

# ホログラムメモリーにおけるマーカ位置の高精度検出法

High accuracy marker position detection of hologram memory

橋本 道一，立石 潔，富田 吉美

Michikazu Hashimoto, Kiyoshi Tateishi, Yoshimi Tomita

**要 旨** ホログラムメモリーの信号処理において，再生画像からデータ記録領域を正確に検出することは重要である。位置検出処理の方法としてテンプレートマッチがあるが，通常これだけでは精度が不十分でさらにサブピクセル位置を推定する必要がある。我々は相関値分布の重心からサブピクセル位置を推定する方法を考案し，実験を行った。その結果，少ない計算量で従来方法以上の精度でサブピクセル位置を検出できた。

**Summary** In the signal processing of a hologram memory system it is important to detect the recorded area accurately from the reproduction image. Template matching is a method of position detection, but it has insufficient accuracy. Therefore the estimation of the sub-pixel position after the template matching is required. We devised the method that estimates the sub-pixel position by the center of gravity of the correlation coefficient, and experimented with this. As a result, the sub-pixel position could be detected more accurately than a conventional method with few calculations.

**キーワード** : サブピクセル位置，テンプレートマッチ，ホログラムメモリー

## 1. ま え が き

近年のIT技術やデジタル放送などの普及に伴って，低コストで大量の情報を高速にアーカイブできるストレージの必要性は今後ますます高まっていくと予想される。その要求に応える次世代の高速高密度光メモリーとして，ホログラムメモリーが期待されている。

ホログラムメモリーの再生信号は二次元画像であり，電気信号に変換されるときCCDなどの撮像センサでサンプリングされる。この際の再生画像ピクセルと撮像センサのピクセルの微小な位置ずれが再生信号の品質に大きく影響する(以降この位置ずれを画素ずれと呼ぶ)。記録密

度を高めるためには，再生画像の位置を正確に検出してこの画素ずれを補正する必要がある。

我々は，正確な位置を検出する方法として位置検出マーカの相関値分布の重心計算により行う方法を考え，その評価実験を行ったので報告する。

## 2. ホログラムメモリーの原理

ホログラムメモリーとは，レーザー光を使って体積ホログラムの形式で3次元的に情報を多重記録する光学メモリー方式である。記録再生の原理を図1に示す。

まずデータは白黒の二次元画像に変換されて

空間変調器 (SLM) に転送される。SLM を通った信号光ともう一方の参照光を記録媒体中で混合させることによって3次元の干渉パターンができる。この干渉パターンの強度変化を屈折率の変化に置き換えて媒体に記録したものがホログラムである。再生時には、参照光のみをホログラムに照射すると、記録した画像に対応した回折像がホログラムから発生する。その画像を撮像センサで電気信号化してデジタル情報として利用する。ホログラムメモリーにおいては、

参照光の入射角度やレーザーの波長などを制御することで、媒体の同一個所に異なる画像データを多重記録でき、大容量化が実現可能である。また、二次元の画像データを一括して記録再生できることから高速なデータ転送も可能である。

