

不完全に位相記録されたキノフォームからの 像再生に関する計算機シミュレーション

赤 堀 寛

Computer Simulation of Image Reconstruction from
the Kinoform with Imperfect Phases

Hiroshi AKAHORI

Abstract

Image reconstruction from the kinoform with imperfect phases caused by a nonlinear relation between computed phases and really recorded ones, is digitally simulated. The mean intensity error on a reconstructed image is shown for various forms of the nonlinear relation which are supposed when photographic emulsion is used as a medium to record the kinoform. The result may be a guide to the realization of a method to compensate the nonlinearity.

1. ま え が き

キノフォーム¹⁾は、計算機プログラムと同様に、物体からの回折波の複素振幅データを算出する計算機と、この振幅データの位相成分のみを光学的な厚さの形で記録する装置とを利用して合成される。理想的に作成されたキノフォームの再生段階では、再生波の吸収がなく、しかもプログラムのように不必要な像を生じさせることもないので、再生光の利用効率が著しく高い。また、位相成分のみを取り扱えばよいから、記録過程において、複素振幅データを表示する装置の分解能による制約が計算機プログラムと比べて大幅に緩和される。このようにキノフォームは、計算機プログラムの欠点を解消した非常に魅力的な技術といえるが、実用にたえるキノフォームを作成するにはさまざまな問題点が残されている。

キノフォーム作成上の問題点のひとつは、位相成分をいかに忠実に光学的な厚さとして記録するかということである。キノフォームの代表的な作成方法は、まず計算によって得られた位相パターンを光強度パター

ンとしてディスプレイなどに表示し、次にこれを写真フィルム(乾板)に縮小記録して濃淡パターンを得、最後にこれを漂白してレリーフパターンに変換する、というものである。このとき、レリーフの各部分の厚さが計算位相に比例し、しかも最も厚い部分と最も薄い部分の位相差が 2π になるという条件(キノフォーム条件)を満たすようにしなければならない。この作成方法は、非線形な過程を積み上げたものであるといつてよく、キノフォーム条件を満たすように各過程を制御することは非常に難しい。

キノフォーム面で物理的に記録された位相値 ϕ_r は、計算された位相値 ϕ_c の関数として次のように表される。

$$\phi_r = f(\phi_c) \quad (1)$$

ここで f は一般には非線形関数である。特に記録位相 ϕ_r が計算位相 ϕ_c に比例する場合には、

$$\phi_r = K\phi_c \quad (2)$$

となる。 $K=1$ のときはキノフォーム条件が完全に満たされる(位相整合)。また $K \neq 1$ の場合は、レリーフパターンの最厚部と最薄部の位相差が 2π にならない(位相不整合)。理論的解析^{2,3)}によれば、位相不整合が

あると本来の再生像の他に光軸上の輝点と共役像が発生する。これらの余分な像は、再生光の利用効率を下げるばかりでなく、像領域が光軸を含む場合には像質の著しい劣化を招く。一般的な非線形性が存在する状態では、こうした傾向は当然加速されるものと考えられる。

良い像を再生できるキノフォームを作成するには、位相記録の非線形性を補正することが不可欠である。どの程度までの補正が必要になるかについての見通しを得るために、位相記録の非線形性が再生像に及ぼす影響を把握しておくことが有用である。そこで本研究では、キノフォームの記録媒体として写真乳剤を想定し、非線形位相特性と再生像質との関係を計算機シミュレーションによって調べた。なお、写真乳剤以外の記録媒体に関しても、非線形性補正の問題は避け難いものと考えられる。

2. 位相の非線形記録特性

キノフォームの記録媒体として写真フィルムを想定すると、計算位相 ϕ_c と実際に記録された位相 ϕ_r との関係は、図1に示すような曲線になると考えられる。これはモノクロネガフィルムの特性曲線に近いものである。何故ならば、 ϕ_c は表示装置の輝度、つまり露光量

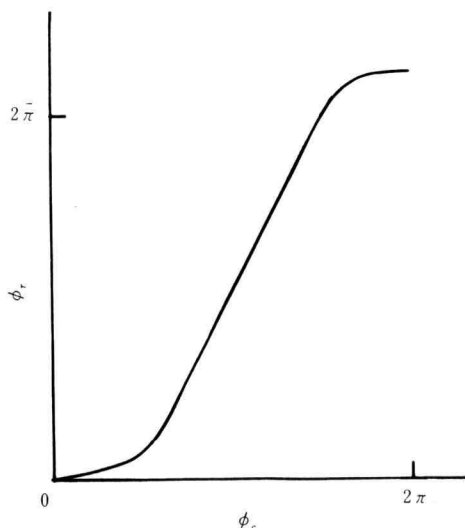


Fig. 1. A characteristic curve of phase recording for photographic film.

