

동시지각 색 샘플링에 기반한 CIEL*a*b*-CMY로의 비선형 색변환

류승민, 오현수, *이철희, **유미옥, ***최환언, 안석출

부경대학교 화상정보공학부

*경북대학교 전자전기공학부

**해양대학교 제어계측공학과

***동부산대학 전자계산학과

(2000년 1월 20일 접수, 2000년 2월 20일 최종수정본 받음)

CIEL*a*b*-CMY nonlinear color transformation based on equi-visual perception color sampling

S. M. RYOU, H. S. OH, C. H. LEE, M. O. YOO**, H. E. CHOI***, S. C. AHN*

Division of Image & Information, Pukyong National University

*School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

**Department of Control & Instrumentation, Korea Maritime University

***Department of Computer Science, Dong-Pusan College

(Received 20, Jan. 2000, in final form 20, Feb. 2000)

Abstract

The color space transformation to link device-dependent color spaces and device-independent color spaces is essential for device characterization and cross-media color reproduction. There are various color conversion methods such as regression, 3D interpolation with LUT(look-up table), and neural network. In the color transformation with these methods, the conversion accuracy is essentially based on the sample data to be exploited for device characterization. In conventional method, color samples are uniformly selected in device-dependent space such as CMY and RGB. However, distribution of these color samples is very non-uniform in device-independent color space such as CIEL*a*b*. Accordingly, the conversion error in device-independent color space is irregular according

to the distribution of the samples.

In this paper, a color sampling method based on equi-visual perception is proposed to obtain approximate uniform color samples in CIEL*a*b* space. In order to evaluate transformation accuracy of proposed method, color space transformations are simulated using regression, 3D interpolation with LUT and neural network techniques, respectively.

1. 서 론

장치독립적인 CIEL*a*b*를 CMY의 3색 잉크로 종이에 재현할 때, 종이의 특성과 잉크의 특성 그리고 잉크간의 정합등의 요인으로 색 왜곡이 발생하게 된다. 이러한 색 왜곡을 줄이기 위해서는 색 보정이 필요하다. 색 보정 방법에는 회귀모델을 이용한 방법^[1], Look Up Table(LUT)을 이용한 보간법^[2], 신경망을 이용한 방법^[3] 등이 있다. 회귀모델을 이용한 방법은 입출력 장치에서의 색 변환을 하나의 선형 변환 행렬로 모델링하는 방법으로 모델링이 간단하지만 색 왜곡이 많은 단점이 있다. LUT를 이용한 보간법은 출력하고자 하는 색공간의 좌표값과 해당하는 출력신호의 쌍을 제작해 두고 입력되는 색 신호값에 대응하는 장치신호(CMY)값을 보간하여 출력하며, 신경망을 이용한 방법은 입력값과 출력값과의 관계를 신경망을 이용하여 비선형 색변환을 하게 된다. 색변환시 입력공간이 되는 CIEL*a*b*공간에서 색좌표의 분포는 색변환의 정확성을 좌우한다. 기존의 방법을 보게 되면 균등간격으로 칼라를 샘플링하게 된다. 이렇게 되면 프린터의 특성상 어두운 영역으로 많이 치우치게 되며, 이것은 색변환시 상대적으로 밝은 부분이라든지 뭉쳐있는 부분에서는 상당한 오차를 발생시키게 된다. 이러한 오차를 줄이기 위해 사람의 시각특성에 기반해서 색샘플을 선정하고, 이를 신경망 색변환에 이용한 측색적 색재현 방법이 보고된 바 있다^{[4][7]}.

본 논문에서 톤 재현범위를 확대시키는데 있어서 시 지각이 민감한 부분은 샘플링을 많이 하고 둔감한 부분은 샘플링을 적게 하는 등 시지각 색 샘플링을 기반한 CIEL*a*b*-CMY 비선형 색변환을 제안하고 이를 3가지 색변환 방법에 적용시켜 제안한 방법의 타당성과 유용성을 확인하였다.

