

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18047

研究課題名(和文) 触覚通信の基盤：通信環境が多次元触感に及ぼす影響の分析と設計手法の提案

研究課題名(英文) Study on Influence of Communication Environment on Multidimensional Tactile Perception

研究代表者

永野 光 (Nagano, Hikaru)

東北大学・情報科学研究科・特任助教(研究)

研究者番号：70758127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高周波成分を含む振動触覚情報を遠隔伝送しロボットの遠隔作業・操縦を支援するため、本研究課題では、計測振動および劣化振動の関係を定量化し、遠隔伝送に適用可能な振動情報の変調手法を構築した。初年度は、衝突などによって発生する非周期的な振動を対象に、衝突振動を表現するパラメータである減衰係数の丁度可知差異を調査した。次年度は、摩擦などによって発生する周期的な振動としてAM変調波を用いて、生振動と劣化振動の知覚的な等価度を評価した。その結果、生振動のエンベロープ周期の1/5以上の解像度を保持した劣化振動であれば、知覚的な差異は生じないことが示された。

研究成果の概要(英文)：For high-frequency vibrotactile transmission system to support remote robot operation, we quantified the relation between measurement vibration and deterioration vibration and showed the modulation method of vibration information. In the first year, we investigated Just Noticeable Difference of the time constant in the decaying sinusoidal vibration model, which is one reasonable factor relating to discrimination of tapped materials. In the second year, we introduced the time-segmented intensity-based perception model of high frequency vibration. Using AM vibration, it was shown that perceptual difference does not occur if the degradation vibration holds the resolution of 1/5 or more of the envelope cycle of the raw vibration.

研究分野：ハプティクス

キーワード：振動触覚ディスプレイ 触感

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットの遠隔作業・操縦の支援を目的として触覚情報の伝送技術に関する研究が数多く報告されている。特に、力覚呈示に関しては、マスタースレーブ式マニピュレータを用いた研究例を始め、数多く研究開発されている。それに対し、摩擦や衝突の際に筐体表面に発生する振動情報のような高周波成分を含む時間的に高解像度な触覚情報の伝送技術の研究が通信技術・信号処理技術の進歩とともに活発になりつつあるのは近年のことである。

申請者はこれまでに、遠隔操縦ロボットに振動触覚センサおよび振動触覚ディスプレイを適用し、操縦性に関するパフォーマンスの向上を確認している(引用文献)。申請者の例を含むいくつかの研究例によって、ロボット遠隔操縦における振動触覚情報の遠隔伝送・通信の有効性の一端は示されているものの、実際の通信環境における課題は取り組まれていない。

高周波成分を含む触覚情報の遠隔通信における重要な課題は、遅延やパケット損失などの通信環境の劣化が主観的な評価である触感(ヒトの知覚)にいかにか影響するののかという特性が明らかでない点である。また、触感の劣化を補償するための信号処理手法や、触感を維持するための手法も打ち出せていない。

そこで、本課題では、劣化のない生の振動触覚情報と通信環境による劣化を模擬した振動触覚情報の知覚的な差異を心理物理実験によって調査することで、振動情報のいかなる要素がヒトの触覚に影響するのかを明らかにする。また、その知見に基づき効率的に触覚情報の変調・伝送する手法を構築し、ロボットの遠隔操縦支援システムに適用する。

### 2. 研究の目的

初年度は、衝突現象などによって発生する過渡的・非周期的な振動情報を対象とした。衝突に伴う過渡的な振動情報は、振幅、内包周波数、減衰係数の3種のパラメータによって特徴づけられる減衰正弦波によって表現されることが一般的である。この減衰正弦波を用いて、減衰係数の丁度可知差異を調査することで、どの程度の減衰係数の変化であればヒトは知覚できるのかを明確にする。この過程で得られる成果は効率的な振動触覚情報の圧縮手法などに応用可能であると期待できる。

次年度は、摩擦現象などによって発生する周期的な振動情報としてAM振動を対象とした。これまでに、エンベロープが変動しない(エンベロープ周波数が0 Hzである)高周波な振動情報においては、キャリア周波数が変化したとしても、それに応じて振動振幅が変化しエネルギーが変化しない条件であれば、ヒトは振動の違いを知覚できないことが示

されている(intensity model)。しかし、エンベロープが変動する(エンベロープ周波数が0 Hzでない)AM振動のような高周波振動情報に対しては、この知見は適用できない。そこで、従来のモデル(intensity model)を拡張したモデルを提案し、基準となるAM振動とエンベロープの時間的解像度が低下した劣化振動の知覚的な等価度合を評価し、知覚的な等価性を維持するために必要な要素を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 衝突振動における減衰係数の丁度可知差異の調査

減衰係数の丁度可知差異を求めるため上下法を採用した。5名の実験参加者は、インタールをおいて提示される3種の刺激を体験する。3種うちいずれか1種(比較刺激)は基準刺激とは異なる刺激であり、参加者は3種のうち1種を回答する。基準刺激ごとに上弁別閾および下弁別閾を求める。実験環境を図1に示す。振動刺激はボイスコイルアクチュエータによって再生する。

