

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(C)  
研究期間：2012～2014  
課題番号：24560404  
研究課題名(和文)スリット視を利用した三次元情報提示デバイスの研究

研究課題名(英文)Slit-based light field 3D display

## 研究代表者

安藤 英由樹 (Ando, Hideyuki)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70447035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年、三次元視覚情報提示装置の開発が盛んである。三次元視覚情報提示を実現するためには、左右眼に別の視覚情報を提示する必要があるが、本研究では、スリット視と呼ばれる一次元光源群から二次元イメージを知覚する人間の視覚特性と、観察者に負担のない光線再現方式を組み合わせることで、多人数が同時に裸眼立体視可能な三次元視覚情報提示デバイスを開発することを目的とする。本提示方式は、複数本の一次元光点列を同期させて点滅させるとともに、それぞれを高速回転させることで簡便に三次元動画像を提示することができる。

研究成果の概要(英文)：The principle of glasses-free 3D displays (each eye sees a different image without wearing glasses) can create a fully natural sensation of depth. In conventional principles, lenticular lenses or parallax barriers are placed in front of an image source, such as a liquid crystal display, to allow it to show a stereoscopic image. A disadvantage of the technology is that the resolution of perceived images is limited by the diffraction at the lenticular lenses or parallax barrier. To overcome this limit, we improved the technique by using the human perceptual feature known as slit viewing. When a figure moves behind stationary narrow slits, observers can see the moving figure as an integrated whole, a phenomenon known as slit viewing.

研究分野：人間情報工学

キーワード：立体視ディスプレイ スリット視 パブリックディスプレイ

1. 研究開始当初の背景

一般に2次元の視覚情報を提示するためには2次元の光源が必要となる。しかし、図1上のようにスリット状の1次元光源群をあたかもスリットの背後で2次元イメージが移動するように点滅させると、観察者はスリット向こうにイメージの運動を知覚し、光源が存在しない部分の形態情報を補完して図1下のような移動する2次元イメージを知覚する(以後“スリットディスプレイ”)。この原理を利用したディスプレイ技術は既に実用化されており街頭で見かけることも多い。しかし、この情報提示手法は、これまで2次元動画提示のみに使用され、3次元情報の提示は実現されていない。また、注目を惹きつけるサインージ・ディスプレイとして、裸眼(特別な装置をつけることなく)で3次元の画像を提示することは必須であるが、技術的な難易度が高い。



図1: スリット状光源(上)  
知覚される2次元動画画像(下)

2. 研究の目的

本研究では、スリットディスプレイの2次元動画画像イメージを左右両眼へ異なるように提示し、奥行き情報を持つ三次元動画を提示するデバイスを実装する。近年、3次元視覚情報提示装置の開発が盛んに行われている。一般に、3次元情報を提示するためには、なんらかの方法で左右眼に別の視覚情報を提示する必要がある(図2上)。これまで、観察者に特殊な眼鏡などを装着してもらう必要があるため、サインージの用途には適さない。また、観察者に負担を強いることなく、多人数に同時に3次元情報を提示できることが望ましい。そこで本研究では、前述のスリットディスプレイによる2次元動画画像イメージを光線再現方式によって、左右両眼に異なるように提示することで、多人数が同時に裸眼で3次元情報を知覚可能なデバイスを簡便に実装する(図2下)。

また、知覚心理学の分野では、左右眼に異なった像をスリット視によって提示すると、奥行きを持って知覚されていることは知られていた。しかし、その原理を積極的に3次元情報提示に利用する試みはこれまで行われていない。また、スリット式3次元ディスプレイの設計指針を構築するために行われる心理実験は知覚心理学の分野の観点から、人間の奥行き知覚のメカニズムを明らかにする。

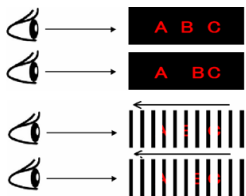


図2: 通常の視差提示(上)  
スリット視による視差(下)