に、また ϕ_r はネガフィルムの濃度に、それぞれおおむね比例すると見なせるからである。物理的に厳密に言えば、 ϕ_r は位相の遅れとして記録されることになるので、図1のたて軸は $-\phi_r$ とすべきである。言い換えれば特性は ϕ_c に関して単調減少曲線になるはずである。ところで、キノフォーム位相が ϕ_r のとき $x-y$ 平面における再生波面を $W(x, y)$ とすると、位相が $-\phi_r$ のときには $W^*(-x, -y)$ となる。したがって、位相が $\pm\phi_r$ のときの再生像強度分布は光軸に関して互いに点対称になる。それ故、再生像の強度誤差を問題にする場合には、図1のような特性を考えても差しつかえないといえる。

図1において、 ϕ_c が0に近い部分は露光量が少ない状態に対応し、ここでは ϕ_c に対する ϕ_r の変化は非常に小さい。また、 ϕ_c が 2π に近い部分では露光過多になって濃度変化が飽和状態に近づき、 ϕ_c に対する ϕ_r の変化はやはり小さくなる可能性がある。さらにこれらの中間の部分では、 ϕ_c に対する ϕ_r の変化はほぼ直線的になるものと考えられる。そこで、位相の非線形記録特性を図2に示すように3本の線分で近似することにする。この近似特性は次式で表わされる。

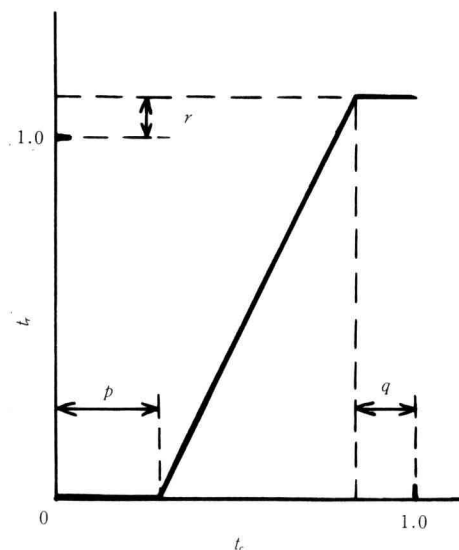


Fig. 2. A model of the characteristic curve for photographic film.

$$t_r = \begin{cases} 0 & 0 \leq t_c < p \\ \frac{1+r}{1-q-p}(t_c-p) & p \leq t_c < 1-q \\ 1+r & 1-q \leq t_c < 1 \end{cases} \quad (3)$$

ただし,

$$\begin{aligned} t_c &= \frac{\phi_c}{2\pi} \\ t_r &= \frac{\phi_r}{2\pi} \end{aligned} \quad (4)$$

である。 ϕ_c および ϕ_r が位相値であることを考慮すれば, 正負の整数 m に対して次式が成立する。

$$\begin{aligned} t_c &= t_c + m \\ t_r &= t_r + m \end{aligned} \quad (5)$$

パラメータ p, q および r の値は, キノフォーム作成の諸過程 (写真撮影, 現像, 漂白など) の条件によって変化する。言い換えれば, 写真撮影条件等を変えることによって, これらのパラメータの値をある程度まで選択しうる。 p および q としては正值を考えればよいが, r は記録された最大位相値の 2π からのずれに相当するものであるから正負の値をとりうる。 $p=q=r=0$ のときは理想的な位相記録特性を表わす。また $p=q=0, r \neq 0$ のときは狭義の位相不整合の状態を表わす。

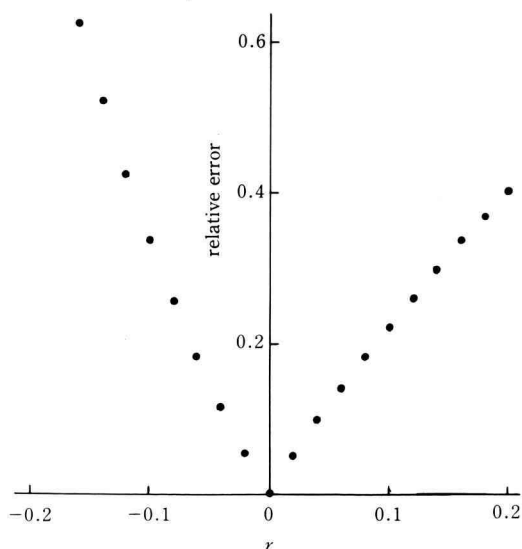


Fig. 3. The relative errors versus values of r for the case that $p=q=0$.

