

論文97-34S-1-11

# 유전 알고리즘을 이용한 색 보정용 색 샘플 결정

## (Selection of Color Samples based on Genetic Algorithm for Color Correction)

李圭憲\*, 金椿宇\*\*

(Kyu-Heon Lee and Choon-Woo Kim)

### 요 약

대부분의 컬러 영상 입출력 장치에서는 각각의 장치가 표현할 수 있는 색 영역의 차이와 구성 요소들의 비선형적 특성 때문에 색의 왜곡이 발생하게 된다. 이와 같은 색의 왜곡을 최소화하기 위해서는 각각의 입출력 장치에 적합한 색 보정을 수행하여야 한다. 색 보정의 첫 번째 단계는 주어진 색 공간 영역의 표현 가능한 모든 색 좌표들의 부분 집합을 취하는 것이다. 흔히 색 보정을 위한 색 샘플이라 불리는 이와 같은 부분 집합으로 주어진 영상 입출력 기기에서의 색 왜곡을 모델링하게 된다. 색 보정의 결과는 적용하는 색 보정 방법뿐만 아니라 선택된 색 샘플에 의하여 결정된다. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 색 샘플을 결정하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서는 제한된 색 측정으로서 주어진 영상 장치의 색 왜곡 특성을 충분히 반영하고 결정된 스트링에 중복된 색 샘플이 포함되지 않도록 스트링의 구조를 설계하였다. 제안한 방법에 의한 색 샘플들의 색 보정 효과를 검증하기 위하여 세 가지 다른 색 보정 방법으로 색 보정 실험을 수행하였다. 실험 결과를 색 좌표 공간을 등간격으로 분할하여 얻어진 색 샘플에 의한 색 보정 실험 결과와 비교 분석하였다.

### Abstract

Most color imaging devices often exhibit color distortions due to the differences in realizable color gamuts and nonlinear characteristics of their components. In order to minimize color differences, it is desirable to apply color correction techniques. The first step of color correction is to select the subset of the color coordinates representing the input color space. The selected subset serves as so called 'color samples' to model the color distortion of a given color imaging device. The effectiveness of color correction is determined by the color samples utilized in the modeling as well as the applied color correction technique. This paper presents a new selection method for color samples based on genetic algorithm. In the proposed method, structure of strings are designed so that the selected color samples fully represent the characteristics of color imaging device and consist of distinct color coordinates. To evaluate the performance of the selected color samples, they are utilized for three different color correction experiments. The experimental results are compared with the corresponding results obtained with the equally spaced color samples.

\* 正會員, LG 電子 멀티미디어 研究所

(Multimedia Research Laboratory, LG Electronics)

\*\*正會員, 仁荷大學校 電氣工學科

(Department of Electrical Engineering, Inha University)

接受日字: 1996年10月31日, 수정완료일: 1997年1月8日

### I. 서 론

프린터, 스캐너, 모니터 등 대부분의 컬러 입출력 장치는 입력과 출력 색 공간 내에서 각각의 장치가 표현할 수 있는 색 영역의 차이와 구성 요소들의 비선형적 특성에 의해 색 왜곡을 나타낸다. 예를 들면 모니터로 표시된 영상과 이를 프린터를 통해 인쇄한 영상간의 색 차이를 색 왜곡으로 정의할 수 있다. 색 보정은 이

