

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18200022
 研究課題名（和文） フォトニックナノスケールオートマトンに基づくセキュア分子画像メモリの開発
 研究課題名（英文） Development of secure image-memory based on photonic nanoscale automaton using molecules
 研究代表者
 谷田 純（TANIDA JUN）
 大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
 研究者番号：00183070

研究成果の概要：

ナノサイズのコンピュータの原型としてナノスケールオートマトンを提案し、その実証例としてセキュア分子画像メモリへの適用を検討した。オートマトンモデルにより高い暗号強度を有する画像暗号化技術を開発し、外部光信号により制御可能な光異性化分子を利用した DNA 分子によるナノスケールオートマトンを 2 種類構築した。また、フォトニックマイクロリアクタを作製し、分子反応の高効率化を達成した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2007 年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2008 年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
年度			
年度			
総計	35,700,000	10,710,000	46,410,000

研究分野：情報フォトニクス

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：ナノスケールオートマトン、分子画像メモリ、暗号・復号、フォトニック DNA 制御、DNA コンピューティング、フォトニックマイクロリアクタ

1. 研究開始当初の背景

設定されたプログラムに従ってさまざまな情報処理を実行するコンピュータは、単なるデータ処理のみならず、インテリジェント制御機器など、あらゆる分野で技術革新をもたらした。コンピュータの適用分野の拡大は、すなわち、新しい技術革新に直結すると言っても過言ではない。コンピュータの一つの展開方向として、ナノスケール領域で動作するコンピュータの開発が考えられる。これは、微小な物理サイズにより、分子反応や生体内反応など従来の手法では直接的に観察でき

なかったナノ世界に入り込み、そこでやりとりされる情報に対する効率的な操作の実現をめざすものである。本研究では、このナノスケール領域で動作する微小なコンピュータの原型として、ナノスケールオートマトンを提案し、その開発をめざした。

ナノスケールオートマトンに対して、三つの実現形態が考えられる。第一は、すべての構成要素をナノサイズで作成し、ナノスケール領域のみで動作が完結する形態である。DNA コンピューティングがめざす分子マシンなどがこれに相当する。潜在能力は非常に大

きいが、製造や制御など現在の技術力でも十分や性能を得ることは困難である。第二は、ほとんどすべての構成要素をマクロスケールで実現し、微小なプローブなどを介してナノスケール領域の情報を取得・制御する形態である。原子間力顕微鏡や近接場顕微鏡などがこれに相当する。物理応用ナノテクノロジーとして実績があるが、空間的に広がった領域をカバーするにはプローブを走査する必要がある。

そこで、本研究では、第三の実現形態として、これらのハイブリッド形態に注目した。ナノスケールの情報操作部とマクロスケールの駆動部を別々に構成し、何らかの手段でそれらを連携して協調動作させる。特に、フォトニック技術を用いる接続形態は、光がもたらす非接触性、高速性、高いエネルギー密度などの特徴により大きな可能性を有する。フォトニック技術によるこの実現形態をフォトニックナノスケールオートマトンと称し、本研究において、その概念を整理し、具体化を行った。

2. 研究の目的

本研究は、ナノスケール領域においてコンピュータ機能を実現するナノスケールオートマトンの開発を目標とし、その具体的な実証システムとして、鍵機能を有するセキュアな分子画像メモリの試作を目的とする。特に、フォトニック技術を利用した能動的分子制御により、ボトムアップ的手法とトップダウン的手法の問題点を互いに補うようなフォトニックナノスケールオートマトンの概念を具体化し、それに基づいた情報システムの構築をめざす。

3. 研究の方法

鍵機能を有するセキュアな分子画像メモリの基本方式として、空間符号による視覚複合型画像暗号化技術を採用する。これは、空間符号パターンとして、画像情報を複数の画像に分散させる暗号化技術であるが、より高い暗号強度を実現するために、オートマトンモデルを適用する。分子画像メモリの設計・開発を通して、フォトニックナノスケールオートマトンの概念を確立し、DNA 分子による実装系を構築する。

まず、フォトニックナノスケールオートマトンに適した情報認証アルゴリズムを設計する。オートマトンモデルに基づいて、適切な順序に従って画像情報が入力された場合のみ、格納された画像情報が正しく復号する画像暗号・復号アルゴリズムを空間符号化技術により開発する。

