

Stop Motion Goggle：高速液晶シャッターを用いた視知覚の拡張

永谷 直久^{1,a)} 上間 裕二² 古川 正紘² 杉本 麻樹^{1,3} 稲見 昌彦^{2,4}

受付日 2011年6月26日, 採録日 2012年1月13日

概要：本論文では、高速なシャッターを用いて視覚情報を時間選択的に受容可能とすることで肉眼の持つ時空間特性の限界を超えた視知覚の拡張を装着型のシステムで実現する視覚変換装置として Stop Motion Goggle (SMG) の提案を行う。SMG では、エイリアシング効果を用いることで、周期運動の主観的速度を大幅に低減させることができるのみではなく、肉眼では残像が生じるため視認が難しかった高速物体をリアルタイムに明瞭に観察することができる。提案システムの効果を確認するために、高速に開閉可能な強誘電液晶を用いた電子シャッターを用いた実装を行い、開放時間を 0.6–4.0 ms とし高速に運動する対象の認識率についての評価実験を実施した。その結果、短い開放時間で認識率の向上が見られた。さらに、この知見を反映させた一般向けの展示を実施し SMG の提供する視知覚の拡張体験に対するユーザの反応について観察した。

キーワード：高速シャッター, 視知覚, モーションデブラー

Stop Motion Goggle: Augmented Visual Perception Using High Speed Liquid Crystal

NAOHISA NAGAYA^{1,a)} YUJI UEMA² MASAHIRO FURUKAWA² MAKI SUGIMOTO^{1,3}
MASAHIKO INAMI^{2,4}

Received: June 26, 2011, Accepted: January 13, 2012

Abstract: Stop Motion Goggle (SMG) expands visual perception by allowing user to perceive visual information selectively through a high speed shutter. In this system, user can easily observe not only periodic rotational motion such as rotating fans or wheels, but also random motion like a jumping ball. In this study, we developed SMG and evaluated the effect of SMG on visual perception of high speed moving objects. Furthermore this paper describes user's behaviors under the expanded visual experience.

Keywords: high-speed shutter, visual perception, motion deblur

¹ 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科附属メディアデザイン研究所

Media Design Research Institute, Graduate School of Media Design, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223–8526, Japan

² 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Graduate School of Media Design, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223–8526, Japan

³ 慶應義塾大学理工学部情報工学科
Department of Information and Computer Science, Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223–8522, Japan

⁴ 科学技術振興機構 ERATO
Japan Science and Technology Agency ERATO, Chiyoda, Tokyo 102–0076, Japan

a) naohisa.nagaya@gmail.com

1. はじめに

実環境における物体の移動などの運動は、網膜上に連続的な光学的変化を生じる実際運動 (Real motion) ととらえられる。視覚情報に影響を与える科学や芸術の分野においては、ストロボスコープを用いることにより実際運動を時間軸上で離散的にすることで高速な物体の動きの認識を容易にしたり [1]、ビデオカメラなどの撮像装置を通じて一定周期で繰返し運動を観察することでコミカルに見せたり [2] することが行われている。このような離散化は、すなわち時間軸上での視覚情報の標本化 (サンプリング) を

行っているとも換言できる。

視覚情報の離散化・標本化を行うシステムに注目するとストロボスコープを用いたシステムでは、可視光を遮断した暗室として環境を準備しておき、高い照度の光を瞬間的に投影することで視覚情報の標本化を実現している。この形式では、定常的な可視光が与えられていないため、実際運動からの連続した視覚情報と、標本化した視覚情報の両者を同時に獲得することはできない。また、標本化を行うために実環境に影響を与えてしまうため、複数の観察者がいる場合にも単一の離散化された視覚情報しか提供することができない。一方で、ビデオカメラなどの撮像装置を使用して視覚情報の標本化を実現するシステムでは、環境に影響を与えることなく離散的な視覚情報の獲得を実現可能であるが、獲得された情報はTVモニタなどの提示装置を通じて被験者に提供する必要がある。このため、視覚情報を提示するうえで撮像装置・提示装置のハードウェアによる制約の影響を大きく受ける。

本論文では、日常的な照明環境における視覚情報を高速なシャッタを用いた視覚情報の制御により、直接に実環境からの光線情報を受容する被験者の視知覚の拡張を試みるインタフェースとして Stop Motion Goggle (SMG) を提案する。SMG の特徴は下記の3点である。

- 1) 視覚情報の微少時間での遮断により裸眼で対象を観察できる日常的な照明環境における視知覚を拡張する。
- 2) 装着型のデバイスにより観察対象側の環境に影響を与えない形式で被験者ごとに異なった視覚情報を提供する。
- 3) 高い応答性を持つシャッタを用いることにより、きわめて短い時間幅 (1 ms 未満) の視覚情報の標本化を可能とする。

本論文では、SMG を提案するとともに、被験者実験により SMG 使用時の視覚情報提示に対する知覚特性に関する評価を行い、提案するインタフェースによる視覚への影響を検討する。また、実演展示を通じた SMG による視覚体験の観察についても述べる。

