

エルグラフィ素子を用いた光デュプリケートシステム

渡邊恵理子, 小舘香椎子

日本女子大学理学研究科数理・物性構造科学専攻

(2002年12月19日受理)

要 旨 近年の情報技術の発展と共に実時間処理が可能なさまざまな高性能記録材料の開発が進められている。その代表的な材料が液晶である。この液晶の高分子複合体と有機感光体とを組み合わせた新しいタイプのアナログ静止画像用の入力記録媒体としてエルグラフィ素子が開発されている。このエルグラフィ素子は現像処理が不要で、高解像度、メモリ性があり、撮影後瞬時に可視化でき、電圧の印加条件の変化による2値画像処理化、熱処理による書き換えが可能などの優れた特徴を持っている。

一方著者らは光学式のハイブリッドな顔画像認識システムを構築し、認識速度7face/s, 本人拒否率0.3%, 他人受け入れ率0%の低いエラー率を持つ実用可能な装置の小型化を実現している。しかしこのハイブリッドシステムは信号の制御は容易であるが、入力・参照画像においてコンピュータのメモリから液晶画像へ表示する際に、電気・光信号変換に33msの時間を有しており、システムの高速演算のボトルネックになっている。我々はこれらの問題解決に向けて、同時並列な画像を入力するための光デュプリケートシステムと参照画像の光速読み出しの多重光メモリシステムについて検討を行ってきた。

本論文では、全光認識システムの光並列画像入力部分として、エルグラフィ素子を用いたデュプリケートシステムを提案し、その有効性を実験により確認した。まず光並列画像入力としてLEDを用いたデュプリケート光学系を構築し、光学伝達関数 (Modulation Transfer Function: MTF) による評価を加え、理論上のカットオフ周波数とほぼ同一の22.5lp/mmを検出した。これらの結果に基づき、2値化顔画像の表示を行い、エルグラフィ素子の液晶と感光体との組み合わせの割合の最適化と撮影条件を決定した。さらに、画像を記録したエルグラフィ素子を用いデュプリケート画像を表示し、これを用いたシミュレーションによる相関演算実験により、その有効性を示した。

キーワード: エルグラフィ素子, 光デュプリケートシステム, Modulation Transfer Function (MTF), 顔認識, 全光認識システム

1. はじめに

近年のデジタル画像処理の発展は目覚しく、さまざまな高性能記録材料が活用されているが、画像入力システムとしてはデジタルカメラや銀塩写真が代表的である。特に最近普及が著しいデジタルカメラは、ビデオ信号等で画像を取り込むことで、実時間の画像処理が可能である。電子写真の技術と液晶の技術を利用した新しいタイプの画像入力プロセスとして^{1,2)}、大日本印刷株式会社が静止画像用にエルグラフィシステムを開発している。このエルグラフィ素子は、高密度高解像度記録媒体で、記録する液晶にはメモリ性があり、撮影後瞬時に可視化

できる。また印加電圧の変化により2値化に近い画像処理ができ、熱処理により書き換えが可能であるなどの優れた特徴を持っている。

一方、著者らは回折型のマルチレベルゾーンプレートアレイ (Multi level zone plate array: MLZPA) を用い、光の空間並列性を生かした並列結合変換相関器 (Parallel Joint Transform Correlator: PJTC) を提案し、これにデジタルコンピュータによる前後処理を加え、ハイブリッドな顔画像認識システムを構築してきている³⁻⁵⁾。さらに実用化へ向けて、4並列演算が可能で持ち運びできる光学式小型顔認識装置 (COPaC II: 20×24×43cm³: 6kg) の試作を行った。バイオメトリクス認証のガイドライン⁶⁾に沿って300人のデータベースを用いた1対1照合の実験により、認識速度7face/s, 本人拒否率0.3%, 他

Contribution No.: MP 02-4

人受け入れ率 0 % の高い認識精度を得ている^{7,8)}。これらの値から、試作装置はコンピュータログインや住宅エントランスへのセキュリティ応用が十分に可能であることが確認できた。さらに応用として、通信放送機構マルチメディアキャンパスの成果展開型公募研究として採択された「マルチメディアキャンパス展開事業 13~18 年」の一つのテーマである日本女子大学と早稲田大学間の e-ラーニングにおけるセキュリティシステムとして、モバイル入力を用いた運用実験を始めている^{9,10)}。