2. 등시지각에 기반한 색 샘플링

이상적인 프린터 출력 기법은 출력망점이 정사각형이고 중첩이 없다는 것을 가정하고 있으나, 실제 프린터의 도트는 정사각형이라기 보다는 원에 가깝고 모양도 일정하지 않다. 따라서, Fig.1의 (a)와 같이 디지털 입력값 즉, 프린터 구동신호를 균등하게 하더라도 출력되는 것은 Fig.1의 (b)에서처럼 잉크젯프린터의 특성상 도트의 중첩으로 인해서 전체적으로 어두운 색영역으로 치우치게 된다.

2. 1 등시지각 특성

CMY 색공간에서 입력값은 Cyan, Magenta, Yellow 각각 0-255의 8bit로 표현되며 디지털 입력값 255와 0은 각각 0%와 100%의 잉크농도를 가진다고 한다. 각각의 잉크만을 사용해서 256단계의 등간격을 가진 색 샘플을 생성하고 프린터로 출력한 후 CIEL*a*b*값을 측정한다. Fig.2는 측색된 샘플들의 표준백색면, 즉 종이와의 색차를 보여준다.

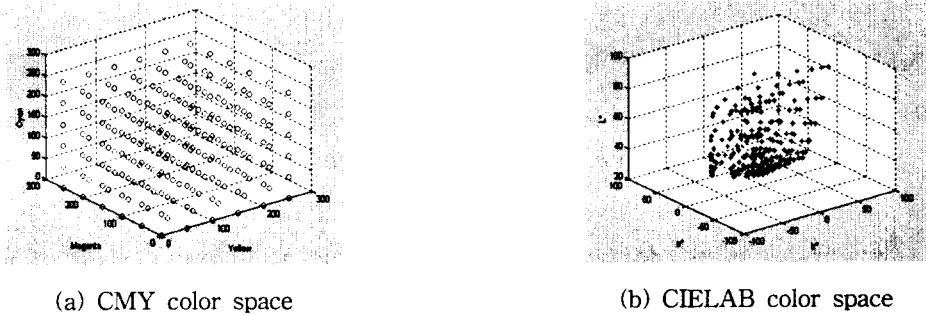


Fig. 1. LUT with uniform sampling points.

CIEL*a*b*공간은 심리물리적으로 균등한 색공간이므로 색차가 같으면, 지각적으로 같은 차이를 가진다. 각각의 잉크에 대해서 256단계의 색 샘플들이 지각적으로 같은 차이가 있으려면 등색차가 되어야 한다.^[4] Fig.2에서 디지털 입력값에 대한 종이와의 색차를 E라고 하면 원하는 등색차 ΔE는 다음과 같다.

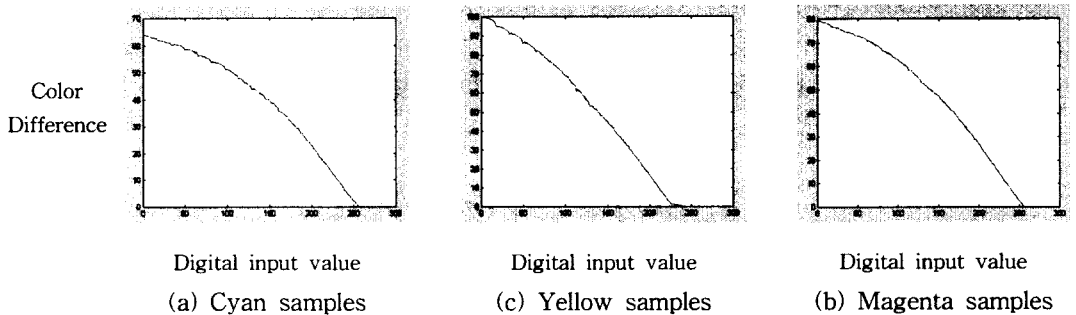


Fig. 2. The relationship between the digital input value and the color difference

$$\Delta E = \frac{E_{max} - E_{min}}{n - 1} \tag{1}$$

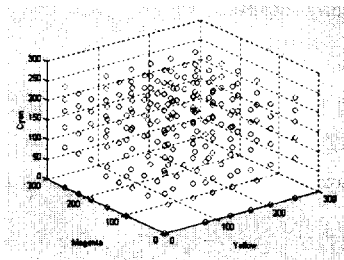
여기서 E_{max} 와 E_{min} 은 각각 최대색차와 최소색차를 나타낸다. 색차를 n단계의 등간격으로 나누는 다음, 그것에 해당되는 디지털 입력값을 구하면 각각의 잉크에 대해서 동일한 색차를 가지게 된다.