3. 計算機シミュレーション

位相記録特性の非線形性が再生像に及ぼす効果を調べるために, 計算機シミュレーションを行った。記録

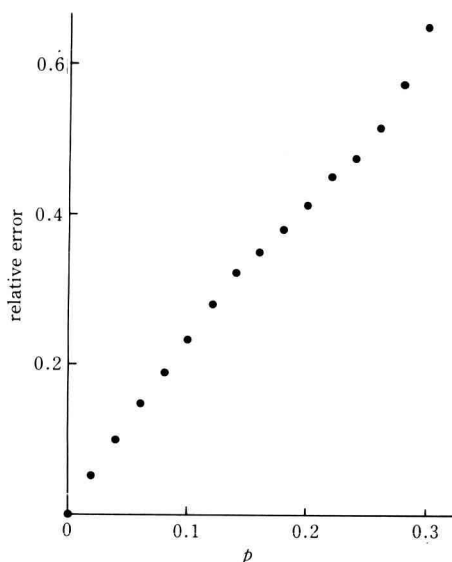


Fig. 4. The relative errors versus values of p for the case that $q=r=0$.

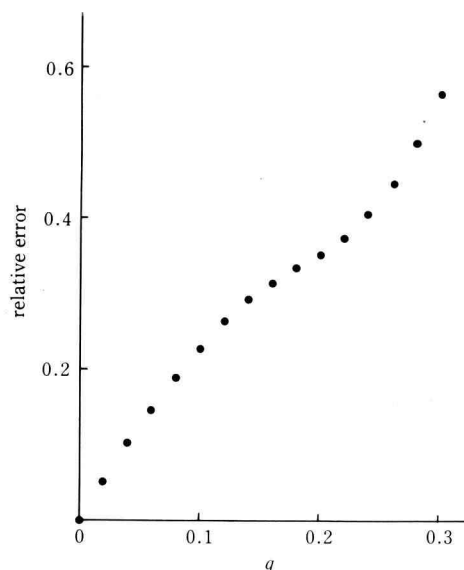


Fig. 5. The relative errors versus values of q for the case that $p=r=0$.

物体の例として、 8×8 個の標本点からなる 2 次元パターンを用い、各標本点での複素振幅の絶対値をすべて一定とした。また標本点データの位相については、キノフォーム面の振幅成分を一定と見なすという仮定が実際にも満たされるように、繰り返し計算アルゴリズム

により決定した。

図 2 の位相記録特性のグラフにおける 3 つのパラメータ p , q および r のいろいろな値に対する再生像強度を算出し、そのときの像質を評価した。像質の評価規準として、もとの物体強度に対する再生像強度の

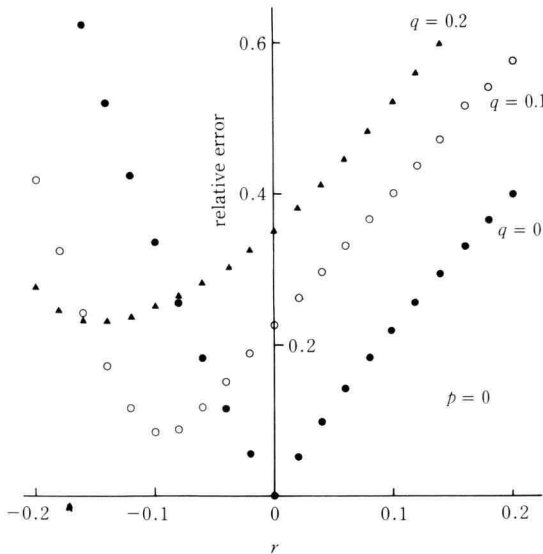


Fig. 6. (a) The relative errors versus values of r for the cases that $p=0$ and $q=0, 0.1, 0.2$.

