



可視光通信による触感再生のためのシステム同定

北川湧麻¹⁾, 吉元俊輔¹⁾, 黒田嘉宏¹⁾, 大城理¹⁾

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, ykitagawa@bpe.es.osaka-u.ac.jp)

概要: 高品質な触感提示技術は仮想環境における高臨場感な体験や高精度な遠隔操作に有用である。本研究では身体への広範囲、高密度な触感提示を小型な装置で行うため、プロジェクタを用いた可視光通信により様々な周波数の振動を再生するシステムを開発する。触感の表現に必要な振動刺激を適切に出力するため、本稿では提案システムの同定を行い、再生可能な振動の周波数帯域を明らかにする。

キーワード: ハプティクス, 触感再生, 可視光通信, プロジェクタ光, 振動刺激

1. 序論

皮膚に存在する機械受容器は身体と物体の接触に伴う物理現象を検出し、操作の状態、物体の品質、体験の印象など多様な情報伝達に関わっている。触覚の中でも物体の状態や質を表す触感情報は、皮膚と対象物の接触によって生じる様々な周波数の振動が機械受容器を刺激することで生起される。近年では、遠隔操作における触感情報や、仮想環境における質感・物性、インタフェースの操作情報など、機器による様々な触覚情報の提示が試みられている。

触覚提示を行う主要な方法としては、振動を用いる方法 [1]、集束超音波を用いる方法 [2]、電気刺激を用いる方法 [3] が存在する。身体の様々な部位や掌全体、指腹部で物体をなぞる動作に伴う触感を想定すると、様々な周波数の振動が皮膚の広範囲かつ高密度な領域に生じる。振動刺激の高密度化には刺激要素の小型化が必須であるが、広範囲、つまり多チャンネルな刺激においては通信や信号生成要素の複雑化が課題となり、トレード・オフの関係にある。したがって、触覚提示システムの時空間的性能に課題があり、身体の様々な部位に触感を生成することは難しい。

広範囲かつ高密度に刺激を提示するため、プロジェクタを用いた可視光通信により、刺激素子の簡素化と多チャンネル化を可能にする手法が提案されている [4]。映像に対して遅延が少ない触覚刺激が可能であるが、振動子の駆動に一定の周波数の信号源が用いられており、任意の周波数の振動は再現されていない。また、液晶モニタの光により形状記憶合金を駆動する方法 [5] や、LED の光により Liquid Crystal Elastomers (LCE) を駆動する方法 [6] も提案されているが、時間応答性に課題がある。したがって、空間的性能に優れた可視光通信において、時間的性能を向上させる必要がある。

本研究では、プロジェクタ光を直接振動子の駆動信号として用いるとともに、Digital Light Processing (DLP) 方式の時分割の色表現を活用することで、時間的性能の向

上を目指す。特に、機械受容器の感度が高い 10-200 Hz [7] において任意の周波数の振動を発生させることを目標とする。本稿では、プロジェクタを用いた可視光駆動型の振動刺激システムのモデル化を行い、二つの要素に分けて入出力関係を調べることでシステム同定を行った結果を示す。さらに、その結果に基づき、提案システムで提示可能な周波数帯域について考察する。

2. 可視光通信による触感再生システム

本研究では、プロジェクタを用いた可視光通信により、振動子を任意の周波数で駆動する手法を提案する。以下では提案システムのモデル化を行うことで振動の伝達特性を明らかにする。

2.1 システムの概要

提案するシステムの構成を図 1 に示す。提案システムは、PC、プロジェクタ、光検出器 (フォトトランジスタ)、電流増幅器および振動子で構成される。以降、PC とプロジェクタおよび光検出器の部分を可視光通信システムとし、電流増幅器および振動子の部分を刺激要素と呼称する。PC においてプロジェクタの各画素の輝度値が入力されると、その輝度に対応した照度の光がプロジェクタから光検出器に投影される。光検出器では照度に応じて電流が流れ、増幅された電流により振動子が駆動される。振動子に電磁式のリニア振動子を用いることを想定すると、電流に応じた可動子の変位が得られる。

