

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00271

研究課題名(和文) マルチスリット視を利用した双方向立体映像伝送技術

研究課題名(英文) Bi-directional stereoscopic image transmission technology using multislit view

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：立体視を実現するためには左右の眼に異なる視覚情報を提示する両眼視差，頭部移動に合わせて視覚情報変化させる運動視差の両方を提示する必要がある。両眼視差と運動視差を同時に効率よく提示する手法として，複数本の一次元光点列を高速回転させ，光線群を再現する独自の手法を提案してきた。本研究ではこの光線再現を行う手法を計測手法にも応用し，実環境の物体を光線群として計測することで立体視覚情報を取得するシステムを開発した。また，本計測システムをこれまで開発した手法と組み合わせることで，多人数が同時に異なる視点から，裸眼立体視可能な立体テレビジョンシステム(双方向立体映像伝送技術)を実現した。

研究成果の概要(英文)：In order to realize stereoscopic vision, it is necessary to present both binocular parallax that presents different visual information to the left and right eyes, and motion parallax that changes the visual information according to head movement. The binocular disparity and the motion parallax As a technique to efficiently present at the same time, we proposed a proprietary method to rotate a plurality of one-dimensional light spot rows at high speed and reproduce the light rays. In this research, we applied this method of light ray reproduction to measurement method, we developed a system that obtains stereoscopic visual information by measuring objects in real environment as a group of light rays. In addition, by combining this measurement system with the method developed so far, realize a bi-directional stereoscopic video transmission technology capable of stereoscopic viewing from multiple different viewpoints at the same time.

研究分野：人間情報工学

キーワード：マルチスリット ライトフィールド 立体視 双方向通信 光線再現 ディスプレイ

1. 研究開始当初の背景

離れた空間の視覚情報を伝送する技術としてテレビが普及しているが、立体視可能な3Dテレビの普及率は低い。その理由の1つとして、日常の物体観察では、自由な視点位置から物体を眺めることができるのに対して、多くの3Dテレビでは、立体視可能な範囲がカメラ(離れた場所で撮像を行う)の視点位置に固定されるため、物体を様々な位置から見るという欲求が満たされないということが挙げられる。従来多くの方法では観察者の頭部に頭部位置を計測するセンサ及び Head-Mounted-Display あるいは 3D-grass などの映像提示の装着が必要であり、装着の面で観察者に大きな負担を要する。実空間のように複数人が何の装置も装着せず、それぞれ異なる視点から観察することを実現する方法としては、ある空間における光線群を計測し、再構築することで、裸眼の立体視を実現するライトフィールドを用いた方法(Tachi et.al,1996 など)が検討されている。さらに、広い空間で同時にライトフィールドを再現する方法として、情報通信研究機構 NICT が開発した 200 インチ裸眼立体視ディスプレイがある。これはスクリーン奥にある 200 台の各プロジェクタアレイから出力される少しずつ視差の異なる映像を、水平方向に狭く拡散させる集光レンズを通してスクリーンに表示させることによって、大画面かつ広域の視域、さらに 57 視点ではあるが、ライトフィールドを実現したディスプレイである。しかしながら、上述のように膨大なデバイスリソースが必要であり、普及という観点からは現実的な難しさがある。

一方で我々は、今までにスリット状の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2次元イメージを知覚する(以後“スリットディスプレイ”)の各アレイをライトフィールド化し3Dに拡張したスリット式3次元ディスプレイを実現した。このディスプレイは、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、異なる位置の観察者

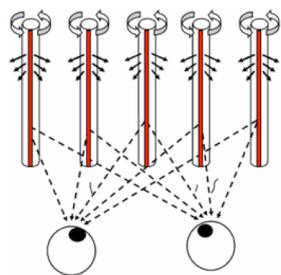


図1. マルチスリットライトフィールドディスプレイ

A, B に対して異なる視覚情報を提示し、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(図1)。この方式では疎に配置された光点列でライトフィールドディスプレイを実現できるため、デバイスリソースを大幅に簡略することができる。

2. 研究の目的

立体視を実現するためには、左右の眼に異なる視覚情報を提示する両眼視差、頭部移動に合わせて視覚情報変化させる運動視差の両方を提示する必要がある。我々は今までに、ライトフィールドによって両眼視差と運動視差を同時にかつ、低リソースで提示する手法を開発してきた。これはマルチスリット視ディスプレイそれぞれの交点列について指向性を持たせて回転させることで、光線群を再現する独自の手法を提案してきた。本研究では、光点列による光線再現と対になる、計測手法を実現することで、実環境の物体を光線群として計測し、立体視覚情報を取得するシステムを開発する。また、本計測システムをこれまで開発したディスプレイと組み合わせることで、多人数が同時に異なる視点から、裸眼立体視可能な立体テレビジョンシステム(双方向立体映像伝送技術)を実現する。