### 3. 信号処理

ホログラムメモリーでは、図2に示すような二次元の白黒(二値)画像の形で信号の記録再生

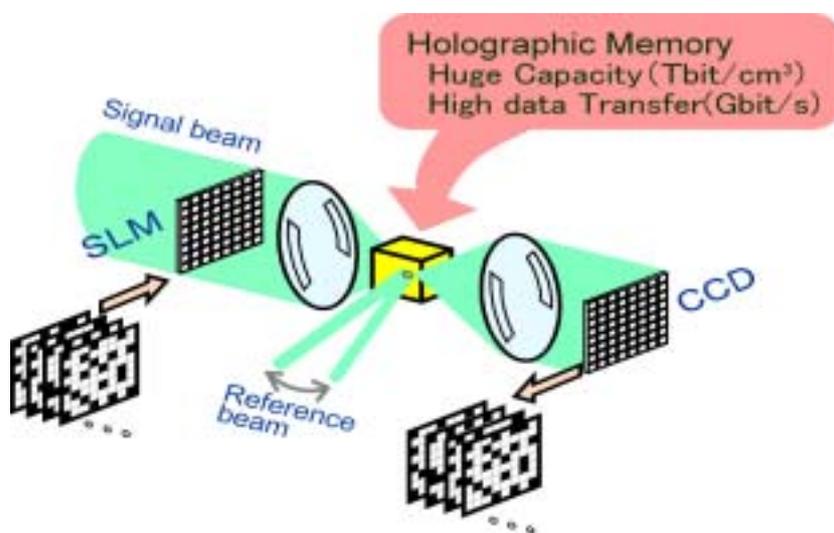


図1 ホログラムメモリーの記録再生原理

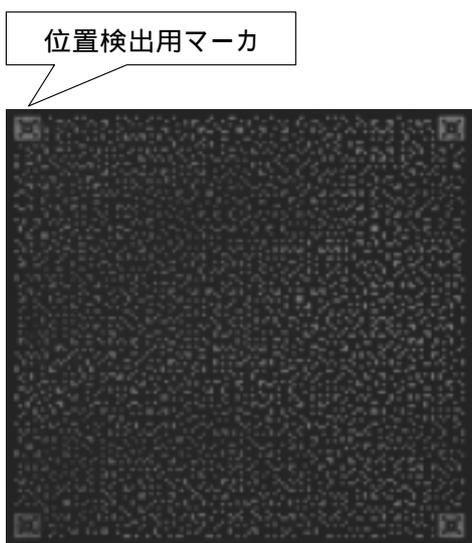


図2 再生信号の例

を行う。ところが、ホログラムメモリの再生画像には記録媒体や光学系を原因とするひずみがあることや、またトラッキング制御などにより撮像センサ上の再生像の結像位置が動くことなどの理由から、再生画像のピクセル位置と撮像センサのピクセル位置がずれることになる。ホログラムメモリの再生信号の品質は、再生画像のピクセル位置と撮像センサのピクセル位置が一致しているかどうか大きく依存し、この画素ずれが復号エラーの一因となる。そのため、ひずみを含む画素ずれを検出し、補正処理を行う<sup>(1)</sup>。図3に信号処理のフローを示す。

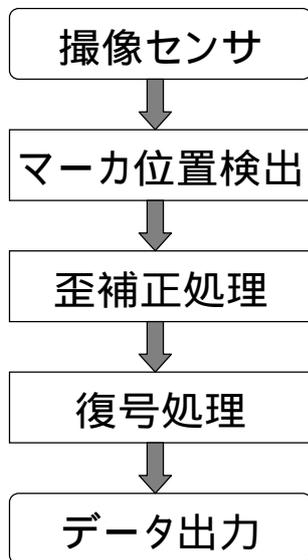


図3 ホログラムメモリの信号処理

画素ずれの補正は再生画像の四隅に置いた基準パターン(以降マーカと呼ぶ)の位置を検出し、4つのマーカ間を等間隔にサンプリングし直す信号処理により行う。

マーカ位置検出は、まず再生画像とテンプレート(マーカ)の相関値が最大になる位置を探索するテンプレートマッチ処理を行う。この位置検出はピクセル単位の座標検出であるため、さらにサブピクセル位置の推定を行って位置検出精度を上げる。

従来の代表的なサブピクセル位置の推定方法として、センサの受光画像をN倍に補間拡大してテンプレートマッチすることにより、1/N画素単位のマーカ位置を検出する方法がある<sup>(2)</sup>。しかし、この方法は計算量が非常に多いという課題がある。

また、テンプレートマッチング出力の画素単位の相関値分布に一次または二次関数をフィッティングして、相関値分布の頂点位置を推定する方法がある。この方法の計算量は少ないが、光学的なひずみにより大きな推定誤差が発生する場合がある<sup>(3)</sup>。