러한 색 왜곡을 최소화함으로써 보다 향상된 화질을 얻는 과정들을 의미한다.<sup>[1,2]</sup>

색 보정의 수행을 위해 가장 먼저 색 샘플들을 결정하여야 한다. 칼라 프린터를 위한 색 보정의 경우를 예로 들어 설명하기로 한다. 프린터의 입력 영상은 RGB 좌표계에서 채널당 8비트의 색 좌표값을 갖는다고 가정한다. 즉, 서로 다른  $256 \times 256 \times 256$ 개의 표현 가능한 프린터 입력 색상이 존재하게 된다. 주어진 프린터의 출력 색 좌표값들은 표현 가능한 모든 입력 색상을 프린터로 출력한 후 이를 색 측정 기기로서 측정함으로써 얻을 수 있다.  $256 \times 256 \times 256$ 개의 입력과 출력 색 좌표값들의 순서쌍이 주어진 프린터에서의 색 왜곡을 나타낸다. 하지만,  $256 \times 256 \times 256 = 16,777,216$ 개의 색상들을 인쇄하고 측정하는 일은 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서,  $256 \times 256 \times 256$ 개의 순서쌍의 부분 집합을 선택하여 주어진 프린터에서의 색 왜곡을 모델링하게 된다. 이와 같이 선택된 입력 색 좌표계에서의 부분 집합을 색 샘플이라 한다.

대표적인 색 보정 방법들로는 선형 변환에 의한 방법<sup>[3,4,5,6]</sup>, Look-up-table(LUT)에 의한 방법<sup>[3,4,7,8]</sup>, 색 모델을 이용한 방법<sup>[3,9,10]</sup>, 신경 회로망을 이용한 방법 등<sup>[3,11,12]</sup>이 있다. 이들 중에 선형 변환과 LUT에 의한 색 보정 방법들이 널리 사용되어 진다. 선형 변환에 의한 색 보정 방법에서는 색 샘플들의 입력과 출력 색 좌표값 순서쌍들을 이용하여 색 왜곡을 선형 변환으로 모델링하고 계산된 행렬을 이용하여 색 보정을 수행한다. LUT에 의한 색 보정 방법에서는 색 샘플들의 입력과 출력 색 좌표값 순서쌍들로 LUT를 구성한다. 색 보정은 주어진 색 좌표값이 LUT 상에 존재하는지의 여부를 확인하고 LUT의 색 좌표값 또는 LUT 상의 주변 값들로서 보간을 통해 계산된 색 좌표값을 프린터로 출력함으로써 이루어진다.

색 보정의 결과, 즉 색차는 적용된 색 보정 방법뿐만 아니라 보정에 사용된 색 샘플에 의해서 좌우된다. 따라서, 주어진 색 공간 내에서 칼라 입출력 기기의 색 왜곡을 가장 잘 표현할 수 있는 색 샘플을 선택하는 것이 중요하다. 이는 색 보정의 결과, 즉 색차가 적용된 색 보정 방법뿐만 아니라 보정에 사용된 색 샘플에 의해서도 좌우되기 때문이다. 주어진 색 공간의 영역을 등간격으로 분할하여 색 보정용 색 샘플을 선택하는 것이 가장 일반적인 색 샘플 선택 방법이다. 혹은, 중간 계조의 색들의 재현에 중점을 두기 위하여 중간 계

조값들을 상대적으로 조밀하게 샘플링하여 색 샘플을 얻는 경우도 종종 있다. 그러나 두 가지 방법 모두 주어진 입출력 장치의 고유한 색 영역과 색 왜곡 형태가 색 샘플의 결정에 충분히 반영되지는 않는다.

본 논문에서는 유전 알고리즘<sup>[13]</sup>을 이용하여 주어진 칼라 입출력 장치의 색 왜곡 특성을 잘 표현할 수 있는 색 보정용 색 샘플 선택 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서는 제한된 색 측정으로써 주어진 영상 입출력 기기의 색 왜곡 특성을 반영하고 필요에 따라서는 사용되는 영상의 특성을 고려할 수 있도록 스트링(string)의 구조를 설계하였다. 또한, 이와 같은 스트링 구조를 사용하면 교차(crossover), 돌연변이(mutation)의 연산자를 수행한 후에도 스트링 내에 중복된 색 좌표값이 존재하지 않게 된다. 복제(reproduction) 연산의 경우 수렴 속도를 증가시키기 위하여 복제 확률 계산시 지수함수를 사용하였다. 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플의 색 보정용 색 샘플로서의 적합성을 보이기 위해 선형 변환 방식, LUT 방식과 신경 회로망을 이용한 방식에 적용하여 색 보정 실험을 수행하였다. 또한, 실험 결과들을 등간격 분할에 의해 얻어진 색 샘플을 이용한 색 보정 실험 결과와 비교 분석하였다.