フォトニックナノスケールオートマトンの具体的な実装技術として、DNA 分子系における内部状態信号の保持と遷移方法を検

討する。外部光信号による状態遷移を誘起する技術として、光応答性 DNA 分子を用いた方式について設計し、動作を実証する。光異性化分子であるアゾベンゼンを導入した DNA により光 DNA ピンセットを構成し、その能力を評価する。

また、オートマトン動作の任意性を達成するために、DNA 分子反応をモジュール化し、必要に応じてそれらを組み合わせる 2 記号 2 状態オートマトンの実装系を構築する。ヘアピン DNA とアゾベンゼン分子による反応系を構成し、その評価を行う。

一方、情報媒体となる DNA 分子の拡散を防ぎ、情報処理の実行に必要な分子濃度を確保するため、マイクロリアクタを開発する。リソグラフィ・エッチング技術により、直径 5~20 μm 程度の微小な反応空間を作製し、分子画像メモリの実装形態としての有効性を評価する。

4. 研究成果

(1) 画像暗号・復号アルゴリズムの設計
空間符号による視覚復号型暗号化技術をもとに、フォトニックナノスケールオートマトン向けの情報認証アルゴリズムを設計した。

まず、基本となる 2 状態で実現可能な XOR 型の状態遷移による暗号化と復号の原理を図 1 に示す。各画素は図の上部に示された XOR 型の状態遷移を行うオートマトンで構成される。暗号・復号の鍵となるランダムパターンを照射したのち、秘密画像パターンを照射することで画像の暗号化がなされる。暗号化がなされたオートマトンアレイに対して、鍵パターンを再度照射することで秘密画像が復号される。

次に DNA ウォーカーと呼ばれるような DNA の位置変化に基づくオートマトン利用時の情報暗号・復号の基本原理を図 2 に示す。DNA はウォーカー回路上を入力信号に従って移動する。ウォーカー回路上の各色は出力値を表す。画素ごとに出力値の系列を別に設定しておくことで、その系列情報なくしては正し

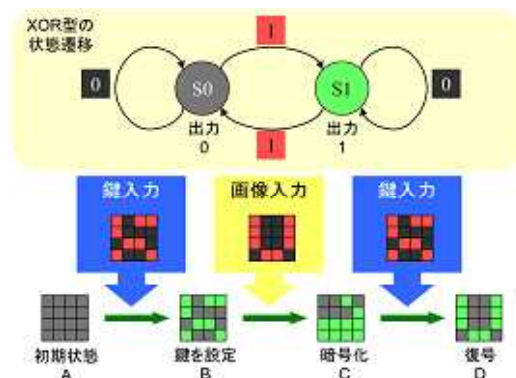


図 1 XOR 型の状態遷移を用いた画像の暗号と復号の原理



図2 DNAウォーカーを利用した状態遷移暗号の模式図

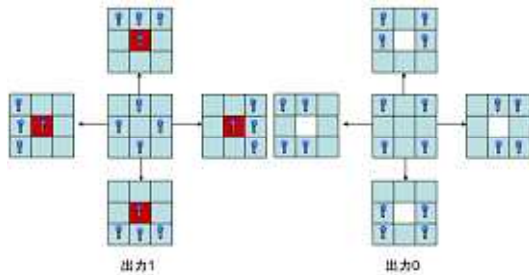


図3 SIMD型状態遷移を利用したアクセス痕跡記録メモリの構成

く情報を復号できない。さらにウォーカー回路上に一方構成ゲートを導入することで、復号手順に順序依存性を持たせることが可能である。

DNA位置による情報表現法を2次元に拡張した。状態遷移図を配置した2次元アレイ上のDNA位置を出力値に対応させる。フォトニックナノスケールオートマトンを3×3画素で構成するときの例を図3に示す。情報1を格納する際には各辺の中央部分にマーカーDNAを配置し、情報0を格納する際に四隅にマーカーDNAを配置する。読み出し操作はマーカーDNAを上下左右のどちらかに1画素分だけ動かして行う。光操作によりSIMD型にマーカーDNAが動くため、1回の読み出し操作によりマーカーDNAの間隔が変化するため情報アクセスの痕跡が記録される。

さらに、電気泳動操作をDNA種類と位置の2次元変換と考えると、電気泳動復号型の画像復号方式の実現可能性を示した。視覚復号型暗号を用いたセキュアディスプレイで開発された暗号パターンを応用して、表示画像を電気泳動法に基づいて符号化されたDNAとして、復号用マスクパターンで紫外光を照射することで秘密画像が復号される。