システム全体の伝達関数 $G(j\omega)$ は可視光通信システムの伝達関数 $G_{\text{opt}}(j\omega)$ と刺激要素の伝達関数 $G_{\text{vib}}(j\omega)$ を用いて式 (1) で表される。

$$G(j\omega) = G_{\text{opt}}(j\omega)G_{\text{vib}}(j\omega) \quad (1)$$

ただし ω は角周波数である。触感を再生する際は、先行研究 [1] のように、記録した振動データに伝達関数の逆関数を適用し、周波数に応じた振幅補償を施したデータを利用することで高品質な刺激生成を可能にする。

Yuma KITAGAWA, Shunsuke YOSHIMOTO,
Yoshihiro KURODA, and Osamu OSHIRO

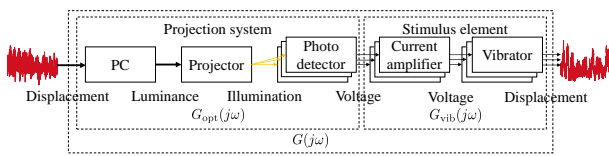


図 1: 提案するシステムの構成

2.2 可視光通信システム

提案システムでは DLP プロジェクタの投影光を振動子の駆動に用いる。DLP 方式では、光源の正面に配置したカラーホイールを高速回転させ、三原色の光を時分割で、マイクロミラーに対して照射する。画素数分のマイクロミラーの角度を制御する装置である Digital Mirror Device (DMD) は、三原色それぞれに対して光の出力を ON/OFF 制御する。人間が視覚的に知覚できない速さで色を切り替えることにより、残像による色の合成を利用して任意の色を表現することができる。図 2 に DLP プロジェクタを用いた駆動信号の生成方法を示す。

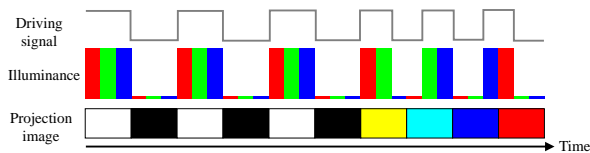


図 2: DLP プロジェクタによる駆動信号の生成

図 2 はカラーフィルタが三原色で構成され、各色の割合が均一である場合を示しているが、実際には中間色も使用され、割合も不均一である場合が多い。

可視光通信システムは一定の時間間隔で映像更新を行うことから、サンプルホールドの機能を有すると考えられる。また、PC では入力変位を輝度に線形変換し、プロジェクタからは輝度値に比例して照度が得られること、光検出器からは照度に比例して出力電圧が得られると仮定すると、可視光通信システムの伝達関数 $G_{\text{opt}}(j\omega)$ は式 (2) で表すことができる。

$$G_{\text{opt}}(j\omega) = \frac{v}{x_i} = \frac{\beta(1 - e^{-j\omega T})}{j\omega T} \quad (2)$$

ただし x_i は入力変位、 β は定数、 T は可視光通信の更新に要する時間である。

2.3 刺激要素

電磁式のリニア振動子は交流信号を入力することで振動を生じさせることができる。提案システムでは、投影光が時間変化し、交流信号として利用される。ただし、光検出器の出力電流が小さいことから、トランジスタを用いて電流増幅した信号により振動子を駆動する。

リニア振動子は、図 3 に示すように、電気的モデル (RL 回路) と電磁石モデル、機械的モデル (質量-バネ-ダンパ系) の三つの要素が連結した構成として考えられる。 v を印加電

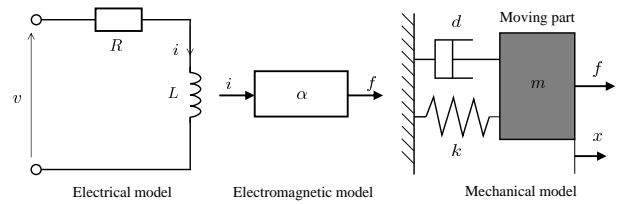


図 3: リニア振動子のモデル

圧、 i を電流、 f を力、 x_o を出力変位とすると、各伝達関数は式 (3)-(5) で表される。

$$\frac{i}{v} = \frac{1}{j\omega L + R} \quad (3)$$

$$f = \alpha i \quad (4)$$

$$\frac{x_o}{f} = \frac{1}{-\omega^2 m + j\omega b + k} \quad (5)$$

ただし、 m は可動子の質量、 b は粘性、 k はバネ定数、 L はインダクタンス、 R は抵抗を表す。また、 α はコイルの半径と巻き数、永久磁石の磁気量によって決まる定数である。式 (3)-(5) より、リニアアクチュエータの伝達関数は式 (6) で与えられる。