#### 4. サブピクセル位置の計算モデル

本章では、我々が考えたサブピクセル位置の推定方法について述べる。

画素ずれと撮像センサの関係を図4に示す。

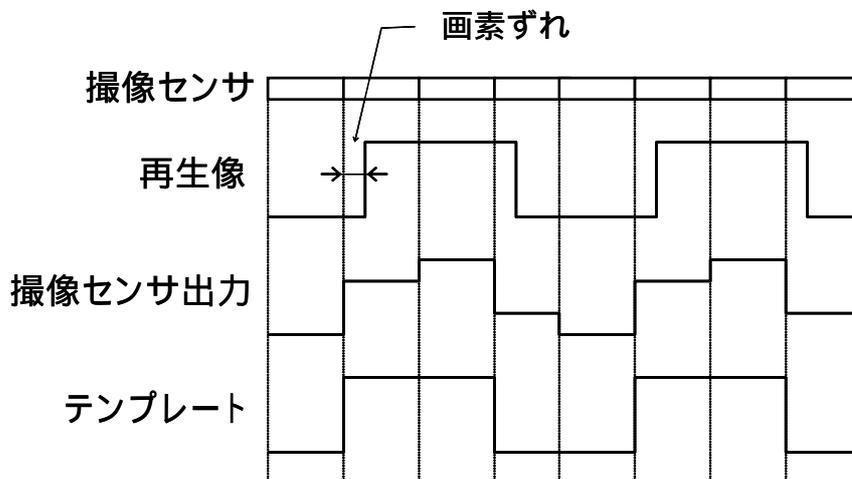


図4 画素ずれと撮像センサの関係

ただし図示し易くするため再生像を一次元の信号としている。この際、撮像センサ出力は次に示すようになると仮定した。

- ・画素ずれがある場合、一つの撮像センサ素子で受光されるべき光が画素ずれの量だけ隣の素子で受光される。
- ・センサの出力は受光量に比例する。

この仮定における撮像センサ出力のテンプレートマッチとテンプレートの自己相関関数の関係を図5に示す。ここで再生像の1画素は、撮像センサの2×2個の素子で受光(2倍オーバーサンプリング)されていると考える。

ちなみに、相関値 $C_i$ は以下の式で定義され、テンプレートマッチは $C_i$ が最大となる位置 $i$ を探索する処理になる。 $P(n+i)$ は撮像画像、 $T(n)$ はテンプレート画像、 $k$ はテンプレートのサイズ、

$$C_i = \sum_{n=0}^k P(n+i) \times T(n)$$

$i$ は撮像画像内のテンプレート位置とする。

テンプレートマッチの結果の最大相関値 $C_z$ を中心とする相関値分布を、 $C_{z-2} \sim C_{z+2}$ とすると、これは図5に示すような自己相関関数上の値となる。また、ホログラムメモリーで使用するテンプレートは、二値の白黒パターンであるので、その自己相関関数は折れ線状の遇関数になる。自己相関関数の位置2の値を基準値 $B$ と

すると、自己相関関数のピーク位置は $C_{z-2} \sim C_{z+1}$ から $B$ を減算した値の重心になるので、この計算モデルで画素ずれ量の推定を行った。

実際には撮像画像には輝度むらなどがあり、レベルがテンプレートと異なるため、相関値 $C_{z-2} \sim C_{z+2}$ はテンプレートの自己相関関数上の値とはならない。従って、基準値 $B$ の値もテンプレートマッチの結果から推定する必要がある、これは位置2～4の自己相関特性の傾きが小さい特性のテンプレートを使用することにより $B = C_{z+2}$ と考えた。従って、画素ずれ量 $z$ は次式で推定できる。

$$z = \frac{2C_{z-2} + C_{z-1} - C_{z+1} - 2C_{z+2}}{C_{z-2} + C_{z-1} + C_z + C_{z+1} - 4C_{z+2}}$$

以上は、再生像を1次元の信号とした場合の説明であるが、二次元信号では次のようになる。テンプレートマッチング結果の相関値分布

$C_{00}$	$C_{01}$	$C_{02}$	$C_{03}$	$C_{04}$
$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$
$C_{20}$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{24}$
$C_{30}$	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$	$C_{34}$
$C_{40}$	$C_{41}$	$C_{42}$	$C_{43}$	$C_{44}$