2장에서는 먼저 제안하는 스트링의 구조 및 특성을 제시하고 유전 알고리즘을 이용한 색 샘플 결정 방법을 설명한다. 3장에서는 제안하는 방법에 의한 색 샘플들을 이용한 세 가지 색 보정 실험들의 내용과 결과를 비교 분석하였다.

## II. 유전 알고리즘을 이용한 색 샘플 결정 방법

색 보정용 색 샘플을 선택하는데 있어서 일반적으로 사용되는 방법은 주어진 색 공간 영역을 등간격으로 분할하여 색 보정용 색 샘플들을 선택하는 것이다. 이와 같이 선택된 색 샘플들은 주어진 칼라 입출력 장치의 색 왜곡 특성을 충분히 반영하지 못한다는 단점이 있다. 유전 알고리즘은 제어, 신호 처리, 영상 처리 등 여러 분야의 최적화 문제를 해결하는데 폭 넓게 사용되고 있다. 유전 형질이 복제, 교차, 돌연변이의 과정을 통하여 세대가 지남에 따라 주어진 환경에 맞게 개선되어 가는 과정을 알고리즘화 하여 최적화 문제의 해를 계산하는 것이다. 본 논문에서는 주어진 칼라 입출

력 장치의 색 왜곡 특성을 반영한 색 샘플들을 선택하기 위하여 유전 알고리즘을 이용하였다. 편이상 컬러 프린터를 색 보정의 대상으로 하여 제안하는 색 샘플 결정 방법을 설명하기로 한다. 이때, 주어진 컬러 프린터의 입력 색 좌표계는 RGB, 출력 색 좌표계는 CIE  $L^*a^*b^*$  공간이라 가정한다. 물론 제안하는 색 샘플 결정 방법은 다른 컬러 입출력 장치에도 적용이 가능하다.

### 1. 초기 모집단(Initial Population)의 구성

유전 알고리즘을 이용한 색 샘플 결정 과정의 첫 단계는 초기 모집단을 구성하는 것이다. 초기 모집단은 다수의 스트링들로 구성되며 본 절에서는 먼저 색 샘플 결정에 적합한 스트링의 구조에 대하여 설명한다. 제안하는 스트링 구조의 목적은 제한된 색 측정으로써 주어진 영상 입출력 기기의 색 왜곡 특성을 반영하고 또한, 결정된 색 샘플들의 집합에 중복된 색 샘플이 포함되지 않도록 하는데 있다.

우선, 입력 색 공간 영역을 등간격으로 분할하여 측정 가능한 개수만큼의 '측정 샘플'들을 생성시킨다. 이와 같이 제한된 개수의 측정 샘플들을 프린터를 통하여 인쇄하고 색 좌표값을 측정하여 입력 색 좌표값과 측정된 출력 색 좌표값들로서 '측정 색 좌표값 순서쌍'을 구성한다. 다음에는, 큐빅 B-스플라인 보간법<sup>[14,15]</sup>을 입력과 출력 색 좌표값의 순서쌍들에 적용하여 순서쌍의 개수를 확장한다. 예를 들어 입력 채널당 8개씩의 측정 샘플들, 즉  $8 \times 8 \times 8 = 512$ 개의 측정 샘플들을 선택한 경우 이들을 토대로  $29 \times 29 \times 29$  혹은 그 이상의 개수로 순서쌍을 확장하는 것이다. 유전 알고리즘에 의해 선택된 색 보정용 색 샘플들은 이들 '확장된 순서쌍'의 원소들로 이루어진다.

