副尺視力に基づく画像解像度と階調の相乗効果の一検討とマルチ画面の位置合わせ用信号への適用

Study on Synergism of Resolution and Gray Scale Characteristics in Image Recognition in Relation to Vernier Acuity

正会員 金澤 勝[†], 正会員 浜田 宏一[†], 正会員 近藤 いさお[†], 正会員 岡野 文男[†]
Masaru Kanazawa[†], Koichi Hamada[†], Isao Kondo[†] and Fumio Okano[†]

Abstract We studied the synergism of resolution and gray-scale levels in image recognition in relation to the precise phase detection in vernier acuity. Humans who have a 1.0 visual acuity can detect 1.0 minute-size (1/60 degree) objects. Video systems are designed based on this data. On the other hand, it has been reported that human can detect an approximately 2.0-second (2/60/60 degree) phase shifts. We found that precise position detection is possible with a low resolution detector if the number of gray-scale levels is sufficient. We applied this principle to the position adjustment on a multi-screen display system.

キーワード: Vernier Acuity, Resolution, Multi-Screen, Gray Scale, Visual Acuity

1. ま え が き

人間の視力は、一般にランドルト氏環を用いた測定で定義されており、映像信号の画素数はこの視力をもとに規定されている¹⁾。しかし、視覚の特性を示す指標として、この他に副尺視力などもある。副尺視力とは、接する2本の線での位相差の検知限で定義されている。条件が良ければ、視力測定のランドルト氏環で検知限となる隙間の10分の1以下の細かさで、直線の位相差を検知できることが報告されている²⁾。この理由として、文献3)では周波数成分の違いを検出するというモデルを提案しているが、文献4)では輝度の違いで説明できるとしており、副尺視力における高い精度の理由は明確になっていない。また、視力と副尺視力の定量的な考察は、著者の知る限り、報告されていない。

今回、視覚における画像の位相差の検討を行い、位相差の検知限が極めて高く位相特性が重要であることを示し、これをもとに視力と副尺視力の関係を論じたので報告する。まず、副尺視力の説明を行った後、階調特性が良ければ解像度が低くても高い精度で画像の位相を求めることができることを示す。次に、視力と副尺視力の関係を考察し、この関係をマルチ画面の調整に応用した例を示す。

2. 副尺視力の検討

ランドルト氏環を用いて測定される視力は、測定結果が

安定で、視覚系の解像度特性を表すものとして多く用いられている。しかし、視覚系の特性を示す指標としてはこの他に、位相差に着目した副尺視力も重要である。副尺視力では、視力の測定での検知限と比較して、数10分の1の非常に高い精度で、位相差が検知できることが報告されている。この章では、副尺視力の説明の後、視覚における画像の位相差検出のモデル化により、副尺視力で高い検知限が得られる理由に対する定性的な説明を試みるとともに、視力と副尺視力の関係を論じる。

2.1 副尺視力について

人間の視力に基づいて、テレビジョンの方式、特に画素数が決められている。例えば、ハイビジョンでは、標準的な観視位置3H(H:画面高)から画面を見たときに、視野角1°あたり約60画素になるように、画素数が1,920×1,080と決められている¹⁾。視力は、図1に示すランドルト氏環と呼ばれるパターンで測定され、視力1.0とは、ランドルト氏環の切れ込みで弁別できる最小の大きさが、視野角にして1

図1 視力検査のランドルト氏環
Landolt ring.

2002年12月10日受付, 2003年5月30日再受付, 2003年7月11日採録

[†]NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-1125)

[†]NHK Science and Technical Research Labs.

(1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Japan)

図2 副尺視力の検査
Measurement of vernier acuity.

分であることを意味する。すなわち、上記で述べた映像システムでの画素の大きさは、視力1.0の標準的な観視者が、視野角の $1/60^\circ$ 以下の大きさを持つ物体の存在を検知できないことに基づいている¹⁾。

一方、例えば、図2に示す直線2本の位相差の知覚については、条件が良ければ、ずれが視野角で2秒程度でも検知できると報告されている²⁾。これが副尺視力と呼ばれる視覚特性であり、視野角2秒は、上記のランドルト氏環での1分の $1/30$ に相当する精度である。

このように、視野角1分以下では存在が検知できないにも関わらず、相対的な位相差であれば、その数10分の1程度であっても検知できることが明らかになっている。この説明として、文献2)では視細胞の分布で密な部分の存在を仮定しているが、文献3)では周波数成分の違いを検出するというモデルを提案している。さらに文献4)では輝度の違いで説明できるとしているなど、副尺視力における高い精度の理由は明確になっていない。また、視力においては空間周波数特性が調べられているが、副尺視力に関して、このような特性が調べられたとの報告は、著者の知る限り、なされていない。

2.2 副尺視力に関する式の提案

前節で示したように、現在の映像システムは、1画素が視野角1分になるように設計されているが、副尺視力によると、人間の視覚はその $1/30$ の細かさの位相差を検知できる。もし、現在の映像システムの表示能力が、1画素の $1/30$ の細かさの位相差まで表現できるのであれば、副尺視力の高精度な検出能力に対応していることになるが、そうでなければ、現在よりもはるかに画素数の多い映像システムが必要となる。副尺視力での高精度な検出能力の原因を調べるため、視覚を映像システムに置き換えて検討する。