図6 二次元の相関値分布の定義

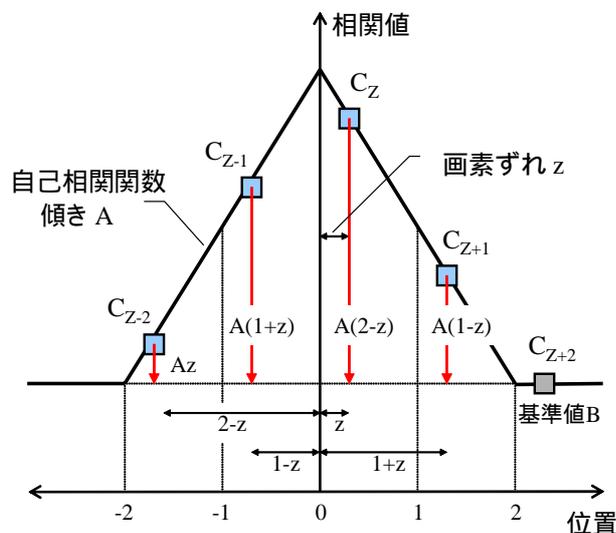


図5 テンプレートマッチと自己相関関数の関係

(中央が最大相関値)を図6のように定義すると, C00の座標を原点とするマーカ位置  $x, y$  は次式で推定できる。

$$x = \frac{\sum_{m=0}^4 \sum_{n=0}^4 (C_{mn} - B) \times n}{\sum_{m=0}^4 \sum_{n=0}^4 (C_{mn} - B)}$$

$$y = \frac{\sum_{m=0}^4 \sum_{n=0}^4 (C_{mn} - B) \times m}{\sum_{m=0}^4 \sum_{n=0}^4 (C_{mn} - B)}$$

$$B = \left( \sum_{m=0}^4 C_{m0} + \sum_{n=1}^4 C_{0n} \right) / 9 \quad \dots (C_{21} < C_{23}, C_{12} < C_{32} \text{の時})$$

$$B = \left( \sum_{m=0}^4 C_{m0} + \sum_{n=1}^4 C_{4n} \right) / 9 \quad \dots (C_{21} < C_{23}, C_{32} < C_{12} \text{の時})$$

$$B = \left( \sum_{m=0}^4 C_{m4} + \sum_{n=0}^3 C_{0n} \right) / 9 \quad \dots (C_{23} < C_{21}, C_{12} < C_{32} \text{の時})$$

$$B = \left( \sum_{m=0}^4 C_{m4} + \sum_{n=0}^3 C_{4n} \right) / 9 \quad \dots (C_{23} < C_{21}, C_{32} < C_{12} \text{の時})$$

この場合, 基準値  $B$  を推定するためテンプ

レートの形状として位置 2 ~ 4 の自己相関特性がフラットなもの, またノイズによる演算誤差を小さくするために位置 0 ~ 2 自己相関特性の傾きが大きいものを選ぶ必要がある。自己相関特性の例を図7に示す。テンプレートのサイズ  $14 \times 14$ , 白・黒画素のレベルは  $\pm 1$  として計算した。

またテンプレートの形状により, どの程度の推定誤差が出るのかをシミュレートした結果を図8に示す。図7において位置 0, 1 の範囲の自己相関値をピーク部, その他の範囲を周辺部, ピーク部の傾き / 周辺部の標準偏差を自己相関特性の平坦度と定義したとき, 平坦度が 10 以上のテンプレートを使用すれば, 推定誤差はほぼ最低ラインに収まることがわかる。