확장된 순서쌍의 입력 RGB 색 공간에서의 계조값들을 오름차순으로 나열한 후 다음과 같이 채널별로  $m$ 개의 부분 집합으로 구분한다. 이때, 채널별 부분 집합의 개수가 다를 수도 있으나 편이상 같은 개수의 부분 집합을 갖는다고 가정한다.

R 채널 :  $[R_1], [R_2], [R_3], \dots, [R_m]$

G 채널 :  $[G_1], [G_2], [G_3], \dots, [G_m]$

B 채널 :  $[B_1], [B_2], [B_3], \dots, [B_m]$

여기서,  $R_i, G_i$ 와  $B_i, i=1,2,3,\dots,m$ 는 각각 채널당 여러 개의 계조값들을 포함하는  $i$ 번째 부분 집합을 나타낸다.

각각의 부분 집합에 포함되는 계조들의 개수는 채널별로 색 보정을 수행할 컬러 입출력 기기의 특성이나 주어진 기기에서 주로 사용되는 영상의 특성에 따라 유연하게 조절할 수 있다. 예를 들어 중간 계조 색들의 재현에 중점을 두기 위해서는 중간 계조를 나타내는 부분 집합에 포함되는 계조수를 그렇지 않은 부분 집합보다 상대적으로 적게 할 수 있다. 이와 같이 선택했을 경우, 앞으로 설명할 스트링 결정 방법과 유전 알고리즘 연산 방법에 의해 최종 선택된 색 샘플들의 집합에 강조하고자 하는 중간 계조를 나타내는 색 샘플들이 상대적으로 많이 포함되게 된다.

이와 같이 확장된 입력과 출력 색 좌표값의 순서쌍들을 부분 집합으로 나눈 후에 초기 모집단을 구성하는 스트링들을 다음과 같이 선택하게 된다. 각 채널의 부분 집합으로부터 임의로 한 개씩의 계조값을 선택한다. 이들을 조합하면 서로 다른  $m \times m \times m$ 개의 색 좌표값을 얻게 되고 이들을 아래와 같이 순차적으로 나열함으로써 한 개의 스트링을 선택하게 된다.

$$(r_1, g_1, b_1)(r_1, g_1, b_2) \dots (r_1, g_1, b_m)(r_1, g_2, b_1)(r_1, g_2, b_2) \dots (r_1, g_2, b_m) \dots (r_m, g_m, b_m)$$

여기서,  $r_i, i=1,2,\dots,m, g_j, j=1,2,\dots,m, b_k, k=1,2,\dots,m$ 는 각각 R채널의  $i$ 번째 부분집합  $R_i, G$ 채널의  $j$ 번째 부분 집합  $G_j, B$ 채널의  $k$ 번째 부분 집합  $B_k$ 로부터 임의로 선택된 계조값을 나타낸다. 이 과정을  $K$ 번 반복하여 초기 모집단을 구성하는  $K$ 개의 스트링을 선택한다.

스트링을 구성하는 원소를 선택할 때 각 부분 집합에서 한 개의 계조값만을 임의로 선택하여 순차적으로 나열함으로써 서로 다른  $m \times m \times m$ 개의 원소를 취하게 되며 또한, 앞으로 설명할 교차, 돌연변이의 유전자 알고리즘 연산을 적용한 후에도 중복된 색 샘플을 포함하지 않게 된다.

지금까지 초기 모집단을 구성하는 스트링들의 구조와 선택 방법을 설명하였다. 다음에는 유전 알고리즘을 위한 연산자들에 대해 설명한다.