3. 研究の方法

課題 1: マルチスリットセンサによる立体情報計測の検討

複数の線光源を利用したマルチスリット立体視法による立体視覚情報提示に、光線の計測機能を追加して提示系と対になる計測系を実現する。はじめに、一次元光センサ列を高速回転させたときの回転速度に対する計測周期や計測の感度、スリット幅、といった基本的な設計パラメータの確定と、複数本の光センサ列を同時に計測するためのシステムを開発する。計測したデータの評価に関しては、得られたデータを基に三次元空間を再構成するVR空間上のシミュレーションによって確認する。そうすることで、どの場所から見ても、正しく立体視覚情報が提示可能となる設計指針を明らかとする。

課題 2: 裸眼立体視可能なテレビジョンシステム(立体映像伝送技術)を実現するデバイスの開発

1次元センサ列と1次元光源列を統合し、1次元センサから情報をそのまま光源から提示することで、双対の計測・提示系を構成する。

課題 3: 裸眼立体視可能な双方向立体映像伝送技術の評価

実際に立体映像伝送技術を実現したときの効果検証としてヒトの視覚特性から評価を行う。

4. 研究成果

課題 1: マルチスリットセンサによる立体情報計測の検討

空間の光線の要素には、位置、方向、波長、時刻の四つが挙げられる。これに基づいてマルチスリットディスプレイにて提示する光線群と対を成すようにして設計すればよい。(図2)

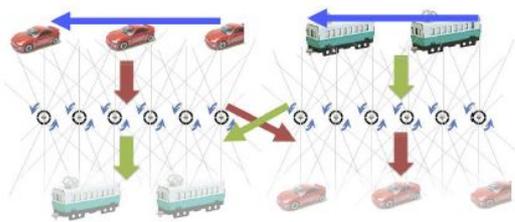


図2. 光線群の入力と出力の関係

位置については、スリット筒の中心に位置するLEDが光源点となる。そこで、背面からこのそれぞれの光源点を通る光線を計測し、通過する方向へ入力された波長(色)と同じ

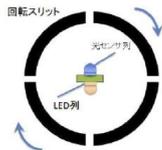


図3. 光線の入力と出力

色として光源点を発行させれば良い。時刻については、点滅に見えない周波数(100Hz以上)となるように筒を回転させ、光源点を発行させれば良い。具体的なメカニズム例としては、ライトフィールドとして、光センサ列への入射光と対になるように、LED列を発光すれば良いことになる。

研究当初においては、図3の実装を検討し、RGBカラーセンサ S9032-02を用いて検証を行った。しかしながら、回転する筒のスリットの間を通過するわずかな光線だけでは、十分な光量が得られず、正確な色情報の取得は困難であることが明らかとなった。また、センサ個数もLEDと対となるだけ必要となるため、コストの面においても不利であることがわかった。そこで、図4のように、マルチスリットディスプレイのスリットユニット一つと対をなすようにカメラを配置するカメラアレイ手法の実装を検討した。

具体的なカメラモジュールとしては、LED列の解像度とフレームレート及び入手性、コストを検討した結果OV7670カメラモジュールを利用することとした。

具体的な画像処理方法(図5)としては、まず、カメラから得られた映像について画角が一致するように垂直方向のライン状に分割する。そして、光源点を通る光線の入射角に応じラインの選択し、光源を点灯させる。これにより、カメラに入射する光線群を保持したままディスプレイによって提示されるように制御される。以上の検討を踏まえて設計を行った。課題2では実際に作製した具体的な構

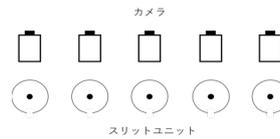


図4: カメラアレイ方式の構成

成について述べる。またこの手法では、レンズに関わる歪による幾何学的なずれによる影響が懸念される。そこで、課題3では設計されたシステムについてヒトの知覚特性について実験を行った。

