千田 正勝*1, 尾林 良祐*2, 福島 庄太郎*3

Gradation Reductions of Imaging A/D Conversion and Medium Hologram

in Two-Dimensional Recording Code

Masakatsu SENDA, Ryosuke OBAYASHI and Shotaro FUKUSHIMA

This work investigates gradation reductions of the imaging A/D conversion for high data transmission and processing speeds, and of the medium hologram for high productivity in the ROM-type, in holographic memories. Accuracy in the position detection of marker and bit error rate (BER) in the decoding are used for the above evaluations. In the imaging A/D conversion, a resolution of < p/10 (*p*: image-sensor pixel pitch) can be maintained in the ≥ 3 bit gradations, and a BER can be $< 10^4$ in the ≥ 4 bit gradations. Also, in the medium hologram, the high resolution and the superior BER are realized in the ≥ 3 bit and ≥ 4 bit gradations, respectively. So, the limitations of the gradation reductions are estimated to be 4 bit both for the imaging A/D conversion and the medium hologram.

KEYWORDS: two-dimensional recording code, hologram, gradation reduction

1. まえがき

ホログラムメモリは体積・多重記録、二次元一 括処理が可能なため、大容量・高速な次世代メモ リとして期待されている¹⁾。再生データは二次元 画像として撮像素子でキャプチャされ、A/D 変換 の後に信号処理回路にてデコードされる。データ 転送量が大きいと、転送・処理スピードの高速化 において問題となるため、A/D 変換の低階調化が 望まれる。一方、ROM 型ホログラムメモリでは ²⁵⁹、ホログラムを人工的に加工形成するため、生 産性の点でホログラムの低階調化が必要とされる が、これに伴い発生する量子化ノイズの影響が危 惧される。ホログラムメモリ用高密度・高効率二 次元記録符号としては、再生輝点と撮像素子画素 との位置合せ機構を不要とし、再生像の歪・変形 に対応可能な非ピクセルマッチのオーバサンプリ ング符号が現実的であり、デコードにテンプレー トマッチを用いた 4/9 符号が高符号化率を有する 符号として有望視されている⁵⁶。オーバサンプリ ング符号では複数画素の画素レベルと輝点の座標 を用いて輝点強度を算出するため、高精度な二次 元位置検出技術が必要であり、通常、符号画像デ

^{*1} 電気電子創造工学科(Dept. of Innovative Electrical and Electronic Engineering), E-mail: senda@oyama-ct.ac.jp

^{*2} 電気情報工学科平成 25 年 3 月卒業

^{*3} 電気情報工学科平成 24 年 3 月卒業

ータの中に位置検出用マーカを埋め込んで用いる。 本論では、記録符号として上記 4/9 符号を採用 し、撮像後の再生像に対し A/D 変換の階調を低下 させ、位置検出精度および符号デコード性能への 影響を評価する。また、ROM 型ホログラムメモ リを想定し、ホログラムの低階調化を図った場合 の位置検出、デコード性能への量子化ノイズの影 響を検討する。

2. 検討内容および実験方法

本論では、ホログラムメモリの記録再生工程を 計算機シミュレーションで追従し、位置検出精度 およびデコード性能から、撮像 A/D 変換およびホ ログラムの低階調化の限界を評価する。図1にホ ログラムメモリの記録再生工程を示す。基データ は論理的ディジタルデータでありこれを記録符号 によりピクセルの明暗組合せから成る二次元画像 データ(基画像)にエンコードする(①)。記録過程で は基画像に対応したホログラムを媒体中に形成し データを記録保存する(2)。再生過程ではまず媒 体からの再生光が結像して生成される再生像を CCD 等の二次元撮像素子上でキャプチャする(③)。 撮像素子は通常アナログ出力であるため、再生像 データはA/D変換の後ディジタルデータ信号とし て後段信号処理回路に転送される(④)。信号処理 回路では記録時の符号にてデコードし論理的ディ ジタルデータとして再生する(⑤)。記録符号の1 符号ブロック当りのピクセル数をn、bit 数をkと すると(k/n 記録符号)、Nbit 階調 A/D 変換の場合、 1符号ブロック当りのデータ転送量はN×n bitとな る。また位置検出用マーカも符号同様、データ画 像中に埋め込まれ、そのデータ転送量は階調 bit 数×ピクセル数に比例した値となる。A/D 変換時 の階調数が高いとデータ転送量は増大し、転送、 処理スピードの高速化に支障をきたすため、階調 数はできるだけ低いことが望ましい。市販撮像素 子(CCD、CMOS 等)の階調は14~8bit 程度であり、 本研究ではこれよりどの程度まで低階調化が可能 かを検討する。ROM 型ホログラムメモリではホ ログラムを計算機ホログラム(CGH)により求め、 媒体を人工的に加工形成する。この場合、連続的 あるいは高階調なホログラムとすることは非現実 的であり、生産性の点からもできるだけ低階調と することが望ましい。しかし一般に階調の低下に 伴い量子化ノイズは増大し、これらはトレードオ