2. 関連研究

近年、普及が進んでいる 3D ディスプレイ技術の中では、液晶シャッタにより視覚情報に影響を与える手法が、現在の市販されている 3D ディスプレイの主要な方式であるアクティブシャッタ方式として古くから提案され [3]、技術開発がされている。視覚情報を時分割で制御し両眼視差を作り出すこと (フレームシーケンシャル方式) で立体映像を体験者に与える提示することができるが、実環境の実際運動を観察の対象とするのではなく、ビットマップディスプレイに表示された映像に視差を与えるために使用されるという意味で用途が本研究とは大きく異なる。

視覚情報を遮断するための液晶シャッタデバイスは

Milgram らによって提案され装置が市販されている [4] が、液晶として無色から白色に変わる方式を採用しており、応答速度も白色から無色の遷移に 4 ms、無色から白色の遷移に 3 ms で合計 7 ms 程度と低速である。本研究で開発したインタフェースは無色から黒色に変化する方式を採用しており遮断した際に、環境光の反射による視覚刺激を避けることができる。また、応答速度も黒色から無色、無色から黒色の遷移の実測値で合計 1 ms 未満と高速であるため光学的特性・時間的特性が大きく異なる。

視覚情報の標本化に関わる研究としては、すでに述べているようにストロボスコープやハイスピードカメラなどがあげられる。ストロボスコープは高輝度 LED などの発光体を周期的に発光させることで暗所における視覚情報のサンプリングレートをコントロールする装置である。教育の分野で落体の運動を時間軸方向で見るために使用されることもあるが、周期的な運動をする回転体などの観察においては回転体の回転周波数に近い周波数で発光させることによりエイリアシングが生じ、物体の運動の見かけ上の運動速度に変化を与えることができる。この特性を利用し、水滴などを一定周期で射出する機構を有した噴水にストロボスコープを用いることで、水があたかも重力に逆らって逆流しているかのように観察することができる作品がアミューズメントパークなどに設置されている。また、観察対象へ光を投影する研究の1つである Morphovision では、高速回転をする観察対象に対して、観察対象と同期して回転しているミラーに特殊なパターンの光を照射することで残像効果を起こし、観察対象が様々な形に変形したかのような視覚効果を作り出している [5]。

ハイスピードカメラはその名のとおり動きのある物体などを 1,000 fps などで撮影することにより、通常のビデオカメラの撮影 (60 fps 程度) や裸眼観察ではぶれ (ブラー) をともなう現象を鮮明に記録することができる。そして撮影した情報はディスプレイを通して、実際の時間軸を引き延ばしたスローモーション映像として見る事ができる。撮像素子の高性能化によって現在では 70,000 fps 以上のサンプリングレートで撮影できるハイスピードカメラも登場している。回転体の回転周期と撮像装置のサンプリングレートを適切に設定することで同様の現象を提示する手法として、Bellows では回転体に無数の立体オブジェクトを配置し、ビデオカメラのフレームレートとシャッタースピードを制御することでディスプレイを通してアニメーションを生成している [2]。

ストロボスコープや Morphovision は裸眼で観察可能であるが、設置環境が暗室である必要があり設置環境依存性が高い。また、観察対象が設置された環境に可視光を投影することで視知覚の変化を実現しているため、多数の被験者がいる場合にも単一の時間においては同一のパラメータの視覚提示しか行うことができない。また、カメラ映像の

場合、標本化した情報の提示のために画像提示装置が必要であり、撮像装置だけでなく提示装置の性能からも提示可能な情報に制約がある。

3. Stop Motion Goggle による視知覚の拡張

ヒトの視覚では、可視光を入力として感覚器である眼球内の網膜・視神経を通じて視野と視覚情報が伝達される。Stop Motion Goggle (SMG) は、感覚器の直近に高速なシャッターを設けることで、視覚情報の標本化を実現する。図 1 に SMG の概念図を示す。本研究での視覚情報の制御パラメータとしては、感覚器の露光周波数、露光位相、露光時間を考えることができる。これは、デバイス側に注目するとシャッターの開放周波数、位相、時間と換言できる。

開放周波数を制御すれば、運動する対象を離散化する間隔を可変とすることができる。離散化された視覚情報を与える場合、周波数と空間領域での影響の検討 [6] が行われており、知見を考慮することができる。また、観察対象からの視覚入力に周期性がある場合、開放周波数のナイキスト周波数より高い周波数においてエイリアシングが発生し、ナイキスト周波数と入力周波数の差分が知覚されることが標本化定理から明らかである。裸眼ではふだんは知覚できない高い周波数での明滅を環境に変更を加えることなく、その場で SMG を通すだけで可視化することができる。

開放位相を制御すれば、周波数制御とあわせて感覚器に可視光が入射するタイミングを調整できる。観察対象の周波数と開放周波数が一致している場合には、位相を指定することで、明滅している対象の任意の明るさの状態のみを観察したり、周期的に運動している対象の任意の状態を観察したりすることができる。