(2) 光DNAピンセット型オートマトン
ナノスケールオートマトンの一方式として、光DNAピンセットを考案した。これはDNAを材料としたナノマシンであり、光を照射することにより構造が可逆的に変化する。周辺環境との物質のやり取り伴わない自己完結型の構成のため、安定した連続状態遷移が可能であり、画像メモリの安定動作に資する。

光DNAピンセットの概要を図4に示す。光信号を入力、DNA構造を内部状態に対応づけることにより、図4(下)に示す入力記憶機能を有するオートマトンを実現する。構造は4種類のDNA(A、B、C、H)から成る。Hに

は光異性化分子であるアゾベンゼンを導入しており、紫外光によりアゾベンゼンがシス化するとCとHの結合力が低下して開状態(内部状態"S0")となり、可視光によりトランス化するとCとHが結合して閉状態(内部状態"S1")に遷移する。

実験では、光DNAピンセットの状態を判別するため、Aの両末端に蛍光分子(FAM)と消光分子(BHQ-1)を修飾し、蛍光共鳴エネルギー移動(FRET)による蛍光強度を測定した。開状態と閉状態では蛍光・消光分子間の距離が異なり、蛍光強度に違いが観測される。分光蛍光光度計(JASCO, FP-6200)を用いて、可視光(信号0、波長440nm)、紫外光(信号1、波長340nm)を交互に1分ずつ、10サイクル照射したときの蛍光強度を図5に示す。紫外光照射後に開状態、可視光照射後に閉状態に戻っている。閉状態から開状態への遷移効率は25~28%でほぼ一定であり、開状態の光DNAピンセットは可視光照射でほぼ100%閉状態に遷移した。さらに、メモリ動作の物理的な基盤となるガラス基板上での遷移を確認した。これらの実験結果から、光DNAピンセットによる光信号のメモリ機能を実証した。

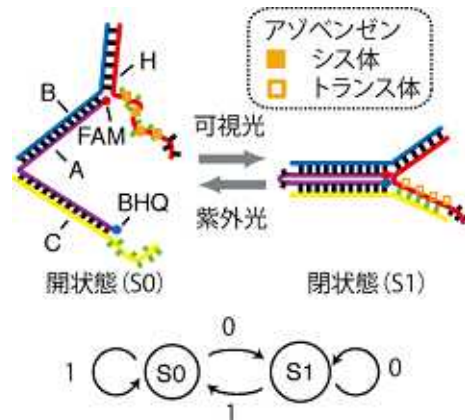


図4 光DNAピンセットの概要(上)と実現するオートマトン(下)

(3) 2記号2状態オートマトンの実装

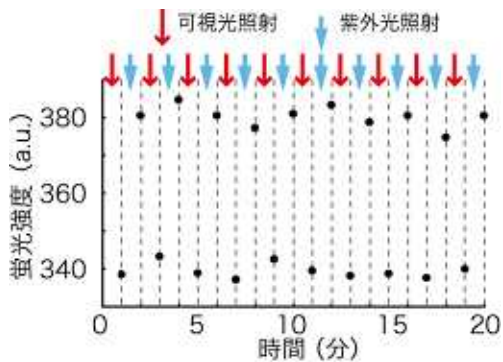


図5 繰り返し状態遷移の結果

セキュア画像メモリの実現には、時系列信号に依存した動作が必要である。そこで、2記号2状態の任意の状態遷移図を実現する有限オートマトンの実装を行なった。考案したオートマトンの構成を図6に示す。状態遷移と状態メモリの2つのブロックに分割し、これらを交互に動作させる。まず、状態メモリから内部状態が読み出され状態遷移ブロックに転送される。ブロック間の情報転送は、各ブロックで設定されたヘアピン DNA の開閉状態に伴う DNA の位置操作により行なう。状態遷移ブロックでは、現状態に応じて異なる反応系が駆動し、光信号に応じて次状態が決定される。この次状態の情報は状態メモリに転送され、保持される。

光信号に依存した構造に到達する4つのDNA反応系を設計・実証した。この反応系は、状態遷移ブロックの重要な機能である。図7に基本反応スキームを示す。ヘアピン DNA の開状態を S0、閉状態を S1 に対応させる。最初に A と M が反応すると、A と K の結合状態 (S0) が生成される (図7(左)) のに対し、A と M が反応しない場合には A のヘアピン閉状態が最終的な生成物 (S1) となる。この基本反応スキームに光応答性 DNA を導入するなどした4つの反応系を構成し、光入力に依存した状態遷移を可能にする。