図1 ホログラムメモリの記録再生工程



フの関係となることが予想される。図2に再生像 での画素レベル、あるいは媒体でのホログラム振 幅・位相に対する低階調化のイメージ(3bit 階調の 例)を示す。

図3に4/9符号を説明する⁵⁶⁾。1符号ブロック (3×3px)中左上4ピクセルの明暗組合せで(0000)から(1111)の4bitを表現しデコード処理は16種のテ ンプレートとのマッチングにより行う。図4に撮

像素子上の再生輝点を示す。各再生輝点は通常、 その中心位置が撮像素子の画素中心から外れ、ま た光の回折限界により拡がりを持ち複数画素にま たがって再生する。図は輝点中心が画素中心から 左へt、上へs だけ並進移動した状態を表す。ここ でt, s (= 0.0~1.0)は画素ピッチ(p)で最大値1.0 に 規格化した輝点の位置ズレを表すパラメータであ る。オーバサンプリング符号では位置ズレ、輝点 拡がりに対応するため、複数画素を用いて輝点強 度 I_i(i=0,1,2,3)の算出を行う。即ち、I_iをt,s およ び輝点中心を囲む最近接 4 画素の画素レベル Pi (ij=0,1,2)を用い、線形補間により算出する。例 えば図 4 中 I_0 は $P_{00}ts + P_{01}(1-t)s + P_{10}t(1-s) +$ P11(1-t)(1-s)で計算される。一般に t,s は各輝点に固 有となる。デコードはブロック毎に再生像に対す る輝点強度 Ii とテンプレートに対する強度 Ii (i= 0,1,2,3)との類似度($S_{code} = [\sum [I_i - I_i]^2]^{1/2}$)比較にて行 う。各輝点の t. s はデータ画像中に埋め込んだ位 置マーカ座標間を等分割する線形歪補正法により 見積もる。図5に線形歪補正法を説明する。例え ば基画像上の点Aが基画像4隅に埋め込まれた位 置マーカ(×印)と図 5(a)の位置関係にあるとする。 撮像素子上の再生像が図 5(b)である場合、4 つの マーカ位置が検出されると、これらの座標間を縦 横等しく分割することで再生像(撮像素子)上での 点 A の位置座標が計算される。点 A を輝点中心と すればこのような手順で画素中心から各再生輝点 中心との距離 t. s が決定する。位置検出用マーカ パターンを図6に示す。マーカ位置検出はマーカ テンプレートをデータ画像上で仮想的に縦横二次 元走査させ、マーカテンプレートの画素レベル P'ui とデータ画像中マーカテンプレート直下に位 置する領域の画素レベル P'_{ii} との類似度(S_{mark} = [5[P'ii-P'iii]2]12)比較で行う。この様子を図7に示 す。マーカ用輝点も拡がりを持ち複数画素に分布 する。僅かな変位による分布状態の違いが大きな Smark変化をもたらし画素サイズを大幅に超える高 分解能での位置検出が可能となる。

ホログラムの記録再生計算は、波動光学における回折積分にて行った。波数空間演算を用いた高速演算処理を施し、巡回関数化雑音の発生回避のためデータを縦横2倍とし基データ領域周辺をゼロ値で埋める Zero-Padding 法を用いた⁷⁻⁸⁾。光伝搬関数としては球面波を用い、光波長(2)660 nm、p=6.7µm、波面計算点は2048×2048pt とした。符号デコード計算では1ピクセルを5×5分割(1.34µm/div.)



