カラービデオカメラのガンマ補正の色再現への影響について

正会員 阿部 昌人[†], 正会員 池田 宏明^{††}

1. ま え が き

カラービデオカメラを含めカラーテレビシステムの最終受容器は人間の目であるから、カラービデオカメラの色再現性評価をカラーテレビを含めた主観評価によって行うことの重要性は、いうまでもない。しかし、カラービデオカメラは、単体として色彩センサ的な使用法¹⁾と考えられるので、カラービデオカメラ単体が測色学的に正確に設計され調整されているかを、客観的数値として把握することは重要であるといえる。

国際電気標準会議 (IEC/TC 84) において、放送用を除く単板式カラービデオカメラ (以下、カラービデオカメラと略す) の性能の標準測定法の国際規格が審議され²⁾、制定された³⁾。輝度信号チャンネルのガンマ特性の測定法では、グレイスケールチャートを撮像し、出力された電気信号の各ステップの理論値からのずれをガンマ誤差とし評価を行う。評価の基準となるガンマ特性の理論値は、CRT のコントラスト比と非線形特性を考慮した発光特性の逆特性を近似したものである。

一方、色再現性の評価においては、CRT 発光特性およびガンマ補正回路特性は、単純なべき乗の関数として仮定されている^{2)~5)}。

そこで、本稿では実際のカラービデオカメラの色再現性の評価にあたり上記のガンマ補正回路特性、CRT 発光特性を適用した場合に発生する色再現誤差を色差で示すことにより、ガンマ補正回路の特性が色再現に与える影響をシミュレーションによって定量的

図 1 CRT 発光特性
Optical characteristics of CRT display

に述べる。また、最適に色再現性を評価する方法を提案する。

2. CRT 発光特性とガンマ補正回路特性

CRT 発光特性は非線形性を有し、その特性は一般にガンマ特性と呼ばれるべき乗の特性で理想化される⁶⁾。すなわち

$$L = E_0^\gamma \quad (1)$$

ここで、 E_0 正規化入力レベル、 L 正規化発光レベル、 γ ガンマ係数

である。しかし、実使用環境での CRT はコントラスト比を考慮しなければならず、最大正規化発光レベルを 1 とすれば、最低発光出力は零にはならない。したがって、実際の発光出力 L_1 は

$$L_1 = L_k + (1 - L_k)E_0^\gamma \quad (2)$$

ただし、 L_k 最低発光出力

である

図 1 に理想特性 (1) 式とともに $L_k = 1/40$ の場合の CRT 発光特性 (2) 式を示す。CRT 発光特性が理想特性と仮定できる場合は、カラービデオカメラのガンマ

[†] 千葉大学 教育学部 技術科

^{††} 千葉大学 工学部 電気電子工学科

“Effects of Gamma Corrections to Color Reproduction of Color Video Cameras” by Masato Abe (Faculty of Education, Chiba University, Chiba) and Hiroaki Ikeda (Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba)

補正回路の特性は

$$E_0 = E_i^{1/\gamma} \quad (3)$$

ただし、 E_i 正規化入力レベル、 E_0 正規化出力レベル。

でよいが、(2)式の CRT 特性を仮定したグレイスケールチャートを用いてカラービデオカメラのガンマ補正回路特性を調整した場合には、CRT の非線形性を補償するために、逆特性として

$$E_{01} = \left(\frac{E_i - E_k}{1 - E_k} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (4)$$

E_k : CRT コントラスト比の制限による限界黒レベル

としなければならない。

しかし、(4)式に示した出力は負になる場合があり、カラービデオカメラの出力範囲外である。したがって、ガンマ補正回路で負になる信号は、すべて零に圧縮するとすれば

図2 ガンマ補正回路特性
Characteristics of gamma correction circuit.