3. 研究の方法

スリット式3次元ディスプレイは、光源を垂直方向一列に並べた光点列を複数本用意し、それらを一定間隔で設置する。それぞれの光点列は回転させながら、発光パターンを高速で変化させると、異なる方向に異なる1次元視覚情報を提示可能である。そして、光点列間で提示画像情報を同期させると、観察位置によって異なるスリット2次元視覚像を知覚可能である。そして、図3異なる位置の観察者A、Bに対して異なる視覚情報を提示し、

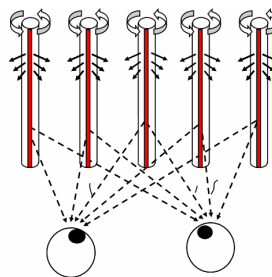


図3: スリット式3次元ディスプレイの原理

このとき、観察者Aと観察者Bを左右眼と考え、それぞれに視差をつけた画像を提示すると、3次元情報が提示可能である。期間内では、以下の三点について研究を行う。

(1) 2次元視覚像を提示する通常のスリットディスプレイでは、光点列は図1のようにある一定の奥行きに等間隔に並んで設置される。しかし、スリット式3次元ディスプレイにおいては、光点列と観察者の位置関係は左右眼の視差画像を考える上で重要な設計要素である。そこで、はじめに光点列の空間配置と提示する3次元動画(主にコンピュータグラフィクスで作成された動画)が決定されたときに、各々の光点列の点滅パターンをシミュレーションするようなシステムを開発する。

(2) スリット式3次元ディスプレイにおいて、各々の光点列は、1秒間に数十回転し、それに同期させて点滅パターンを変化させる。このような高速に回転する光点列とその点滅を同期させるようなハードウェアの開発を行う。

(3) 最後に、前記のシミュレーションシステムとハードウェアに基づいて、全ての光点列を同期させながら、3次元動画を提示するデバイスを実装する。

4. 研究成果

提案する「スリット視を利用した三次元情報提示デバイス」の実現のためには、まず、ヒトの視覚における知覚特性を考慮して、空間的設定(LED列間距離、LED列並び、LED列配置密度、スリット幅、解像度等)、時間的設定(LED点滅周期、流れる絵の速度、スリット筒回転速度等)からなる複数の要素に適切なパラメータを設定する設計指針を立てる必要がある。次に、この設計指針に基づいて実際に要素ごとに心理物理実験を行い、各パラメータの妥当性を評価した上で、これらの要素が干渉しないように組み合わせることでデバイスを構築する。さらに、このデバイスを最大限に効果的と

する表示方法についての設計指針も検討する。

(1)幾何設計のための心理物理実験

パターンの可読性が高い設計パラメータの同定として、マルチスリットディスプレイを設計する場合には、表示する文字の大きさに対して適切なスリットの間隔とスクロール速度のパラメータを決定する必要がある。そこで、様々なスクロール速度とスリット間隔に対して、ランダムに表示される同じ大きさの文字が正しく認識できるかを確かめる実験 1 を行った。実験条件として、表示に PC(OS:Windows7, CPU: Intel(R) Core(TM) i7CPU870@2.93GHz, GraphicCard: NVIDIA GeForce GTS450), HMD(eMaginZ8003DVisor, 解像度: SVGA800 × 600, リフレッシュレート: 60Hz, 視野角: 32 × 24deg, 重量: 227g) を用いた。本実験では立体視を考慮しないため、両眼に同じ映像を提示した。文字の大きさは縦 1.5deg, 横 1.5deg とした。表示方向は左から右とし、表示時間は 320ms で統一し、160ms のときに文字の中心が画面の縦中央を通過する。文字は 2 段表示され、それぞれ文字の中央が横中央から上下に 2.75deg 離れた場所に表示される。上下 2 文字の中央には指標(12 × 12) が表示されており、実験参加にはこの指標を注視するように指示した。スリット文字の色は白、背景色は黒、注視点は赤である(図 4)。このとき、文字の運動速度を 4.8, 9.6, 14.4, 19.2, 24.0[deg/sec], スリット間隔を 0.4, 0.8, 1.2, 2.0, 3.2[deg], それぞれの条件がランダムに 10 回ずつ出現するようにした。実験参加者にはスクロール表示が消えたあとにすぐ、上下 2 文字を口頭で回答させた。これを 1 セットとして、セット数を 5 回、実験参加者数を 4 名(すべて 20 代男性)で行った。