### 2. 복제 연산을 위한 적격치(fitness value) 계산

초기 모집단을 선정한 후에는 유전 알고리즘의 복제 연산자 수행을 위해  $k$ 번째 스트링에 대한 적격치(fitness value)  $f_k$ 를 계산하여야 한다. 이를 위하여 먼저 각각의 스트링에 대하여 다음의  $e_{i,k}$ 를 최소화하는 선형 변환 행렬을 최소제곱법에 의해 계산한다.

$$e_{1,k} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \|Y_{k,j} - A_k X_{k,j}\|^2 \quad (1)$$

여기서  $M=m \times m \times m$ 은 한 개의 스트링이 포함하는 색 좌표의 개수를 나타낸다.  $X_{k,j}$ 는  $k$ 번째 스트링내의  $j$ 번째 입력 색 좌표값을 토대로 다음과 같이 계산한  $10 \times 1$  벡터이다.

$$X_{k,j} = [R \ G \ B \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ RG \ GB \ BR \ 1]^T \quad (2)$$

또한, 식 (1)에서  $Y_{k,j}$ 는 2.1절에서 설명한 확장된 순서쌍의 입력 색 좌표값  $X_{k,j}$ 에 대응하는 출력 색 좌표값으로서  $3 \times 1$  벡터를 나타낸다. 식 (1)을 최소화하는  $3 \times 10$ 행렬  $A_k$ ,  $k=1, \dots, K$ 는  $k$ 번째 스트링에 의하여 모델링된 프린터에서의 색 왜곡을 나타낸다.

계산된  $A_k$ 를 아래의 식 (3)에 대입하여  $k$ 번째 스트링에 대한  $e_{2,k}$ ,  $k=1, \dots, K$ 를 계산한다.

$$e_{2,k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|Y_i - A_k X_i\|^2 \quad (3)$$

여기서  $N$ 은 2.1절에서 설명한 확장된 순서쌍의 개수를 나타내고  $X_i$ 는 확장된 순서쌍의  $i$ 번째 입력 색 좌표값,  $Y_i$ 는  $i$ 번째 출력 색 좌표값을 나타낸다. 즉  $e_{2,k}$ 는  $k$ 번째 스트링에 의해 모델링된 색 왜곡 모델을 확장된 순서쌍들에 적용했을 때의 색차를 나타낸다. 또한,  $e_{2,k}$ 는 유전 알고리즘의 복제 연산자 수행을 위한 평가 함수 (evaluation function)의 역할을 한다.  $e_{2,k}$ 가 최소일 때 적격치가 최대가 되도록  $k$ 번째 스트링에 대한 적격치  $f_k$ 를 다음의 식 (4)에 의해 계산한다.

$$f_k = c_1 - e_{2,k} \quad (4)$$

여기서  $c_1$ 은 양의 상수이다.

### 3. 복제 확률의 계산

일반적으로 유전 알고리즘에서  $k$ 번째 스트링의 복제 확률로서는 다음 식 (5)의  $P_k$ 가 널리 사용된다.

$$P_k = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^K f_k} \quad (5)$$

여기서,  $f_k$ 는 식 (4)에서 계산된  $k$ 번째 스트링의 적격치이고  $K$ 는 스트링의 총 개수를 나타낸다. 그러나  $f_k$  값들의 차이가 적으면 식 (5)에 의해 계산된  $P_k$ 의 차이도 적게 되어 상대적으로 큰 확률을 가지는 스트링, 즉 우성 형질의 스트링을 다음 세대로 효과적으로 복제할

수 없고 따라서 원하는 해로의 수렴 속도가 느려지게 된다. 본 논문에서는 다음의 식 (6)과 (7)에 의해 새로운 적격치를 계산하여 복제에 사용하였다.<sup>[16]</sup>

$$f_{k\_new} = \exp\left(1 + \frac{N_r \times n}{c_2} \times P_k\right) \quad (6)$$

$$P_{k\_new} = \frac{f_{k\_new}}{\sum_{k=1}^K f_{k\_new}} \quad (7)$$

여기서,  $N_r$ 은 유전 알고리즘 과정의 총 반복 횟수,  $n$ 은 현재 수행 중인 반복 횟수,  $c_2$ 는 상수이다.