モデルを簡単にするため、網膜の受容体(視細胞)は1次元で画素ピッチ R_w の単純な画素構造とする。最初は、網膜の受容体が検出できる階調を2値(onとoffのみ)と仮定する。入力画像 $f(x)$ は、式(1)に示す通り、黒字に白の矩形で、開始位置が x_s 、終了の位置が x_e とする。このとき、入力画像の中心座標 x_0 を、重心の座標として式(2)で定義する。式(1)の矩形波の場合は、中心座標 x_0 は式(3)で与えられる。

図3 階調と画素数の関係(2階調)
Relationship between pixel No. and gray level (2 levels).

$$f(x) = \begin{cases} 1 & (x_s \leq x \leq x_e) \\ 0 & (x < x_s, x_e < x) \end{cases} \quad (1)$$

$$x_0 = \frac{\int_{x_s}^{x_e} x \cdot f(x) \cdot dx}{\int_{x_s}^{x_e} f(x) \cdot dx} \quad (2)$$

$$x_0 = \frac{x_s + x_e}{2} \quad (3)$$

図3に示すように、入力画像の矩形波は網膜上において R_w 単位でサンプリングされる。入力画像での座標 x_s, x_e に対応する網膜上でのサンプリング位置を $i_s \sim i_e$ とすると、サンプリング位置 i における受容体出力 $P(i)$ は、仮定より2値階調なので、位置 $i_s \sim i_e$ だけ1となり、それ以外は0である(式(4))。座標 x_s とサンプリング位置 i_s は、入力画像の矩形波および受容体出力の立ち上がりの位置であるため、式(5)の関係となる。同様に、座標 x_e とサンプリング位置 i_e は式(6)である。ここで、ガウスの記号 $[\cdot]$ ($[x]$:実数 x を越えない最小の整数値)を用いると、式(5)、式(6)は式(7)と表すことができる。

$$P(i) = \begin{cases} 1 & (i_s \leq i \leq i_e) \\ 0 & (i < i_s, i_e < i) \end{cases} \quad (4)$$

$$R_w i_s - R_w < x_s \leq R_w i_s \quad (5)$$

$$i_e \cdot R_w < x_e \leq i_e \cdot R_w + R_w \quad (6)$$

$$i_s = \left[\frac{x_s}{R_w} \right], \quad i_e = \left[\frac{x_e - R_w}{R_w} \right] \quad (7)$$

式(2)と同様に、網膜上で検出される中心位置 I_0 を、受容体の出力の重心位置として定義する。すなわち、中心位置 I_0 は式(8)で計算される。この場合は2値階調なので、中心位置の検出値 $I_{0(2level)}$ として式(9)が得られる。画像の位置関係を示す座標として x_s, x_e などによる表現と、受容体のサンプリングの位置 $i_s \sim i_e$ での表現が混乱しないよう、以下ではそれぞれ x 座標、サンプリング位置と称する。 x 座標での中心位置の検出誤差 $\Delta P_{(2level)}$ は式(10)で計算される。

$$I_0 = \frac{\sum_{i=i_s}^{i_e} i \cdot P(i)}{\sum_{i=i_s}^{i_e} P(i)} \quad (8)$$

$$I_{0(2 \text{ level})} = \frac{i_s + \dots + i_e}{1 + \dots + 1} = \frac{i_s + i_e}{2} \quad (9)$$

$$\Delta P_{(2 \text{ level})} = |x_0 - R_w \cdot I_{0(2 \text{ level})}| \leq \frac{R_w}{2} \quad (10)$$

次に、受容体が検出できる階調を6レベルと仮定し、入力画像は上記と同じとする。網膜上のサンプリング位置 $i_s \sim i_e$ の受容体出力 $P(i)$ は、レベル $n/5$ ($n=0 \sim 5$) を有する。図4(a)に示すように、波形の一方の端での視細胞との位相差を a ($0 \sim R_w$) とすると、 $P(i_s)$ は式(11)となる。同様にもう一方の端では、位相差を b ($0 \sim R_w$) とすると、 $P(i_e)$ は式(12)となる。

$$P(i_s) = \frac{1}{5} \cdot \left[\frac{5 \cdot a}{R_w} \right] \quad a = R_w i_s + R_w - x_s \quad (11)$$

$$P(i_e) = \frac{1}{5} \cdot \left[\frac{5 \cdot b}{R_w} \right] \quad b = x_e - R_w i_e + R_w \quad (12)$$

$P(i_s)$ と $P(i_e)$ 以外では、受容体出力は一定値(1.0)であり、6レベルの場合での波形の中心位置 $I_{0(6 \text{ level})}$ は式(8)から求められ、図4(b)に示すように式(13)で与えられる。 x 座標での中心位置の検出誤差 $\Delta P_{(6 \text{ level})}$ は式(14)で計算されるように、式(10)の1/5となる。

$$I_{0(6 \text{ level})} = \frac{i_{s+1} + i_{e-1}}{2} + \frac{P(i_e) - P(i_s)}{2} = \frac{i_{s+1} + i_{e-1}}{2} \quad (13)$$

$$+ \frac{1}{10} \left[\frac{5}{R_w} \cdot \{ (x_s + x_e) - R_w (i_s + i_e) \} \right]$$

$$\Delta P_{(6 \text{ level})} = |x_0 - R_w \cdot I_{0(6 \text{ level})}| \leq \frac{R_w}{10} \quad (14)$$

図4 階調と画素数の関係(6階調)
Relationship between pixel No. and gray level (6 levels).