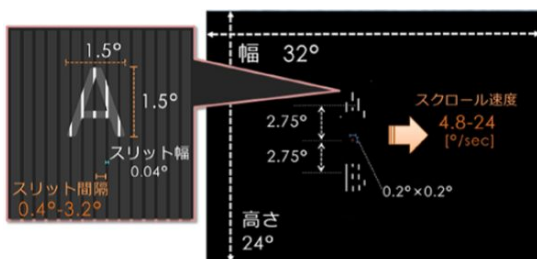


図 4 . HMD 上の視覚刺激

4 名の正答率の平均値と標準偏差をプロットした結果を図 5 に示す。横軸は提示したパターンのスクロール速度であり、縦軸は正答率である。結果より、正答率とスクロール速度には山形の形状を示す傾向があり、スリット間隔によらずスクロール速度が 14.4deg/sec のときに正答率が高いという傾向が見られる。また、スリット間隔が広がるほど正答率は低下する。0.4, 0.8, 1.2deg 時には正答率が 8 割以上であったことに対して、2.0deg では 6 割程度となっており、1.4deg から極端に正答率

が下がっていることがわかった。この要因として今回の文字の幅は 1.5deg であったことから、スリット幅が 1.2deg の場合には 1 つの文字が同時に 2 本のスリット上を通過する場合があるため、空間上で文字の幅を知覚することができるが、2.0deg では 1 本以上同時に通過することはないため、文字幅を知覚することが難しくなったからであると考えられる。以上より 8 割以上の正答率を得るためには、1 文字の幅よりも狭いスリット間隔で配置する必要があり、スクロール速度は 14.4deg/sec 程度が望ましいことが示唆される。

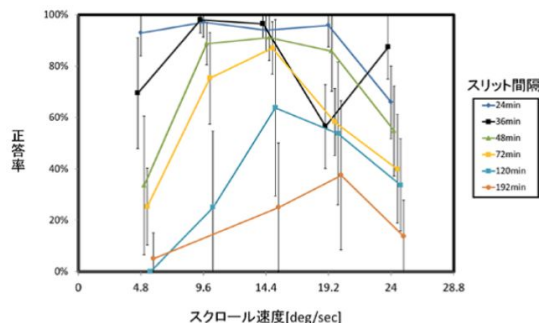


図 5. 見やすいスクロール速度

次に、両眼視差によってマルチスリットディスプレイが立体提示可能かどうか確認する実験 2 を行なった。本実験では、上部に両眼視差つけたマルチスリットを介した文字、下部に両眼視差をつけたスリットを介さない文字を提示し、下部の文字の奥行きを上部の奥行きに合わせるタスクを行う。このとき、立体視における奥行き比較においては輝度差が影響するため、この比較実験を行う際にはマルチスリット視の文字の輝度と通常の立体視の輝度を揃える必要があった。そこで、輝度差の影響を受けないように実験を行うために、事前にマルチスリット視による画像提示とスリット無し画像提示との輝度が等価知覚となるように調整させる実験を行った。立体奥行き知覚の実験においては、輝度差による立体知覚の影響を受けないように実験者参加者の等価輝度の値を用いた。上部のマルチスリット視における文字の視差を変化させた時に、マルチスリット視において知覚した文字の奥行と同じになるように、下部のスリット越しでない文字の視差を調整して回答させる実験を行った。文字の大きさは 1.5deg × 1.5deg, 指標の大きさは 12' × 12' である。運動速度は 14.4deg/sec, マルチスリット視のスリット間隔は 1.2deg とした。一般的に融合限界は個人差が大きい、不特定多数を対象とする場合 2deg 程度と考えた方がよい、本実験ではその範囲で実験を行った。具体的には、2.4deg, 1.6deg, 1.2deg, 0.8deg, 0.4deg, 0deg, -0.4deg, -0.8deg, -1.2deg, -1.6deg, -2.4deg (- は手前, + は奥に感じる視差である) の 11 段階の視差をランダムに提示した。実験参加者は、条件ごとに下部の文字を視差 0deg の状態から ±