Fig. 1 に示すように、構築したハイブリッド顔認識システムでは、入力信号が光信号でない限り、何らかの入力変換器によって光信号に変換する必要がある。提案したシステムではデジタルカメラで取り込んだ画像と、コンピュータから入力した参照画像を 2 つ同時に液晶空間光変調器に表示し、コヒーレント光源からの光を用いて MLZP で光学的にフーリエ変換している。さらにこれら 2 つの画像のジョイントフーリエ変換像を光書き込み型の液晶空間光変調器に表示し、第 2 の MLZP でフーリエ変換し、この光信号を CCD カメラで受け取り、電気信号に変換している。日本、米国などの国で採用されているテレビ・ビデオの送受信は NTSC 方式であり、一秒間に 30 画面 (30Hz: ビデオレイト)、一画面 525 本の走査線と決められている。従ってこのようなハイブリッドシステムは信号の制御は容易であるが、入力・参照画像においてコンピュータのメモリから液晶へ画像を読み出す際に、電気信号から光信号へ変換するための画像表示に 33ms の時間を有しており、システム全体の速度に限界がある。

このような技術的な条件から生じる、光・電変換による余分な転送時間を減少するために、光速を生かした全光システムの検討が進められている¹¹⁾。我々のグループでも Fig. 2 に示すようにシステムの高速化へ向けた、全光認識システムの検討を行ってきた¹²⁾。このシステムでは、入力画像に光学式デュプリケートを、参照画像には光アクセス方式の並列メモリを採用し、光・電変換なしに画像入力を行っている。並列光メモリに関しては、すでにフォトリフラクティブ結晶、SBN の非線形性を利用したホログラフィックな多重記録を行い、20 並列で 6 多重、合計 120 枚の顔画像の記録に成功している^{13,14)}。従って、この全光認識システムの実現には、入力画像に対して並列数に応じた光画像入力の検討が必要である。また、この入力素子としては、高解像度で高速応答、更にコンピュータによる前処理を光学的に施すことができることなどが条件としてあげられる。

本論文では、2 章で全光認識システムのための光並列画像入力法として、新たに提案した LED を用いたデュプリケート光学系について記述する。またデュプリケー

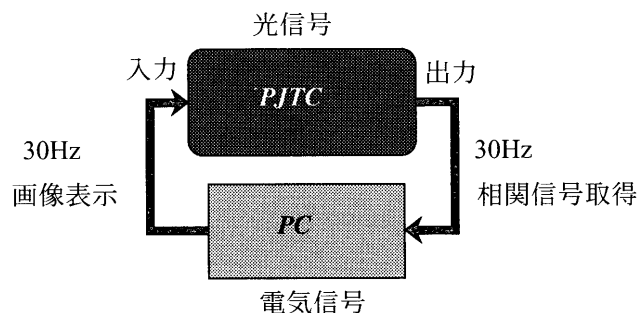


Fig. 1 Fabrication of a hybrid optical face recognition system.
PJTC: Parallel Joint Transform Correlator

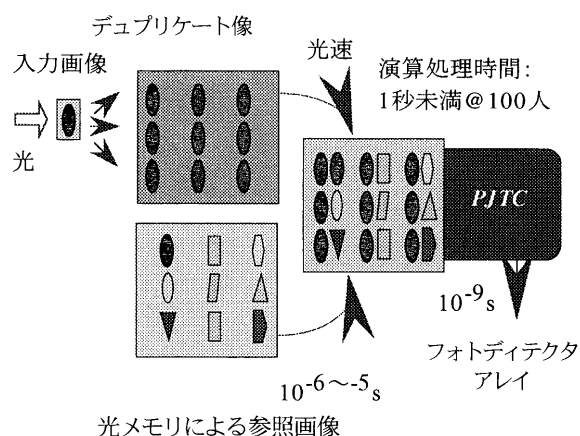


Fig. 2 Concept of all optical recognition system with duplicate input images and optical memory for reference images.
Access time for face recognition: 1sec/person
Database containing 100 faces (female)

ト入力素子として、エルグラフィ素子を適用し、最適な混合比を持つ媒体と画像の撮影条件に関する検討結果を 3 章で示す。4 章で高解像度デュプリケートシステムを光メモリとの複合光学系として提案し、その有効性について述べ、5 章でまとめとする。

2. 全光認識システム用デュプリケート入力光学系

2.1 デュプリケート光学系

空間並列な光相関演算を能率的に行うには、1 画像の入力がフーリエ変換アレイ素子の配置に合わせて、複製される光学系が必要である。またこのデュプリケート光学系への要求として、高解像力であること、チャンネル毎の像を均一に複製できることなどがあげられる。一方、光デュプリケート用の光源には、コヒーレント、インコヒーレント、さらにマルチ光源^{15,16)}などがあげられるが、中でもインコヒーレント照明下におけるデュプリケート光学系は単純で、コリメートレンズとレンズアレイのみで構成され、コヒーレント光学系に比べ 2 倍の解像力