可視光を信号0、紫外光を信号1に対応付け、これらの光信号を与えたときの4つの反応系の生成物を電気泳動した結果を図8に示す。実線枠で囲む領域に生成するバンドが S0 の構造に対応する。4通りすべての反応系に対して所望の DNA 構造が得られており、画像メモリにおける光入力機能を実証した。

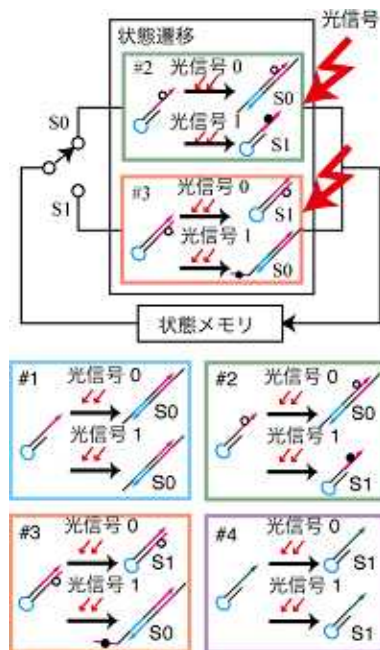


図6 2記号2状態オートマトンの実装方式
システムでは、これら4つの反応系のうち、

与えられた状態遷移図に応じて2つが利用される。ただし、状態メモリから転送される現状態に従って、2つのうち一つのみを駆動する必要がある。そこで、反応系全体を DNA 構造体内に結合固定し、M の物理的位置により、反応を制御する手法を考案した。基本構成を図9(a)に示す。DNA 群を用いて枠構造を作製し、ヘアピン DNA のペアの構造を変化させることにより、P1 または P2 で示す位置へ M が移動させる。M の位置を (i)P1、(ii)P2、(iii)P1 と移動させたときの蛍光強度の観察結果を図9(b)に示す。ヘアピン DNA の構造変化により M の位置を移動できることを確認した。この機能により、画像メモリの画像入力、暗号化、復号を段階的に実行できる。

次に、DNA 枠構造を積層することにより、オートマトンの一連の動作を実装した。実験により、M の位置にしたがって上段で駆動する DNA 反応系を選択できること、積層構造において DNA の位置情報が伝搬し現状態に応じた次状態の位置情報を得られることなどを確認した。

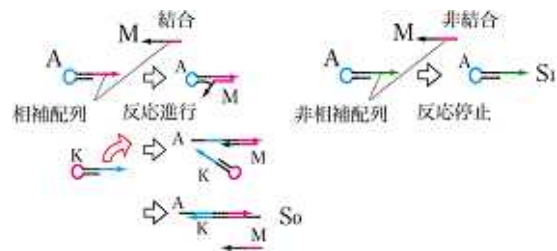


図7 基本 DNA 反応スキーム

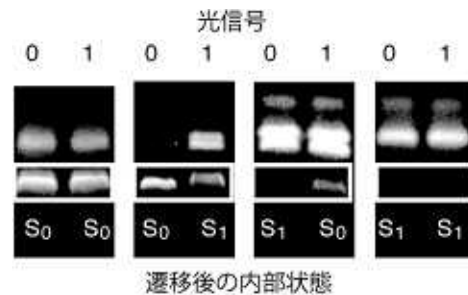


図8 光 DNA 反応系の電気泳動結果

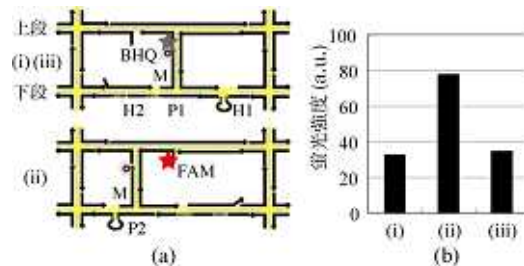


図9 位置情報に基づく反応制御法 (a)構成、(b)蛍光強度の変化

(4) フォトニックマイクロリアクタの作製

i 線ステップおよびウェットエッチングを利用し、フォトニックマイクロリアクタを作製した。各リアクタは直径 $20\mu\text{m}$ 、深さ $10\mu\text{m}$ とし、 20×20 個を配列した。制御光の透過性を考慮し、石英基板を用いた。作製したリアクタの写真を図 10 に示す。直径 $20\mu\text{m}$ 、深さ $6\mu\text{m}$ のお椀形状のリアクタを作製することができた。