これをN階調に一般化すると、中心位置の検出誤差 ΔP は式(15)で表される。

$$\Delta P_{(N \text{ level})} \leq \frac{R_w}{2 \cdot (N-1)} \quad (15)$$

式(15)は、網膜上の受容体の解像度が低くても、階調の情報を利用することにより、受容体の密度で決まる限界解像度よりも細かな精度で、位置検出ができることを示している。

逆に、ある位相差 ΔP が式(16)を満足するのであれば、検出誤差以上の位相差なので位相差があると判断される。

$$\Delta P \geq \frac{R_w}{2 \cdot (N-1)} \quad (16)$$

以上の検討を、視野にある二つの波形での位相差の検出に適用する。視覚系の受容体で検出できる階調数N、受容体のピッチ R_w と仮定し、入力画像の条件として、視野には位相差 ΔP で二つの同一な波形ABが見えているとする。このとき、図5に示すように、位相差 ΔP が式(16)を満足するのであれば、視覚系で位相差が検出できる。

式(16)を、式(17)に書換える。式(17)の左辺は、二つの波形の差に対応する受容体の出力レベルと等しい(付録1参照)。

$$\frac{\Delta P}{R_w} \geq \frac{1}{2 \cdot (N-1)} \quad (17)$$

これを一般式で表記する。受容体のある視細胞(x 座標: $x \sim x + R_w$)に入力される二つの入力信号(信号 $f(x)$ と、それから位相差 ΔP だけずれた信号 $f(x + \Delta P)$)の差分を ΔF 、受容体の視細胞が受け取ることが可能な最大の入力を $\Delta F_{\max}$ とすると、式(17)は式(18)と表記される。上記の定義より ΔF は式(19)で表される。また、入力信号の最大値を1.0に規格化すると ($\text{Max}(f(x)) = 1.0$)、 $\Delta F_{\max}$ は式(20)で表される。ここで、変数 ξ は積分のための補助変数である。

$$\frac{\Delta F}{\Delta F_{\max}} \geq \frac{1}{2 \cdot (N-1)} \quad (18)$$

$$\Delta F = \int_x^{x+R_w} \{f(\xi + \Delta P) - f(\xi)\} d\xi \quad (19)$$

図5 検出できる位相差(矩形波)
Detectable phase (rectangular pattern).

$$\Delta F_{\max} = \int_x^{x+R_w} 1 \cdot d\xi = R_w \quad (20)$$

$f(x)$ は式 (1) のステップ関数であり、厳密には微分可能ではない。しかし、関数 $f_s(x)$ を式 (21) で定義すると、これは x で微分可能で、 s を無限大にすると式 (22) に示す通りステップ関数となるため、便宜上 $f(x)$ を微分可能として取り扱うことができる。そこで、 $f(x)$ に Taylor 展開を用いると、式は (18)、式 (23) となる。

$$f_s(x) = \left\{ \frac{1}{\pi} \cdot \arctan(s \cdot x) + 0.5 \right\} \quad (21)$$

$$f(x) = \lim_{s \rightarrow \infty} f_s(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta F}{\Delta F_{\max}} &= \frac{\int_x^{x+R_w} \{f(\xi + \Delta P) - f(\xi)\} d\xi}{R_w} = \\ &= \frac{1}{R_w} \cdot \int_x^{x+R_w} \left\{ \Delta P \cdot f'(\xi) + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(\Delta P)^k}{k!} \cdot f^{(k)}(\xi) \right\} d\xi \\ &= \frac{1}{R_w} \cdot \left[\Delta P \cdot \{f(x+R_w) - f(x)\} \right. \\ &\quad \left. + \int_x^{x+R_w} \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(\Delta P)^k}{k!} \cdot f^{(k)}(x) \cdot d\xi \right] \geq \frac{1}{2 \cdot (N-1)} \end{aligned} \quad (23)$$