開放時間を制御すれば、感覚器へ入射する可視光の時間幅が可変となり時間軸上で視覚刺激を選択できる。ヒトの視覚では、視覚刺激を短時間しか提示しない場合でも刺激の輝度や空間周波数に依存するが数 10 ms から 200 ms 程度の視覚像が保持される視覚的持続 (Visual persistence) と呼ばれる現象が起こることが知られている [7], [8]。また、視覚入力が連続的に変化している場合、シャッターの制御により開放時間幅を短くすることで、観察対象の運動の

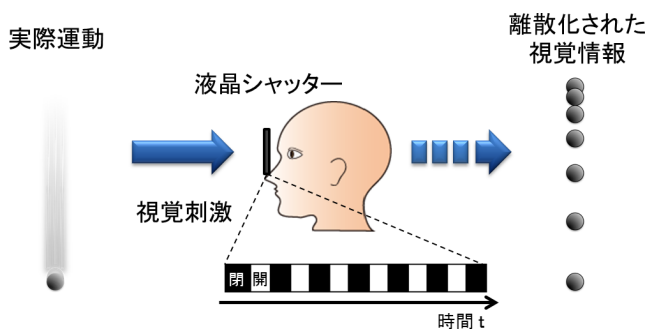


図 1 SMG の概念図

Fig. 1 Concept sketch of SMG.

影響による視認性の低下を低減させることが可能である。具体的にはモーションブラーの低減が可能と考えられる。SMG の使用による視知覚の拡張の効果として裸眼と比較して日常的な照明環境で高速に動いている対象に対する視認性を改善できると期待できる。

インタフェース設計の観点から見ると、SMG では観察対象に可視光を投影するのではなく、遮断するのみである。暗室などではなく裸眼で対象を観察できる日常的な照明環境での使用が可能である。また、遮断を感覚器の近傍で行うため、観察対象に影響を与えず、シャッターごとに異なった視覚情報を提供することができる。本研究の特徴として述べている項目のうち、被験者ごとに異なった視覚情報を提供することが可能であることは、システム的设计上、明かであるといえる。さらには、観察対象が景観のような大きなスケールである場合にも観察者へ可視光が届いていれば効果を発揮できるという利点もある。

4. 実装

本論文で提案する SMG は頭部固定型の装着インタフェースである。使用環境を限定しないよう制御用 PC を必要としない可搬性の高いインタフェースを目標としてシステム構成や回路、シャッターの選定を行った。

4.1 システム構成

SMG は主に液晶シャッターとその駆動制御回路からなる。システム構成をおよび外観を図 2 に示す。マイコンとオペアンプにより任意の周波数および Duty 比を持った電圧波形を生成し、それにより液晶シャッターを駆動させる。シャッターの制御パラメータは、制御回路内に配置した EEPROM にあらかじめ登録しておいた波形パラメータを制御回路に備えたダイヤルでの切替え可能である。また、外部入力として赤外送信機からの信号をフォトトランジスタで受信してパラメータを切り替えることも可能としている。液晶の駆動パラメータを細かく変更する場合は PC とのシリアル

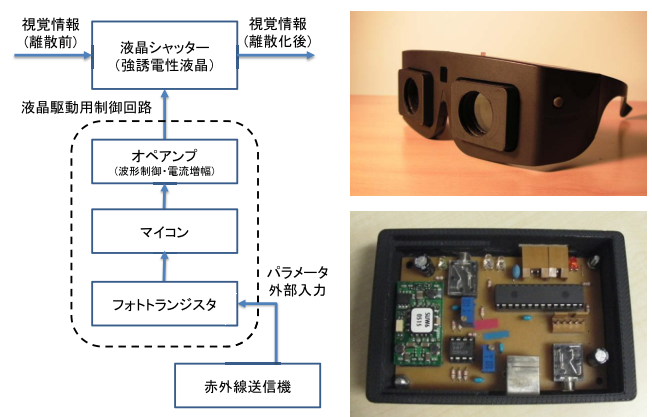


図 2 システム図と SMG 装置外観

Fig. 2 Block diagram and snapshot of SMG.

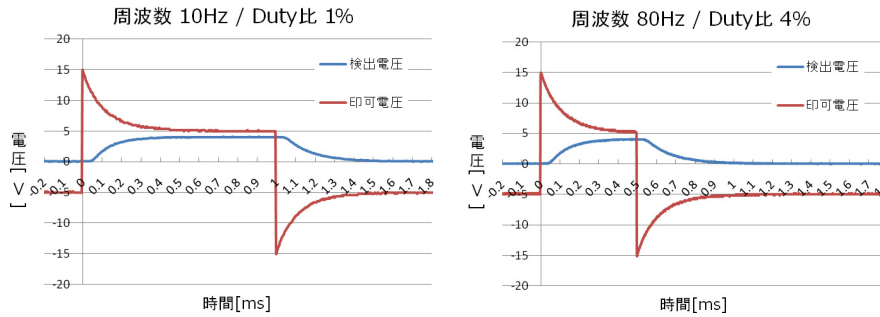


図 4 印加時間による FLC の動作特性

Fig. 4 Characteristics of FLC.

表 1 FLC の仕様

Table 1 FLC Specifications data sheet.