図3 総合階調特性
Composite tone characteristics of color television system.

$$E_{02} = \begin{cases} \left(\frac{E_i - E_k}{1 - E_k} \right)^{\frac{1}{\gamma}} & E_i > E_k \\ 0 & E_i \leq E_k \end{cases} \quad (5)$$

となる。

しかし、ガンマ補正回路特性の調整のためのグレイスケールチャートで用いられている特性は、(4)式を

$$E_{03} = \frac{E_i^{1/\gamma} - E_k^{1/\gamma}}{1 - E_k^{1/\gamma}} \quad (6)$$

と近似している⁴⁾。

さらに、(4)式と同様に(6)式の補正回路の負出力は、すべて零に圧縮される。

これは、(6)式を

$$E_{04} = \begin{cases} \frac{E_i^{1/\gamma} - E_k^{1/\gamma}}{1 - E_k^{1/\gamma}} & E_i > E_k \\ 0 & E_i \leq E_k \end{cases} \quad (7)$$

とすることと等価である。図2に $E_k=0$ と $E_k=1/40$ の場合のガンマ補正回路の特性を示す。また(5)式および(7)式のガンマ補正回路特性をもつカラービデオカメラ、(1)式および(2)式の特性を持つ CRT からなる系の総合階調特性を図3に示す。

以上示したように、実際の CRT 発光特性は(2)式でモデル化するのが適当であると考えられ、ガンマ補正回路の特性は(5)式になるように調整されるべきであるが、実際のグレイスケールチャートの特性は(6)式であり、このグレイスケールチャートを用いて調整が行われている。一方、カラービデオカメラの色再現性の評価にあたっては(3)式が仮定されており³⁾⁴⁾、混乱がある。以下では色再現性の評価方法を

評価法(1) ガンマ補正回路特性(7)式、CRT 発光特性(1)式を評価式として用いる。

評価法(2) ガンマ補正回路特性(7)式、CRT 発光特性(2)式を評価式として用いる。

評価法(3) ガンマ補正回路特性(5)式、CRT 発光特性(2)式を評価式として用いる。

として各評価法時の色再現評価誤差を検討する。

3. 色再現性の評価

3.1 評価の対象となるカラービデオカメラ

今、NTSC の定めた蛍光体の色度座標から決定される理想的な撮像特性を持ち、かつ線形な光電変換特性を持つ撮像デバイスに、(7)式または(5)式の特性で表されるガンマ補正を施したカラービデオカメラを考える。標準の光源 C で被写体を照明し、これを撮像したとき撮像デバイスの正規化電気信号出力は、被写体の三刺激値 XYZ と NTS の RGB との関係を表す線形変換行列⁷⁾を用いることにより得られる。これ

を E_{ri}, E_{gi}, E_{bi} とし、ガンマ補正回路によって補正された電気信号出力を E_{ro}, E_{go}, E_{bo} とする。

3.2 評価法(1)

(7)式で表されるガンマ補正が施されているカラービデオカメラに評価法(1)を適用する。

この評価系に対し、テレビジョン学会の ITE カラーチャート⁴⁾中の NTSC の色再現範囲内の 8 色について、各色の色度を変化させず輝度 Y を再現範囲内

で、10 IRE～90 IRE まで 17 段階に変化させた場合の被写体色と再現色の輝度と色度 u', v' の誤差を表 1 に示す。

階調特性が、図 3 で示したように非線形であるため、輝度のみならず色度方向にも誤差を生じていることがわかる。さらに、三刺激値 X, Y, Z を CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 均等色空間上に変換し、色差を表した結果を図 4 に示す。図 4 の◇印の中心は被写体色の

表 1 評価法(1)による輝度誤差 ΔY および色度誤差 $\Delta u'v'$
Luminance error ΔY and chrominance error $\Delta u'v'$ caused by estimation(1).

輝度	Rt 3		Rt 4		Rt 5		Rt 9	
	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差
10	6.63720	0.00567	6.27289	0.05505	6.12533	0.02655	6.84809	0.07027
15	7.85940	0.00420	7.44910	0.04747	7.18987	0.02183	8.22108	0.05019
20	8.52614	0.00354	8.09057	0.04209	7.75829	0.01967	9.02003	0.04045
25	8.82614	0.00316	8.37100	0.03801	7.98119	0.01812	9.43901	0.03458
30	8.85985	0.00291	8.38797	0.03485	7.94706	0.01688	9.58166	0.03059
35	8.68840	0.00274	8.20146	0.03233	7.71383	0.01586	9.51125	0.02767
40	8.35238	0.00261	7.85147	0.03028	7.32039	0.01500	9.26981	0.02542
45	7.88039	0.00251	7.36625	0.02857	6.79435	0.01427	8.88700	0.02363
50	7.29352	0.00244	6.76668	0.02711	6.15610	0.01364	8.38470	0.02216
55	6.60784	0.00237	6.06869	0.02586	5.42125	0.01308	7.77959	0.02092
60	5.83596	0.00232	5.28480	0.02477	4.60206	0.01259	7.08476	0.01987
65	4.98796	0.00228	4.42502	0.02380	3.70835	0.01215	6.31071	0.01896
70	4.07211	0.00224			2.74816	0.01176		
75	3.09523	0.00221						
80	2.06307	0.00218						
85	0.98053	0.00216						
90								
95								