通常、視力の議論では正弦波による空間周波数でのレソポンスが用いられるため、上記の入力信号を、空間周波数 u の正弦波 $\sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x)$ (x : 空間上の位置) にする。すなわち式 (23) で、 $f(x)$ を正弦波 $\sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x)$ として計算すると式 (24) が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta F}{\Delta F_{\max}} &= \frac{1}{R_w} \cdot \left[\Delta P \cdot \{ \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x+R_w)) - \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \} \right. \\ &\quad \left. + \int_x^{x+R_w} \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(\Delta P)^k}{k!} \cdot \sin^{(k)}(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \cdot d\xi \right] \\ &= \frac{1}{R_w} \cdot \left[\Delta P \cdot \{ \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x+R_w)) - \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \} \right. \\ &\quad \left. + \int_x^{x+R_w} \frac{(\Delta P \cdot 2 \cdot \pi \cdot u)^2}{2} \cdot \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(\Delta P)^k}{k!} \cdot \sin^{(k)}(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \cdot d\xi \right] \\ &= \frac{1}{R_w} \cdot \left[\Delta P \cdot \{ \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x+R_w)) - \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\Delta P \cdot 2 \cdot \pi \cdot u)^2}{2} \int_x^{x+R_w} \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x+\Delta P)) \cdot d\xi \right] \geq \frac{1}{2 \cdot (N-1)} \end{aligned} \quad (24)$$

副尺視力の議論を行うため、ランドルト氏環による視力での限界となる空間周波数以下で、かつ位相差 ΔP がこの限界となる空間周波数の波長よりも小さいという条件を与える。この場合は、 $\Delta P \cdot u < 1$ となり (付録2)、式 (24) 左辺の第2項が無視できる。また、視覚で検知できる階調数 N は $N \gg 1$ であるため、式 (25) が得られる。

$$\frac{1}{R_w} \cdot [\Delta P \cdot \{ \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x+R_w)) - \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \}] \geq \frac{1}{2 \cdot N} \quad (25)$$

これに再度 Taylor 展開を用いると、式 (26) となる。

$$\begin{aligned} &\frac{1}{R_w} \cdot \Delta P \cdot \left\{ 2 \cdot \pi \cdot u \cdot R_w \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(R_w)^k}{k!} \cdot \sin^{(k)}(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \right\} \\ &= \frac{\Delta P}{R_w} \cdot \left\{ 2 \cdot \pi \cdot u \cdot R_w \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \right. \\ &\quad \left. + \frac{(2 \cdot \pi \cdot u \cdot R_w)^2}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x+R_w)) \right\} \geq \frac{1}{2 \cdot N} \end{aligned} \quad (26)$$

副尺視力の議論であるという前述の説明と同様に、今回の検討では $R_w \cdot u < 1$ との条件となり、式 (26) の第2項が無視できる。これにより式 (27) が得られる。このため、位相差 ΔP と空間周波数 u の積が式 (27) に示す値以上であれば、視覚系はこれらの波形の位相差 ΔP を検知できる。これを図6に示す。

$$2 \cdot \pi \cdot u \cdot \Delta P \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \geq \frac{1}{2 \cdot N} \quad (27)$$

$\cos(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x)$ は、 $x=0$ で最大になり、そのとき式 (27) を満足する ΔP は最小値 $\Delta P_{\min}$ となる。視覚系では、この最小位相差 $\Delta P_{\min}$ は空間周波数 u の関数であると考えられるので、これを $\Delta P_{\min}(u)$ と表記する。以上より、検知できる最小位相差 $\Delta P_{\min}(u)$ は式 (28) と表される。

$$\Delta P_{\min}(u) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot u \cdot N} \quad (28)$$

式 (28) に視覚の特性を組込む。視覚の空間周波数特性を $F(u)$ 、空間周波数が0 (直流) のときに受容体が検知できる

図6 検知できる位相差 (正弦波)
Detectable phase (sinusoidal wave) .

階調数を N_0 とすると、式(28)の階調 N は式(29)で表される(付録3)。

$$N = N_0 F(u) \quad (29)$$

また、式(29)の N_0 は受容体1個が空間周波数0のときに検知できる階調数であるが、通常、視覚で検知できる階調数と定義されているものは、複数の受容体の出力を寄せ集めたものである⁵⁾。そこで、一般に視覚が検知できるとされている階調数を $N_{\max}$ と表し、係数 K を式(30)で定義すると、式(28)は式(31)と表現できる。これより、空間周波数 u で検知可能な位相差の最小値 $\Delta P_{\min}(u)$ は、空間周波数とその周波数でのレスポンスの積に反比例することが予想される。

$$K = \frac{4\pi \cdot N_0}{N_{\max}} \quad (30)$$

$$\Delta P_{\min}(u) = \frac{1}{K \cdot N_{\max} \cdot u \cdot F(u)} \quad (31)$$

3. 副尺視力の考察

3.1 副尺視力についての考察

人間の視力は、多くの文献に発表されている。ここでは、視覚のレスポンス $F(u)$ をBartenらによる式(32)⁶⁾として、考察を行う。

$$F(u) = a \cdot u \cdot \exp(-b \cdot u) \cdot \{1 + c \cdot \exp(b \cdot u)\}^{0.5} \quad (32)$$

ここで

$$a = \frac{540 \cdot (1 + 0.7/L)^{-0.2}}{1 + \frac{12}{\omega(1 + u/3)^2}}$$

$$b = 0.3 \cdot (1 + 100/L)^{0.15}$$

$$c = 0.06$$

u : 空間周波数(cycle/deg)