課題 2: 裸眼立体視可能なテレビジョンシステム(立体映像伝送技術)を実現するデバイスの開発

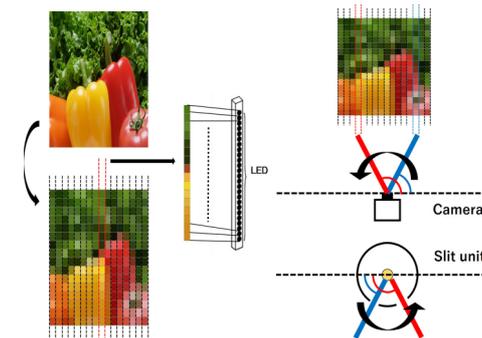


図5: カメラアレイ方式によるライトフィールドの再現方法

前節で議論した裸眼立体視可能なマルチスリットディスプレイの設計パラメタを参考に、カメラアレイ方式によるライトフィールド撮像デバイスの設計を行なった。コスト及び過去の実験における視認性の結果から換算してディスプレイ面は横75cm、縦32cmの面に16本の縦の線光源が等間隔にならんだものとした。ディスプレイ部におけるスリット間隔は50mmであるため、カメラ間隔においても同一の50mmとした。

ライトフィールドの撮像装置では、カメラ横に8台を50mm間隔で並べたカメラアレイを8個一式として、小型の三脚によって固定される。それぞれのカメラは、ネジを回すことで固定したまま方向の微調整ができる機構とした。カメラアレイを実現するカメラには、OV7670カメラモジュールを使用した。カメラの画素数は640×480であるが、画素の読み出しが横方向であるため処理の効率を考慮して、90度回転して使用している。よって本装置におけるカメラの画素数としては480×640となる。カメラのレンズは焦点距離2.2mm、絞り値がF2.5(ユニエル電子製BLT-2225)を使用した。カメラの水平方向画角65.3°は垂直方向画角49°であった。本システムにより実現する視点数は32視点であるから、49°で480dotsを32分割し、それぞれの光線がイメージセンサのどの横番号に入射するかを考えればよい。したがって、図6のようにカメラに入射する光線を分割した。回転する筒のスリットの開口方向に合わせて提示する横方向の画素の列を変化させることで、横方向の光

線再現を実現する。縦方向については、64 個の LED 列によって表示する。カメラの垂直方向の画角が 54.6° で 640dots これを 64 分割し、対応する LED を駆動させる。これらの制御は FPGA (Xilinx 社 XC6SLX9 TQG144) を用いて行った。回転するスリット筒の角度はモータ軸に接続されたロータリーエンコーダから ABZ のパルス (500ppr を 4 逓倍するため 2000ppr) を FPGA でカウントし計測される。また、CMOS カメラ入力, LED 出力も FPGA に接続されている。FPGA 基板は一台の回転する筒, LED 列, CMOS カメラ一式ごとにそれぞれ準備される。図 2 のようなライトフィールドの入出力を行う場合には、FPGA

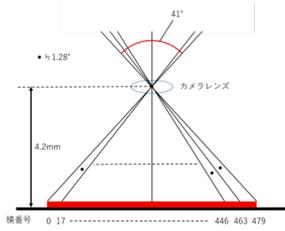


図 6: カメラへ入射する光線の軌跡

図 7 のようなライトフィールドの入出力を行う場合には、FPGA

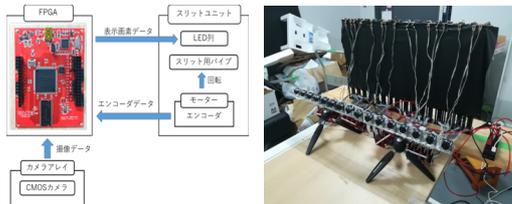


図 7. システムの構成図 (左) とシステム概観 (右)

と FPGA の通信は行う必要がない。この、システムの構成図を図 7(左)に示す。また、実際に作製した裸眼立体視可能なテレビジョンシステム (立体映像伝送技術) の外観を図 7(右)に示す。

課題 3: 裸眼立体視可能な双方向立体映像伝送技術の評価

実際に立体映像伝送技術を実現したときの効果検証としてヒトの視覚特性から評価を行うために、(a)カメラの前に置かれた物体の形状知覚の実験と、(b)カメラの前に置かれた物体の奥行き知覚の実験をおこない、設計事項に関わる検証実験を行った。

