

電子透かし音響・画像の制作技術

Water Mark Technology on Sound・Picture

ポリテクカレッジ青森

(東北職業能力開発大学校附属
青森職業能力開発短期大学校)

佐々木 隆幸

1. はじめに

コンピュータ・ネットワーク技術が進歩し、デジタル情報が非常に手軽に取り扱えるようになってきた。その結果、ネットワークが一般家庭にも急速に普及し、だれでもがデジタル情報をいとも簡単にコピーできるようになり編集したりすることもできるようになってきた。

それに伴い、そのコピーや編集がトラブルを引き起こす原因にもなっている。多額の費用と労力を要して制作したデジタル音楽や商標画像が著作権者の許可なく不正コピーや不正使用・販売されたり、建築現場や事故現場などで証拠となるデジタル写真・画像が簡単に改ざんされたりする。

そのため、デジタル情報の不正コピーや改ざんを防止する技術が強く求められている。その防止策の1つとして電子透かし技術がある。ここでは、波の干渉と回折を利用した電子透かし技術を開発⁽¹⁾したので、それについて紹介する。

最初に、電子透かし技術の原理を述べ、次に制作方法を、最後にこの技術の特徴を述べていく。

2. 電子透かしの原理

ここに紹介する電子透かしは3つの原理に基づく。

2.1 微小なランダム信号

1つ目の原理は

(情報信号)+(微小なランダム信号)≡(情報信号)
が成り立つということである。

時系列情報である音響信号 $f(t)$ 、あるいは平面空間情報である画像信号 $f(x,y)$ に、それぞれ微小なランダム信号 $rand(t)$ あるいは $rand(x,y)$ を加え合わせても、加え合わせるランダム信号が微小であればあるほど

$$f(t) + rand(t)$$

$$f(x,y) + rand(x,y)$$

の信号は加え合わせる前の $f(t)$ あるいは $f(x,y)$ とほぼ等しい。

2.2 波の干渉

2つ目の原理は、波の干渉を用いると、意味ある情報を限りなくランダム的な信号に変換することができることである。以下にその理由を示す。

2つの波が重なり合うと干渉が発生する。2つの波源から発生する波の変位 y が

$$y = \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad \left(\begin{array}{l} T: \text{周期} \quad t: \text{時間} \\ \lambda: \text{波長} \quad x: \text{位置} \end{array}\right)$$

であるとき、波源からそれぞれ距離 d_1 、 d_2 だけ離れた点で重なり合うと

$$2\sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d_1 + d_2}{2}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d_1 - d_2}{2}\right)$$

となり、その点での振幅は

$$2 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d_1 - d_2}{2}\right)$$

となる。つまり、その点での振幅は波源からの距離によって、強め合ったり弱めあったりする。その結

果として水面全体に規則正しい干渉縞がみられる。この干渉縞は振幅や波長が互いに等しく位相差が一定の2つの波源からの干渉結果である。

しかし、さまざまな振幅の波源が数多くなると、ある点における合成波はもっと複雑に干渉し、水面全体にはランダムに近い干渉縞が形成される。

例えば、雨粒が降り落ちて池の水面を想像しよう。1個の雨粒が池に落ちると、そこに1つの波源ができ波紋が発生する。別の場所に落ちた雨粒はその位置に新しい波源をつくり別の波紋を起こす。多数の雨粒が池に同時に降り落ちると、その個数だけ波源ができ波紋がそれぞれに発生する。しかも雨粒の大きさや落下スピードが異なると、上に述べたような振幅がさまざまな波源が多数個あるのと同じになる。こうしてできた池の水面全体の波紋がある瞬間における干渉縞である。そのときの干渉縞がランダムに近いことが容易に想像できるだろう。

レーザー光の波を用いて干渉縞をつくることができる。図1に示すようにハーフミラーでレーザー光

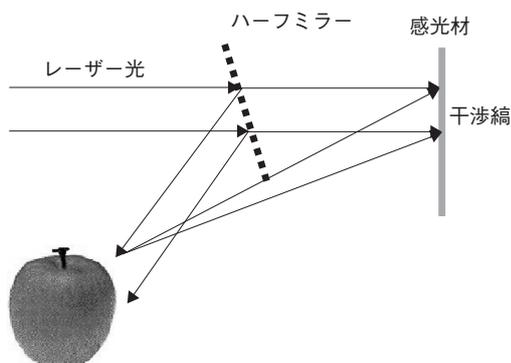


図1 レーザー光による干渉縞形成

を2つに分離する。一方はハーフミラーをそのまま直進するレーザー光、他方はハーフミラーで反射するレーザー光である。その反射光は物体を照射し、物体のさまざまな点から散乱する。散乱したレーザー光が感光材に到達すると、直進してきたレーザー光と感光材面上で重なり合い干渉する。その結果、感光材には干渉縞が記録される。記録された干渉縞はランダム的な縞模様になる。