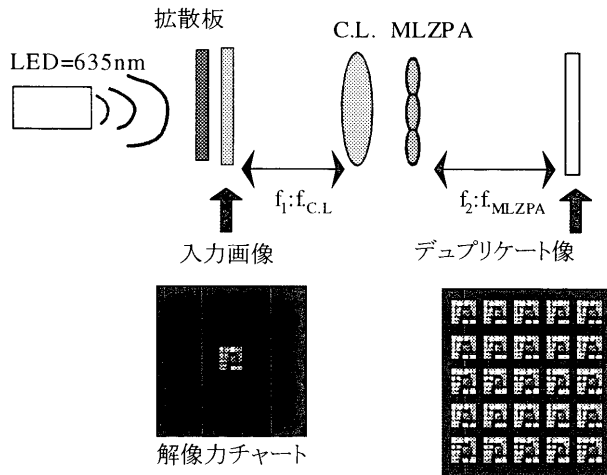


Fig. 3 Optical setup for the duplicate system.
fcl: focal length of collimate lens, fMLZPA: focal length of MLZPA

Table 1 Specifications of 25ch MLZPA.

Level 数	8level
開口	3×3mm
焦点距離	100mm
回折効率(実験値)	91.7±4.82%
スポット径(実験値)	9.6±1μm

を持っている。そこで本研究では、このインコヒーレントデュプリケート光学系を採用した。Fig. 3にデュプリケート光学系を示すがインコヒーレント光源であるLEDを用い、アレイレンズとして、25チャンネルの矩形開口のMLZPAを用いている。レンズ機能を持つMLZPAはデュプリケータ(複製器)としての機能を持っているので、アレイ化して用いると1つの画像のアレイ数だけの複製が可能であり、倍率は f_1/f_2 で表される。25チャンネルのMLZPAの仕様をTable 1に示す。LED光源としては、波長635nm、標準照度70mcdを用いた。

2.2 MTFによるデュプリケート光学系の評価

光学系の性能を評価するには、光学伝達関数 (Optical Transfer Function: OTF) による代表的な評価方法を用いた。

光学伝達関数は

$$|\text{OTF}(\mu, \nu)| = \text{MTF}(\mu, \nu) \exp(i\phi) \quad (1)$$

と表され、位相ずれ(ϕ)も考慮している。

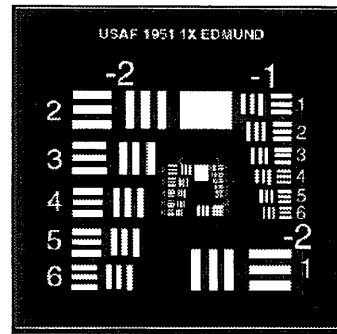


Fig. 4 Resolution chart of the USAF type.

しかし位相ずれは実験では算出しにくい。今回はOTFの強度部分であるMTFを用いて評価を行った。MTFの実験的な算出にはFig. 4に示す様な異なる周波数成分の書かれた矩形波用解像力チャートを利用し、入力と出力の可視度の比を用いて求めた。

入力と出力のチャートの可視度は

$$V(\mu) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

の式により算出し、入力の可視度 V_1 は解像力チャートから、また出力の可視度 V_2 はデュプリケート像をCCDカメラから取り込み解像力チャート像を用いた。

次式に示すように、これらの値の比を空間周波数のパラメータとして算出する。

$$\text{MTF}(\mu) = V_2/V_1 \quad (3)$$

しかし、ここで用いているMTFの値は正弦波チャートを対象とした式なので、今回の矩形波チャートで算出した実験値に対し正弦波チャートへの補正の必要がある。式(4)に示すコルトマン補正式(矩形波チャート周波数 μ , 正弦波チャート周波数 ν)を利用して補正を加えMTFの値を決定した。

$$M(\nu) = \frac{\pi}{4} \left\{ M_R(\mu) + \frac{1}{3} M_R(3\mu) - \frac{1}{5} M_R(5\mu) + \dots \right\} \quad (4)$$

インコヒーレント光源のデュプリケート光学系に、Table 1に示した仕様の25チャンネルのMLZPAをデュプリケート素子として用いた場合の、MTF測定の結果をFig. 5に示す。この図からわかるように、理論曲線に近いMTFの値が得られており、カットオフ周波数は22.5lp/mmと理論値とほぼ同じ値であった。また光強度のばらつきは±15%で、十分に認識システムに組み込むことのできる値となっている。さらにより広く均一な指