		5				
					5	
	1			1		

図6 位置検出用マーカパターン



図7 二次元位置検出法

した 5 倍密計算、位置検出計算では 11×11 分割 (0.609µm/div.)した 11 倍密計算とし、画素レベルは これら分割点でのレベルの総和とした。デュード 性能は t, s を予め既知とする条件で、位置検出と は独立に評価した。位置ズレは横方向の並進のみ とし、全輝点に対し t は 0.0~1.0、s は 0.0 に設定 した。ブロック数は 68×68、マーカ類似度比較領 域は 13×13px とし、符号およびマーカ用テンプレ ートにも本計算による再生像を利用した。 S_{code} 、 S_{mark} 計算の際は、精度向上のため比較対象領域ご とに最大レベルを 100.0 とする規格化処理を行っ た。また開口数(NA)は、これまでの検討にて用い た NA=0.07(位置検出計算時)および NA=0.14(符号 計算時)とした⁵。

3. 検討結果と考察

3.1 撮像 A/D 変換低階調化

まず、位置検出精度に関する評価から撮像 A/D 変換低階調化の限界を検討する。図8に低階調化 無し(64bit 計算に対応、以下同様)の場合の 4/9 符 号データ中に埋め込まれた位置マーカの再生像を 示す。予め1=1/11の位置ズレに設定されている。 図9にこの再生像に対するマーカ位置検出結果を 示す。類似度が最小となるテンプレートマーカの 走査位置がマーカ検出位置を表す。類似度は 1= 1/11 に対応する走査位置+0.609um にて最小とな り、< p/10の分解能での位置検出に成功している ことが解る。以下では、< p/10の分解能での位置 検出が可能か否かをもって低階調化の限界を判定 することにする。図10に撮像A/D変換の階調数 を 5bit から 1bit まで変化させた場合の、各t での 検出誤差を示す。いずれの t でも 3bit 階調までは 検出誤差はゼロ(< p/10)であるが、2bit 階調以下で は誤差が発生し出す。この結果から、位置検出精 度に関しては撮像 A/D 変換低階調化の限界は 3bit 階調までと判断される。

次に符号デコード性能に関し、BER 特性により 評価する。図 11 に撮像 A/D 変換の階調を徐々に 低下させた場合の各 tに対する BER の閾値特性を 示す。BER はブロック単位のエラー率から求めた。 またここで閾値は規格化処理工程において (0000)→(1111)の誤判定回避のため低画素レベル をゼロ値化する際に用いるパラメータであり、0 ~100%のいずれかで BER < 10^4 が実現すればデ



図8 位置マーカ再生像





コード成功を意味する。t = 0/5 は輝点中心が画素 中心と一致した条件、t = 2/5 は輝点中心が画素境 界近傍に位置ズレした条件に対応する。(a)では位 置ズレが小さい場合(t = 0/5、1/5)、BER は約5~ 50%の広い閾値範囲で< 10^4 となるが、画素境界近 傍まで大きく位置ズレすると(t = 2/5)、この範囲は 狭くなる。以下では $t = 0/5 \sim 2/5$ のいずれの並進擾

乱に対してもBER < 10⁴を満たす閾値範囲が存在 するか否かをもって低階調化の限界を判定する。 (b)8bit 階調では(a)と完全に一致はしないもののほ ぼ同様の特性となり、未だ劣化は生じないことが 解る。同様に(c)6bit 階調、(d)5bit 階調、(e)4bit 階 調と低下させた場合も、(a)の基本的な特性はほぼ そのまま維持されており、劣化は起きていない。 なお、徐々にデータ点が粗くなるのは階調数の低 下によるものである。例えば4bit 階調の場合、画 素レベルは16段階に階調化されるため、閾値の0 ~100%の変化も実効的には16段階の階調となる。 (e)において0~5%の閾値範囲にてBER < 10⁴とか えって特性が良くなるのは、この閾値範囲が< 6.25% (= 100%/16 段階)であり常時ゼロ値化され るためである。(f)3bit 階調では、t = 0/5、1/5 では BER < 10^4 が実現するものの、t = 2/5ではBER < 104 を満たす閾値範囲は無くなる。以上より、デ コード性能の観点ではA/D変換低階調化の限界は 4bit 階調までと評価される。なお、1 = 3/5、4/5、 5/5 に関しては各々t=2/5、1/5、0/5 と同様の結果 となった。

以下、4bit 階調に低階調化した場合の再生像が どうなっているかを観察する。図 12(a)は4/9 符号 によるエンコード後の基画像であり、全体の一部 (3×3 ブロック分)を示したものである。図 12(b)は 図 12(a)と同一部分の 4bit 階調、t=2/5 での再生像 である。(b)では、再生輝点が画素境界近傍に位置 するため隣接画素のレベルもやや高く(明るく)な っているが、レベルが特に高い画素のみに着目す ると、それらの位置は(a)の輝点位置と正確に一致 する。このことから目視観察によっても 4bit 階調 に低階調化した再生像は正しくデコード処理可能 であることが確認できる。

