刺激 D を上回った。これは、PAC-AM を用いることで、同程度のしびれ感を誘発するにもかかわらず、より大きな物理的加速度を持つ振動を提示可能であることを示唆している。

4 種の刺激（A, B, C, D）間で行った知覚強度の一対比較の結果を、心理尺度として図 4 に示す。また、各刺激の強度を強いと答えた割合を図 5 に示す。刺激 A, B, C, D の順に知覚強度が大きい結果となった。刺激 D は他の刺激と比べて顕著に知覚強度が小さい。刺激 A, B, C の間で知覚強度に大きな差が見られなかった。

刺激 A と刺激 C はともにしびれ感が生じる刺激であり、振幅は刺激 C の方が小さい。しかし、刺激 A の方が強く感じると回答された割合は 55.6 % であった。

しびれ感の知覚閾値である刺激 B（PAC-AM）と刺激 D（振幅調整）を比較した結果、刺激 B の方が強く感じると回

表 1: Threshold for numbness.

	B		D	
被験者	低減率 [%]	加速度 [m/s ²]	振幅	加速度 [m/s ²]
a	6.5	145	0.85	127
b	10	143	0.88	131
c	15	140	0.90	134
d	15	140	0.92	137
e	18	139	0.83	123
f	32	130	0.87	129

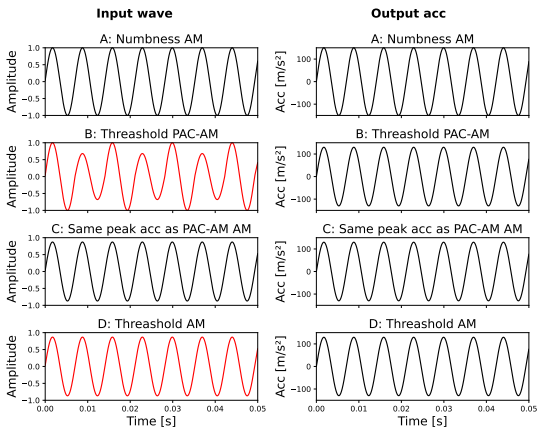


図 3: Input wave and output acc of a subject. The red line means that the wave has the threshold numbness sensation.

答された割合は 61 % を占めた。このことから、しびれ感を低減させたとき、提案手法の方がより強い知覚強度を生成する傾向が確認された。

次に、ピーク加速度を等しく設定した刺激 B (PAC-AM) と刺激 C (ピーク加速度統制刺激) を比較した。この場合においても、刺激 B の方が強く感じると回答された割合は 61 % であった。

3.3 考察

振幅以外は同じ条件で刺激 C の方が振幅が小さいが、刺激 A と刺激 C の比較で、刺激 A の方が強く感じると回答された割合は 55.6 % であった。この結果から、被験者が知覚強度の区別ができていないことが示唆される。しびれ感の閾値まで振幅を下げた刺激 D は、刺激 A, C と比べて知覚強度が小さいと回答されたため、しびれ感が知覚強度の判別に影響を与えている可能性がある。

PAC-AM は、キャリア振幅を周期的に減衰させることで

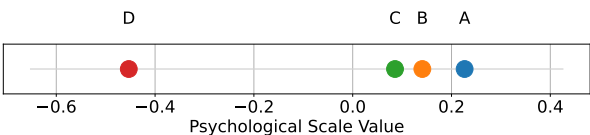


図 4: Psychological scale values of vibratory intensities estimated from the result of comparing the intensities.

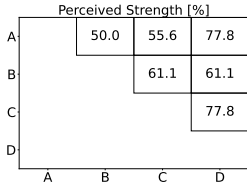


図 5: The result of comparing the intensities. The values show the ratio of a stimulus having reported stronger than the other.

「しびれ感」を低減しつつ、キャリア振幅全体を一様に低減させるよりも、知覚強度を比較的高く維持できる傾向があることが示された。具体的には、同程度のしびれ感の閾値において、PAC-AM の方が振幅調整手法よりも高いピーク加速度を実現でき、知覚強度においても優位性がある傾向を示した。この結果は、エネルギーの時間的分布を工夫することで、振動刺激の不快感と強度をトレードオフせずに制御できる可能性を示唆する。

閾値に対して参加者間で個人差が観察されたことから、皮膚の特性、アクチュエータの把持力などが影響している可能性がある。

4. むすび

本研究では、高周波振幅変調波に対する「しびれ感」を低減するための新たな振動提示手法として、キャリア振幅を周期的に減衰させる PAC-AM (Periodic Attenuated Carrier AM) を評価した。主観評価実験の結果、PAC-AM はキャリア振幅を一様に低減させる手法と比較して、しびれ感の閾値において、アクチュエータの出力加速度が大きかった。主観的な知覚強度も大きい傾向が確認された。また、しびれ感が生じていて振幅のみ異なる AM の知覚強度を比較したところ、同程度の知覚強度であった。しびれ感が知覚強度の判別に影響を及ぼす可能性が示唆された。今後は、知覚強度の判別ができていなかった原因を検証する。

参考文献

- [1] 赤井峻真, 昆陽雅司, 田所諭, “映像に基づく運動体感の自動生成に関する研究-第 4 報: 力推定に基づく振動刺激による努力感の表現-”, 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2024
- [2] D. Igarashi, M. Konyo, and S. Tadokoro, “Reproducing Realistic Haptic Feedback Using a Sensory Equivalent Vibration Conversion for a Commercial VR Controller,” *The 31st International Display Workshops*, 2024
- [3] 赤井峻真, 昆陽雅司, “高周波振動によるしびれを低減する振動フィードバック手法の検討”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2025
- [4] G. Serhat, and K. J. Kuchenbecker, “Free and forced vibration modes of the human fingertip,” *Applied Sciences*, vol.11, no.12, p.5709, 2021