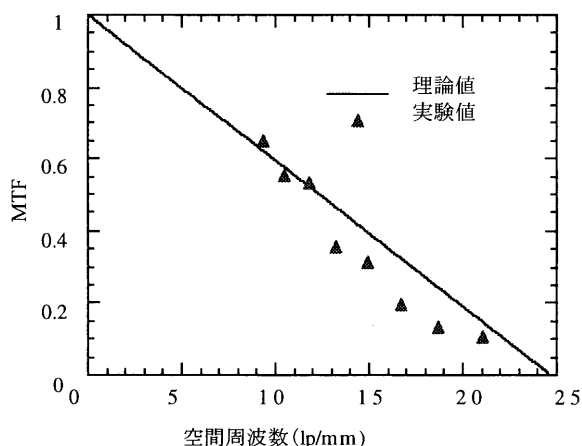


Fig. 5 Experimental results of MTF dependence on spatial frequency using the resolution chart. The cut-off frequency is 22.5 lp/mm, which is nearly equal to the theoretical value.

向性を持つ光源を用いれば、25チャンネルに対し高い均一化を得ることは可能である。

3. エルグラフィを用いたデュプリケート入力

並列画像入力においては入力素子が①高解像度であること、②実時間応答のために高速応答であること、③書き換え可能であること、④不要な回折光が出ないようにピクセル構造ではないことなどの要求を満たす必要がある。今回使用するエルグラフィの解像力は500lp/mmで、現在市販されている電気書き込み型液晶空間光変調器(Electrical Addressed Spatial Light Modulator: ESLM)の5～20倍の解像力を持つため、表示面積を小さくでき、光学系の小型化を図れる。また応答速度は10ms～で、アナログ素子であるため、アレイ配置に制限無く複製が可能である。光並列顔認識システムでは、取得した画像はコンピュータ上でエッジ抽出・2値化の処理を施し、この前処理がロバスト性を高めているため、これを具備した入力素子であることが望ましい。

本節ではエルグラフィ素子の構造と原理について述べ、関連演算に適した媒体と撮影条件を算出する。

3.1 エルグラフィ素子の構造と記録原理

エルグラフィ素子の断面図をFig. 6に示す。1組の透明ガラス基盤の間に、透明光センサである有機光導電膜層とメモリ性を持つ液晶と高分子の複合体である層により構成されている。有機光導電膜層と液晶層の間には分離層が設けられている。画像を記録する際には、透明電極の間に+300V～+500Vの電圧を加え、光センサ層の側から光をあてる。光導電膜に光を照射するとそれに応じて電荷が発生し、その部分の抵抗が下がって液晶層に

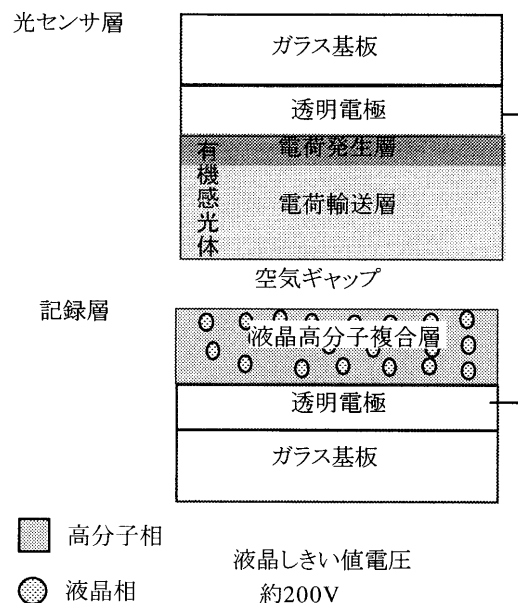


Fig. 6 Sectional configuration of Elgraphy device with two layers: layer-composite of organic photoconductor and liquid crystal optical memory

電圧が加わり、メモリ層では液晶のしきい値を境にランダムに並んでいた液晶分子が変調し同方向を向き、透過率が上昇する。光導電膜の抵抗値は照射する光により変化する。この変化が液晶に加わる電圧の変化になり、液晶層にはコントラストや階調のある画像が記録される。この記録媒体としては液晶分子が一度向きを変えたとその状態を維持するメモリ性を備えた液晶を使っている。