ω : ディスプレイを見込む視野角(deg)

L : ディスプレイの輝度 (cd/m²)

ディスプレイの視野角 ω をハイビジョンでの推奨値30deg、輝度 L が100cd/m²としたときの特性を図7に示す。横軸は空間周波数 (cycle/deg)、縦軸は視覚のレスポンス $F(u)$ で最大値は1.0に規格化している。式(32)を式(31)の視力 $F(u)$ として計算したものを図8に示す。横軸は空間周波数 (cycle/deg)、縦軸は検知可能な位相差 $\Delta P_{\min}$ (式(31))だが、 K の値は不明であるため、 $K \cdot \Delta P_{\min}$ を計算した。なお、ここでの視覚の特性は、輝度に対する特性を意味するものとする。図8は空間周波数10cycle/deg程度で位相差に対する感度が高いことを示している。

K を概算するため、SXGAの液晶プロジェクタを用いて、筆者1名による評価実験を行った。用いた画面は、図9に示すとおり、正弦波で上下に位相差があるものである。数点

図7 視覚特性の計算例(輝度)
Example of human vision characteristics.

図8 検知できる位相差の計算例
Example of calculation for detectable phase difference.

図9 使用したパターン
Test patterns.

の空間周波数で、判別が可能となる位相差を求めた。結果を表1に示す。また、この結果より換算した、空間周波数と検知できる位相差の関係を表2に示す。表2の評価結果は、高周波成分で特性がややずれるものの、図8の特性と同様と考えられ、これから K は0.1程度となる。この場合、検知できる位相差の精度は視野角20秒に相当し、副尺視力で報告されている視野角2秒の精度は得られなかった。しかし、この値は視力1.0の観察者によるランドルト氏環の測定での検知限視野角1分より小さい。ここで、筆者の視力は0.7程度であること、副尺視力の測定では図9のような正弦波ではなく、矩形波が用いられるため、多くの周波数成分の合

表1 位相差の測定結果1
Measurement result 1 for phase detection.

周期	視距離 2.5m	視距離 1.5m
4 画素	*	45 deg.
8 画素	20 deg.	10 deg.
24 画素	8 deg.	6 deg.
30 画素	4 deg.	4 deg.

スクリーン高さ: 58 cm

*: この視距離では、正弦波として見えないため測定不能

表2 測定結果1の換算
Conversion of measurement result.

空間周波数 (cycle/deg.)	位相差の 検知限(deg.)	副尺視力 (sec.)
19.26	*	
11.54	45	39
9.63	20	34.7
5.77	10	17.3
3.21	8	24.9
1.92	6	31.2
1.28	4	31.16
0.77	4	52

*: 測定不能

図10 画素と位相差の見え方の例
Example of phase difference.

成として位相差を判別できること、を考慮するならば、図8は副尺視力を定性的に説明していると思われる。すなわち、ランドルト氏環を用いた視力の測定では、視力1.0の観察者は視野1.0分以下の大きさの物体を見分けられないが、階調の情報を用いることによって、その数十分の1の精度で位相差を判別できる、ことが今回の考察から説明できる。

図8の特性を映像信号と関連して考えると、中域(ハイビジョンでは5.6~17.4MHzに相当)においては、検知限となる位相差の値が小さい(すなわち感度が高い)ことから、これらの周波数の位相特性が、画質に大きく影響することが予想される。

3.2 画像と副尺視力

テレビジョンシステムでは、1画素の大きさが検知できない視距離になるように、映像方式を決定している。例えば、ハイビジョンでは1,920(水平)×1,080(垂直)画素で、視距離3H(H:画面高)から観視すると、前述のように、1画素は、視野角1分となる。すなわち、映像システムの限界解像度は視野角1分に相当する。一方、副尺視力での限界が視野角2秒とすると、これは映像システムの限界解像度の1/20に相当する細かさであり、映像信号はこの精度で位相差を伝える必要がある。

前述のように位相差の判別には階調情報が用いられている。映像信号の階調は、8または10ビット(映像信号0~100%で220または877階調)であるため、現在の映像システムは、上記の精度(映像システムの限界解像度の1/20)を満足する十分な階調で映像を伝送している。これを考察で示

す代わりに、簡単なシミュレーションで示す。位相差のある二つの白い三角形にLPF処理を行い、16×16画素の解像度にしたものを図10に示す。図10(a)~図10(c)は、単純なLPF処理、図10(d)~図10(f)はそれらを16×16画素のディスプレイに表示した状態をシミュレートしたものである。三角形同士の位相差は、図10(a)、図10(d)が0、図10(b)、図10(e)が1/4画素、図10(c)、図10(f)が1/8画素である。この図に示す通り、1画素以下の位相差でも三角形の位置の違いを判別できる。したがって、現在の映像システムは高い精度で位相差を表現できることがわかる。

