1 搬送波周波数分割多重単管カラーカメラの信号解析

株式会社日立製作所中央研究所

江 藤 良 純・長 原 脩 策

1 搬送波周波数分割多重カラーカメラにおいて、搬送波を変調している2種の色信号成分を分離するのに必要な各部の定数の一般的な関係式を求めた。これを用い、1 搬送波方式の輝度ビートは2 搬送波方式と異なり走査線と平行な構造となること、また1 搬送波方式個有の問題として、走査線1本おきの構造の色ビートが発生しやすいことを示した。

1. ま え が き

産業用カラーカメラの分野においては、単管カラーカメラの研究、開発が盛んである。単管カラーカメラの方式には大別すると、周波数分割多重方式と位相分割多重方式があるが、撮像管の実現の容易さから、これまで発表された例は周波数分割多重方式が圧倒的に多い。

周波数分割多重方式においては、シアンと黄のストライプフィルターを用いて被写体の赤および青成分を変調し、これと無変調の緑成分とを周波数分割多重化して撮像管よりとり出す。

これまでに実用化された周波数分割多重方式においては、上述の2種のストライプフィルターと走査線との交差周波数を異ならしめる、いわゆる2搬送波方式¹⁾²⁾が採用されてきた。一方、最近になりこれらの交差周波数を等しくする1搬送波方式^{3)~11)}も注目されている。

1 搬送波方式は2搬送波方式とくらべると①多重化された信号の占有帯域が狭い、②パーシバル回路の共振周波数を搬送周波数に一致させ S/N を高くできる、などの利点があるが、一方、1 搬送波方式独自の問題もあると思われる。この問題のひとつにビートの発生があることがすでに報告⁹⁾されている。本論文はまず1 搬送波方式における色の分離の条件の一般解を求め、これらの関係を基本にして1 搬送波方式におけるビートの発生機構を解析しようとするものである。

2. 1 搬送波方式の一般的記述

周波数分割多重方式における撮像管の光電変換面に結像される像 I は次式のように求まる²⁾。

$$\begin{aligned} I(\lambda, \vec{d}) = & O(\lambda, \vec{d}) P(\lambda) F(\lambda) \{ R(\lambda) B(\lambda) \\ & + B(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(\vec{\omega}_R) \\ & + R(\lambda) [1 - B(\lambda)] \Phi(\vec{\omega}_B) \\ & + [1 - R(\lambda)] [1 - B(\lambda)] \Phi(\vec{\omega}_R) \Phi(\vec{\omega}_B) \} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで

λ : 波長

$\vec{d}$: 位置 (2次元のベクトル量)

$O(\lambda, \vec{d})$: 被写体の分光特性

$P(\lambda)$: 撮像管の分光特性

$F(\lambda)$: 補正フィルターの分光特性

$R(\lambda)$: シアンストライプフィルターの分光特性

$B(\lambda)$: 黄ストライプフィルターの分光特性

$\Phi(\vec{\omega})$: 空間周波数 $\vec{\omega}$ (2次元のベクトル量) で1と0の2値をくり返す関数

$\vec{\omega}_R$: シアンストライプフィルターの空間周波数

$\vec{\omega}_B$: 黄ストライプフィルターの空間周波数

(1)式の1~3項がおのおの被写体の緑、赤、青成分に対応した信号である。ここで $\vec{\omega}$ の走査線方向の成分を μ 、これと直交する成分を ν とすれば、 $\vec{\omega}_R$ 、 $\vec{\omega}_B$ について図1のように、

$$\vec{\omega}_R: \mu = \omega_c, \nu = \omega_{hR} \quad (2)$$

$$\vec{\omega}_B: \mu = \omega_c, \nu = \omega_{hB} \quad (3)$$

と書け、両方で μ が等しいのが1 搬送波方式と呼ばれる理由である。(1)式のうち $\mu = \omega_c$ 近傍の周波数成分が

"Analysis on Signal of Frequency Division Multiplex Color Camera Using Single Pickup Tube and Single Carrier" by Yoshizumi Eto and Shusaku Nagahara (Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo)

図 1 1 搬送波方式のストライプフィルタ
Stripe Filter of Single Carrier Method

撮像管より得られる赤・青成分で、これを時間 t に対して $C(t)$ とすれば、

$$C(t) = R' \sin \omega_C t + B' \sin \omega_C t \quad (4)$$

と書ける。なお、空間周波数から時間周波数への変換（つまり光電変換）の際の直線性を仮定し、その変換係数は簡単のため 1 とした。また R', B' は (1) 式の 2, 3 項の係数より次式のように求まり、被写体の赤・青成分のレベルを表わす。

$$R' = \int O(\lambda, t) P(\lambda) F(\lambda) B(\lambda) [1 - R(\lambda)] d\lambda \quad (5)$$

$$B' = \int O(\lambda, t) P(\lambda) F(\lambda) R(\lambda) [1 - B(\lambda)] d\lambda \quad (6)$$