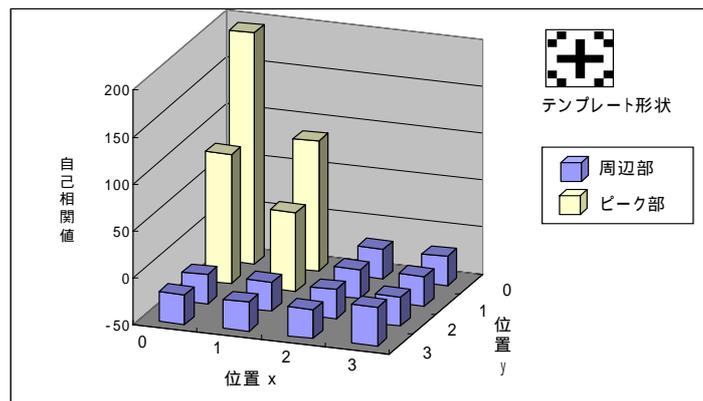
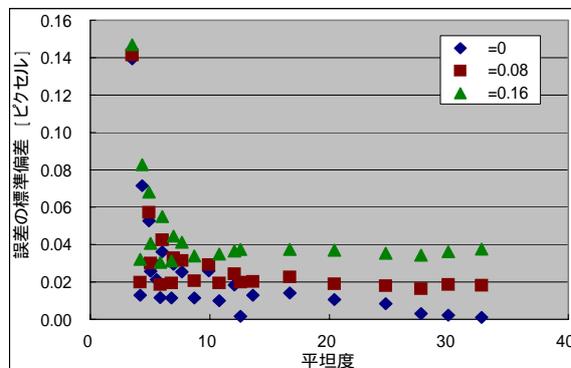


図7 テンプレートの自己相関特性例



信号ノイズ比  $N/S = \text{ガウスノイズ} / \text{最大信号レベル}$   
 平坦度 = ピークの傾き / 周辺部の標準偏差

図8 テンプレート形状による誤差

## 5. 評価実験

マーカ位置検出の評価実験は、図9のようにして行った。撮像センサの位置を変位計でモニタしながら約1  $\mu\text{m}$  づつ移動してマーカ画像を撮像し、変位計で測定した撮像センサの移動量と撮像画像から検出したマーカ位置の比較により、位置検出の精度を評価した。その結果を図10に示す。