(a) カメラの前に置かれた物体の形状知覚実験
試作したライトフィールドの入力装置によって撮像されたライトフィールドを、裸眼立体視可能なマルチスリットディスプレイによって観察者に提示し、パタンの可読性とパタンの大きさ、スクロール速度のパラメタとの関係について検証を行う。また、カメラレイ装置の構造上、撮像したライトフィールドにわずかな歪みが発生する可能性があるが、この歪みが存在する状況でもパタンの可読ができるかについても検証を行う。

実験手続き:本実験では、試作したカメラアレ

イ装置によって刺激となるパタンを撮像し、撮像されたライトフィールドを裸眼立体視可能なマルチスリットディスプレイによって実験参加者に提示を行った。

本実験では、実験参加者にはそれぞれの利き目のみで単眼で刺激を観察させた。提示するパタンにはラテン字の A, B, D, K, R, X の 6 種類について、A5 黒画用紙一杯となるように文字の形に切り取られた赤紙を貼り付け、任意の速度で動かすことができるベルトコンベアに固定した。実験参加者は、視点位置がディスプレイ面の中心位置の正面となるように初期位置を調整させた。視点の初期位置とディスプレイ面との距離は 65.8cm である。スリット間隔、スリット幅はそれぞれ 5cm, 3mm であり、視覚に換算するとそれぞれ 4.36deg , 0.261deg となる。パタンの表示方向は右から左とした。文字は各試行で 6 種の中からランダムに 1 種の文字がマルチスリットディスプレイを水平移動する。ディスプレイ面の中央には指標が表示されており、実験参加者にはこの指標注視するように指示した。物体の背景には暗幕を置き、文字以外の部位は黒色となるようにした。文字の色は赤色である。このとき、文字の運動速度を視覚換算で 12.0, 14.4, 16.8, 19.2, 24.0 [deg/sec] となるようにし、パタンの大きさを 4.2, 5.8, 7.4, 9.0 [deg], となるようにカメラとベルトコンベア距離を調整した。それぞれの条件がランダムに 6 回ずつ出現するようにした。実験参加者にはスクロールが停止したあとにすぐ、提示された文字を口頭にて回答させた。実験参加者数は矯正視力 1.0 以上の健常な 20 代男性 3 名であった。

パタンのスクロール速度と正答率についての結果を図 8 に示す。横軸は提示したパタンのスクロール速度であり、縦軸は正答率である。また、error bar は標準誤差を示している。また、パタンの大きさと正答率の結果を図 8 (右) に示す。この図において、横軸は提示したパタンの大きさであり、縦軸は正答率である。また、error bar は標準誤差を示している。

図 8(左)より、正答率とパタンの速度には

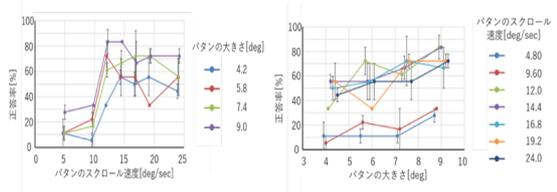


図 8. パタンのスクロール速度と正答率 (左) とパタンの大きさと正答率 (右) の関係

山形の形状を示す傾向があり、パタンの大きさによらず、スクロール速度が $12[\text{deg}/\text{sec}]$ 以上のときに正答率が高いという傾向が見られる。また、スクロール速度が $9.6[\text{deg}/\text{sec}]$ 以下の条件では、スクロール速度が下がるほどパタンの正答率が下がっている。この理由と

して、マルチスリット視では、あるスリットから見える物体の一部が、隣接するスリットから見えるようになるまでの時間差によってスクロール速度の情報を得ているが、物体の運動が遅すぎると、その物体の運動速度を知覚しづらくなり、その結果パタン全体の形態の再構築が困難になったことが考えられる。また、

パタンのスクロール速度によらず、パタンの大きさと正答率との間には正の相関関係の傾向を示すことが見て取れる。特に、文字の大きさが 4.2[deg] の条件では、それよりも文字の大きさが大きい他の条件と比べ、正答率が極端に下がっている。この要因は隣り合うスリットの間隔が 4.36deg であったことから、パタンの大きさが 4.2deg の条件では、一つの文字が同時に 2 本以上のスリットを同時に通過することがなく、それにより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。これらの結果は PC でマルチスリット視をシミュレートした映像を HMD で実験参加者に観察させた先行研究(安藤ら 2016)の結果とよく一致することから、計測システムは想定どおりに動作していると考えられる。また、課題 1 危惧されていたレンズによる歪みについては正答率にはほとんど影響しないことがわかった。