ストライプフィルタは図 1 のように傾斜しているで、1 水平走査時間 h ごとに搬送波の位相は変化する。すなわち任意の整数 n に対して、

$$C(t - nh) = R' \sin(\omega_C t - n\theta_R) + B' \sin(\omega_C t - n\theta_B) \quad (7)$$

となる。この h ごとの位相変化 θ_R, θ_B は走査線の空間周波数を $\nu = \omega_h$ とすると、

$$\theta_R = 2\pi \frac{\omega_h R}{\omega_C} \quad (8)$$

$$\theta_B = 2\pi \frac{\omega_h B}{\omega_C} \quad (9)$$

と求まる。

図 2 に 1 搬送波方式における信号処理を示す。 $C(t)$ から R', B' を分離するために、 $C(t - nh)$ を h と適当な位相 θ_R に相当する時間 θ_R/ω_C だけ遅延させた信号 $C[t - (n+1)h - \theta_R/\omega_C]$ と $C(t - nh)$ との平均を $C_R(t -$

$nh)$ とする。ここで隣接走査線間で R', B' はほぼ一定とすれば、

$$C\left[t - (n+1)h - \frac{\theta_R}{\omega_C}\right] = R' \sin(\omega_C t - (n+1)\theta_R - \theta_R) + B' \sin(\omega_C t - (n+1)\theta_B - \theta_R) \quad (7)'$$

であるから、

$$\begin{aligned} C_R(t - nh) &= \frac{R'}{2} \left\{ \sin(\omega_C t - n\theta_R) \right. \\ &\quad \left. + \sin[\omega_C t - (n+1)\theta_R - \theta_R] \right\} \\ &\quad + \frac{B'}{2} \left\{ \sin(\omega_C t - n\theta_B) \right. \\ &\quad \left. + \sin[\omega_C t - (n+1)\theta_B - \theta_R] \right\} \\ &= R' \cos \frac{\theta_R + \theta_R}{2} \sin \left[\omega_C t - \frac{(2n+1)\theta_R + \theta_R}{2} \right] \\ &\quad + B' \cos \frac{\theta_B + \theta_R}{2} \sin \left[\omega_C t - \frac{(2n+1)\theta_B + \theta_R}{2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

一方、 θ_R を他の位相 θ_B に変えて同様の操作を行い、得られる信号を $C_B(t - nh)$ とすると、

$$\begin{aligned} C_B(t - nh) &= R' \cos \frac{\theta_R + \theta_B}{2} \sin \left[\omega_C t - \frac{(2n+1)\theta_R + \theta_B}{2} \right] \\ &\quad + B' \cos \frac{\theta_B + \theta_B}{2} \sin \left[\omega_C t - \frac{(2n+1)\theta_B + \theta_B}{2} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、任意の整数 i, j, k, l に対して、

$$\theta_B + \theta_R = (2i+1)\pi \quad (12)$$

$$\theta_R + \theta_B = (2j+1)\pi \quad (13)$$

と選んでおけば、 $C_R(t - nh)$ の包絡線 $|C_R(t - nh)|$ より

図 2 1 搬送波方式の信号処理
Signal Processing of Single Carrier Method.

R' が, $C_B(t-nh)$ の包絡線 $|C_B(t-nh)|$ より B' が得られる. 一方, このとき得られる $|C_R(t-nh)|$, $|C_B(t-nh)|$ を最大にするのが S/N の点から望ましいので,

$$\theta_R + \Theta_R = 2k\pi \quad (14)$$

$$\theta_B + \Theta_B = 2l\pi \quad (15)$$

を得る.

(12)式~(15)式を満たす数値例として, 参考文献^{3)~8)}にある,

$$\theta_R=0, \theta_B=\pi, \Theta_R=0, \Theta_B=\pi \quad (16)$$

が, また他の参考文献^{6)~10)}にある,

$$\theta_R=\frac{\pi}{2}, \theta_B=-\frac{\pi}{2}, \Theta_R=-\frac{\pi}{2}, \Theta_B=\frac{\pi}{2} \quad (17)$$

などがある. しかし, これらの値は任意の i, j, k, l (実際に独立の値をとれるのはこのうち3つである) に対して求まるので(16), (17)式に限らず無限の組合せが他にも存在することがここに示された.