作製したリアクタアレイを用いて、オートマトンに利用する DNA 基本反応を確認した。DNA をマイクロビーズに結合して DNA クラスタを作製し、上方からのレーザー光を用いた光ピンセットによりリアクタ内に輸送する。リアクタアレイの底面には光吸収材のチタニルフタロシアニンを塗布し、下方からのレーザー光照射による光熱変換に基づきリアクタ内の温度を制御する。レーザー光は対物レンズを用いて集光されており、特定のリアクタ内の DNA 反応を局所的に制御できる。

リアクタに直径 $2.8\mu\text{m}$ のビーズを輸送し、DNA 解離反応を行った結果を図 11 に示す。蛍光強度の変化から、対象のリアクタのみ反応を誘起できることが確認できた。このとき、光ピンセット用のレーザーを停止した位置において、ビーズがブラウン運動により隣のリアクタに移動する現象が見られた。これは、リアクタの底面形状がお椀型であり移動の障壁が低いためであると考えられ、リアクタ間の移動に必要なエネルギーを低減できる可能性を示唆している。(3)のオートマトンをフォトニックマイクロリアクタで動作させることにより、画像メモリを構成することができる。

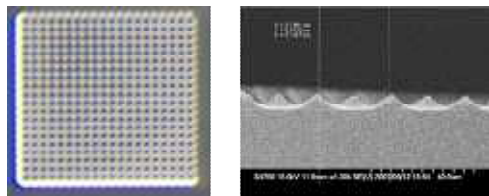


図 10 作製したフォトニックマイクロリアクタの光学顕微鏡写真と断面 SEM 写真

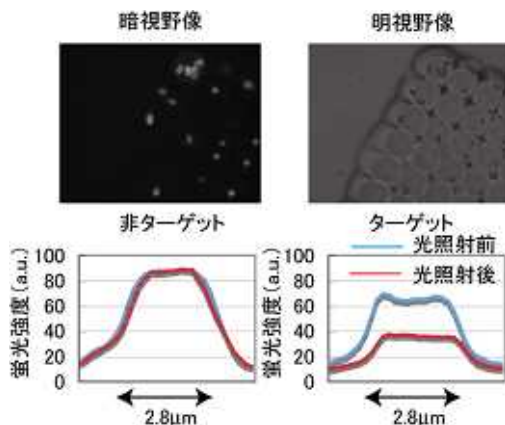


図 11 リアクタ内の反応制御結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. Yusuke Ogura, Takahiro Nishimura, and Jun Tanida, "Self-Contained Photonically-Controlled DNA Tweezers," *Applied Physics Express*, 2, 025004 (2009). [査読有り]
2. Mingjie Zheng, Yusuke Ogura, and Jun Tanida, "Three-Dimensional Dynamic Optical Manipulation by Combining a Diffractive Optical Element and a Spatial Light Modulator," *Optical Review*, 15, pp. 105-109 (2008). [査読有り]
3. Rui Shogenji, Naoya Tate, Taro Beppu, Yusuke Ogura, and Jun Tanida, "Local Area Manipulation of DNA Molecules for Photonic DNA Memory," *Lecture Notes in Computer Science*, 4287, pp. 374-380 (2006). [査読有り]
4. Hisanori Noto, Hirotugu Yamamoto, Yoshio Hayasaki, Syuji Muguruma, Yoshifumi Nagai, Yoshinori Shimizu, and Nobuo Nishida, "Analysis of Reproduced 3D Space by Stereoscopic Large LED Display," *IEICE Trans. on Electronics E89-C*, pp. 1427-1434 (2006). [査読有り]
5. Mitsue Otaka, Hirotugu Yamamoto, and Yoshio Hayasaki, "Manually operated low-coherence interferometer for optical information hiding," *Optics Express*, 14, pp. 9421-9429 (2006). [査読有り]
6. 山本裕紹, "視覚復号型暗号によるディスプレイのセキュリティ技術," *月刊ディスプレイ*, 12, pp. 77-83 (2006). [査読無し]

〔学会発表〕(計 27 件)