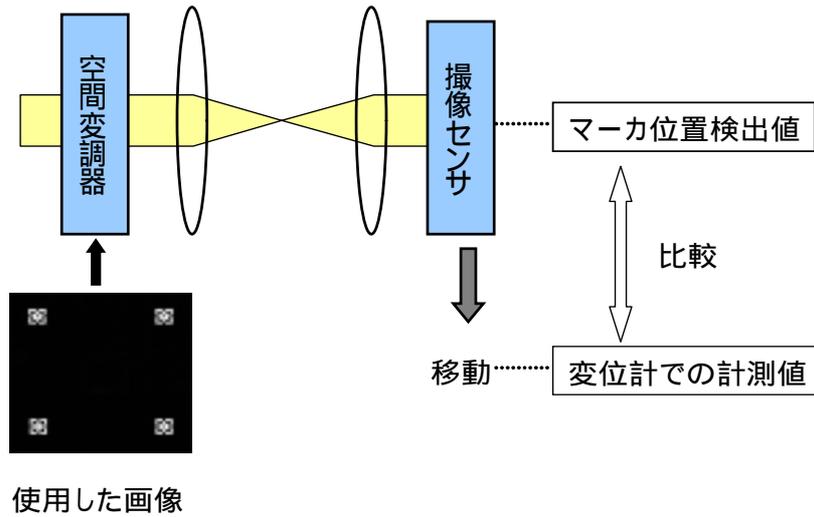


図9 評価実験

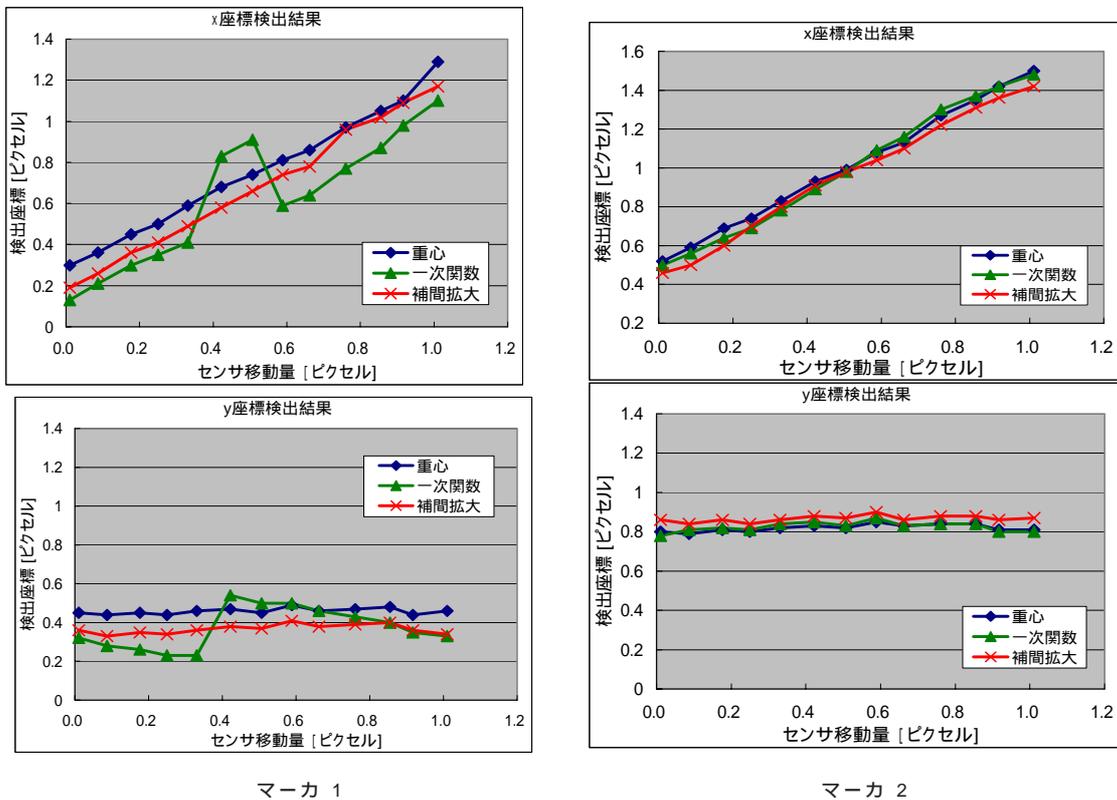


図10 位置検出結果

本稿の重心による位置推定方法との比較のために、前述した従来方法である10倍補間拡大方法、および一次関数フィッティング方法による結果も合わせて示してある。この結果は4個のマーカの中で結果が特徴的であった2個である。また、この2個のマーカの相関値分布を図11に示す。図の同心円の中心付近ほど高い相

関であることを表す。

マーカ1では光学的な歪と思われる原因により相関値の分布が斜めに傾いた楕円状になり、そのため各サブピクセル位置推定法の結果に差が出ている。特に一次関数フィッティングでは推定値に局所的な変位が見られ、マーカに光学的な歪がある場合に推定誤差になり易いことがわかる。マーカ2では光学的な歪が殆どないので、各推定法の結果に差がない。

また、各推定法における全マーカ位置の推定誤差の標準偏差、および各推定法における1ページあたりの位置検出処理時間の比較を表1に示す。この実験ではサブピクセル位置の正しい値は特定できないため、ここでの推定誤差とは最小二乗法で予測した直線との誤差を表す。

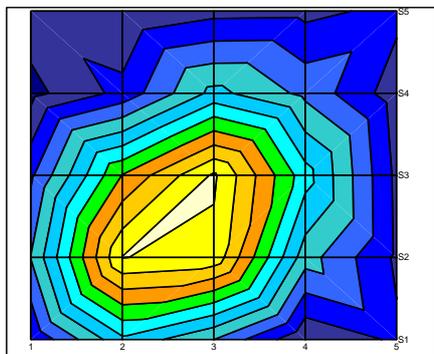
これらの結果から、重心による位置推定は、少ない計算量で、光学的な歪があるなしに関わらず、リニアリティ良くサブピクセル位置の推定ができることがわかる。