0.08deg 刻みに調整させる調整法で行った。条件ごとに 5 回ずつ課題を実施した。結果として被験者間のデータを相加平均したグラフを図 6 に示す。

図 6 よりマルチスリット視における両眼視差量とスリットのない両眼視差量はほぼ等価であることが見て取れ、通常の両眼立体視と差がないことが明らかとなった。コントロールとの差分を見ても、分散の範囲であるので、通常の立体視とほぼ同様に知覚できる傾向にあると言える。

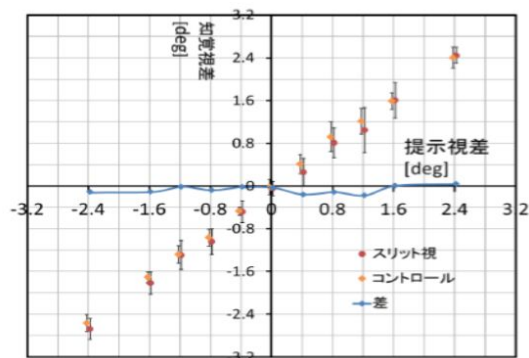


図 6. 両眼視差量と視差知覚

## (2) マルチスリットディスプレイの幾何設計

立体視可能なマルチスリットディスプレイは多眼方式であるが、提示可能な視点数は光線の角度分解能が高いほど多くの視点数を実現できる。また、両眼像を分離するためにも十分な分解能が必要となる。つまり光線の角度分解能は、立体ディスプレイの性能に影響する重要なパラメータであり、設計する際には少なくとも両眼分離ができる分解能を持つ必要がある。そこで光学的に両眼像の分離が可能になる光源の方向分解能について議論を行う。ここでは観察位置から最も遠い光線源ユニットにおける光源の方向分解能を議論する。理由として、LED 光は提示距離が遠いほど光線間距離が増大するため、観察者から最も離れた光線源ユニットが要求される分解能を満たせば、他の光線源ユニットも両眼分離の要件を満たすと考えてよいからである。ディスプレイ中央から垂直に離れた観察距離を  $X$ 、ディスプレイ中央から水平に離れた観察距離を  $A$ 、マルチスリットディスプレイの端から端までの距離を  $S$  とし、眼間距離を  $E$ 、角度分解能を  $\theta$  と設定する。また、計算の簡略化のために LED 光線の横幅は 0 と設定する。

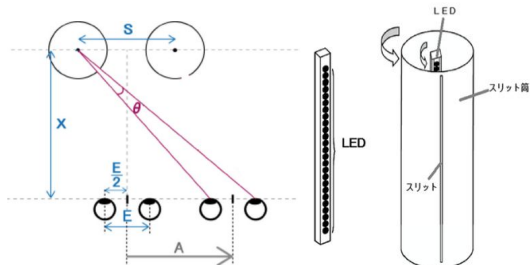


図 7. 光学的に両眼分離が可能な分解能と観察距離の関係

これらの関係を図示したものを図 7 に示す。両眼分離を行うためには式(1)において少なくとも 未満の角度分解能を実現する必要がある。光線源ユニットからの距離が遠いほど高い分解能が必要になる。