(b) カメラの前に置かれた物体の奥行き知覚実験

ヒトが奥行きを知覚する際の運動視差の手がかりは、大きく観察対象の物体が運動する条件での受動的運動視差と、観察者の視点移動する条件での能動的運動視差の二つに分けて考えることができる。ここで、観察者があある一つの物体を観察する状況について考えると、物体が速さ v である方向に時間 t だけ移動するのを静止した観察者が観察する場合(静止条件)と、物体の移動する方向と真逆の方向に観察者が速さ v [m/sec] で時間 t [sec] だけ移動しながら静止した物体を観察する場合(運動条件)では、観察者の網膜に結像する物体から発せられる光線は全く同じになる。つまり、観察者にとっては、両条件における物体の見え方は変わらないと言える。しかし、運動条件の場合のみ、観察者は自身の運動する速さを知覚している。観察者とある物体の距離を d [m]、網膜上での物体の移動量を θ [deg/sec] とするならば、運動条件においては

$$d = \frac{vt}{\tan(\theta)}$$

の関係が成り立つ。

よって、運動条件では、以上の関係を基に、観察者は物体との距離を幾何学的に求めることが可能である。言い換えるならば、観察者は運動条件では、物体の絶対奥行き量を推定することが可能であるといえる。それに対し静止条件では、観察者が物体の運動する速さを知覚することはできない。よって、物体の絶対奥行き量を推定することは不可能である。次に、物体をスリット越しに観察する状況に

ついて、静止条件と運動条件にて考える。物体をスリット越しに観察する際、物体と観察者の間にスリットとそれを構成する遮蔽物が存在する。どちらの条件でもスリットは静止しているが、運動条件においては、網膜上ではスリットが運動しているように見えてしまう。よって、観察者はマルチスリット視を行う上でスリットが動いて見えることを考慮しなければならない。マルチスリット視は、スリットの間から見える対象物体の断片的映像とその運動速度を知覚することによって物体の全体像を補完して知覚する現象である。マルチスリットが網膜上で運動することから、そのスリットから見える物体の断片的映像の運動速度は、マルチスリットの網膜上での運動速度の影響を受ける。マルチスリットの網膜上での運動量は、観察者からマルチスリットまでの距離と観察者の運動速度によって定まるため、マルチスリット視において、観察者が運動することで物体を眺める際には、マルチスリットと観察者との距離も考慮に入れなければならない。スリット越しに見える物体の速度によって、物体のサンプリングレートを決定しているため、観察者から見たスリットと観察物体の網膜上での移動速度の差が物体の形状、奥行きを知覚には重要である。次節の実験では、物体の網膜上での運動速度と奥行きを知覚精度の関係について検証を行う。

実験手続き: 実験 (a) と同様の環境で実験を行った。本実験では、運動立体視のみを考慮するため実験参加者にはそれぞれの利き目のみで単眼で刺激を観察させた。提示する刺激には赤色円を用いた。実験参加者には、視点位置がディスプレイ面の中心位置の正面となるように初期位置を調整させた。視点の初期位置とディスプレイ面との距離は 65.8cm である。スリット間隔、スリット幅はそれぞれ 5cm, 3mm であり、視覚に換算するとそれぞれ 4.36deg, 0.261deg となる。ディスプレイ面の中央に刺激が表示されており、実験参加者にメトロノームの音に合わせて身体的に無理のない速度である 30cm/sec で頭部を正面に対して右方向に平行に 30cm、その後左方向に 60cm、続けて右方向に 30cm 移動させ、初期位置まで移動させた。頭部の移動中には指標を注視し続けるように指示した。スクロール移動する物体の背景には暗幕を置き、刺激以外の部位は黒色が表示される。このとき刺激の網膜上での移動速度を 31.0, 25.6, 21.8, 18.9, 16.7[deg/sec] の 5 段階でランダムに提示した。このとき、各運動速度は、観察者の視点位置から物体までの距離がそれぞれ 100, 125, 150, 175, 200[cm] の状況に相当する。実験参加者には頭部の運動が終了したあとにすぐ、提示された刺激の奥行きを同様の運動を無制限に行いながら下限 50cm、上限の範囲で回答させた。各条件につき 5 回試行を行った。実験参加者数は矯正視力 1.0 以上の健常な 20 代男性 3 名であった。なお、