次に、図2に示したような変調パターンを使

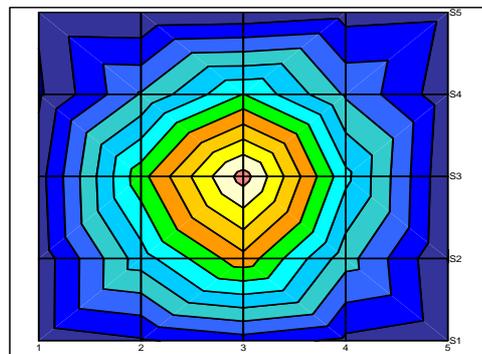
表1 位置推定方法の比較

	処理時間 [ms]	誤差の標準偏差 [ピクセル]
重心	0.577	0.0201
等角直線フィッティング	0.385	0.0673
10倍補間拡大	107	0.0192

処理時間はPentium4・2 GHzで測定  
処理時間はテンプレートマッチングを含む



マーカ 1



マーカ 2

図11 マーカの相関値分布

用し、各推定方法でマーカ位置検出・歪補正・復調を行い、エラー数を数えた結果を表2に示す。この比較は同一の撮像画像を使用したので違いは推定方法のみである。

5～10%のわずかな差ではあるが重心による位置推定が最も少ないエラー数であり、この結果から重心による位置推定が従来手法以上の精度であると考えられる。

表2 各推定方法のエラー比較

	エラー数
重心	1664/1734552
等角直線フィッティング	1758/1734552
10倍補間拡大	1845/1734552

## 6. まとめ

ホログラムメモリーの記録密度を向上させるため画素ずれを補正する方法を考えた。その方法は、マーカのサブピクセル位置推定を、相関値分布の重心演算で行う方法で、これと従来手法と比較実験を行った。

本方法は光学的なひずみの影響を受け難く、少ない計算量でかつ従来手法以上の精度でサブピクセル位置を推定できることがわかった。

ホログラムメモリーでは2次元のデータを一括記録再生することから、従来のCDやDVDなどの1次元の信号処理と比べて大量の演算が必要となる。今後は、この2次元信号処理を効率

参 考 文 献

- (1) 桜部仁史, 佐藤大輔, 片柳康孝, 山本学:  
“ ホログラムメモリにおける2次元デジタル情報の符号・複合化処理 ” 映像学技報  
Vol.27, NO.69, pp.1-6, MMS2003-61,  
Dec.2003
- (2) 本山智之, 杉山雄一, 原田拓磨, 山本学:  
“ デジタルホログラム情報の高速・高精度データ位置検出処理 ” 映像学技報  
Vol.27, NO.69, pp.7-12, MMS2003-62,  
Dec.2003
- (3) 清水雅夫, 奥富正敏: “ 領域ベースマッチングのための2次元同時サブピクセル推定法 ” 信学論(D- ), vol.J87-D- , no.2,  
pp.554-564, Feb.2004.
- (4) 清水雅夫, 奥富正敏: “ 画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質 ” 信学論(D- ), vol.J85-D- , no.12,  
pp.1791-1800, Dec.2002.
- (5) 清水雅夫, 奥富正敏: “ 画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定手法 ” 信学論(D- ), vol.J84-D- , no.7,  
pp.1409-1418, July.2001.
- (6) 高木幹夫, 下田陽久: 「 画像処理ハンドブック », pp707-712, 東京大学出版会,  
1991.
- (7) 畑野秀樹: “ ホログラム記録用LiNbO3, LiTaO3単結晶の開発 », パイオニアR & D,  
Vol.13, pp.52-62(2003).

橋 本 道 一 ( は し も と み ち か ず )

研究開発本部 総合研究所 光技術システム  
研究部。高精細静止画システム, MPEG-7の  
応用開発などを経て, ホログラムメモリー  
システムの研究開発に従事。

立 石 潔 ( た て い し き よ し )

研究開発本部 総合研究所 光技術システム  
研究部。レーザーディスクLSI開発, DVD,  
Blu-ray制御技術開発などを経て, ホログ  
ラムメモリーシステムの研究開発に従事。

冨 田 吉 美 ( と み た よ し み )

研究開発本部 総合研究所 光技術システム  
研究部。8mmVTR・DAT用磁気ヘッド開発,  
光ディスクの信号処理開発などを経て, ホ  
ログラムメモリーシステムの研究開発に従  
事。