$$=\arctan((S+2A+E)/2X)-\arctan((S+2A-E)/2X)\dots(1)$$

## (3) 作成したデバイス

ここまでの幾何計算と現実的な工作精度を鑑みて、垂直視域 200cm 以内、水平視域幅 100cm 以内のサイネージを想定して設計した。スリット間隔については 50mm とした。このスリット間隔は想定する観察距離 120~240cm の範囲において視角 1.2~2.4deg に対応する。スリット間隔 1.2deg と 2.4deg では実験(1)によって正しい奥行き知覚が可能であることが確認されていることから、この範囲内で両眼分離ができれば両眼視差による奥行き知覚ができることが期待される。ディスプレイを構成する光線現ユニットの本数は 24 本とし、ディスプレイサイズを縦 32cm x 横 115cm とした。

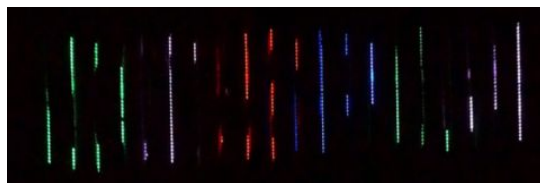


図 8 . 作成したデバイスと表示イメージ

## (4) 手前側の奥行き知覚に関する問題

シミュレーションによるスリット間隔とパターンのサイズ、スクロール速度、視差範囲を同様に設定したにも関わらず、実際のデバイスによる観察では手前側の奥行き知覚が困難であるという問題が起こった。その理由として、遮蔽矛盾が発生しているからであると考えた。遮蔽矛盾とは、奥行き手がかりである視差情報と矛盾した遮蔽関係が提示されてしまうことである。



図 9 . 視差のあるパターンと遮蔽板による遮蔽矛盾

(右の場合には矛盾が起こっている)  
つまり、立体視可能なマルチスリット視においては、スリットが並ぶ遮蔽板よりも手前側の奥行き視差を提示した場合には、パターンと遮蔽板との遮蔽関係が矛盾することになり(図9)その場合は、遮蔽板の位置に知覚される。

従来研究において、遮蔽矛盾が生じている場合において視差情報に基づいた奥行き知覚で安定した立体視をさせるには、透明視解釈が有効とされている。透明視解釈は、透明面を構成する領域の輝度が、背景となる2つの領域の中間の輝度である条件下で生じることからマルチスリット視においては遮蔽板と背景と間の輝度をパターンに使用することで透明視解釈が生じ遮蔽矛盾が解消される可能性が考えられたことから、次の実験を行った。

下記の4つについて、提示されるパターンの奥行きを、ディスプレイ面に対して手前側か奥側かを2択で回答させる実験を行った。

1. 従来の提示
2. 透明視が成立する輝度条件
3. 透明視が成立しない輝度条件
4. 透明視が成立する輝度条件(Kanizsa型主観的輪郭)

従来の提示ではパターンのみを有色としており、背景は黒であった。しかし、背景が黒であるとディスプレイをなすスリットを視認することができず、奥行き判別ができない。そのため、背景を少し光らせて(YUV表現法でY=32)スリットを視認できる条件にし、白い(Y=200)パターンを提示した。次に透明視が成立する条件であるが、透明面を構成する領域の明るさが背景となる2つの領域の間の輝度を持つ必要がある。そのため、背景を(Y=200)とし、パターンを(Y=96)の輝度に設定した。反対に透明視が成立する条件外のものとして、背景を(Y=32)とし、パターンを(Y=96)とした。パターンの輝度を同じにすることで、背景の輝度との違いを明らかにした。また、Kanizsa型主観的輪郭の生成には背景を(Y=200)とし、パターンを黒(Y=0)とした。これらの刺激を以下の表でまとめる。

刺激	パタン(Y)	背景(Y)
従来	200	32
透明視成立条件	96	200
透明視成立条件外	96	32
Kanizsa型主観的輪郭	0	200

刺激は赤い注視点とその両隣に文字「A」をディスプレイの右から左へスクロール提示する。文字の大きさは6deg×6deg、指標の大きさは1deg×1degである。スクロール速度は24.4deg/sec、スリット間隔は2.4degであり、ディスプレイ面から120cm離れて観察を行う(図10)。視差は各条件パターンで0.5, 0.25, 0, -0.25, -0.5degの5段階をランダ