3.3 画像の差の知覚

上記の説明は、視覚系は、例えば上下の領域で別々に中心位置を知覚し、その差を検知するというものである。一方、ほかのモデルとしては、視覚系では領域の差自体をもとに視覚系の特性から位相差を検知することも考えられる。これを図11に示す。図11(a)は、2.2節での視覚系のモデルであり、図11(b)は、最初に画像の差をとり次に位相差を判定するモデルである。視覚系では、視神経からの信号に対して、強調や抑制を組合せた処理が行われていることから⁷⁾、このような差分の生成は、可能性があると思われる。また、文献4)でも輝度の差を視神経が検知するモデルを想定している。この場合は、領域1での入力 $f_1(x)$ が式(33)に示すように $\sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x)$ 、領域2での入力 $f_2(x)$ はこれよりも Δx だけ位相がずれているので、式(34)に示すよう

図11 副尺視力での視覚系のモデル

Model of human vision for vernier acuity

(a) Human vision model in 3.2, (b) Human vision model of image differentiation.

に $\sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x + \Delta x))$ となる。視覚系におけるこれら二つの信号の差の振幅は、式(35)に示すように、 $2 \cdot \pi \cdot u \cdot \Delta x$ に比例する。

$$f_1(x) = \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \quad (33)$$

$$f_2(x) = \sin(2 \cdot \pi \cdot u \cdot (x + \Delta x)) \quad (34)$$

$$f_2(x) - f_1(x) \cong \Delta x \cdot 2 \cdot \pi \cdot u \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u \cdot x) \quad (35)$$

式(35)の振幅成分($2 \cdot \pi \cdot u \cdot \Delta x$)と空間周波数 u での視覚系のレスポンス $F(u)$ との積が、明暗の識別の閾値 T_h 以上であれば(式(36))、位相差 Δx が検知される。このため、識別可能な最小位相差 Δx_{th} は、 A をある定数として式(37)の形をしていることになり、これは2.2節と同じ結果である。また、画像の差をとることは、階調の情報を用いていることを意味するので、階調が関係する点も同じである。視覚系の働きが、2.2節とこのモデルのどちらに近いのかは、今後の検討であるが、どちらであっても3.1節と3.2節の議論は成り立つ。

$$2 \cdot \pi \cdot u \cdot \Delta x \cdot F(u) \geq T_h \quad (36)$$

$$\Delta x_{th} = \frac{A}{2 \cdot \pi \cdot u \cdot F(u)} \quad (37)$$

4. マルチ画面の位置合わせ

前述の検討は、解像度などを対象とした画像の評価および高精度を必要とする位置検出などの測定に応用できる。

ここでは一例として、高解像度ディスプレイの位置合わせ調整に応用した。マルチ画面ディスプレイは、高精細・大画面表示を容易に実現する方法であるが、その構築のためには、画面位置の合成を高精度で行う必要がある。副尺視力の原理を応用するならば、解像度の低いカメラを用いて、マルチ画面上で高精度の位置あわせの補正を行うことが可能となる^{8) 9)}。

4.1 マルチ画面プロジェクタでの画面位置合わせ

図12、表3に、今回試作した全体の構成と仕様を示す。SXGA(1,280×1,024画素)のプロジェクタ4台の画面をつなげることにより、約2,000×2,000画素の表示が可能である。このときの、画面どうしの重なりは100画素程度とした。画面上で、各プロジェクタの画像が正しくつながっているためには、画面上での各プロジェクタの画素の相対位置関係を調べ、それに応じて各プロジェクタ用の画像の幾何学変換を行う必要がある。

前述のように、階調の情報を利用するのであれば、解像度がディスプレイよりも低いカメラを用いて、1画素以下の精度での位置測定が可能となる。前章では、入力信号として1次元の矩形波と正弦波を用いたが、位置ずれ補正は2次元であるため、コンバーゼンス誤差測定方法として開発した信号¹⁰⁾を用いた。

図12 マルチ画面ディスプレイの構成
Configuration of the Multi Projection system.

表3 測定システムの仕様
Specifications of measurement system.

Item	Specification
Measurement CPU	CPU: Pentium III 500MHz RAM: 128 MB
Digital camera	Nikon D1 2000×1312 pixels, 8bit Lens: AF NIKKOR 28~80 mm I/O: IEEE1394
Signal generator CPU	CPU: Pentium III 500MHz RAM: 64 MB Video board: Jeronimo Pro-32VW Capable of 4 SXGA outputs

図13 測定と補正のフロー
Flow chart of measurement and correction.

図14 測定用の $\cos^2$ パターン
 $\cos^2$ patterns.