エルグラフィの像形成は光散乱によるものである。

Fig. 7は液晶媒体への画像の記録原理を模式的に示している。液晶記録層はFig. 7のように液晶部分と樹脂部分が層分離した状態になり、液晶層の配向の屈折率は樹脂屈折率と等しくなるように調整されている。液晶は屈折率異方性があり、配向しない状態の屈折率は樹脂層よ

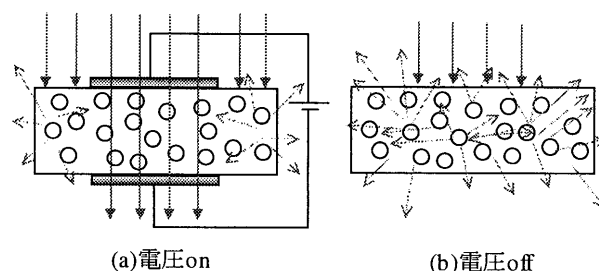


Fig. 7 Scheme of the liquid crystal media recording devices for images

(b) Additional voltage transfers the lights into straight direction, increasing the penetration ratio.

(a) Separation of liquid crystal and resin parts diffracts incident lights into random directions, making penetration ratio low.

りも高くなっている。**Fig. 7 (a)** のように液晶媒体に電圧がかかっていない状態では液晶分子は特定の方向に配向していないため、液晶層の屈折率は樹脂層よりも高く、従って入射した光は液晶層と樹脂層との界面で屈折し、散乱を繰り返すため透過率が低下する。しかし液晶相の膜厚に電界を加えると電界方向に液晶分子が配向し、液層相と樹脂相の屈折率が一致する。従って入射光は散乱されずに直進するため透過率が増加する。エルグラフィで使用されている液晶は通常のディスプレイ用液晶とは異なり、メモリ性のあるスメチック液晶である。従って電圧が画像にかかっていなくても半永久的に保護できる。また、等方相になる温度の熱により元に戻るの繰り返しが可能となる。

3.2 エルグラフィ素子による画像記録

エルグラフィ素子の記録媒体には電圧印加や照射光強度に伴い記録する画像の特性を変える事ができる。大きくは①緩やかに透過率が上昇するタイプ、②ある一定の電圧により急激に透過率が上昇するタイプ、に分ける事ができる。緩やかに上昇するタイプ①は微弱光印加にも対応するため、グレースケールでの記録に適している。急激に透過率が上昇するタイプ②では、一定電圧以上に

しか反応しないため、2 値化に近い処理を施すことが可能である。これらの媒体の特性を利用して、コンピュータ上に近い相関に適した素子を記録することができる。まず、濃淡画像のグレースケールを線形にエルグラフィ素子に記録した場合について自己と相互相関を用いて評価を加えた。2 値化に近い処理を施し、コントラストの高い液晶媒体を用いたときの入力画像、相関演算ピークを **Fig. 8** に示す。いずれも S/N 比の高い相関演算結果

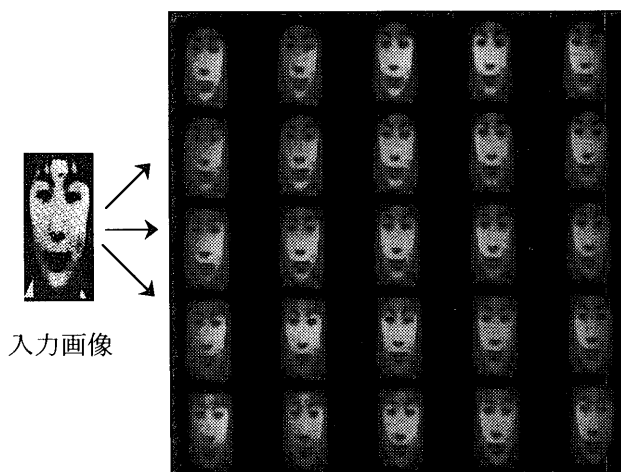


Fig. 9 25 duplicated images on Elegraphy devices. Duplicate images are sufficiently sharp for the experiments.

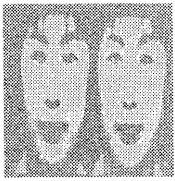
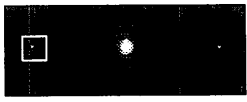
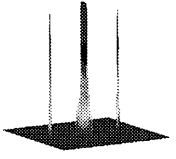
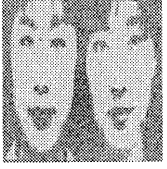

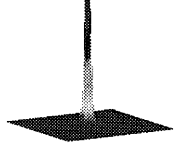
入力画像	相関信号
自己相関  code#1 data#1	 2次元プロフィール  3次元プロフィール
相互相関 ⋮  code#1 data#25	 

Fig. 8 Experimental results of auto- and cross-correlation signals using images on Elgrapy devices.