1. 小倉裕介, 酒井寛人, 谷田 純, "フォトニック DNA オートマトン: 概念と実装法," レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会, Jan. 10, 2009, 徳島大学. [招待講演]
2. Hirotugu Yamamoto, "Multi-functional display by use of polarization processing," International Topical Meeting on Information Photonics 2008, Nov. 20, 2008, Hyogo, Japan
3. Takanori Imagawa, Hirotugu Yamamoto, and Shiro Suyama, "Construction of visual cryptography by use of polarization-modulation films," International Topical Meeting on

- Information Photonics 2008, Nov. 19, 2008, Hyogo, Japan.
4. Hiroto Sakai, Yusuke Ogura, and Jun Tanida, "An Implementation of a Nanoscale Automaton Using DNA Conformation Controlled by Optics Signals," International Topical Meeting on Information Photonics 2008, Nov. 19, 2008, Hyogo, Japan
 5. Yusuke Ogura, Takahiro Nishimura, Yuichiro Horiguchi, and Jun Tanida, "Concept and Primal Implementation of Photonic Nanoscale Automaton," International Topical Meeting on Information Photonics 2008, Nov. 17, 2008, Hyogo, Japan
 6. 今川貴紀, 山本裕紹, 陶山史朗, "偏光式視覚復号型暗号における順序依存性を有する復号用マスクの構成", 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2008, Nov. 4, 2008, つくば国際会議場 .
 7. Yusuke Ogura, Takahiro Nishimura, and Jun Tanida, "State-Transition of DNA Nanomachines Based on Photonic Control," SPIE Optics + Photonics 2008, Aug. 13, 2008, San Diego, U.S.A. [Invited paper]
 8. Yusuke Ogura, Yuichiro Horiguchi, and Jun Tanida, "Stepwise State-Transition of DNA Structures Controlled Through Sequential Photonic Signals," 14th International Meeting on DNA Computing, June 4, 2008, Prague, Czech Republic.
 9. Hirotsugu Yamamoto and Yoshio Hayasaki, "Secure Display by Use of Visual Cryptography Based on Polarization Processing," The 14th International Display Workshops, Dec. 5-7, 2007, Sapporo, Japan. [Outstanding Poster Paper]
 10. MingJie Zheng, Naoya Tate, Yusuke Ogura, and Jun Tanida, "Parallel optical tweezers with combining a diffractive optical element and a spatial light modulator for photonic DNA memory, SPIE Optics & Photonics 2007, Aug. 27, 2007, San Diego, U. S. A. [Invited paper]
 11. Naoya Tate, Yusuke Ogura, Jun Tanida, and Masami Hagiya, "Implementation of molecular addressing technique based on photoinduced cleavage reaction," CLEO/QELS 07, May 8, 2007, Maryland, U. S. A.
 12. Hirotsugu Yamamoto and Yoshio Hayasaki, "Secure display that limits the viewing space by use of optically decodable encryption," Advanced Optical and Quantum Memories and Computing IV, Jan. 24, 2007, San Jose, U.S.A.
 13. Hirotsugu Yamamoto and Yoshio Hayasaki, "Three-dimensional displacement of the viewing space of secure display by use of visual cryptography," The 13th International Display Workshops, Dec. 7, 2006, Shiga, Japan.
- 〔図書〕(計 2件)
1. Hirotsugu Yamamoto, Yoshio Hayasaki, Nobuo Nishida, "Large Stereoscopic LED Display by Use of a Parallax Barrier," in Three-dimensional Imaging, Visualization, and Display, Springer, Chapter 10, 183-206 (2009).
 2. 西田信夫, 山本裕紹, 早崎芳夫, "パララックスバリア方式の表示原理と最新研究開発," 立体視テクノロジー 第2編 第2章, (株)エヌ・ティー・エス, pp. 114-127 (2008).
6. 研究組織
- (1)研究代表者
谷田 純 (TANIDA JUN)
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：00183070
- (2)研究分担者
小倉 裕介 (OGURA YUSUKE)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：20346191
- (3)連携研究者
山田 憲嗣 (YAMADA KENJI)
大阪大学・臨床医工学融合研究教育センター・特任准教授
研究者番号：70364114
- 山本 裕紹 (YAMAMOTO HIROTSUGU)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・助教
研究者番号：00284315
- 齋藤 誠慈 (SAITO SEIJI)
同志社大学・工学部・教授
研究者番号：90225714