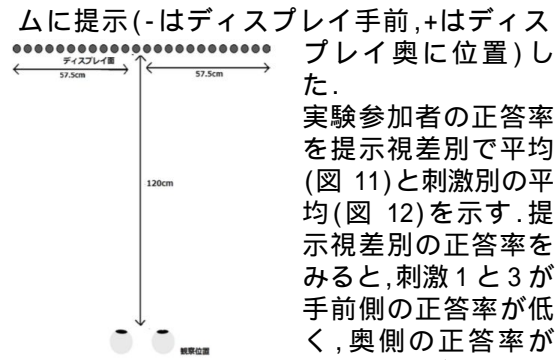


図10. 実験俯瞰図

ムに提示(-はディスプレイ手前,+はディスプレイ奥に位置)した。

実験参加者の正答率を提示視差別で平均(図11)と刺激別の平均(図12)を示す。提示視差別の正答率をみると、刺激1と3が手前側の正答率が低く、奥側の正答率が高いことがわかる。

反対に、刺激4は奥側の正答率が低く、手前側の正答率は

高い。刺激2はどの提示視差に対しても高い正答率である。刺激別の正答率を見ると刺激2が88%で高いことがわかる。刺激1が69%で刺激3が57%、刺激4は72%となっている。

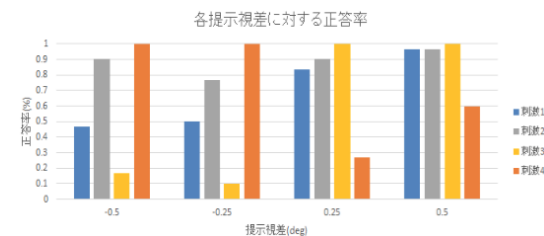


図11. 提示視差別の平均正答率

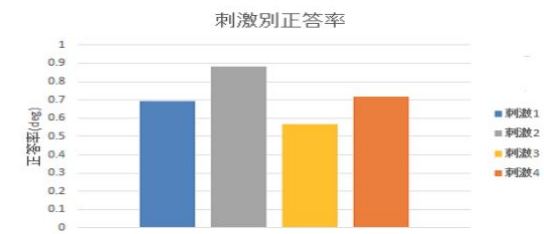


図12. 刺激別の平均正答率

提示視差別の正答率を見ると、透明視輝度条件を満たさない刺激3と従来の提示方法である刺激1では手前の視差を提示した場合にはチャンスレベルの5割を下回っている。奥の視差を提示した場合には高い正答率があることから、奥側の奥行き知覚をする傾向にあることがわかる。遮蔽矛盾において、遮蔽情報を大きな手がかりとしてディスプレイとの相対位置を解釈したと考えられる。これらに対して、透明視条件の刺激2では手前側の視差条件でも高い正答率である。これは手前側の視差を与えた時に透明視解釈を行うことで遮蔽矛盾の解消ができたと考えられる。

次に、刺激別正答率をみると、透明視輝度条件を満たす刺激2が約9割の高い正答率であり、従来の提示の刺激1の7割に比べて大幅に改善されたことがわかる。また、透明視輝度条件を満たさない刺激3は正答率が6割に満たしていない。以上より、このディスプレイの設計論として、手前側の視認性を向上させるためには透明視解釈輝度条件を満た

して透明視解釈を生じさせることが効果的である。

以上より、「スリット視を利用した三次元情報提示デバイス」の実現のために、シミュレーションとHMDを用いた実験により実現可能であることを検討し、得られたパラメータから実機を作成した。この実機を用いて評価を行ったところ、スリットよりも手前側の立体知覚に乏しいという問題点を発見し、これを改善するために透明視の概念を持ち込むことで、手前側についても正しく立体知覚が出来る方法を発見した。したがって、当初の研究計画をほぼ達成できたといえる。