$$\begin{aligned} E_n &= \{E_0, E_1, E_2, \dots, E_{n-1}\} \\ &= \{E_0, E_0 + \Delta E, E_1 + 2\Delta E, \dots, E_0 + (n-1)\Delta E\} \end{aligned} \tag{2}$$

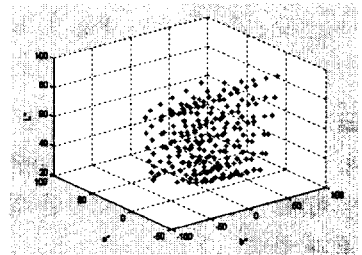
입력 신호값 V_{in} 과 등시지각차 E_n 에 해당하는 신호값을 V_{out} 이라 할 때 프린터 보정함수 $f(V_{in})^{-1}$ 은 다음과 같다.

$$f(V_{in})^{-1} = a_0 + a_1 Vin + \dots + a_{p-1} Vin^{p-1} + a_p Vin^p \tag{3}$$

이러한 등시지각에 기반해서 칼라를 선택한 후 출력해서 측정된 칼라공간을 보게되면 Fig. 3 (a) 처럼 CMY공간은 비균등으로 되지만 출력은 Fig. 3 (b) 처럼 CIEL*a*b*공간은 비교적 균일하게 됨을 알 수 있다.



(a) CMY color space



(b) CIELAB color space

Fig. 3. LUT with non-uniform sampling points.

3. LUT를 이용한 보간

LUT를 이용한 보간 방법에는 육면체 보간과 프리즘 보간, 그리고 사면체 보간 방법 등이 있다. 그 중에서도 사면체 보간법은 다른 보간 방법보다 수행방법이 용이하고 4개의 면이 모두 평평해서 임의의 색이 사면체내에 포함되어 있는지 쉽게 판단이 될 수 있기 때문에, 본 논문에서는 사면체 보간법을 이용해서 색변환을 한다.

3. 1 CIEL*a*b*-CMY 변환

LUT을 이용한 보간법은 패킹(Packing), 탐색(Search), 보간(interpolation)의 3부분으로 구성된다. 패킹은 LUT를 구성하는 것인데 동시지각에 기반한 색 샘플링으로 3D LUT를 구성한다. 탐색은 임의의 색좌표가 들어왔을 때 포함되어있는 사면체를 찾는 것인데, 이러한 사면체를 찾기 위한 방법 중에서 Cowan이 인용한 무계중심적인 보간법^[5]을 이용해서 가중치를 구하고 이 가중치의 성질을 이용해서 보간하고자 하는 색을 포함하는 사면체를 찾는다. 이렇게 사면체가 찾아지면 대응하는 CMY로의 보간을 하게된다.

3. 2 무계중심적 보간(Barycentric interpolation)

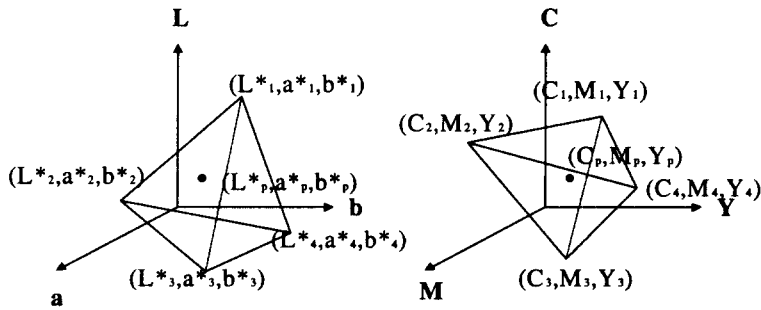


Fig. 4. Corresponding tetrahedrons between CMY and CIELAB spaces.