パラメータ	動作特性@21℃	保証動作特性@21℃
透過率 (液晶開状態時)	28% ~ 30%	> 25%
透過率 (液晶閉状態時)	< 0.03%	< 0.05%
コントラスト比	1000:1	500:1
応答時間 (10%~90%/90%~10%)	35μs	< 50μs
状態遷移時間 (0%~90%/100%~10%)	70μs	< 100μs
動作保証温度	10℃ ~ 50℃	
形状	円形	
サイズ	直径 34mm	

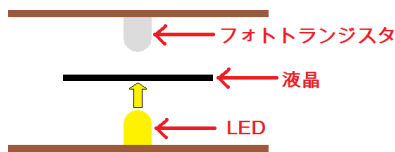


図 3 FLC 動作特性測定システム

Fig. 3 Characteristics of FLC measurement system.

通信により任意のパラメータを指定可能である。制御できるパラメータは液晶の駆動周波数, Duty 比, 位相であり左右それぞれ独立して制御できる。

4.2 液晶駆動用制御回路

液晶駆動制御波形を生成する装置として Microchip 社 PIC16F876 マイクロプロセッシングユニットを搭載している。制御電圧は ±5V としているが、駆動開始時に短時間だけ液晶に高い印加電圧をプリアンファシス回路経由で与えることにより液晶分子の応答を速くすることができるため、DC-DC コンバータとしてコーラル株式会社 SUW60515C を用いることで制御波形をオーバドライブさせている。

4.3 液晶シャッタ

本研究では、短い時間における視覚情報のフィルタリングを実現するため、通常の液晶ディスプレイなどに用いられる TN 型や IPS 型ではなく応答性能に優れている強誘電性液晶 (FLC: Ferro-electric Liquid Crystal) を使用することとした。SMG では Displaytech 社 (現 Micron 社) の強誘電性液晶を用いた。表 1 に LV2500P-OEM の仕様を示

す。素子自体の仕様としては透過率 10% から 90%, 90% から 10% の応答時間は 50 μs であり、高い応答性を持っている。

LV2500P-OEM は印加電圧 +5V 以上の電圧で光を通すが、-5V 以下の電圧を加えると光を遮断する。実際に FLC を駆動した際の実験結果を調べるために図 3 のように LED とフォトトランジスタの間に液晶を設置し測定を行った。実験は 0.02 Lux の暗室で行い、フォトトランジスタの出力電圧をオシロスコープで測定した。図 4 に 10Hz/Duty 比 1% (印加時間 1ms) で駆動した条件と 80Hz/Duty 比 4% (印加時間 0.5ms) で駆動した条件下での測定した結果を示す。赤いグラフが印加電圧の時間変化であり、青いグラフがフォトトランジスタの電圧値である。いずれの場合も電圧を印加してから 50 μs 程度の時間遅れがあり、その後 150 μs 程度過ぎてから定常状態の 90% 程度の値までフォトトランジスタの出力電圧が上昇していることが分かる。実験結果からは印加時間が 250 μs (周波数 80Hz, Duty 比 2%) 以上であれば、確実に 90% 以上の高い透過率で可視光を通過させる状態を実現できることが読み取れる。また、100% の透過率を基準とした場合も黒色から無色、無色から黒色の遷移の合計で 1.0ms 未満を実現できている。

5. 動的指標を用いた評価実験

本論文では SMG を用いた視覚の拡張が実現できることを確認し、微小時間の感覚器への視覚情報入力によるヒトの視覚特性を検証するため、動的指標を用いた知覚評価実験を行う。3章で述べている視覚の拡張を考えるうえでのパラメータのうち、開放時間を可変として 2つの周波数条件で実験を行う。本実験により、本研究の特徴として述べている項目のうち、遮断により視覚の拡張が行っていることと、微小時間の知覚に影響を与えられることの 2点について検証を行う。

指標が運動することにより生じるモーションブラーが知覚に及ぼす影響に関する研究は数多く行われており、実際には脳の情報処理の過程でモーションブラーを抑制することが明らかになっている [9], [10]。当然ながら、SMG を用いる場合にも開放時間中も視標の実際運動は持続してお

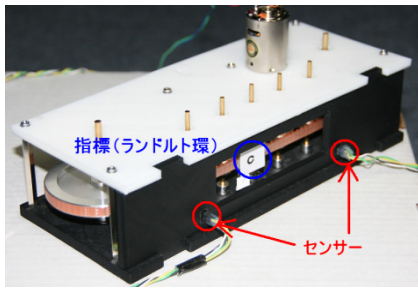


図 5 視標加速装置
Fig. 5 Accelerator unit.

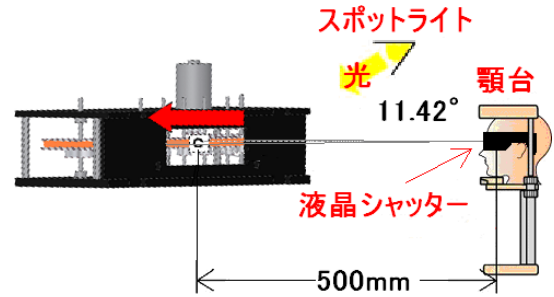


図 6 実験構成図
Fig. 6 Experimental setup.