3. 輝度ビート

(1)式の第4項は輝度信号中のビート成分を表わす. このビート成分は,

$$R(\lambda) \text{ または } B(\lambda)=1 \quad (18)$$

が λ に対して恒等的に成立すれば存在しないが, (18)式は NTSC 方式の撮像特性を実現する色フィルターの特性からは成立しない. ビート成分の空間周波数は ω_R と ω_B の和または差よりなるが, 輝度信号中に落ち込むのは特に差成分である. その空間周波数は(2), (3), (8), (9), (12)~(15)式より,

$$\mu=0 \quad (19)$$

$$\nu=\omega_{hR}-\omega_{hB}$$

$$=\frac{\omega_h}{2\pi}(\theta_R-\theta_B)$$

$$=\frac{\omega_h}{2}\{2(k-i)-1\} \quad (20)$$

輝度ビートは2搬送波方式にも存在するが, 1搬送波方式の特徴は(19), (20)式よりビート構造が走査線と平行になることである. 特に(16), (17)式の数値例の場合はいずれも,

$$|\omega_{hR}-\omega_{hB}|=\frac{1}{2}\omega_h \quad (21)$$

となり, 走査線1本おきのビート構造となる.

なお, 光電変換または信号処理系に非直線特性があっても同様のビート成分が発生する.

4. 色ビート

$C_R(t-nh)$ および $C_B(t-nh)$ から被写体の赤成分および青成分を分離する条件として(12)~(15)式をあげ

た. これらを構成する要因のうち θ_R, θ_B は各ストライプフィルターと走査線との交差角, 垂直偏向系の偏向サイズ, また Θ_R, Θ_B は同期系の水平周波数, $1H$ および微小時間遅延線の遅延時間, 水平偏向系の偏向サイズなどが正規の値になったときに設計値に一致する.

これらの値は変動しやすいえ, かつ偏向系は非直線ひずみを有するので, 画面のあらゆる位置で正規のサイズになりにくい.

以上のような原因で発生する誤差分 $\Delta\theta_R, \Delta\theta_B, \Delta\Theta_R, \Delta\Theta_B$ を含む実際の $\theta_R, \theta_B, \Theta_R, \Theta_B$ を $\theta_R', \theta_B', \Theta_R', \Theta_B'$ とすれば,

$$\theta_R'=\theta_R+\Delta\theta_R \quad (22)$$

$$\theta_B'=\theta_B+\Delta\theta_B \quad (23)$$

$$\Theta_R'=\Theta_R+\Delta\Theta_R \quad (24)$$

$$\Theta_B'=\Theta_B+\Delta\Theta_B \quad (25)$$

である. (10)~(15)式および(22)~(25)式を用いて $C_R(t-nh)$, $C_B(t-nh)$ の実際の値 $C_R'(t-nh)$, $C_B'(t-nh)$ を求めると付録(1)より次式となる.

$$\begin{aligned} C_R'(t-nh) &= R' \cos \frac{\Delta\theta_R + \Delta\Theta_R}{2} \\ &\quad \cdot \sin \left[\omega c t - \frac{(2n+1)\Delta\theta_R + \Delta\Theta_R}{2} - n\theta_R \right] \\ &\quad + B' \sin \frac{\Delta\theta_B + \Delta\Theta_B}{2} \\ &\quad \cdot \cos \left[\omega c t - \frac{(2n+1)\Delta\theta_B + \Delta\Theta_B}{2} - n\theta_B \right] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} C_B'(t-nh) &= R' \sin \frac{\Delta\theta_R + \Delta\Theta_R}{2} \\ &\quad \cdot \cos \left[\omega c t - \frac{(2n+1)\Delta\theta_R + \Delta\Theta_R}{2} - n\theta_R \right] \\ &\quad + B' \cos \frac{\Delta\theta_B + \Delta\Theta_B}{2} \\ &\quad \cdot \sin \left[\omega c t - \frac{(2n+1)\Delta\theta_B + \Delta\Theta_B}{2} - n\theta_B \right] \end{aligned} \quad (27)$$

検波して得られる $C_R'(t-nh)$ の包絡線を $|C_R'(t-nh)|$ とし, (14)~(15)式または(13)~(15)式で得られる,

$$\begin{aligned} \theta_R - \theta_B &= \{2(k-i)-1\}\pi \\ &= \{2(j-l)+1\}\pi \end{aligned} \quad (28)$$