2.3 波の回折

3つ目の原理は干渉縞にはおのおのの波源からの

情報がすべて含まれていることである。したがって、干渉縞を調べることにより、波源に関する情報を遡って知ることができる。

その理由をレーザー光による干渉縞の例で示したのが図2である。干渉縞が記録された感光材にレー

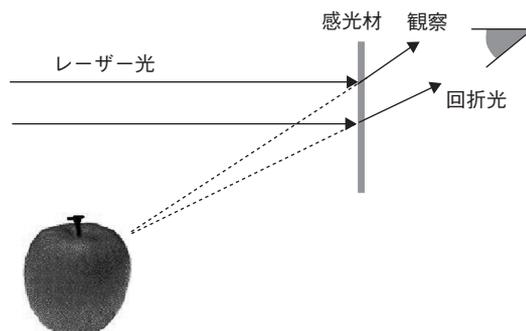


図2 干渉縞による再現

ザー光が入射すると、レーザー光は干渉縞によって回折する。回折したレーザー光の方向はレーザー光が物体から散乱した方向と一致する。だから、この回折光を覗き込むと、物体の情報が回折光の奥の方に再現されているのを観察することができる。

3. 電子透かし情報のランダム化

ここで用語を整理しておく。埋め込む透かしそのものを透かし情報、透かし情報が埋め込まれる前の土台となる音響・画像を原音響・原画像、そして透かし情報が埋め込まれた後の原音響・原画像を電子透かし音響・画像と呼ぶことにする。

2.2で述べた原理を用いて、電子透かし情報をランダム化してみる。

音や光は一般に次式で表現される。 $i=\sqrt{-1}$ とする。

$$A \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)} \quad \left(\begin{array}{ll} A: \text{振幅} & \vec{k}: \text{波数ベクトル} \\ \omega: \text{角周波数} & \vec{r}: \text{位置ベクトル} \end{array} \right)$$

したがって、音や光を単純に1つのマイクやレンズで記録すると、振幅の絶対値2乗つまり $|A|^2$ だけが音の強さや光の明るさとして記録される。すなわち、位相情報を含む $e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$ の部分が欠落してしまう。だから、1つのマイクやレンズで記録された音や光には、一般に音の拡がりや写真の奥行きがなくなってしまう。このことはコンピュータで記録する場合

でも同様である。つまり、位相情報を含む複素数のままでは記録できず、必ず振幅と位相に分離してそれぞれを記録するか、大きさだけの記録にならざるを得ない。

これを解決するための、振幅と位相を同時に記録する方法⁽²⁾を述べる。

時刻 t に記録された強さが $f(t)$ 表される音響、位置 (x,y) に記録された明るさが $f(x,y)$ となる画像を用いて説明する。しばらくの間、音響と画像に関する式をそれぞれ併記していく。

最初に、これらをフーリエ変換すると、それぞれ次式 $F(v)$ の、 $F(u,v)$ で表される。

$$F(v) = \int f(t) \cdot e^{-i2\pi vt} dt \quad (v: \text{周波数})$$

$$F(u,v) = \int f(x,y) \cdot e^{-i2\pi(ux+vy)} dt \quad (u,v: \text{周波数})$$

これらの式は振幅と位相の両方の情報をもつ。つまり1つの波に相当する。

次に、この波と干渉させるための、もう一つの波をそれぞれ次式のように任意に用意する。ただし、 a 、 b は定数とする。

$$M(v) = e^{i2\pi va}$$

$$M(u,v) = e^{i2\pi(ua+vb)}$$

以上の2つの波をそれぞれ次式

$$F(v) + M(v)$$

$$F(u,v) + M(u,v)$$

のように重ね合わせる。

最後に、上式を絶対値2乗する。そして、次式で与えられる量を記録する。 $*$ は複素共役を示す。

$$F(v) \cdot M^*(v) + F^*(v) \cdot M(v)$$

$$F(u,v) \cdot M^*(u,v) + F^*(u,v) \cdot M(u,v)$$

これらの式は干渉縞の濃淡を表し、振幅と位相の両方の情報を含んでいる。しかも、この干渉縞の濃淡は限りなくランダムに近い。

その実例を以下に示す。図3は透かし情報に用いた音響と記録された干渉縞である。上半分の波形が透かし情報に用いたステレオ音響 $f(t)$ で、下半分の波形が重ね合わせた結果の干渉縞音響

$$F(v) \cdot M^*(v) + F^*(v) \cdot M(v)$$

である。干渉縞音響が限りなくランダムに近いことがわかる。



図3 透かし情報の音響(上)と干渉縞音響(下)