Fig 4에서 처럼 대응되는 사면체가 있다고 할 때 임의의 입력값(P_0)를 포함한 사면체의 네 꼭지점을 P_1, P_2, P_3, P_4 로 정의하면

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \begin{bmatrix} L^*_1 \\ a^*_1 \\ b^*_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ M_1 \\ Y_1 \end{bmatrix}, & P_2 &= \begin{bmatrix} L^*_2 \\ a^*_2 \\ b^*_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 \\ M_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} \\
 P_3 &= \begin{bmatrix} L^*_3 \\ a^*_3 \\ b^*_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_3 \\ M_3 \\ Y_3 \end{bmatrix}, & P_4 &= \begin{bmatrix} L^*_4 \\ a^*_4 \\ b^*_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_4 \\ M_4 \\ Y_4 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4}$$

CIEL*a*b*공간의 사면체 체적 V_T 와 부사면체 체적 V_1, V_2, V_3, V_4

$$\begin{aligned}
 V_T &= \frac{1}{6} \begin{vmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \\
 V_1 &= \frac{1}{6} \begin{vmatrix} P_0 & P_2 & P_3 & P_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, & V_2 &= \frac{1}{6} \begin{vmatrix} P_1 & P_0 & P_3 & P_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

$$V_3 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} P_1 & P_2 & P_0 & P_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad V_4 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

여기서 W_i 는 각 꼭지점에 대한 가중치로 전체사면체와 부사면체 사이의 비율로 식(6)과 같이 구해지고, 식(7)과 같은 성질을 가진다. 이러한 W_i 의 조건을 가지고 포함 여부를 가리게 된다.

$$W_i = \frac{V_i}{V_T}, \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

$$W_i \geq 0, \quad W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1 \quad (7)$$

대응하는 CMY는
$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^4 W_i C_i \\ \sum_{i=1}^4 W_i M_i \\ \sum_{i=1}^4 W_i Y_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

4. 신경망을 이용한 색변환

보간법의 데이터 저장용량 문제와 처리속도의 개선을 위해 신경망을 이용한 색변환 방법이 연구되었다. 국내에서도 신경망을 이용한 CIEL*a*b*에서 CMYK로의 색변환 시스템 유용성이 확인된 바 있다.^[4]

4. 1 신경망 학습

출력하고자 하는 LAB를 가진 컬러를 재현하기 위해서 측정된 CIEL*a*b*값에서 CMY로의 변환을 신경망학습에 의해서 구한다. Fig.5는 실험에 사용되어진 신경망의 구조를 나타낸다. 이것은 입력층(CIEL*a*b*) 1개, 은닉층 2개, 출력층(CMY) 1개로 구성된 신경망의 구조이다.

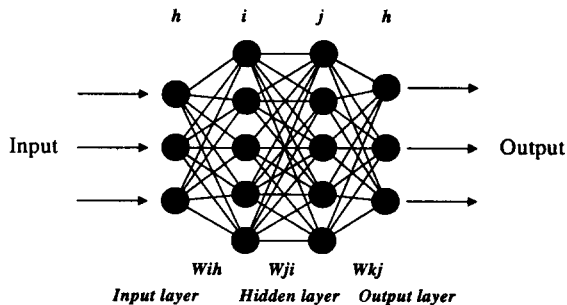


Fig. 5. Structure of a neural network.

그리고 신경망의 가중치를 조절하기 위해 역전파 알고리즘(Back Propagation Algorithm)을 사용 하였다. 가중치 결정은 목표값과 실제출력값 사이의 최소 자승 오차를 계산한 후 오차가 감소하는 방향으로 웨이트를 업데이트 시키면서 학습시키게 된다.