を用いてこれを整理すると付録(2)より次式を得る.

$$\begin{aligned} |C_R'(t-nh)|^2 &= \left(R' \cos \frac{\Delta\theta_R + \Delta\Theta_R}{2} \right)^2 \\ &\quad + \left(B' \sin \frac{\Delta\theta_B + \Delta\Theta_B}{2} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2R'B'(-1)^n \cos \frac{\Delta\theta_R + \Delta\theta_R}{2} \\
& \cdot \sin \frac{\Delta\theta_B + \Delta\theta_R}{2} \sin \frac{(2n+1)(\Delta\theta_B - \Delta\theta_R)}{2}
\end{aligned} \quad (29)$$

同様に $C_B'(t-nh)$ の包絡線 $|C_B'(t-nh)|$ に対して、

$$\begin{aligned}
|C_B'(t-nh)|^2 = & \left(B' \cos \frac{\Delta\theta_B + \Delta\theta_B}{2} \right)^2 \\
& + \left(R' \sin \frac{\Delta\theta_R + \Delta\theta_B}{2} \right)^2 \\
& + 2B'R'(-1)^n \cos \frac{\Delta\theta_B + \Delta\theta_B}{2} \\
& \cdot \sin \frac{\Delta\theta_R + \Delta\theta_B}{2} \sin \frac{(2n+1)(\Delta\theta_R - \Delta\theta_B)}{2}
\end{aligned} \quad (30)$$

を得る。(29)式または(30)式において、第1項は信号成分、第2項はクロストーク成分、第3項は両者の積の成分を表わしている。 $\Delta\theta_R$, $\Delta\theta_B$, $\Delta\theta_R$, $\Delta\theta_B$ がすべて0であれば、もちろん第2項、第3項成分は消滅し、第1項は本来の値である R' または B' となる。また、

$$\Delta\theta_R - \Delta\theta_B = 0 \quad (31)$$

または

$$\Delta\theta_B + \Delta\theta_R = 0 \quad (32)$$

$$\Delta\theta_R + \Delta\theta_B = 0 \quad (33)$$

なる条件があっても第2項、第3項成分は消滅する。

一方、その他の場合は、

$$|\Delta\theta_R - \Delta\theta_B| \ll \pi \quad (34)$$

と考えられるから、第3項の極性は n が1ずつ変化すると共に (すなわち1走査線おきに) 反転するといえ、

$$\begin{aligned}
|C_R'(t-nh)| & \simeq |C_R'[t-(n+2)h]| \\
& \simeq |C_R'[t-(n+1)h]|
\end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
|C_B'(t-nh)| & \simeq |C_B'[t-(n+2)h]| \\
& \simeq |C_B'[t-(n+1)h]|
\end{aligned} \quad (36)$$

となる。すなわち、被写体の赤・青成分として復調される $|C_R'(t-nh)|$, $|C_B'(t-nh)|$ は走査線1本おきにはほぼ同一振幅となる。なお、(1)式の第1項である緑成分の振幅は n には無関係であるから、以上の現象は走査線1本おきに色ビートが発生することに他ならない。

2搬送波方式におけるビートの発生は3章で述べた輝度ビートのみであるが、1搬送波方式においては輝度ビートの他に色ビートも発生することが特徴である。

この色ビートの発生を防ぐには、

- ① θ_R , θ_B , θ_R , θ_B の誤差をなくす。
- ② 誤差に (31), または (32), (33) 式の関係を持たせる。
- ③ 色ビートが走査線1本おきの構造であることを利

用し除去する。

などが考えられる。なお②, ③の方法で色ビートをなくしても、一般には $\Delta\theta_R$, $\Delta\theta_B$, $\Delta\theta_R$, $\Delta\theta_B$ は画面内で一定ではなく、(29), (30)式の第1項の振幅が画面内で変化し色むらの原因となる。したがって、できるだけ①の方法を実現することが望ましく、4章のはじめに述べた θ_R , θ_B , θ_R , θ_B の誤差の発生箇所の精度を向上させる必要がある。

なお、走査線1本おきの構造の色ビートが発生しやすいというカメラ試作結果は、先に報告例⁹⁾もあるが、ここにその理論的根拠と対策が示された。

5. む す び

同一周波数の搬送波を被写体の赤・青成分で変調し、緑成分と周波数分割多重化して単一撮像管よりとり出すカラーカメラの信号を解析した。まず、赤・青成分を分離するのに必要なストライプフィルターの構成および分離回路の定数を定める一般式を求め、従来知られている値がその解の一例であることを示した。次に、ストライプフィルターの分光特性などに起因し、2搬送波方式と同様に輝度ビートが発生するが、その構造は走査線と平行になることを示した。最後に、1搬送波方式固有の問題として、カメラの諸定数に誤差があると走査線1本おきの構造の色ビートが発生することを示した。