輝度	Rt 10		Rt 11		Rt 12		Wh	
	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差
10	6.58457	0.02932	6.40692	0.05188	6.24226	0.05820	7.03979	0.00393
15	7.78994	0.02122	7.59052	0.04090	7.41863	0.04762	8.46901	0.00275
20	8.44186	0.01726	8.23443	0.03490	8.05476	0.04084	9.31564	0.00220
25	8.72831	0.01486	8.52151	0.03109	8.33016	0.03618	9.77694	0.00187
30	8.74935	0.01321	8.54918	0.02842	8.34247	0.03276	9.95814	0.00165
35	8.56592	0.01200	8.37451	0.02638	8.15163	0.03014	9.92340	0.00149
40	8.21846	0.01107	8.03605	0.02474	7.79757	0.02804	9.71536	0.00137
45	7.73548	0.01032	7.56194	0.02337	7.30851	0.02633	9.36409	0.00127
50	7.13798	0.00971	6.97306	0.02221	6.70529	0.02489	8.89176	0.00119
55	6.44199	0.00919	6.28538	0.02121	6.00381	0.02366	8.31527	0.00113
60	5.66007	0.00875	5.51142	0.02034	5.21656	0.02260	7.64791	0.00107
65	4.80228	0.00837	4.66126	0.01957	4.35356	0.02166	6.90029	0.00102
70	3.87685	0.00803	3.74311	0.01888			6.08111	0.00098
75	2.89059	0.00774					5.19757	0.00094
80							4.25572	0.00090
85							3.26071	0.00087
90							2.21697	0.00085
95							1.12833	0.00082

座標を示し、そこから伸びる線分の先端が評価式によって得られた色の座標を示している。評価法(1)の場合、色差 ΔE_{ab}^* の最大は 26.14、平均で 13.04 である。なお、この条件による評価法は、現在標準法として行われているものである^{2)~5)}。

3.3 評価法(2)

評価法(1)と同様のカラービデオカメラに評価法(2)を適用する。

評価法(1)と同様のサンプル色について、被写体色と再現色の輝度 Y と色度 u', v' の誤差を表 2 に示す。また被写体色と再現色の色差を表した結果を図 5 に示す。階調特性が図 3 で示したように評価法(1)と同様に非線形であるため、多少の改善は見られるものの、輝度および色度方向の誤差は依然として大きい。評価法(2)の場合、色差 ΔE_{ab}^* の最大は 30.12、平均で 11.48 である。

表 2 評価法(2)による輝度誤差 ΔY および色度誤差 $\Delta u'v'$
Luminance error ΔY and chrominance error $\Delta u'v'$ caused by estimation(2).

輝度	Rt 3		Rt 4		Rt 5		Rt 9	
	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差
10	4.22127	0.04608	3.86606	0.02702	3.72220	0.02696	4.42688	0.00844
15	5.53792	0.02851	5.13787	0.01069	4.88513	0.01291	5.89055	0.01682
20	6.31298	0.01957	5.88831	0.01225	5.56433	0.00800	6.79453	0.01924
25	6.73049	0.01442	6.28673	0.01513	5.90666	0.00720	7.32803	0.01959
30	6.88835	0.01115	6.42827	0.01675	5.99839	0.00750	7.59212	0.01924
35	6.84619	0.00892	6.37142	0.01754	5.89598	0.00787	7.64847	0.01866
40	6.64357	0.00732	6.15518	0.01788	5.63738	0.00814	7.53806	0.01802
45	6.30838	0.00612	5.80709	0.01795	5.24949	0.00829	7.28983	0.01738
50	5.86118	0.00519	5.34751	0.01787	4.75220	0.00836	6.92508	0.01678
55	5.31765	0.00446	4.79198	0.01769	4.16072	0.00838	6.46010	0.01622
60	4.69006	0.00387	4.15268	0.01747	3.48701	0.00836	5.90764	0.01571
65	3.98826	0.00338	3.43940	0.01722	2.74064	0.00831	5.27794	0.01523
70	3.22030	0.00298			1.92946	0.00825		
75	2.39285	0.00264						
80	1.51150	0.00235						
85	0.58102	0.00210						
90								
95								