基準刺激は5種の内包周波数(150, 250, 500, 800, 1000 Hz)を有する減衰正弦波であり、減衰係数を表わす時定数はいずれも50 msである。図2に実験刺激の一例を示す。比較刺激は内包周波数および振幅は変化せず時定数のみが変化する。

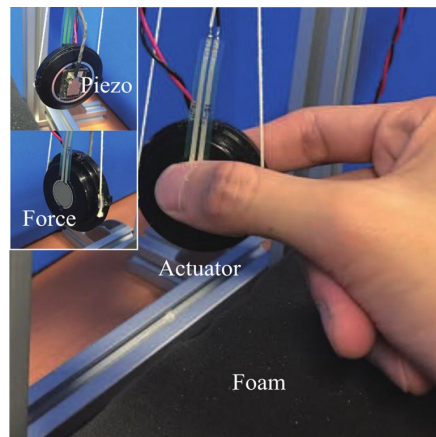


図1 実験環境：ボイスコイルアクチュエータを用いた振動刺激の提示

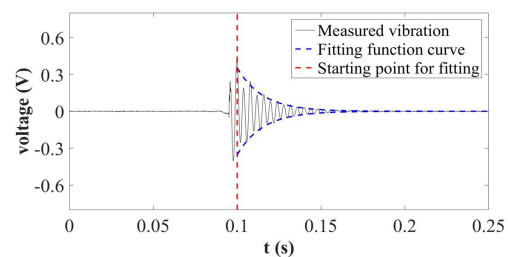


図2 実験刺激の一例

(2) AM 振動においてエンベロープ解像度が知覚的差異に及ぼす影響の調査

周期的な振動情報として AM 振動に着目する。高周波振動に対するヒトの知覚を表現する intensity model と呼ばれるモデルは、エンベロープ周波数が 0 Hz である高周波な振動情報においては、キャリア周波数が変化したとしてもエネルギーが変化しない場合、ヒトは振動の違いを知覚できないことを示していた。我々はこのモデルに対し時間的に等間隔に分割された処理区間を導入し、区間ごとのエネルギーが変化しない図 3 のような刺激であれば、ヒトは刺激の違いを知覚しないのではないかと考えた。本研究では、区間の長さの違いがどの程度ヒトの知覚的等価性に影響を及ぼすのかを実験を通じて調査する。

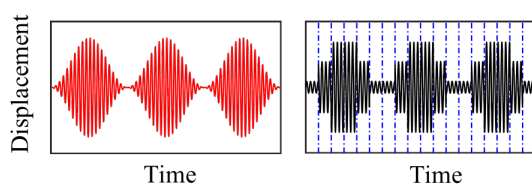


図 3 AM 変調振動と提案手法によって変調された振動の一例

実験では、参加者は、3 種の刺激を体験する。3 種のうち、2 種は劣化のない振動であり、1 種は我々のモデルによって劣化した変調された振動である。参加者は、3 種のうちいずれか 1 種を異なる刺激として回答する。実験刺激の条件として、エンベロープ周波数は 15, 30, 45 Hz の 3 種、キャリア周波数は 300, 600 Hz の 2 種とし、区間の長さはエンベロープの波長を基準とする比で表現する 6 種 (original (生波形), 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2) とした。振動刺激は、図 4 に示すようにピエゾアクチュエータを用いて、示指指腹部に提示される。

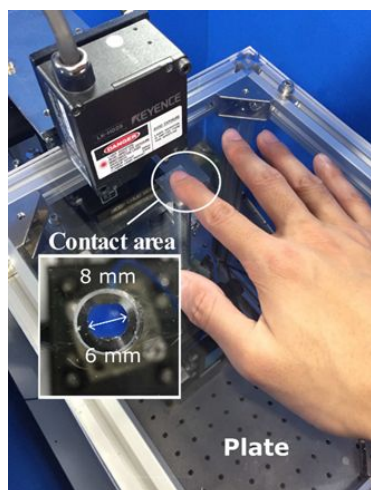


図 4 実験環境：ピエゾアクチュエータを用いた高周波振動の提示

4. 研究成果

(1) 衝突振動における減衰係数の丁度可知差異の調査

実験に得られた減衰係数の丁度可知差異 (上弁別閾および下弁別閾) を図 5 に示す。

いずれの内包周波数においても、減衰係数の変化を参加者が知覚していることが示され、衝突時の振動のような過渡的な振動を再現する上で、減衰係数を維持する必要があることが分かる。また、内包周波数が異なる場合、周波数が高いほど、減衰係数の違いに気づきにくいことも示された。