以上述べたように、1搬送波方式の信号の性質が明らかになったので、これらの結果を考慮し、1搬送波方式の特長を生かした単管カラーカメラが実現できると思われる。

(昭和48年11月18日受付 昭和49年2月4日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 長原, 小林ほか: 周波数多重化単管カラーカメラの開発, テレビ誌, **26**, 2 (1972) 104-110
- 2) 江藤, 日比: 高解像度単管カラーカメラ, テレビ誌, **26**, 5 (1972) 381-387
- 3) 特公昭 45-8699
- 4) Electronics, Oct. 23 (1972) 8E-1 2E
- 5) 杉本: カラーテレビジョンカメラの現状と将来, テレビ誌, **27**, 8 (1973) 586-595
- 6) 吹抜: 単管カラーカメラ, カラー画像記録のための2次元カラー多重化の一方式, テレビ全大, 4-4 (1971)
- 7) 特開昭 46-759
- 8) US PAT. 3647943
- 9) D. Pritchard: Stripe-Color-Encoded Single-Tube Color-Television Camera Systems, RCA Rev., **34**, June (1972) 217-266
- 10) 特開昭 46-1208
- 11) 特開昭 46-1207

〈付 録〉

(1) (26)式の算出

$$\begin{aligned}
 C_R'(t-nh) &= R' \cos \frac{\theta_R' + \Theta_R'}{2} \\
 &\quad \cdot \sin \left[\omega ct - \frac{(2n+1)\theta_R' + \Theta_R'}{2} \right] \\
 &\quad + B' \cos \frac{\theta_B' + \Delta\theta_R'}{2} \\
 &\quad \cdot \sin \left[\omega ct - \frac{(2n+1)\theta_B' + \Theta_R'}{2} \right] \\
 &= R' \cos \left[\frac{\Delta\theta_R + \Delta\theta_R}{2} + k\pi \right] \\
 &\quad \cdot \sin \left[\omega ct - \frac{(2n+1)\Delta\theta_R + \Delta\theta_R}{2} - k\pi - n\theta_R \right] \\
 &\quad + B' \cos \left[\frac{\Delta\theta_B + \Delta\theta_R}{2} + i\pi + \frac{\pi}{2} \right] \\
 &\quad \cdot \sin \left[\omega ct - \frac{(2n+1)\Delta\theta_B + \Delta\theta_R}{2} - i\pi - \frac{\pi}{2} - n\theta_B \right]
 \end{aligned}$$

となり, これは(26)式に変形できる.

(2) (29)式の算出

$$\begin{aligned}
 R' \cos \frac{\Delta\theta_R + \Delta\theta_R}{2} &= X \\
 B' \sin \frac{\Delta\theta_B + \Delta\theta_R}{2} &= Y
 \end{aligned}$$

$$\frac{(2n+1)\Delta\theta_R + \Delta\theta_R}{2} + n\theta_R = x$$

$$\frac{(2n+1)\Delta\theta_B + \Delta\theta_R}{2} + n\theta_B = y$$

とおくと(26)式は,

$$\begin{aligned}
 C_R'(t-nh) &= X \sin(\omega ct - x) + Y \cos(\omega ct - y) \\
 &= (X \cos x + Y \sin y) \sin \omega ct - (X \sin x \\
 &\quad - Y \cos y) \cos \omega ct
 \end{aligned}$$

したがって,

$$\begin{aligned}
 |C_R'(t-nh)|^2 &= (X \cos x + Y \sin y)^2 + (X \sin x - \\
 &\quad Y \cos y)^2 \\
 &= X^2 + Y^2 + 2XY \sin(y-x)
 \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 \sin(y-x) &= \sin \left[\frac{(2n+1)(\Delta\theta_B - \Delta\theta_R)}{2} + n(\theta_B - \theta_R) \right] \\
 &= \sin \left[\frac{(2n+1)(\Delta\theta_B - \Delta\theta_R)}{2} \right. \\
 &\quad \left. + 2n(k-i)\pi - n\pi \right] \\
 &= (-1)^n \sin \frac{(2n+1)(\Delta\theta_B - \Delta\theta_R)}{2}
 \end{aligned}$$

であり, $|C_R'(t-nh)|^2$ は(29)式に一致する.