処理のフローチャートを図13に示す。相対位置関係の測定のため、図14に示す各画面で 9×7 個の $\cos^2$ 信号を表示し、それを1台の静止画カメラ（約200万画素）で撮影する。各SXGA画面での座標を (x, y) ($x: 1 \sim 1,280$, $y: 1 \sim 1,024$)としたとき、 $\cos^2$ 信号の信号レベル $f(x, y)$ は式(38)で与えられる。ここで、 i ($i: 1 \sim 9$)、 j ($j: 1 \sim 7$)は $\cos^2$ 信号の各パターンの位置を表す変数である。4画面のつなぎ合わせなので、カメラは全画面で 18×14 個の $\cos^2$ 信号を撮影する。

$$f(x, y) = \begin{cases} 255 \cdot \cos^2\left(\pi \cdot \frac{x-128i}{32}\right) \cdot \cos^2\left(\pi \cdot \frac{y-128j}{32}\right) \\ 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} (128i-32 \leq x \leq 128i+32, 1 \leq i \leq 9) \\ (128j-32 \leq y \leq 128j+32, 1 \leq j \leq 7) \end{matrix} \quad (38)$$

(上記以外)

カメラで撮影した画像を $f_{\text{cam}}(x_c, y_c)$ と表記する。ここで、 (x_c, y_c) ($x_c: 1 \sim 2,000$, $y_c: 1 \sim 1,312$)はカメラ出力画像で

図15 2次式への近似
Calculation of quadratic function.

の座標を表す。次に、各パターンの撮影データを式(39)により1次元の $f(x_c)$ に変換し、図15に示すように 18×14 個の各 $\cos^2$ 信号について式(40)の2次式 $g(x)$ で近似する。ここで、 a, b, c は2次式の係数である。

$$f(x_c) = \sum_{y_c} f_{\text{cam}}(x_c, y_c) \quad (39)$$

$$g(x_c) = a \cdot x_c^2 + b \cdot x_c + c \quad (40)$$

これにより、各パターンの中心位置 X_0 は式(41)で計算できる。ここで、 $M_0 \sim M_3$ は式(42)で定義される行列式で、その要素 $Y_0 \sim Y_2$ および $X_0 \sim X_6$ は式(43)で定義される。同様に、 y_c 方向についても計算をする。詳細は次節で述べるが、この方法により、低解像度のカメラを使用しながら、非常に高い精度で画面上の位置を測定することができた。

$$x_0 = -\frac{b}{2a} \quad (41)$$

$$a = \frac{M_1}{M_0} \quad b = \frac{M_2}{M_0} \quad c = \frac{M_3}{M_0}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & X_2 \\ X_1 & Y_1 & X_3 \\ X_2 & Y_2 & X_4 \end{bmatrix} \quad M_3 = \begin{bmatrix} Y_0 & X_1 & X_2 \\ Y_1 & X_2 & X_3 \\ Y_2 & X_3 & X_4 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$M_0 = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & X_2 \\ X_1 & X_2 & X_3 \\ X_2 & X_3 & X_4 \end{bmatrix} \quad M_1 = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & Y_0 \\ X_1 & X_2 & Y_1 \\ X_2 & X_3 & Y_2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$X_k = \sum_x x^k \quad (k=0 \sim 6) \quad Y_k = \sum_x x^k f(x) \quad (k=0 \sim 2)$$

4.2 位置合わせの精度に関する考察

前節で述べた位置検出は、2章、3章で明らかにした原理に基づいているため、検出誤差は式(15)となる。ディスプレイの調整では、ディスプレイの画素の大きさを基準として考えるので、式(15)を修正する。階調 N 、カメラの画素サイズ C_{pixel} 、ディスプレイの画素サイズ D_{pixel} として、検出誤差 ΔP は、式(44)で表現される。

$$\Delta P \leq \frac{D_{\text{pixel}}}{2 \cdot (N-1) \cdot C_{\text{pixel}}} \quad (44)$$

今回は、カメラの画素数がディスプレイの約0.3倍程度、階調は256なので理論的には誤差が ± 0.01 画素以下となる

が、ノイズやシェーディングの影響があるので、実際は ± 0.1 画素程度と思われる。

5. む す び

人間の視力は、一般にランドルト氏環により測定が行われており、視力1に相当する検知限で視野角1分が映像システムの設計に用いられている。一方、画像の位相差を問題とする副尺視力では、検知限で視野角2秒が得られると報告されている。本論文は、階調の情報を利用することにより、精度の高い位置ずれが可能であることを示し、これを視覚系における画像の取り扱いに応用することで、副尺視力での高い検知精度を説明できることを明らかにした。また、副尺視力は周波数特性を持つことを示した。

超高精細映像表示の実現方法として、マルチ画面による高精細表示装置を試作した。マルチ画面では、画面の位置合わせを正確に行う必要がある。今回、前記の位置ずれ検出の方法を応用し、高い精度での位置あわせを可能にした。

視力が視覚系における周波数特性の振幅に関するものとするれば、副尺視力は位相に関する特性と考えられる。副尺視力を考慮した画像処理が必要になる可能性もあるため、さらなる検討をする予定である。