輝度	Rt 10		Rt 11		Rt 12		Wh	
	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差
10	4.16995	0.04641	3.99675	0.03629	3.83621	0.01764	4.61380	0.00047
15	5.47019	0.02968	5.27576	0.02105	5.10816	0.01121	6.13229	0.00098
20	6.23081	0.02149	6.02857	0.01645	5.85339	0.01500	7.08275	0.00109
25	6.63510	0.01692	6.43348	0.01522	6.24690	0.01702	7.65752	0.00109
30	6.78062	0.01408	6.58545	0.01492	6.38391	0.01784	7.95919	0.00107
35	6.72677	0.01218	6.54015	0.01485	6.32284	0.01806	8.05032	0.00103
40	6.51300	0.01083	6.33515	0.01477	6.10263	0.01798	7.97248	0.00099
45	6.16709	0.00983	5.99789	0.01466	5.75080	0.01774	7.75499	0.00095
50	5.70953	0.00905	5.54874	0.01451	5.28766	0.01744	7.41946	0.00092
55	5.15594	0.00844	5.00324	0.01433	4.72871	0.01710	6.98239	0.00088
60	4.51857	0.00793	4.37363	0.01414	4.08615	0.01675	6.45671	0.00085
65	3.80722	0.00751	3.66973	0.01393	3.36972	0.01640	5.85279	0.00083
70	3.02993	0.00716	2.89953	0.01372			5.17908	0.00080
75	2.19332	0.00685					4.44263	0.00078
80							3.64932	0.00076
85							2.80419	0.00074
90							1.91154	0.00072
95							0.97512	0.00070

図 4 評価法(1)による色差
Color difference caused by esitmaton(1).

図 5 評価法(2)による色差
Color difference caused by estimation(2).

表 3 評価法(3)による輝度誤差 ΔY および色度誤差 $\Delta u'v'$
Luminance error ΔY and chrominance error $\Delta u'v'$ caused by estimation(3).

輝度	Rt 3		Rt 4		Rt 5		Rt 9	
	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差
10	0.26887	0.02613	0.08558	0.00828	0.32003	0.01013	0.00000	0.00000
15	0.26028	0.01730	0.00000	0.00000	0.10649	0.00230	0.00000	0.00000
20	0.25168	0.01271	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
25	0.24309	0.00990	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
30	0.23449	0.00800	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
35	0.22589	0.00663	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
40	0.21730	0.00560	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
45	0.20870	0.00479	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
50	0.20011	0.00414	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
55	0.19151	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
60	0.18291	0.00316	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
65	0.17432	0.00279	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
70	0.16572	0.00246			0.00000	0.00000		
75	0.15713	0.00218						
80	0.14853	0.00193						
85	0.13993	0.00171						
90								
95								

輝度	Rt 10		Rt 11		Rt 12		Wh	
	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差	輝度誤差	色度誤差
10	0.27334	0.02670	0.18553	0.01810	0.00434	0.00015	0.00000	0.00000
15	0.26697	0.01784	0.13525	0.00903	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
20	0.26061	0.01323	0.08498	0.00431	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
25	0.25424	0.01041	0.03471	0.00142	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
30	0.24788	0.00850	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
35	0.24152	0.00713	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
40	0.23515	0.00609	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
45	0.22879	0.00528	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
50	0.22242	0.00463	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
55	0.21606	0.00409	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
60	0.20969	0.00364	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
65	0.20333	0.00327	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
70	0.19697	0.00294	0.00000	0.00000			0.00000	0.00000
75	0.19060	0.00266					0.00000	0.00000
80							0.00000	0.00000
85							0.00000	0.00000
90							0.00000	0.00000
95							0.00000	0.00000

図 6 評価法(3)による色差
Color difference caused by estimation(3).