実験参加者の頭部の運動を統制するため、事前に練習を行わせた。

実験結果:実験参加者 3 名の正答率の平均値

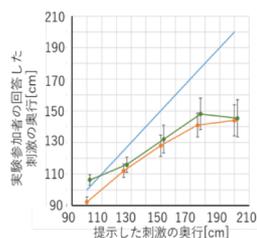


図 9. 提示した奥行と回答した奥行の関係

今回の実験結果であり、オレンジ色で表された結果が CG で作成された先行研究の結果である。先行研究での結果において 100[cm]付近では、カメラを用いた物体のほうが手前側に奥行知覚する傾向がみられた。この理由は、対象がカメラ近傍ほど歪み強く感じる必要があると考えられる。またそれ以外では、CGを用いた場合よりも奥行きを手前に知覚する傾向が見られた。これは、奥行の知覚における能動的運動視差の手がかりは自身が運動した際の網膜上での物体の動きによって生じ、観察者は自身の体性感覚の情報と網膜上の移動量との幾何学的関係より、絶対的の奥行量を知覚する手がかりとする。観察者が一定の視点移動をする際、その幾何学的関係より物体の奥行が大きいほど網膜上での物体の移動量は小さく、逆に物体の奥行が小さいほど網膜上での物体の移動量は大きくなることが要因であると考えられる。このような知覚される奥行と実際の奥行の誤差についてはコンテンツの設計において注意する必要がある。

結論:裸眼立体視可能なマルチスリットディスプレイの対となる、マルチスリット視に基づいて空間のライトフィールドを撮像する手法について検討・試作・評価実験を行った。その結果として、理論設計をほぼ実現するシステムを構築することに成功した。双方向通信の実施にあたっては、デバイスコストにより検証は行うことができなかった(8本づつを利用して構築したが、本数の不足により高い視認性が得られなかった)が、同一のシステムをもう1式準備することで容易に実現可能であると考えられる。さらに、国際会議(SIGGRAPH ASIA 2017)にて展示し、その有効性について理解が得られた(<https://youtu.be/Z9TyF001Xu0> 参照)。特にマルチスリットディスプレイは大画面化に関するコストが少なく済むことから、大規模なショールーム、コンサートホールや野球場サイズのライトフィールド裸眼立体視ディスプレイシステムとしても利用可能であり、本研究の成果である、ディスプレイの対となるライトフィールドを撮像システムによって遠隔テレポーテーション技術として利用が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 安藤英由樹, 平原誠一郎, 古川正紘, 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透明視を利用した知覚特性の改善, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21 巻 (2016) 1 号 p. 149-152, https://doi.org/10.18974/tvrsj.21.1_149. (査読あり)

2. Tanoue Tomo, Watanabe Junji, Maeda Taro, Ando Hideyuki, 3D communication system using slit light field, ACM SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies, DOI:10.1145/3132818.3132820. (査読あり)

3. 安藤英由樹, "意識下応答を活用した情報提示デバイスの研究", 基礎心理学研究, 35-2, pp1-6, 2017. (査読なし)

[学会発表] (計 6 件)

1. 安藤英由樹, "New Media Experience Based on illusion", 「再次重回類比之詩」藝術家座談会, 2016/8/28, 台湾台中市(招待講演),

2. Hideyuki Ando, Junji Watanabe, "Low resource visual display method based on illusion of eyeball movement", International Display Workshops 2017, sendai.

3. 安藤英由樹, "行動誘導インタフェース", IT 連携フォーラム OACIS, 第 49 回技術座談会, 並列計算のトレンドと行動誘導技術, 2015/10/14, 大阪, (招待講演).

4. 田之上 朋, 渡邊 淳司, 安藤 英由樹, 前田太郎, "マルチスリット視における自己運動を利用した静止物体の知覚特性", 電子情報通信学会, ヒューマン情報処理研究会, 2016/5/18, 沖縄.

5. 安藤英由樹, "意識下応答を活用した情報提示デバイスの研究", 日本基礎心理学会 2016 年度 第 1 回フォーラム, 2016/5/21, 東京, (招待講演).

6. 田之上 朋, 渡邊 淳司, 前田 太郎, 安藤 英由樹, "マルチスリット視に基づいた 3D コミュニケーションシステムの提案", 日本バーチャルリアリティ学会大会, 2017.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] (計 0 件)

[その他]

説明動画を下記にアップロード

<https://youtu.be/Z9TyF001Xu0>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤英由樹 (Hideyuki Ando)

大阪大学・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 (Junji Watanabe)

日本電信電話株式会社・NTT 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

(4) 研究協力者 該当なし