また、実際に製作したデバイスは、コンピュータグラフィックスの世界的な国際会議であるSIGGRAPH2014のEmerging Technologyに採択され、国際的に高い評価を得ることができた。

さらに、今回製作したlight field方式の立体ディスプレイは両眼視差だけでなく、運動視差にも正しく対応するため、移動しながら見ることで、想定範囲外であった遠方からでも立体感を得ることができた。

今後の展望として、同システムをディスプレイだけでなく3Dキャプチャシステムと対にすることで光線群を再構築し、異なる2つの空間の接続を試みる予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計12件)

安藤 英由樹, 宮崎 陽平, 前田 太郎, 渡邊 淳司, "マルチスリットディスプレイにおける三次元知覚に関する研究", 信学技報HIP2012-89, 2013., 2013/3/14, 沖縄産業支援センター

Hideyuki ANDO, Yohei Miyazaki, Taro Maeda, Junji Watanabe, "Three-Dimensional Perception in Multi-Slit Vision for Public Display", IEEE VR 2013 WS: AMBIT 2013, 2013/3/16-23, Orlando Florida USA

Hideyuki Ando, Junji Watanabe, "Geometric optics design of the multi-slit stereoscopic display- From the view point of public use", Proc. of ASIAGRAPH2013, 2013/4/25-27, Hawaii Island USA

安藤 英由樹, 宮崎 陽平, 前田 太郎, 渡邊 淳司, "3D マルチスリットディスプレイにおけるオブジェクトの3次元移動知覚特性", Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan, Annual Conference 18, 281-284, 2013-09-18, 2013/9/18-19, グランフロント大阪

Hideyuki Ando, Junji Watanabe, "Scanning", SIGGRAPH ASIA 2013 Art Gallery 2013/11/19-23, Hong Kong Convention and Exhibition Centre, China.

安藤英由樹, "展示を通じた新しい体験イ

ンタフェースの評価,"第5回横幹連合コンファレンス論文集", pp282-283, 2013/11/21-23, 香川大学

安藤英由樹, "錯覚利用インタフェースとその応用", 電子情報通信学会技術研究報告.SIS, スマートインフォメディアシステム113(467), 51-53, 2014-02-27, 2014/3/6-7, 関西大学うめきたラボラトリクリエイティブスペース

安藤英由樹, "錯覚利用インタフェースを用いた体験システムの展示", 錯覚と数理の融合研究プロジェクト 第7回錯覚ワークショップ, 2014/3/11-12, 明治大学中野キャンパス

Hideyuki Ando, Junji Watanabe, "Implementation of the multi-slit stereoscopic display - Device Design -", Proc. of ASIAGRAPH2014, 2014/4/25-27, Bali. Indonesia

Hideyuki Ando, Seichiro Hirabara, Taro Maeda, Junji Watanabe, "Slit-based light field 3D display", SIGGRAPH '14 ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, Article No. 22, ISBN: 978-1-4503-2961-3 doi>10.1145/2614066.2614083, Canada.

安藤 英由樹, "マルチスリット視を利用した三次元情報計測提示システムの構築", WISS2014, 2014/11/26-28, 浜名湖口イヤルホテル

J. Watanabe, S. Hirabara, T. Maeda, A. Hideyuki, "Interactive Technologies with Applied Perception", 第21回ディスプレイ国際ワークショップ(IDW '14) 2014/12/3-5, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター

〔その他〕

「錯覚生かし生活支援」日本経済新聞, 2015/1/13

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

安藤 英由樹 (ANDO Hideyuki)  
大阪大学大学院情報科学研究科 准教授  
研究者番号: 70447035

(2)研究分担者 該当なし

(3)連携研究者

渡邊 淳司 (WATANABE Junji)  
NTTコミュニケーション科学基礎研究所  
主任研究員  
研究者番号: 40500898