$$G_{\text{vib}}(j\omega) = \frac{x_o}{v} = \frac{\alpha}{(-\omega^2 m + j\omega b + k)(j\omega L + R)} \quad (6)$$

3. システム同定と周波数帯域

開発した装置を用いて触感情報を適切に再生するためには、伝達関数のパラメータを推定し、逆関数を用いて再生データを補正する必要がある。また、提案システムにおいて提示可能な周波数帯域を明らかにすることは有用である。本節では、システムの実装と、パラメータ推定を行った結果について述べ、可視光通信による触感再生で表現可能な周波数帯域について考察する。

3.1 実験システムの実装

実装した実験機器の様子を図 4 に示す。皮膚に振動分布を再現するための多チャンネル化を想定し、刺激要素は 3×4 個並列に接続されている。本実験では、リニア振動子に日本電産コバル LD14-002 を、DLP プロジェクタに NEC NP-V332WJD を用いた。なお、プロジェクタは最大 120 Hz のリフレッシュレートを有しており、色の時分割制御を利用することで最大更新頻度 240 Hz の可視光通信を実現できることを確認している。プロジェクタへの映像送信は OpenGL を用いて実装した。

システム同定を行うためには、個々の要素の入出力信号を計測し、モデルをフィッティングすることでパラメータ推定を行う必要がある。本実験では振動子の可動部の変位を出力とし、変位計 (OMRON Z4D-F04)、電源 (ISO-TECH IPS 303DD) を利用し、A/D 変換器 (National Instruments USB-6216) を用いて標準化周波数は 2 kHz でコンピュータに取り込み可能とした。以下では、投影システムと刺激要素に分けてシステム同定の方法と結果を述べる。

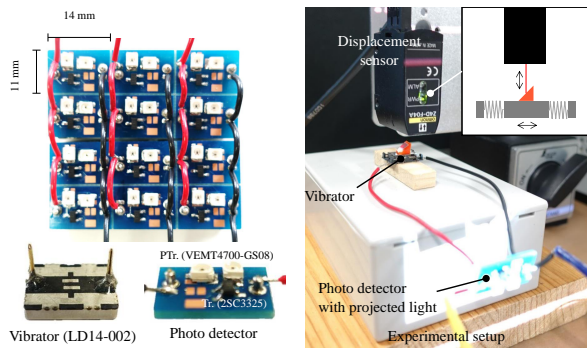


図 4: 実験機器の様子

3.2 投影システムの入出力関係

3.2.1 実験方法

入力変位とプロジェクタの輝度値の関係を対応付けるために、プロジェクタ光の輝度と可動子の変位振幅の関係を調査した。特に、更新頻度 $T = 1/240$ s であることに注意し、サンプルホールドによる減衰が十分小さい 10 Hz の振動を基準とした計測を行った。実験では、光検出回路との距離が 0.1 m の地点にプロジェクタを設置し、5 s の間に輝度が最小値から最大値まで線形に変化する映像を投影した。ただし、輝度が 0 のフレームと輝度が値を有するフレームが 20 fps で交互に切り替得ることで 10 Hz の振動を実現した。

3.2.2 実験結果および考察

実験結果を図 5 に示す。結果より、1 s から 5 s の間で変位振幅が線形的に増加していることが確認できる。DLP 方式では照度が輝度に比例せず、点灯時間と消灯時間の比率によって輝度が調節される。したがって、フォトトランジスタの照度-コレクタ電流特性が影響せず、入出力関係はプロジェクタの輝度と照度によって決まると考えられる。