〔文 献〕

- 1) 例えば、NHK放送技術研究所編：“ハイビジョン技術”，日本放送出版協会，p.19（1988）
- 2) 平凡社：“心理学事典”，p.391（1981）
- 3) C.R.Carlson, et al.：“Spatial-Frequency Model for Hyperacuity”，J.Opt.Soc.Am, A, 2, 10, pp.1747-1751（Oct. 1985）
- 4) T.Watchler, et al.：“A Simple Model of Human Foveal Ganglion Cell Responses to Hyperacuity Stimuli”，Journal of Computational Neuroscience, 3, pp.73-82（1996）
- 5) 例えば、池田：“視覚の心理物理学”，森北出版（株），p.77（1975）
- 6) P.G.J.Barten：“Evaluation of Subjective Image Quality with the Square-Root Integral Method”，J. Opt. Soc. Am, A, 7, 10, pp.2024-2031（Oct. 1990）
- 7) 例えば、松田：“視知覚”，培風館，p.54（1995）
- 8) Kanazawa, et al.：“A Highly Accurate Measurement Method to Adjust a Multi-Screen Display for an Ultra High-Definition and Wide-Screen System”，SID01, p.97（2001）
- 9) 近藤ほか：“高精細映像表示用4画面マルチプロジェクタの検討”，2001年映像学年次大（2001）
- 10) 金澤ほか：“投写型ディスプレイ用自動コンバーゼンス補正装置”，TV全大，12-8（1987）

<付録1> 視覚系の受容体の出力レベル

簡単のため、1次元で考える。本文・図5をもとに、受容体の出力信号を検討する。二つの入力信号パターンA，パターンBは、矩形波で位相差が ΔP であり、それぞれ式（付1・1），式（付1・2）で示す（付1・図1（a），付1・図1（b））。

$$f(x) \quad (\text{付1・1})$$

$$f(x+\Delta P) \quad (\text{付1・2})$$

これらの差分式（付1・3）は、付1・図1（c）に示すように幅 ΔP の矩形波である。

付・図1 差分信号と受容体出力
Receptor output from differential signals

(a) Pattern A, (b) Pattern B, (c) Difference between input signals, (d) Receptors of human vision, (e) Receptor output.

$$f(x) - f(x+\Delta P) \quad (\text{付1・3})$$

付1・図1（d）に示すように、視覚の受容体のピッチは R_w であるため、式（付1・3）の差分信号による受容体の出力レベル $P(x)$ は、付1・図1（e）に示すように、式（付1・4）となる。これは、本文・式（17）の左辺と同じである。

$$P(x) = \frac{\Delta P}{R_w} \quad (\text{付1・4})$$

<付録2> 空間周波数 u と位相差 ΔP の大きさ

視力の限界となる空間周波数を $u_{\max}$ とすると、対象とする空間周波数 u はこれ以下なので式（付2・1）が成立する。また、副尺視力の検討であるため、想定する位相差 ΔP はこの最大の空間周波数の周期の半分以下であり、式（付2・2）が成立する。したがって、式（付2・3）が成立するため、本文・式（25）が成り立つ。

$$u < u_{\max} \quad (\text{付2・1})$$

$$\Delta P < \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot u_{\max}} \quad (\text{付2・2})$$

$$\Delta P \cdot u < \frac{1}{4\pi} \quad (\text{付2} \cdot 3)$$

<付録3> 空間周波数 u における検知可能な階調数

空間周波数0(直流)のときに、輝度 L_1 と L_2 ($L_1 > L_2$) がぎりぎり検知できたとすると、このときのコントラストの検知限の閾値 C_0 は式(付3・1)である。

$$C_0 = \frac{1}{N_0} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \quad (\text{付3} \cdot 1)$$

視覚の空間周波数特性が $F(u)$ であるとは、空間周波数 u のときのコントラストの検知限 $C(u)$ が式(付3・2)であることを意味する。

$$C(u) = \frac{C_0}{F(u)} \quad (\text{付3} \cdot 2)$$

空間周波数 u のときに検知できる階調数 N は $C(u)$ の逆数であるため、式(付3・3)となり、本文・式(29)が成り立つ。

$$N = \frac{1}{C(u)} = N_0 F(u) \quad (\text{付3} \cdot 3)$$

かなざわ
金澤 勝 1979年、北海道大学大学院修士課程終了修了。同年、NHKに入局。新潟放送局を経て、1981年より、放送技術研究所に勤務。1994年より、NHKエンジニアリングサービスへ出向。1998年より、放送技術研究所に復帰。現在、同研究所主任研究員。ディスプレイの特性測定法、超高精細映像表示システム設計に関する研究に従事。正会員。

はまだ
浜田 宏一 1996年、東京大学大学院修士課程修了。同年、NHKに入局。2003年まで、同放送技術研究所にて、画像符号化、PDPの表示方式および信号処理、高臨場感表示に関する研究に従事。正会員。

こんどう
近藤 いさお 1982年、都立大学工学部電気工学科卒業。同年、NHK入局。福井放送局を経て、1986年より、同放送技術研究所に勤務。ハイビジョン受像方式の研究開発に従事。現在、同所立体映像音響Gにて、高精細ディスプレイの研究開発に従事。正会員。

おかの
岡野 文男 1978年、東北大学大学院修士課程修了。同年、NHKに入局。名古屋放送局を経て、1981年より、放送技術研究所に勤務。現在、同研究所立体映像音響G部長。ハイビジョンカメラ、テレビジョンシステム、立体テレビジョンの研究に従事。工学博士。正会員。