5. 회귀모델에 의한 방법

회귀 모델에 의한 방법은 2개의 색공간에 있어서 신호를 벡터로 정의하고, 중회귀 분석에 의해 변환메트릭스를 만든후 색신호를 변환하는 것이다. 칼라변환을 위해 두 색공간의 색샘플을 이용해서 식 (9)와 같이 20차항의 다항 회귀 함수를 구성한다. 여기서 x, y, z는 측정된 L*a*b* 값이며, CMY 값을 추정하기 위한 식 (9)의 각 항의 계수 a는 측정된 CIEL*a*b* 벡터를 V라하고 이에 대응하는 CMY 벡터를 P라고 하면 식 (10)과 같이 결정된다.

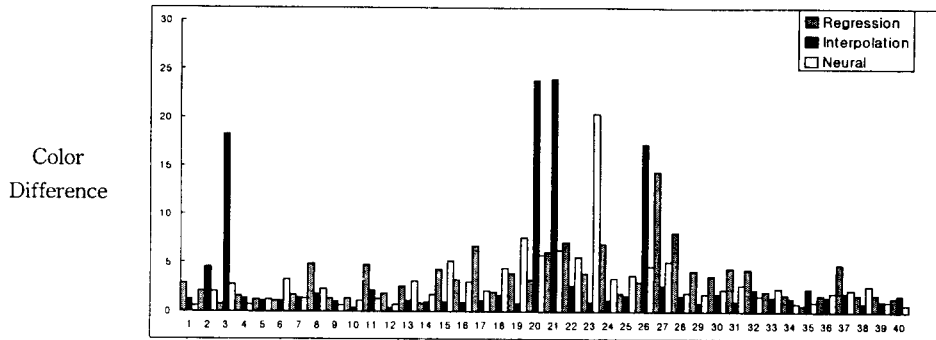
$$P(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6zx + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2 + a_{10}xyz + a_{11}x^3 + a_{12}y^3 + a_{13}z^3 + a_{14}xy^2 + a_{15}x^2y + a_{16}yz^2 + a_{17}y^2z + a_{18}zx^2 + a_{19}z^2x. \quad (9)$$

$$a=(VV')^{-1}(VP) \quad (10)$$

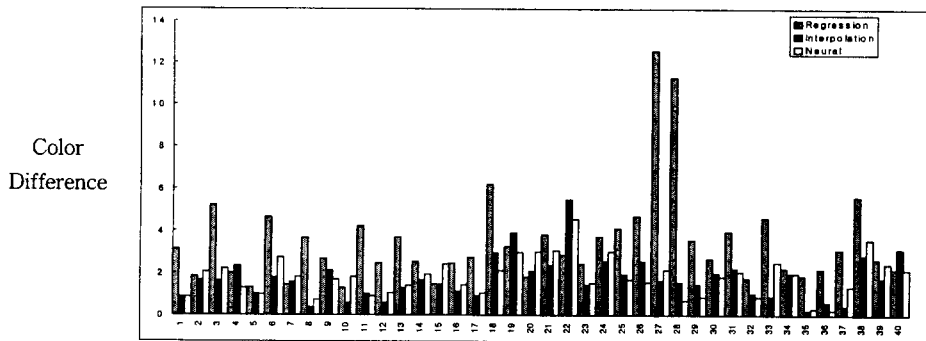
6. 실험 및 고찰

본 논문에서는 CMY 각각의 잉크에 대해서 균등한 색 샘플링과 동시지가에 기반한 색샘플링으로 6단계(6×6×6)로 나눈 216개씩의 샘플을 사용한다. 각 샘플은 블루노이즈 마스크를 사용해서 하프 토닝 한다. 블루노이즈 마스크는 조직적인 패턴이 없고, 시각적으로 보기에 좋은 이미지를 얻을 수 있는 스크린이다.^[6] 하프토닝된 샘플들은 잉크젯 프린터(Epson Stylus photo)로 출력하고 출력된 샘플을 측색기(Techkon SP820)를 이용하여 D65, 2도시야의 조건으로 CIEL*a*b*값을 측정한다. LUT를 이용한 보간과 신경망을 이용한 색변환의 정확성을 평가하기 위해서 LUT과 학습에 참여하지 않은 랜덤한 테스트 패치(41개)를 선정한 후 색변환을 한다.