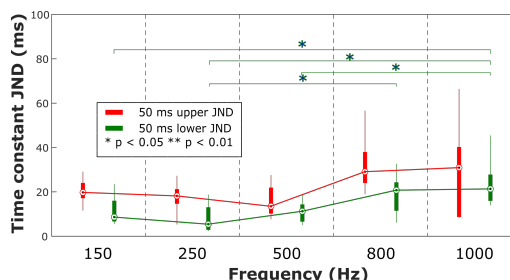


図 5 衝突振動における減衰係数の丁度可知差異

(2) AM 振動においてエンベロープ解像度が知覚的差異に及ぼす影響の調査

基準刺激の条件ごとの弁別確率を図 6 に示す。弁別確率は 3 種のうち劣化した 1 種を正しく回答した確率であり、チャンスレベルは 1/3 である。

すべての条件においては、区間比が 1/2 の刺激は異なると判断され、基準刺激との間に有意な知覚的差異があることが示された。

区間比が 1/3 以下の条件においては、多くの場合、基準刺激との有意な知覚的差異は示されなかった。

以上の結果は、ヒトは高周波振動におけるエンベロープを知覚しており、従来のヒトの知覚モデル (intensity model) では説明できないこの現象も、我々の提案するモデルによって解釈できることが分かった。

また、エンベロープの時間的解像度は必ずしも高い必要はないことも示唆された。区間比が 1/3 の条件は、エンベロープの変化が 2 値で表現されているに過ぎないものの、多くの条件でヒトは基準刺激との間に差異を知覚しなかった。

(3) 高周波振動を遠隔伝送するシステムへの応用

遠隔操縦ロボットの操縦支援を目的に、これまでの知見を応用した高周波振動を遠隔伝送するシステムを開発した。

ロボット筐体の高周波振動は非常に高いキャリア周波数を有しており、そのまま伝送・提示した場合、ヒトは知覚し難い。そこで、エンベロープ周波数は維持しつつ、内包するキャリア周波数をヒトの知覚し易い帯



域の周波数に変更することで、効果的に操縦者に伝達する方法を構築した。

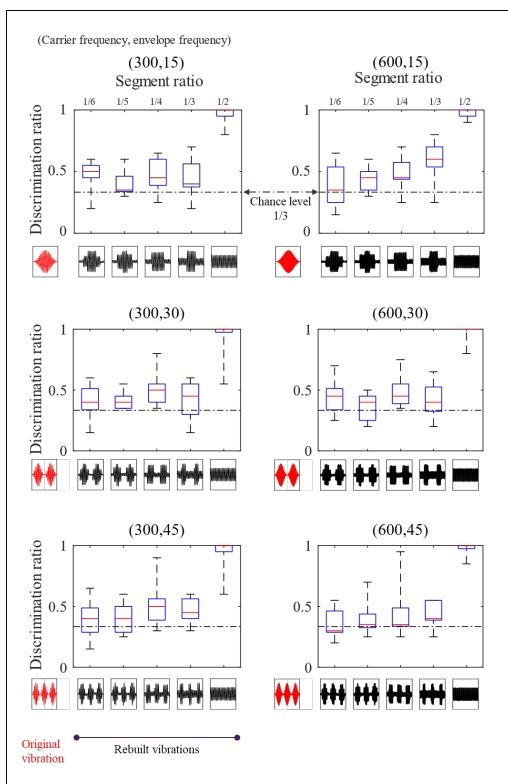


図6 基準刺激の条件ごとの弁別確率

#### < 引用文献 >

Takahito Funamizu, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, Visuo-haptic transmission of contact information improve operation of Active Scope Camera, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016, 1126-1132

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計8件)

Nan Cao, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, Shogo Okamoto, Satoshi Tadokoro, A Pilot Study: Introduction of Time-Domain Segment to Intensity-Based Perception Model of High-Frequency Vibration, International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, 2018, 321-332

竹之内 栄人, 曹 南, 永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭, 遠隔操縦ロボット操縦支援のための高周波振動変調手法, 第18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, 2017, 3B5-12

Hideto Takenouchi, Cao Nan, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, Extracting haptic information from high-frequency vibratory signals measured on a remote robot to transmit collisions with environments, 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2017, 968-973

竹之内 栄人, 曹 南, 永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭, 遠隔操縦ロボットとの触覚共有のための筐体に生じる高周波振動の変調伝達, 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2017, 2D2-03

Nan Cao, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, Shogo Okamoto, Satoshi Tadokoro, Envelope effect study on collision vibration perception through investigating just noticeable difference of time constant, IEEE World Haptics Conference, 2017, 528-533

Nan Cao, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, Time Constant Discrimination of Collision Vibration, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017, 1P1-N05

竹之内 栄人, 曹 南, 永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭, 建設ロボットの遠隔操縦支援のための高周波振動変調による接触情報の提示, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017, 2A1-P07

永野 光, 曹 南, 昆陽 雅司, 田所 諭, 触覚通信に向けた多次元空間での触覚評価, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2016

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

永野 光 (NAGANO Hikaru)

東北大学・大学院情報科学研究科・特任助教 (研究)

研究者番号：70758127