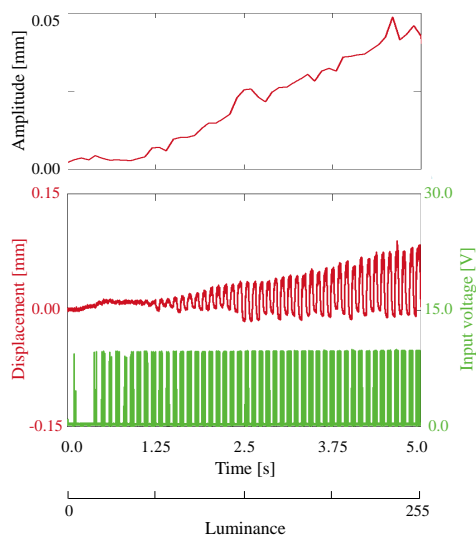


図 5: DLP 方式における輝度と振幅の関係

3.3 刺激要素の周波数特性

3.3.1 実験方法

モデルにより示した通り、刺激要素は三次系のシステムであり、周波数によって振幅が変化する。実験では、信号生成器 (TEXIO FG-281) を用いて振動子に対して 10-200 Hz の矩形波を入力し、印加される電圧 v と振動子の変位 x_o を記録した。刺激要素の伝達関数 $G_{\text{vib}}(j\omega)$ におけるパラメータは、ゲイン線図のデータに対し、モデルをフィッティングすることにより推定した。フィッティングを単純化するために、 $Y = |G(j\omega)|^{-2}$, $X = \omega^2$ と置くことで、次式における係数 A, B, C, D を求め、各パラメータを算出した。

$$Y = AX^3 + BX^2 + CX + D \quad (7)$$

ただし、 $A = (mL/\alpha)^2$, $B = ((mR)^2 + (bL)^2 - 2mkL^2)/\alpha^2$, $C = ((bR)^2 + (kL)^2 - 2mkR^2)/\alpha^2$, $D = (kR/\alpha)^2$ である。すべてのパラメータを一意に定めることは難しいことから、 R, L についてはデジタルマルチメータ (SANWA LCR700) を用いて、 m を秤を用いて実測することで、 α, k, b を得た。

3.3.2 実験結果および考察

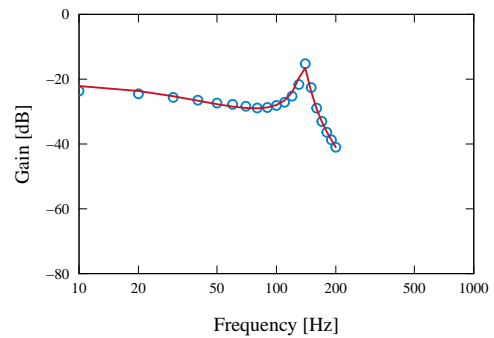


図 6: 振動子のゲインと近似曲線

図 6 に振動子のゲインとフィッティングによって得られた近似曲線を示す。モデルが実験データに適切に当てはまることから、モデルが妥当であったことが示唆される。また、表 1 に計測・算出されたパラメータの値を示す。

表 1: 各パラメータの値

Parameter	Unit	Value	Method
A	-	1.1×10^{-14}	Estimation
B	-	-1.7×10^{-8}	Estimation
C	-	6.1×10^{-3}	Estimation
D	-	1.4×10^2	Estimation
L	H	2.4×10^4	Measurement
R	Ω	2.6×10^1	Measurement
m	kg	9.1×10^{-4}	Measurement
k	N/m	9.4×10^{-1}	Estimation
b	N·s/m	4.1×10^{-2}	Estimation
α	Wb/m	2.0	Estimation

3.4 触感再生システムの周波数帯域

3.4.1 実験方法

本実験では、投影システムのパラメータを同定するとともに、提案システムにより表現可能な周波数帯域を明らかにする。まず、プロジェクタを用いた可視光通信において、10, 20, 30, 40, 60, 120 Hz の周波数で点滅する映像を投影した。各周波数について振動子の変位を計測し、入力変位に対する出力変位の比を求め、システム全体のゲインを取得した。次に、投影システムの伝達関数 $G_{\text{opt}}(j\omega)$ におけるパラメータ β をシステム全体のゲインと振動子のゲインの関係から近似的に求めた。 β の近似的な算出方法としては次式を用いた。