り，モーションブラーを完全になくすことは理論的には行えないが，先行研究の知見を考慮するとモーションブラーを完全になくさなくても鮮明に視標を知覚する領域があることが推測される。

本実験ではまず一定速度で運動する視標に対して，SMGを用いることにより様々な開放時間条件下で用いて評価を行う。評価手法としては視力測定法として一般的なランドルト環を用いた。SMGの特徴と考えている肉眼では観察できないような現象や対象物を知覚できることを示すためにも，視標の速度は円滑性追跡眼球運動ではとらえきれない速度域で実験を行った。

5.1 実験装置

ランドルト環を等速直線運動させる装置として図5に示す視標加速装置を製作した。本装置はアクチュエータとしてDCモータ：マブチモーター株式会社 RS-380PH-4045を用いて，ベルトとプーリーを介して回転運動を直線運動に変換している。速度制御はフォトリフレクタをセンサとしてPICを介したフィードバック制御を行っている。フォトリフレクタは2点間の視標の移動時間をセンシングする。センサの反応を向上させるために視標下部の被験者には知覚できない位置に再帰性反射材を貼り付けた。

5.2 実験構成

図6に示すように視標までの距離は500mmとし，被験者の頭部を顎台により固定した。輻輳の影響をなくすことなどから実験は片眼で行った。視標を知覚できる範囲は被験者の水平視野角に換算すると約11.42degである。視標の速度は2.5m/sに設定した。これは角速度に変換すると200deg/sを超えるため円滑性追跡眼球運動の限界速度とされる40ないし60deg/sよりも十分に大きい。視標となるランドルト環の直径は6mmである。暗室内での実験のため白熱電球を照明として用いた。照明による視標の平均照度を裸眼，FLC駆動時のそれぞれで測定した結果を表2に示す。

実験時の環境光の照度および実験装置を通した被験者の視点における照度を三和電気計株式会社：照度計LX2で

表 2 視標照度と FLC 駆動条件の関係

Table 2 Luminance status.

	駆動条件	照度 Lux
環境光		181.9
SMG 使用時	常時開放時	7.87
	周波数 25Hz Duty 比 2%	0.48
	周波数 25Hz Duty 比 10%	1.51
	周波数 50Hz Duty 比 3%	0.51
	周波数 50Hz Duty 比 12%	1.54

計測した結果を表2に示す。照度計による計測では実験で使用したシャッターの周波数から定まる周期より長い時間幅で照度が積分的に計測されると考えられ，Duty比の減少に応じて値の低下が見られる。

5.3 実験手順

実験は健康な男子5人を被験者として行った。被験者が2.5m/sの等速運動をするランドルト環を裸眼または眼鏡などを使用した矯正状態で詳細を識別できないことを確認後，実験を開始した。

FLCの駆動パラメータは周波数25Hz，50Hzの2条件で，開放時間は25Hz時：0.80~4.0msで0.4msきざみ(Duty比2.0~10%まで1%ごと)の9条件，50Hz：0.60~2.4msで0.2msきざみ(Duty比3.0~12%までの1%ごと)の10条件とした。開放位相は一定として実験パラメータから除いた。提示するランドルト環の向きは上下左右の4条件とし，各向きそれぞれ3回提示するようにした。つまり，FLCの各駆動条件に対して，12回試行した。提示順序は被験者に対してランダムに提示するようにした。各試行での被験者への提示時間は5秒間とした。被験者にはランドルト環の向きを回答してもらい，まったく分からないときには「分からない」と回答するように指示した。

5.4 実験結果

図7，図8にそれぞれ25Hzと50Hzでの開放時間と正答率の実験結果を示す。全被験者において，開放時間の増加にともなう正答率の低下の傾向が見られた。これは25Hz，50Hzいずれの条件下でも同様の傾向が見られた。図9は25Hz，50Hzそれぞれの被験者の結果を平均し，

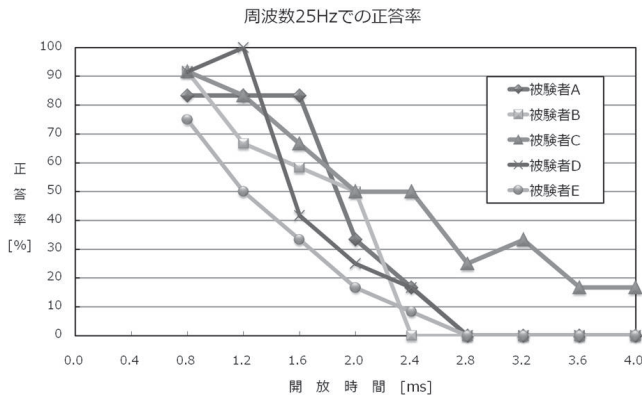


図 7 開放時間と正答率：25 Hz
Fig. 7 Percentage of correct answers: 25 Hz.