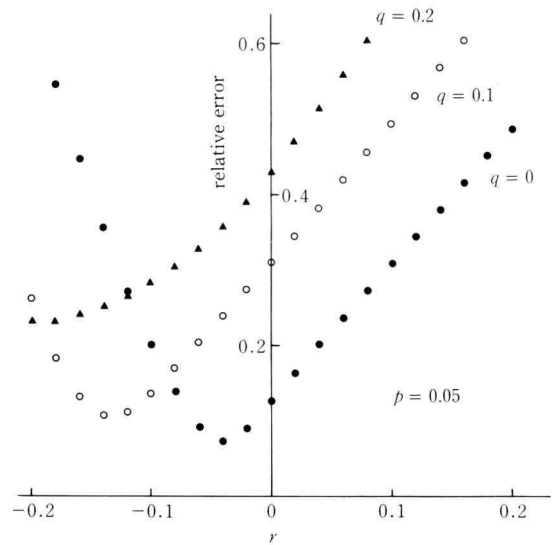


Fig. 6. (b) The relative errors versus values of r for the cases that $p=0.05$ and $q=0, 0.1, 0.2$.

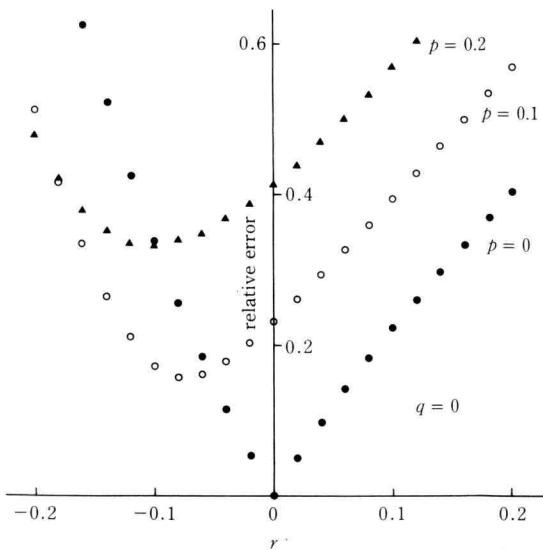


Fig. 6. (c) The relative errors versus values of r for the cases that $q=0$ and $p=0, 0.1, 0.2$.

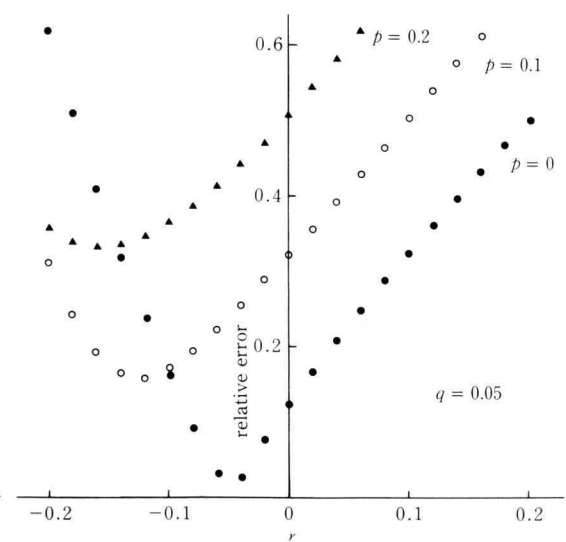


Fig. 6. (d) The relative errors versus values of r for the cases that $q=0.05$ and $p=0, 0.1, 0.2$.

平均誤差を採用した。

図3は、 $p=q=0$ の場合の r の値に対する平均誤差の理想再生像強度に対する相対値を示す。これは狭義の位相不整合の効果を表わしている。 r の負値に対する平均誤差が r の正值に対する平均誤差よりかなり大きく、 $|r|$ が大きくなるにしたがってこの傾向が著しくなる。このことは理論的な解析結果²⁾とも矛盾しない。実現された位相の最大値が 2π より小さい場合よりも大きい場合の方が、位相不整合による再生像質の劣化は少ないことがわかる。

図4は、 $q=r=0$ の場合の p 値に対する平均誤差を示す。これはパラメータ p だけによる非線形性効果を表わす。また図5は、 $p=r=0$ の場合の q の値に対する平均誤差を示す。これはパラメータ q だけによる非線形性効果を表わす。図4と図5からわかるように、 p と q の値が小さい範囲では、 p および q に対する平均誤差はほとんど同じ傾向を示す。式(5)によれば $t_r=0$ と $t_r=1$ とは位相的に等価であるから、 $r=0$ の場合には p の変化と q の変化は同様な効果を生じさせるはずで、このような結果が現われるのは当然である。