3.4 評価法(3)

対象となるカラービデオカメラは、(5)式で表されるガンマ補正が施されているとする。このカラービデオカメラに評価法(3)を適用する。

評価法(1)と同様のサンプル色について、被写体色と再現色の輝度 Y と色度 u', v' の誤差を表3に示す。また、被写体色と再現色の色差を表した結果を図6に示す。階調特性の線形性が保たれているため、輝度方向、色度方向ともに色再現誤差は少ない。色差 ΔE_{uv}^* は、最大で12.6、平均1.7程度である。

4. む す び

現在のカラービデオカメラの色再現性標準評価法は、グレースケールチャートの特性が、CRT コントラスト比を考慮した特性になっているにも関わらず、CRT 発光特性の評価式を単純なべき乗の関数と仮定しているため、色再現性評価を誤認する可能性がある。標準評価法によれば、正確にグレースケールチャートによって調整されたカラービデオカメラでも、最大で26.14、平均で13.04の色差 ΔE_{uv}^* があると誤認する。さらに、現行のグレースケールチャートの反射率特性は、コントラスト比1/40の場合のCRT 発光特性の厳密な逆特性となっておらず、その近似特性が用いられている。そのため、CRT 発光特性の評価式に厳密な式を用いても、依然として大きな色差が生まれる。この場合、色差 ΔE_{uv}^* は、最大で30.12、平均で11.48である。そこで、グレースケールチャートを厳密にCRT 発光特性の逆特性とし、これによってカラービデオカメラを調整し、評価式にも厳密なCRT

発光特性を用いれば、負入力に対するCRTの色圧縮があるものの、色差 ΔE_{uv}^* は、最大で12.6、平均1.7程度となる。

以上まとめれば、評価時に適切なCRT発光特性式を用い、グレースケールチャートにはそれに対応した逆特性を持ったものを用いることが、適切な色再現の実現およびその評価には不可欠であるといえよう。さらに、これらの式を用いた場合でも、CRTの負入力に対する非発光による色圧縮によって色差が存在することに留意する必要がある。

なお、まえがきにも述べたように、色再現性主観評価の重要性は論を持たない。今後の発展としては、数値的な把握をしたうえでの、主観的ガンマ補正特性の決定であろう。

(1993年5月28日受付、1993年7月26日再受付)

【参 考 文 献】

- 1) M. Abe, H. Ikeda, Y. Higaki, M. Nakamichi: "A Method to Estimate Correlated Color Temperature of Illuminant using Color Video Camera", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 40, 1, pp. 28-33 (Feb. 1991)
- 2) 北野: "民生用ビデオカメラの評価技術", テレビ誌, 46, 2, pp. 150-156 (1992)
- 3) IEC Standard 1146, "Method of Measurement for Non-Broadcast Video Cameras (PAL-SECAM-NTSC)", Part 1: Single Sensor Cameras, International Electrotechnical Commission, Geneva (in print)
- 4) テレビジョン学会編: "テレビジョンシステム評価用チャート解説書", pp. 21-24, テレビジョン学会 (1982)
- 5) テレビジョン学会編: "テレビジョン画像の評価技術", pp. 162-166, コロナ社 (1986)
- 6) CCIR Report 407-1, "Characteristics of Colour Television Systems", XIIth Plenary Assembly Vol. V, Part 2 (1970)
- 7) 池田: "カラーテレビジョン方式の測色パラメータについて", テレビ誌, 43, 6, pp. 620-622 (June 1989)

あべ まさと
阿部 昌人 昭和61年、千葉大学大学院修士課程修了。平成4年、千葉大学大学院自然科学研究科修了。平成5年、千葉大学教育学部講師となり、現在に至る。博士(学術)。正会員。

いけだ ひろあき
池田 宏明 昭和63年、千葉大学大学院修士課程修了。同年、千葉大学工学部助手。平成3年、同教授。電子システム講座で計算工学分野を担当し、自動計測、計算機色彩論に興味を持っている。日本工業標準調査会専門委員を兼職。工学博士。正会員。