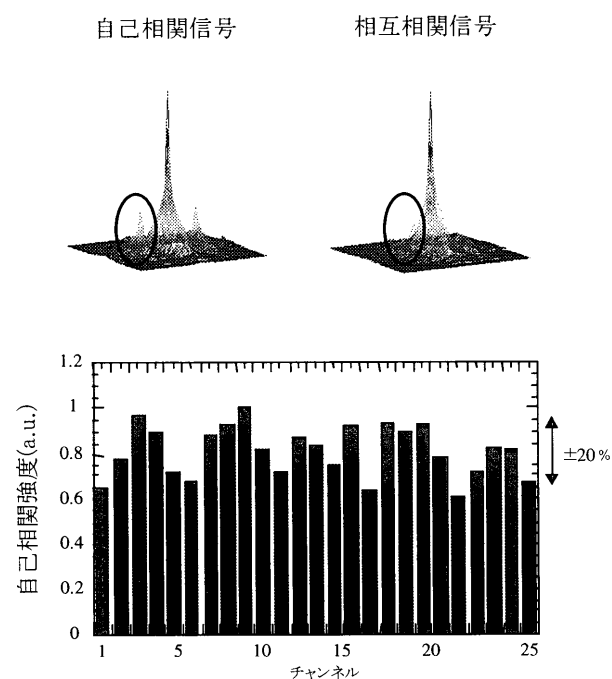


Fig. 10 Recognition results using 25 auto-correlations by Elegraphy devices. Correlation intensity rate is within $\pm 20\%$ of the threshold value.

を得ることができた。この実験結果により、エルグラフィ素子の液晶と感光体の組合せによる画像の2値化記録処理は、コンピュータでの前処理に近い処理が行えることを確かめた。

3.3 エルグラフィ素子によるデュプリケート画像と評価

デュプリケート光学系にエルグラフィ素子を用い、デュプリケートを行った結果をFig. 9に示す。入力には顔画像を用いたが得られたデュプリケート像は細部まで複製ができていたことがわかる。この画像をコンピュータ

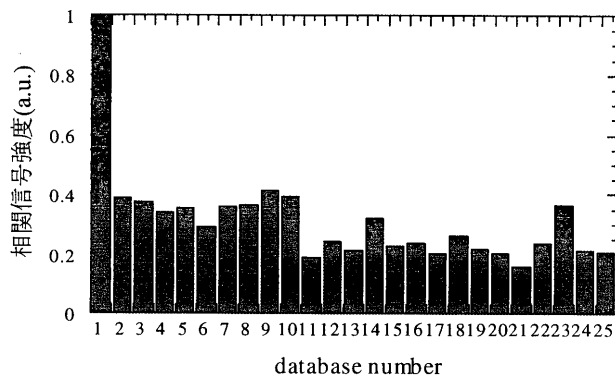


Fig. 11 Experimental result of cross-correlation between 25 duplicate images of the code #1 and the rest (#1-25) in the database. It proves high quality of the system, demonstrating significant values only with the person herself, and lower with every others.

上に取り込み、シミュレーションにより自己相関演算実験を行った結果をFig. 10に示す。25チャンネル全てにおいて光強度が $\pm 20\%$ 以内に相関信号が得られていることを確認した。また登録者data #1に対し、デュプリケート画像とdatabase #1~25での相関演算を行った結果をFig. 11に示す。本人(data #1)のみ高い相関値を得、その他のdata 2~24の演算では低い値を取っているため、このデュプリケート像は十分に認識に利用できると言える。

4. 全光認識システムの提案

全光認識システムをFig. 12に示す。光メモリシステムと、エルグラフィによるデュプリケートシステムの二つを複合したシステムとなっており、電気信号無しで高速光演算を行うことができる。このようにコンピュータ処理を必要とせず、全てアナログ光演算で行うことができるため、装置単独で結果出力まで可能である。この光学系をコンパクトに設計し、小型装置とすれば、将来的には個人認識カメラのような利用が期待できる。

入力画像はFig. 12 (a)のデュプリケートシステムに示すように、エルグラフィカメラによって高解像度に撮影され、エルグラフィ素子に記録される。これを前述したデュプリケート光学系によってデュプリケートを行う。デュプリケートされた画像は光書き込み型液晶空間光変調器 (Optical Addressed Spatial Light Modulator: OSLM) に結像する。一方、データベースとしては光メモリ (SBN