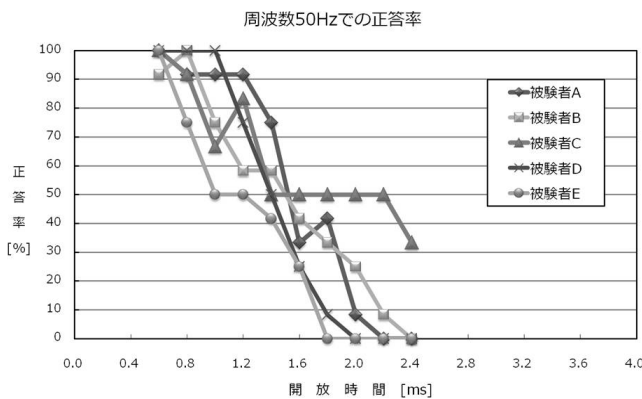


図 8 開放時間と正答率：50 Hz
Fig. 8 Percentage of correct answers: 50 Hz.

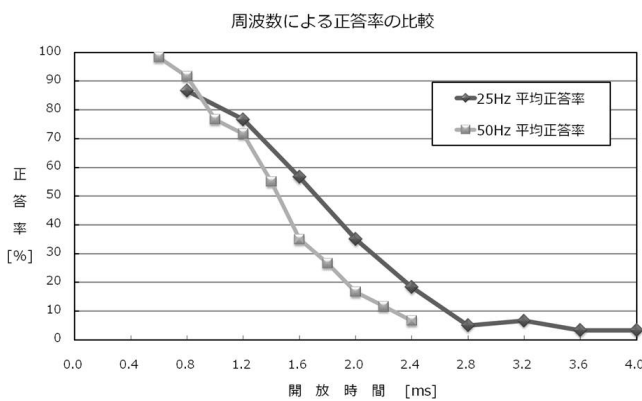


図 9 周波数ごとの開放時間と正答率
Fig. 9 Percentage of correct answers: Each frequencies.

周波数別での結果を示したグラフである。

5.5 考察

実験結果により、対象物に対するシャッタの開放時間はすべての周波数 (25 Hz と 50 Hz) において、シャッタの開放時間の増加に応じて見やすさが減少する傾向であることが分かった。しかし、個人差のため被験者ごとにおいて、見やすさに対するシャッタの開放時間が違うことが分かった。



図 10 移動方向に対するランドルト環の見え方
Fig. 10 Appearances of Landolt rings.

また、異なる周波数条件間ではシャッタの開放時間は同じであるにもかかわらず、周波数により正答率が違うという傾向があった。特に、開放時間が 1.2 ms 以上では高周波数より低周波数でシャッタを切った条件で正答率が高く、視認性が高いと考えられる傾向が見られた。高周波数では対象物が視野内に複数観察され視標が識別しにくかったという被験者の内観報告を考慮すると、低周波数でシャッタを切ったほうが視標の識別がしやすかったためと考えられる。

シャッタの駆動周波数 25 Hz, 50 Hz のいずれも上下方向のランドルト環よりも、横ランドルト環のほうが見やすく、シャッタの開放時間が長くなっても観察可能であった。これは、本実験に使用した装置は横方向にランドルト環を移動させる際に、モーションブラーが生じるため、図 10 に示すように、同じ環境の下で観察しても、縦に向いているランドルト環がぼやけ、方向を見極めることが困難となったということが考えられる。よって、実験中に被験者は横のランドルト環の方が縦のランドルト環よりも識別しやすく正答率の違いという結果になったと考えられる。今回の実験では、ランドルト環という単純な図形を用いた実験であったが、文字や画像などを様々な方向性を持った要素を含むオブジェクトを観察する際はこのような方向性が大きく見やすさという点に関わってくるであろう。

実験では、開放時間の減少にともない視標の提示時間およびコントラストが低下しているにもかかわらず、視認性の向上が見られた。要因としては、開放時間を短くして視覚刺激を短時間しか提示しない場合、時間積分した眼球位置での照度は低下するが、ヒトは先に述べた視覚的持続の影響を受けるため視認可能な視覚像は実際の開放時間より長く保たれる。同時に、開放時間が短いためモーションブラーの低減が行われて視認性向上が得られると考えられる。本実験におけるシャッタの開放時間 0.6 ms-4.0 ms の条件では、照度の影響による視認性の低下より、モーションブラーの低減による影響が大きく、裸眼と比較した場合に視認性の向上が得られたと考えられる。

6. 視知覚の拡張の実演を通じたユーザスタディ

SMG は、すでに述べたとおり外界の情報を変換するフィ



図 11 回転するコインと SMG を通して見たときのコイン
Fig. 11 Snapshot of the coin through SMG.