次に、3つのパラメータ p, q および r による非線形効果が同時に現われる場合の平均誤差の様子を、図6(a), (b), (c)および(d)に示す。これらの図から、 $p=q=0$ の場合以外では、平均誤差が最小になるのは $r=0$ のときではないことがわかる。たとえば図6(d)において、 $p=0$ の場合には $r \approx -0.05$ のときに平均誤差は最小になる。このときの位相記録特性は、式(3)において $p=0, q=0.05, r=-0.05$ と置いて得られ、次のようになる。

$$t_{r1} = \begin{cases} t_c & 0 \leq t_c < 0.95 \\ 0.95 & 0.95 \leq t_c < 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)から、 t_c の大半の領域で t_{r1} が理想的な位相特性と一致することがわかる。 $r \approx -0.05$ のときの位相特性に対して、理想的な位相特性からのずれが最も小さくなるため、平均誤差が最小になるものと考えられる。なお、この場合の平均誤差の最小値が極めて小さいのは、大きな誤差を与えるような位相データが偶然少なかったためであると考えらるべきであろう。

また図6(c)において、 $p=0.1$ の場合には $r \approx -0.1$ に対して平均誤差は最小になる。このときの位相記録特性は、

$$t_{r2} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t_c < 0.1 \\ t_c - 0.1 & 0.1 \leq t_c < 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

となる。計算位相 ϕ_c に一定位相をバイアスとして加減しても、再生像の強度分布には影響しないから、ここで $t_{c'} = t_c - 0.1$ とおき、式(5)の関係を考慮すれば、式(7)は

$$t_{r2} = \begin{cases} t_{c'} & 0 \leq t_{c'} < 0.9 \\ 1.0 & 0.9 \leq t_{c'} < 1.0 \end{cases} \quad (8)$$

となる。式(8)は、 $t_{c'}$ の大部分の領域で t_{r2} が理想的な位相特性と一致することを示す。したがって、 $r = -0.1$ の近傍で、理想的な位相特性からのずれが、位相的な意味で最も小さくなり、平均誤差が最小になるものと考えられる。

以上の計算機シミュレーションによって、次のような点が明らかになった。

(1) パラメータ p, q および r による非線形効果が単独に存在する状況で平均誤差を10%以内に抑えるためには、各パラメータ値を0.04程度以内に抑える必要がある。 p と r による非線形効果が併存する可能性が大きいので、そうした例として、 $p=0.04, q=0, r=-0.04$ の場合を計算すると、平均誤差はほぼ0.06となる。したがって、非線形性をこの程度まで抑制できれば、かなり良質な像の再生が期待できる。

(2) パラメータ p あるいは q が0でない場合、すなわち一般的な非線形性の効果がある場合には、記録位相の最大値と最小値との差が 2π よりも小さい状態で、最も良い像が再生できる可能性がある。

なお、再生像の平均誤差は当然、対象物体の標本点データとそれに付加する位相に依存する。そこで、 26×26 個の標本点からなる2次元パターンについても同じシミュレーションを試みた。結果のおおよその傾向は変わらなかったが、数値にはかなりの差異が認められた。またこの差異は非線形性が大きい場合に顕著であった。

4. あ と が き

キノフォームの位相記録特性の非線形性が再生像質へ与える影響を調べるために、計算機シミュレーションを行った。その結果、位相記録特性の非線形性をどの程度まで抑制できれば比較的良好な像の再生が期待できるかについて、ひとつの目安が得られた。また一般

的な非線形性の効果が存在する場合には、記録位相の最大値と最小値の位相差が 2π よりも小さい状態で、最も良い再生像が得られる可能性があることがわかった。

位相記録特性の非線形性が大きい場合の結果は、理論的解析を裏付けるデータとしての意味はあるにしても、実際上はあまり役に立たない。というのは、そうした状態で作成されたキノフォームの再生像の質は極めて悪いからである。実際にキノフォームを作成した経験から判断すると、写真フィルムの位相記録特性の非線形性はかなり大きい。したがって、非線形性を補正することなしに、実用的なキノフォームを写真フィルムを使って作成することは不可能である。非線形性を補正するといっても、完全を期すことは期待し難く、ある程度の非線形効果が残存することは避けられないであろう。そこで、どの程度の非線形性までは許容し

うるかが問題になる。この計算機シミュレーションの結果は、位相の非線形性を補正する方法を研究するに当たって役立つものと考えられる。

文 献

- 1) L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J.A. Jordan, Jr., "The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device", IBM J. Res. Develop. **13**, 150 (1969).
- 2) D. Kermisch, "Image Reconstruction from Phase Information Only", J. Opt. Soc. Am., **60**, 15 (1970).
- 3) 武田光夫, 谷田貝豊彦, 「計算機プログラムとキノフォーム — 再生像の明るさについて —」, 応用物理, 第41巻第9号, 91 (1972) .