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|G(j\omega_i)|}{|G_{\text{vib}}(j\omega_i)|} \quad (8)$$

ただし、上式は $\omega_i < \pi/T$ を想定しており、 N は計測点の数を表す。最後に、システム全体のゲインと、システム同定によって得たゲインを比較することでモデルの妥当性および表現可能な周波数帯域を評価した。

3.4.2 実験結果および考察

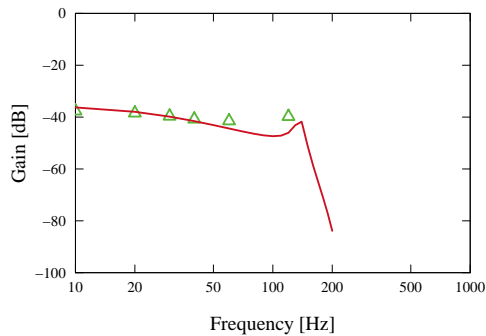


図 7: 計測したゲインのデータと算出したゲイン曲線

実験結果より、投影システムのパラメータは $\beta = 2.0 \times 10^{-1}$ と求まった。また、可視光通信の更新頻度より、 $T = 1/240$ である。本実験の計測によって得られたデータと、同定されたシステム全体のモデルを用いて得たゲイン線図を図 7 に示す。図 7 において計測値と、ゲイン曲線 $|G(j\omega)|$ が概ね一致していることから、モデルが適切であったと考えられる。また、本実験で用いたプロジェクタにより表現可能な周波数の上限は 120 Hz であるが、その範囲においてはゲインの変化は小さく、10 - 120 Hz までの帯域において振動提示が可能であることが示された。一方、振動子の共振特性が 150 Hz 付近に存在し、以降は急激に減衰することから、目標とする 200 Hz までの帯域において振動提示を実現するには改善が必要である。より広帯域な特性を有した振動子、よりリフレッシュレートの高いプロジェクタを選定することで、提案システムの構成においてもさらなる広帯域化が期待される。

4. 結論

皮膚への広範囲、高密度な触感再生の実現を目指し、DLP プロジェクタを用いた可視光通信により、様々な周波数の振動刺激を提示するための手法を提案した。本稿では、忠実な振動刺激を可能にするためにシステムのモデル化を行い、システム同定を行うとともに提示可能な振動の周波数帯域について考察した。実験の結果、計測データにモデルが適切に当てはまり、モデルの妥当性が示唆された。さらに、120 Hz までの帯域において振動提示が可能であることが明らかとなった。今後はプロジェクタの選定や制御に改良を加えることで時間特性を更に向上させるとともに、質感提示における効果を検証する。

参考文献

- [1] Joseph M Romano and Katherine J Kuchenbecker. Creating realistic virtual textures from contact acceleration data. *IEEE Trans. Haptics*, 5(2):109–119, 2012.
- [2] Takayuki Iwamoto, Mari Tatezono, and Hiroyuki Shinoda. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 504–513. Springer, 2008.
- [3] Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi, and Masahiko Inami. Smarttouch: Electric skin to touch the untouchable. *IEEE computer graphics and applications*, 24(1):36–43, 2004.
- [4] Haruya Uematsu, Daichi Ogawa, Ryuta Okazaki, Taku Hachisu, and Hiroyuki Kajimoto. Halux: projection-based interactive skin for digital sports. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, page 10, 2016.
- [5] Takuya Nojima, Yoshiharu Ooide, and Hiroki Kawaguchi. Hairlytop interface: An interactive surface display comprised of hair-like soft actuators. In *Proc. IEEE World Haptics Conference 2013*, pages 431–435, 2013.
- [6] N Torras, KE Zinoviev, CJ Camargo, Eva M Campo, H Campanella, J Esteve, JE Marshall, EM Terentjev, M Omastová, I Krupa, et al. Tactile device based on opto-mechanical actuation of liquid crystal elastomers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 208:104–112, 2014.
- [7] Stanley J Bolanowski Jr, George A Gescheider, Ronald T Verrillo, and Christin M Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5):1680–1694, 1988.