画像の場合の実例を図4に示す。図4(a)は透かし情報に用いた画像 $f(x,y)$ で、図4(b)は重ね合わせた結果の干渉縞画像

$$F(u,v) \cdot M^*(u,v) + F^*(u,v) \cdot M(u,v)$$

である。

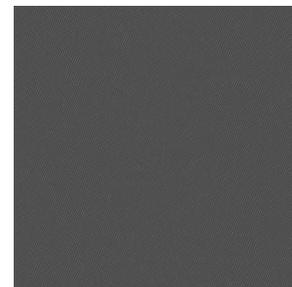


図4(a) 透かし情報の画像

図4(b) 干渉縞画像

この干渉縞画像もランダム信号に限りなく近いことがわかる。

4. 原音響・原画像に埋め込み

次に、2.1の原理を用いて透かし情報を埋め込む。音響の場合を最初に例示する。図3の干渉縞音響を微小倍したものを原音響 $g(t)$ に加え合わせる。それを図5に表す。上半分が原音響 $g(t)$ 、下半分の波形が制作された目的の電子透かし音響である。

同様に、図4(b)の干渉縞画像を微小倍したものを

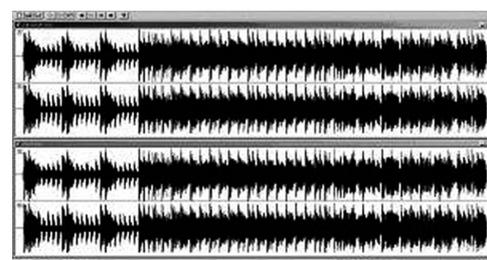


図5 原音響(上)と電子透かし音響(下)



図 6 (a) 原画像



図 6 (b) 電子透かし画像

任意の画像 $g(x,y)$ に加え合わせる。それらを図 6 に示す。左図が原画像，右図が電子透かし画像である。

以上のように，2.1，2.2 の原理を用いることで，電子透かし音響，電子透かし画像を制作することができる。

5. 電子透かし情報の再生

電子透かし音響または電子透かし画像から，電子透かし情報の音響 $f(v)$ または画像 $f(x,y)$ をそれぞれ再生するには，2.3 の原理をコンピュータ上で実行する。それにはフーリエ逆変換する。すると次式に示すように再生できる。

$$\int (F(v) \cdot M(v) \cdot F^*(v) \cdot M^*(v)) e^{i2\pi vt} dt = f(t-a) + f(-t-a)$$

$$\int (F(u,v) \cdot M^*(u,v) + F^*(u,v) \cdot M(u,v)) e^{i2\pi(ux+vy)} dudv = f(x-a,y-b) + f(-x-a,-y-b)$$

再生された音響または画像には，複素共役な音響 $f(-t-a)$ ，複素共役な画像 $f(-x-a,-y-b)$ が現れる。そのことは図 8 の画像に現れている。これは実像と虚像に相当する。

なお，図 7 の音響に複素共役の音響が現れてないのは，横軸の時間長をソフトウェアで事前に半分に

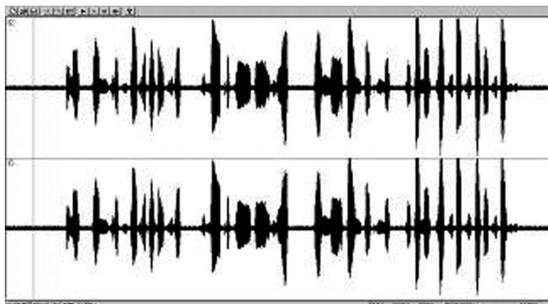


図 7 再生された透かし情報の音響

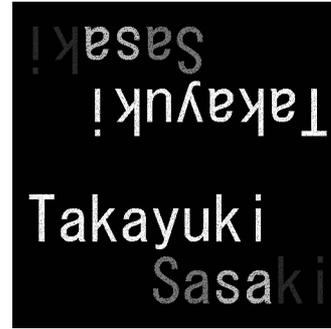


図 8 再生された透かし情報の画像

カット設定しているからにすぎない。

6. 技術の特徴

6.1 部分から全体の再生

この電子透かし技術の特徴の 1 つ目は，電子透かし音響あるいは画像の一部分だけを切出して再生しても，透かし情報の全体を再生できるという点である。以降では視覚的に理解しやすいので，画像に限定して記述していく。