Fig.6은 실험에 사용된 테스트 패치와 재현된 테스트 패치의 각각의 색차를 나타내고, Table 1은 테스트 패치와 재현된 패치의 평균색차와 최대, 최소 색차를 보여준다.



The number of samples
(a) Uniform sampling



The number of samples
(b) Equi-visual perception sampling

Fig. 6. Color difference of each sample patches

Table 1. The average, minimum and maximum color difference of test color samples

(a) Uniform sampling

	Minimum	Maximum	Average
Regression	0.61	14.43	3.39
3D interpolation	0.35	23.98	3.39
Neural Network	0.54	20.37	3.06

(b) Equi-visual perception

	Minimum	Maximum	Average
Regression	1.26	12.57	3.50
3D interpolation	0.20	5.48	1.72
Neural Network	0.23	4.56	1.82

대부분의 색재현에 있어서 원고와 재현된 색은 다소 차이가 있다. Table 1의 (a)에서 최대 색차는 색을 변환하는데 있어서 모델링에 사용된 색영역의 색좌표가 비균일 함에 의해 생긴 오차이다. 제안된 방법으로 균일한 색영역을 생성한 경우는 Table 1의 (b)에서 처럼 최대 색차 및 평균색차가 많이 감소하였다. 색변환방법에 있어서 회귀방정식을 이용한 경우는 기존의 방법과 제안된 방법은 크게 차이가 없었다. 그러나, 신경망 및 보간법은 제안된 방법으로 생성된 색 영역을 사용할 경우 기존의 방법보다 색차가 많이 감소함을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 잉크젯 프린터의 색재현에 있어 입출력 특성을 측색적으로 모델링하기 위한 색 샘플링에 대한 방법에 대해서 연구하였다. 일반적으로 샘플링의 수가 증가할수록 정확한 출력색을 예측할 수 있으나 샘플링의 수가 너무 크게 되면 처리시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 따라서 동일한 수의 색 샘플링시 장치의 색역을 잘 표현하면서 동시에 색변환시 오차를 감소 시키는 방법을 제안하였고, 3가지 색변환 방법에 적용시킨 결과, CIEL*a*b*색공간에서 색 샘플들의 좌표가 비균등한 기존의 방법보다 비교적 균일한 색영역이 얻어지는 제안된 방법이 동일한 데이터 개수(216개)로써 평균 색차 및 최대 색차를 감소 시켰다.

색공간 변환 성능은 기존의 방법은 3가지 변환방법이 비슷한 결과를 보였고, 제안된 방법으로 생성된 색영역을 사용할 경우는 20항의 회귀방정식보다 신경망, 보간법은 우수한 결과를 보였다.

참고문헌

1. Henry R. Kang, Color Technology for Electronic Imaging Devices, SPIE Optical Engineering Press, 1997.
2. P.C. Hung, "Colormetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolation," Journal of Electronic Imaging, Vol. 2(1),

pp. 53-61, Jan. 1993.

3. S.Tominaga, "A Neural Network Approach to Color Reproduction in Color Printer", IS&T and SID's Color Imaging Conf.:Transforms & Transportability of Color, 173-177(1993)
4. Jong-Pil Kim, Eul-Hwan Lee, Suk-Chul Ahn, "Development of CIELa*b*-CMYK color conversion system by Neural Network," Journal of the Korean Printing Society, Vol. 16, 4.
5. Jon Yngve Hardeberg and Francis Schmitt "Color Printer Characterization Using a Computational Geometry Approach" IS&T Color Management and Communication pp.88-91
6. T. Mitsa and K. J. Parker, Digital halftoning technique using a blue-noise mask, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 9, No. 11, pp. 1920-1929, Nov. 1992.
7. H.Y.PARK, J.P.KIM, E.H.LEE, H.E.CHOI, S.N.LEE, S.C.AHN "Colorimetric Color Reproduction of Ink-jet Printer by FM Screen Based on Visual Characteristic" Journal of IS&T, Vol.4.No.1, pp.30-36, 1998