3.2 ホログラム低階調化

本節では媒体でのホログラム振幅および位相の 両方を同時に低階調化し、位置検出精度、デコー ド性能を評価する。図 13 に(a)低階調化無し、 (b)2bit 階調でのホログラムの位相項の例を示す。 位相の $0 \sim 2\pi$ を画像のグレイ階調に対応させて表 している。

図 14 は位置検出精度に関する結果である。3bit 階調まではいずれの t に対しても検出誤差は生じ ないが、2bit 階調とすると誤差が発生し出す。な お、1bit 階調の場合は画像として判別可能な再生







像は得られなかった。以上より、位置検出に関しては、ホログラムは 3bit 階調まで低階調化可能と 解る。

次に符号デコード性能を評価する。図 15 に結果 を示す。2bit 階調ではどの t においてもいずれの 閾値に対しても BER < 10^4 は実現しない。3bit 階 調では t=0/5、1/5 では BER < 10^4 となるが、輝点 中心が画素境界近傍となる t = 2/5 では BER は悪 化する。いずれの t に対しても BER < 10^4 とでき るのは 4bit 階調以上の場合である。なお、本件に 関しても t=3/5、4/5、5/5 の結果は各々t=2/5、1/5、 0/5 の結果と一致した。





(a) 低階調化無し

(b) 2bit階調

図13 ホログラム(位相項)

4. まとめ

ホログラムメモリにおける転送・処理スピード の高速化および ROM 型メモリの生産性向上を目 的に、各々に対する撮像 A/D 変換低階調化、ホロ グラム低階調化の検討を行った。低階調化の限界 は、位置検出精度および符号デコード性能により 判定した。以下に結果を整理する。

・撮像 A/D 変換の低階調化に関しては、いずれの 位置ズレに対しても、位置検出では 3bit 階調まで < p/10 の分解能が維持でき、また符号デコードで は 4bit 階調まで BER $< 10^4$ を満たす閾値範囲が存 在した。

・ホログラムの低階調化に関しては、いずれの位置ズレに対しても、位置検出では 3bit 階調まで、符号デコードでは4bit 階調まで性能を維持できた。 ・上記から、撮像 A/D 変換、ホログラム共に低階調化の限界は4bit 程度と見積られる。

参考文献

- J. Ashley, M. P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Mcfarlane, R. M. Shelby and G. T. Sincerbox : Holographic Data Storage, IBM J. Res. Dev. Vol. 44, pp. 341-366 (2000)
- 2) S. Yagi, T. Imai, A. Tate, M. Hikita, S. Tomaru, S. Imamura, T. Tamamura, Y. Kurokawa and M. Yamamoto : Multilayered Waveguide Holographic Memory Card, presented at the Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage '99, Koloa, Kauai, Hawaii, 11-15 July (1999)
- T. Mitasaki and M. Senda : Write-Once Recording for Multilayered Optical Waveguide-Type Holographic Cards, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 23, No. 3, pp. 659-663 (2006)
- M. Senda and Y. Aoki : Identification Data Reproduction in Multilayered Optical Waveguide-type Holographic Memory Cards, Applied Optics, Vol. 47, No. 21, pp. 3973-3979 (2008)



図14 検出誤差 階調数特性



- M. Senda : Tolerance for Translation Disturbances of Template-Matching Two-Dimensional Modulation Code for Holographic Memories, Optical Engineering, Vol. 49, No. 8, 0858031-08580311 (2010)
- M. Endo, M. Ueno and T. Tanabe : Data Decoding Method and Data Decoding Apparatus, Japan laid-open disclosure public patent bulletin No. JP 2004-348378A (2004)
- M. Ueno, Y. Kurokawa, T. Tanabe and M. Yamamoto : Fast Method of Computing Fresnel Diffraction Patterns, Proc. SPIE, Vol. 4225, pp. 96-101 (2001)
- 8) 千田正勝,福田純希,海原洋介:計算機ホログラムにおける巡回関数化雑音とサブサンプリングの検討,小山高専研究紀要, Vol. 45, pp. 85-90 (2012)

【受理年月日 2013年 6月14日】