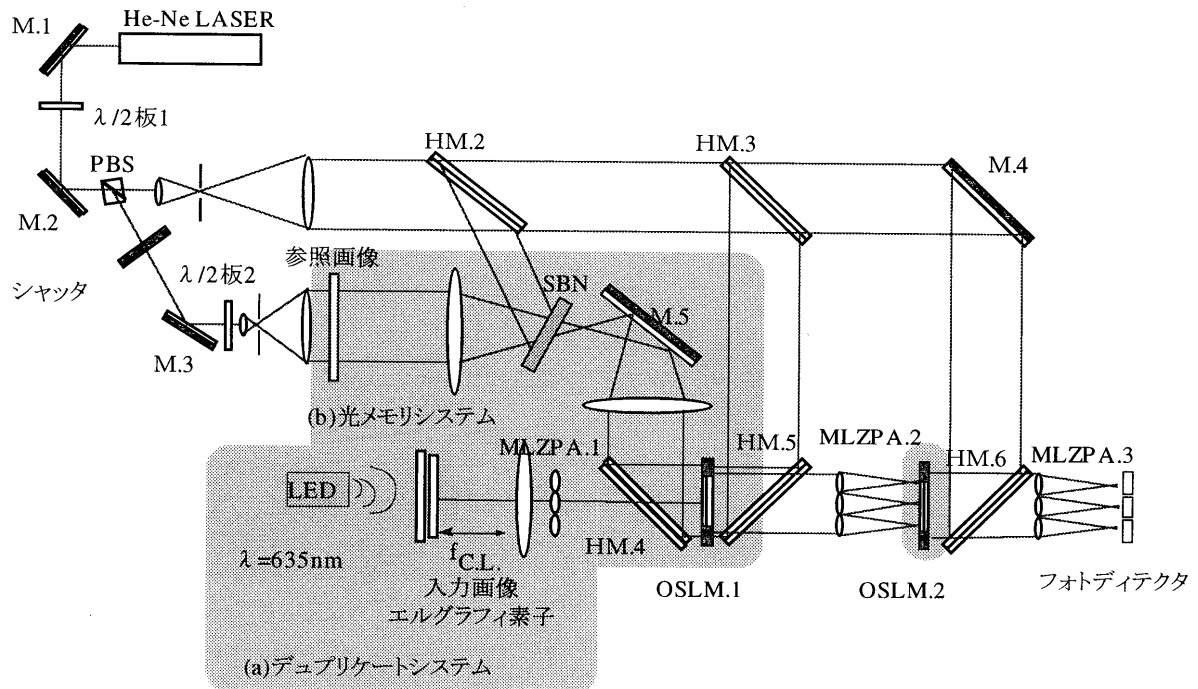


Fig. 12 All-optical parallel recognition system composed of the duplicate and optical memory system.

単結晶)にホログラフィック角度多重記録した画像を用いる。(b)の光メモリシステムに示すようにデータベース画像の記録の際にはシャッタを開き、参照画像を光メモリに角度多重記録する。演算時においてはシャッタを閉じ、結晶(SBN)の回転によって、データベース画像を光速度で読み出す。読み出されたデータベース画像はOSLMにデュプリケート画像と共に結像する。OSLM上のジョイントされた入力画像とデータベース画像を読み出し、レンズアレイによってフーリエ変換を行う。JPSを再度OSLMに書き込み、再度フーリエ変換することによって相関信号を得る。

5. ま と め

光並列画像入力としてLEDを用いたインコヒーレントデュプリケート光学系を提案し、実験を行い、MTFによる評価においてはほぼ理論通りの解像力を得た。またデュプリケート入力素子として、高解像度であること、高速応答であること、書き換え可能であること、またピクセル構造ではないことなどの要求を満たすエルグラフィ素子を適用し、2値化に近い処理を施すための最適な液晶媒体と撮影条件を算出した。エルグラフィ素子によるデュプリケート像の画像評価として結合変換相関光学系で光相関演算を行い、自己相関演算と相互相関演算の良好な結果を得た。またエルグラフィ素子を用いた光デュプリケート入力光学系において25並列デュプリケートを行い、得られた画像を用いたシミュレーションにおいて全チャンネルで相関信号を得ることができた。