ルタとしての役割を持っており、フィルタの特性は液晶シャッタの開放の時間軸上での周波数・位相・時間の制御に依存する。高速に運動をする物体の視知覚へも影響を及ぼすことは前章で検証を行ったが、これらの知見をふまえながら周期的な対象の観察を中心とした実演展示を行い、ユーザを観察することで SMG の効果を確認した。

周期的な視覚情報は周波数によっては使用者がちらつきを知覚する。ちらつきを知覚ないように 40 Hz 以上で駆動させるように留意している。

6.1 コイン回し

十分な速さで回転させたコインを裸眼で観察するとコイン表面の詳細は視覚的持続の影響により積分的に知覚されるため認識できなくなり、モーションブラーのかかった回転体として視認される。コインの回転周期と同期した状態で短い開放時間でシャッタの制御を行うことで、コインの表面の詳細の視認が可能で、あたかも止まっているように視知覚の体験を提供するコンテンツ [12] を SIGGRAPH 2008・インタラクティブ東京 2008 において実演展示した。

実際の展示では図 11 のように土俵のようなものの上に簡単にコイン回しを行える装置を用意し、回転している状態の体験者に観察させた。このコンテンツでは、液晶シャッタの駆動周波数は、この装置を使用した際に安定してコインが回転している周波数を事前に調べその周波数に設定した。

6.2 灯りを見る

室内環境における視知覚体験の拡張は、暗室などの特殊環境を用意すればストロボスコープなどでも同様の視覚体験をすることはできる。しかしながら、SMG を用いる場合、裸眼で観察可能な通常の照明環境を散策し、隠された高い周波数の視覚情報を採し出すといった使用法が可能である。日常的に目にする照明はつねに点灯しているように知覚されるが、実はある一定の周波数で点滅している。これはその場所の電源周波数に依存している。もちろん、インバータ方式で駆動されているような街灯などはより高周

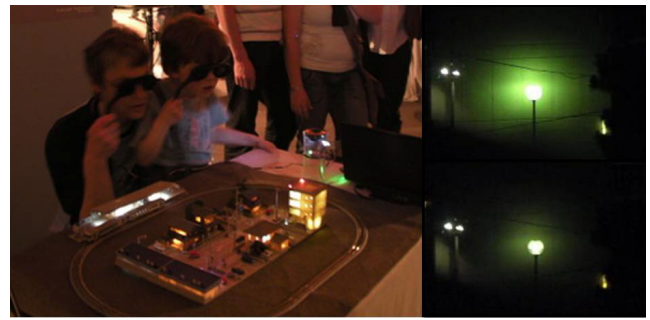


図 12 ミニチュア夜景
Fig. 12 Miniature night view.

波数で駆動しているが、多くの街灯などは電源周波数で駆動されている。

SMG を電源周波数と近い周波数で駆動させることで照明の周期的な輝度変化や街灯の点灯方式によっては色の変化などを知覚できる実演展示のコンテンツを開発し、Laval Virtual 2009, Ars Electronica Center で展示を行った [13]。

展示の形態としては、図 12 のようなミニチュアの模型を用いて夜景を再現した [13]。模型に組み込んだ電源周波数に従って変化する照明を体験者に観察させた。なお、照明を観察するコンテンツとしては、夜景を SMG で眺め、都市全体の電源の位相差を可視化するということも行った。

6.3 体験者の反応と考察

コイン回しの実演展示においては、SMG を通すとコインが直立静止しているように知覚されるタイミングがあり、手で回っている状態のコインをつかもうとする人が多く観察できた。静止状態に見えることで、確信的に手を伸ばすためか、実際に掴むことに成功する体験者も多くいた。また、何回も体験者自身がコイン回しをして SMG での観察を繰り返す光景も見受けられた。実演展示の際はデバイスが、オペラグラス型をしていたこともあり、裸眼と SMG での観察を交互に行う様子が観察できた。また、なぜそのように見えるのかの原理の説明を求められることが数多くあった。裸眼で見える対象が SMG を通すことで異なって見えるため、体験者に強い興味を持たせることができたと考えられる。

照明を観察する実演展示においては、SMG の駆動周波数が 50 Hz や 60 Hz 付近のため、周囲のディスプレイなどを見て色相の変化や明滅するのを楽しんでいた。特に、この観察対象を展示品以外にも求める体験者が多く、目の前で手を素早く振ってみたり、動いていないものに対しても SMG を通して観察してみたりする様子を観察することができた。コンテンツとして用意した照明を装着した模型以外のものを積極的に観察する様子が見受けられたことは、SMG の特徴である日常的な照明環境ですぐに使用できるという利点を体験者の行動からも読み取ることができる例

だと考えられる。

7. 今後の展望

顕微鏡や望遠鏡で肉眼では見えない世界を覗けるように、SMG では時間軸において微少時間の視覚情報や周期的な情報を観察する被験者の視覚を拡張することができる。多くの人たちが SMG を通して世の中の様々な時間軸の影響する視覚現象を知的好奇心に駆られて注意深く観察するようになってくれれば嬉しい。科学教育における SMG の利用には大きな可能性があると考えられる。

SMG の優位性はリアルタイムで肉眼では観察できないような物体の実際の変化を観察できる点にあり、さらにはデバイスの特性から同じ観察対象であってもシャッターごとに制御パラメータを変えることができるという点である。たとえば、左右の眼にそれぞれ異なる情報を提示できるのもストロボスコープなどにはない特徴である。左右の視覚情報に時間的差を持たせることによる認知への影響の検証なども行ってゆきたい。

本研究提案の拡張性について考えると、被験者の周囲の空間の可視光を選択的に制御することができれば、装着型でなくても同様の効果を得ることができる。たとえば、車輛の窓をシャッターにすることで同様の効果を備えたシステムを実装するといったことも可能であるといえる。