電子透かし画像の一部分，例えば図 9 (a) に示すように図 6 (b) を 3/128 に分割した画像からでも元の透かし情報を再生できる。この画像から再生した透かし情報が図 9 (b) である。



図 9 (a) 図 6 (b) の 3/128 分割画像



図 9 (b) (a) の再生画像

再現性の程度を数値化するため相関係数を求める。その結果を表 1 に示す。

表 1 再現性の相関係数

| | 2 分割 | 4 分割 | 8 分割 | 16 分割 | 32 分割 |
|----------|------|------|------|-------|-------|
| 相関係数 (%) | 89.5 | 84.3 | 80.1 | 72.6 | 64.6 |

この特徴を利用すると，部分的な不正コピーに対してでも透かし情報全体を再生できることから著作

権を主張できる。また何らかの原因で破壊された画像であっても一部分が残っていれば、透かし情報全体を暗号として読み取ることができる。

6.2 多重記録と再生

多重記録に用いた画像は全部で4枚である。図10の原画像1枚と、図11に示した透かし情報(a), (b), (c)の3枚の計4枚である。



図10 原画像



図11(a) 透かし情報(a)



図11(b) 透かし情報(b)

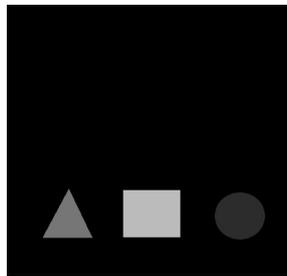


図11(c) 透かし情報(c)

3枚の透かし情報の干渉縞を個々に制作し、それぞれ3枚を原画像に3重に埋め込む。そのようにしてできた多重記録の画像が図12の電子透かし画像である。

再生方法を述べる。個々の透かし情報を個々に再生できるようにするために、事前にそれぞれの透かし情報をランダム化するとき、異なる周波数を用いてある。例えば、横方向の周波数を u 、縦方向の周波数を v として、ランダム化するときには余弦波の波 $M(u, v) = \cos 2\pi(au + bv)$ を用い、再生するときには波 $R(u, v) = \cos 2\pi(\alpha u + \beta v)$ を用いる。さらに $\alpha = a, \beta = b = 0$ とおくと

$$\begin{aligned} & \iint \{F((u,v) \cdot M^*(u,v) + F^*(u,v) \cdot M(u,v)) \cdot R(u,v) \cdot e^{i2\pi(ux+vy)} dudv \\ &= \frac{1}{4} \{f^*(-x-2a, -y) + 2f^*(-x, -y) + f^*(-x+2a, y)\} \\ &+ \frac{1}{4} \{f(x-2a, y) + 2f(x, y) + f(x+2a, y)\} \end{aligned}$$

となる。

このように周波数を使い分けることにより、多重



図12 原画像

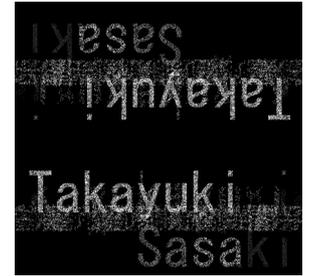


図13(a) 透かし情報(a)

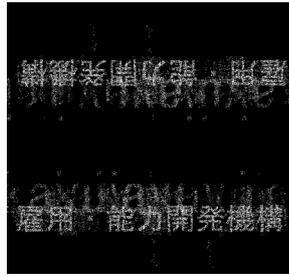


図13(b) 透かし情報(b)



図13(c) 透かし情報(c)

記録した電子透かし画像から、個々の透かし情報を再生することができる。再生した透かし情報が図13の(a), (b), (c)である。

7. おわりに

電子透かし音響・画像の制作技術の原理と実例を紹介してきた。電子透かし技術にはほかにもさまざまな方法がある。

しかし、ここに紹介した電子透かし技術は、音響・画像の一部分だけからでも透かし情報の全体を再生できる技術であり、しかも複数枚の透かし情報を個々に再生できる多重記録が可能な技術である。

また、この電子透かし技術は2つ側面で活用できる。1つは原画像を透かし情報よりも重要視する側面で、このときは「著作権侵害防止」に活用できる技術となる。もう1つの側面は、透かし情報を原画像よりも重要視する側面で、この場合は「暗号伝達」に活用できる技術となる。

最後に、この技術が当初目的の不正コピー防止や改ざん防止に大いに役だつことを期待する。

<参考文献>

- (1) 佐々木：『電子透かし入り画像の生成工法』、特開平15-087554
- (2) D.Gabor：“A new microscopic principle”, Nature, 1948