さらに光デュプリケートシステムとアナログ光ホログラフィックメモリを組み合わせ、PJTCで光演算を行う複合JTCシステムの光学系を提案した。今後、全光化認識システムの構築に向けて実証実験を行っていく予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、エルグラフィ素子を提供して頂いた大日本印刷株式会社の岡部将人氏、青木大吾氏、関根啓子氏に感謝いたします。また光デュプリケートシステムの検討及びデータ取得を行った橋本麻子氏(現キャノン株式会社光学技術研究所)に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 上山弘徳, 青木大吾, 彦坂眞一, 井上英一, 第78回電子写真学会研究討論会 **25** (1996).
- 2) Daigo Aoki, Shinichi Sakano, Masato Okabe, Osamu Shimizu, Minoru Utsumi, Masanori Akada and Eiichi Inoue: IS&T's 48th Annual Conference Proceedings 502 (1995).
- 3) K. Kodate, A. Hashimoto and R. Thapliya: Appl. Opt. **38** 3060 (1999).
- 4) R. Thapliya, H. Koizumi, K. Kodate and T. Kamiya: Appl. Opt. **37** 5408 (1998).
- 5) Kashiko Kodate, Rieko Inaba, Eriko Watanabe and Takeshi Kamiya: Meas. Sci. Technol. **13** 1756 (2002).
- 6) 瀬戸洋一, 磯部義明, 三村昌弘: 信学会誌 **83** 624 (2000).
- 7) 渡邊恵理子, 稲葉利江子, 小館香椎子: 画像電子学会誌 **31** 848 (2002).
- 8) K. Kodate, E. Watanabe, R. Inaba: Proceedings of SPIE **4455** 42 (2001).
- 9) 稲葉利江子, 柳沼良知, 渡邊恵理子, 小館香椎子: 電気学会論文誌C **112** 1259 (2002).
- 10) Rieko Inaba, Yoshitomo Yaginuma, Kashiko Kodate: ICO2002 **4826** 35 (2002).
- 11) R. Thapliya: Doctoral thesis (University of Tokyo) (1999).
- 12) 橋本麻子: 日本女子大学理学研究科修士論文 (1998).
- 13) 小館香椎子, 住山文香: 信学技報 MR99-87 CPM99-151 25 (2000).
- 14) Kayo Shimizu, Eriko Watanabe, Yumi Okazaki, Yoshihisa Takayama and Kashiko Kodate: ODF2002 156 (2002).
- 15) Atsushi Akiba and Kenichi Iga: Appl. Opt. **29** 4092 (1991).
- 16) Keniro Hamanaka, Hiroyuki Nemoto, Masahiro Oikawa, Eiji Okuda, and Takashi Kihimoto: Appl. Opt. **29** 4064 (1990).

An Optical Duplicate System for the Input Images by Elgraphy

Eriko Watanabe and Kashiko Kodate

The Graduate school of Science, Division of Mathematical and
Material Structure Science, Japan Women's University

(Received December 19, 2002)

Abstract: With recent and rapid advancement of the information technology, developments of various recording materials for real-time procession are under way. This is exemplified in the field of liquid crystal technology. Combined with this, electro-photography has been used to research and development of elgraphic devices as a new type of input recording media for analogue images. This device merits attention for its non-developing procession, high resolution, and a large quantity of memory capacity. Other features are possible instant visualization after photo-shooting, binary image-processing by changing voltage conditions, rewritability by use of heat-processing.

In parallel with this research and development, a hybrid optical face-recognition system has been constructed. It has been proved by a number of evaluative experiments that our system is rigorous with the recognition speed of 7 faces per second, the false non-match rate 0.3%, and the false match rate 0%. The compact device for a practical use is already materialised. While this hybrid system facilitates the control of signals, it requires 33ms for exchanging electric and optical signals in the process of obtaining input images from the memory and projecting reference images on the crystal liquid display. Higher speed is desirable for further improvement of the system. Seeking to tackle this speed issue, we have been conducting several researches using an optical duplicate system designed to input correlational images and a multiple optical memory system for high-speed reference images reading.

In this paper, a duplicate system with Elgraphy devices is proposed. The devices are equipped at the input end of an all-optical recognition system. The validity and its higher performance are then examined through experiments and will be presented. In brief, this research is conducted in following procedures: Designing the duplicate optical system employing LED as input devices for parallel optical images. Successively, experimenting on this system, we assess the performance by MTF, and demonstrate the obtained value, 22.5 lp/mm is nearly equal to the value of the cut-off frequency in theory. Based on these results, we display binarized facial images, followed by optimizing crystal liquid of the Elgraphy elements and determining the photo-shooting conditions.

Lastly, duplicate images are exhibited using the memory-storing elgraphy elements. By way of simulation based on correlation experiments, the validity is proven to be significant.

Key words: Elgraphy element, optical duplicate system, Modulation Transfer Function(MTF), face-recognition system, All-optical recognition system