8. 結論

本論文では、実環境からの光線情報を受容する被験者の視知覚の拡張を試みるインタフェースとして Stop Motion Goggle を提案した。感覚器に近い位置に高速なシャッターを設け、裸眼で対象を観察可能なふだんと同じ照明環境で機能するシステムの設計を行った。また、提案インタフェースによる視知覚の拡張の検証として、制作した装置によってシャッターの開放周波数 25 Hz と 50 Hz において、開放時間を 0.6–4.0 ms の範囲で制御し、被験者実験によって高速に運動を行っているランドルト環に対する認識率が開放時間が短いほど向上することを示した。

SMG の実演展示を通じた視知覚の拡張に対する体験者の反応を観察し、街灯などの日常的な実世界の視覚情報の変容自体がエンタテインメントとなりうること、そして観察対象として用意したコンテンツ以外にも体験者自身で身の回りにある様々なモノを探検的に観察し出すことなどが分かった。

参考文献

- [1] Edgerton, E.H. and Killian, R.J.: Flash!: Seeing the unseen by ultra high-speed photography, Hale, Cushman & Flint (1939).
- [2] Dyer, E.: Bellows: Bringing digital animation into the physical world, *ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos* (2008).

- [3] Lipton, L. et al.: Achromatic liquid crystal shutter for stereoscopic and other applications, U.S. Patent 4884876 (Dec. 5, 1989).
- [4] Translucent Technologies Inc., PLATO: Visual Occlusion Spectacles, available from (<http://www.translucent.ca/plato.html>) (accessed 2012-01-26).
- [5] Fukaya, T., Iwai, T. and Yamanouchi, Y.: Morphovision, *ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies* (2006).
- [6] Watson, B.A. and Ahumada, J.A. Jr.: A look at motion in the frequency domain, *NASA Technical Memorandum 84352* (1983).
- [7] Bowling, A., Lovegrove, W. and Mapperson, B.: The effect of spatial frequency and contrast on visual persistence, *Perception*, Vol.8, pp.529–539 (1979).
- [8] Ueno, T.: Visible persistence: Effect of luminance, spatial frequency and orientation, *Vision Research*, Vol.23, pp.1687–1692 (1983).
- [9] Takeuchi, T. and De Valois, K.K.: Sharpening image motion based on the spatio-temporal characteristics of human vision, *Proc. SPIE*, Vol.5666, pp.83–94 (2005).
- [10] Ramachandran, V.S., Rao, V.M. and Vidyasagar, T.R.: Sharpness constancy during movement perception (Short note), *Perception*, Vol.3, pp.97–98 (1974).
- [11] Miles, A.F., Kawano, K. and Optican, L.M.: Short latency ocular following responses of the monkey. I. Dependence on temporospatial properties of visual input, *Journal of Neurophysiology*, Vol.56, pp.1321–2354 (1986).
- [12] Nagaya, N., Chuan Siang, F.F., Furukawa, M., Tokiwa, T., Sugimoto, M. and Inami, M.: Stop motion goggle, *ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos* (2008).
- [13] Nagaya, N., Furukawa, M., Sugimoto, M. and Inami, M.: Surrounding of Firefly: Stop Motion Goggle for Luminary Objects, *Laval Virtual 2009* (2009).



永谷 直久

2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。日本学術振興会特別研究員(DC1)を経て、2011年同大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻博士後期課程単位取得済み退学。現在、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科附属メディアデザイン研究所リサーチャー。視覚拡張および前庭感覚提示を利用したインタフェースの研究に従事。



上間 裕二

2008年慶應義塾大学理工学部物理情報工学科卒業。2010年同大学大学院メディアデザイン研究科修了。2010年より同学科後期博士課程に在学中。視覚インタフェースに関する研究に従事。



古川 正紘

2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻博士前期課程修了。2010年同専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2009年4月日本学術振興会特別研究員(DC2), 2010年4月同特別研究員(PD)。現在, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科特任助教。触覚インタフェース, 視覚誘導性自己運動感覚, テレイグジスタンスに関する研究に従事。日本VR学会学術奨励賞受賞(2008年), Augmented Human Best Paper Award(2011年)。



杉本 麻樹 (正会員)

2006年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士(工学)。電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師等を経て, 現在, 慶應義塾大学理工学部情報工学科専任講師。実写履歴画像を用いた三人称視点からの遠隔ロボットインタフェース, 画像提示装置を用いた計測と制御等のインタラクティブシステムに関わる研究に従事。



稲見 昌彦 (正会員)

1999年東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学リサーチ・アソシエイト, 同大学助手, 電気通信大学講師, 同大学助教授, JST さきがけ研究者, MIT コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者, 電気通信大学知能機械工学科教授を経て, 現在, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授。ロボット, バーチャルリアリティ等インタラクティブ技術に関する研究に従事。情報処理学会山下記念研究賞, 同学会論文賞, 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞, 同学会論文賞, 同学会貢献賞, IEEE Virtual Reality Best Paper Award, 文部科学大臣表彰若手科学者賞, 義塾賞等受賞。日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE Computer Society 等各会員。