### 4. 교차 연산자

복제 연산을 마친 후에는 교차 연산을 수행하게 된다. 먼저 복제 연산을 마친 세대의 모집단에 속하는 스트링들을 임의로 선정하여 2개씩 쌍을 구성한다. 한 쌍의 스트링에 대해 임의로 교차 위치를 선정 후 결정된 위치 전, 혹은 후의 스트링의 내용을 교환한다. 이때 교차 위치에서의 전후 여부는 교차 위치의 전에 속한 원소의 개수와 후의 원소를 비교하여 작은 쪽의 내용을 교환하게 된다. 2.1절에서 언급한 스트링의 구조에 의해 교차 연산 후에도 모든 스트링은 중복된 샘플을 포함하지 않는다.

### 5. 돌연변이 연산자

유전 알고리즘에서는 반복 수행 중에 해가 의사 극소점(local minima)으로 수렴하는 것을 방지하기 위하여 돌연변이 연산을 수행한다. 본 논문에서 제안하는 방법에서는 미리 정해진 돌연변이 확률에 따라 모집단 내의 스트링들 중에 돌연변이 연산을 적용할 스트링(들)을 선정한다. 선정된 스트링내에서 돌연변이 연산에 의해 바뀌어질 색 좌표값의 위치를 임의로 선정한다. 선정된 색 좌표값을 바꾸어줌으로서 돌연변이 연산을 수행한다. 새로운 채널 별 계조값은 바뀌어지는 계조값이 속한 부분 집합 내에서 임의로 선정한다. 이와 같이 돌연변이 연산을 수행하는 이유는 돌연변이 연산 후에도 스트링 내에 중복된 색 좌표값이 존재하지 않게 하기 위함이다.

지금까지 색 샘플 결정을 위해 수행할 복제, 교차, 돌연변이 연산자의 적용 방법에 대해 설명하였다. 2.1절에서 설명한대로 초기 모집단을 선정할 후 2.2-2.5절에 설명한 세 가지 연산자에 의해 다음 세대를 만들어낸다. 주어진 반복 횟수동안 2.2-2.5절의 내용을 반복

수행한다. 반복 수행을 마친 후 식 (3)에서 정의된  $e_{2,k}$  값이 최소가 되는 스트링이 제안하는 방법의 결과이며 색 보정을 위한 색 샘플로서 사용하게 된다.

### III. 실험 및 결과

본 장에서는 먼저 실험에 사용된 기기들에 대하여 설명하고 칼라 프린터를 색 보정의 대상으로 하여 제안하는 방법을 적용한 색 샘플 결정 실험을 설명한다. 또한, 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플들의 색 보정 효과를 검증하기 위하여 수행한 색 보정 실험들의 내용을 제시하고 결과를 비교 분석한다.

설명할 실험에서 사용한 색 좌표 측정 기기는 크로마미터 (미놀타 CR-321)로서 사용된 조명은 Illuminant C이다. 또한, 실험에 사용한 프린터는 최대 해상도가 137dpi인 continuous 톤 프린팅 방식의 열승화형 프린터(삼성 CVP-610D)이다. 사용한 프린터는 디지털 영상을 입력으로 사용하며 CMY 삼색 프린터이다. 프린터의 도너와 리셉터로는 코다 Thermacolor VP1-30을 사용하였다.

#### 1. 제안된 방법에 의한 색 샘플 결정 실험

주어진 프린터에서의 색 왜곡 보정 과정에 필요한 색 샘플들을 제안하는 방법에 의하여 결정한 실험 내용을 설명하기로 한다. 먼저 채널당 256 계조를 갖는 입력 RGB 좌표계를 등간격으로 샘플링한  $8 \times 8 \times 8$ 개의 샘플들을 생성한다. 이들은 2.1절에서 설명한 측정 샘플들로 사용된다. 아래의 식 (8)을 이용하여 인쇄를 위해 측정 샘플들의 색 좌표값을 CMY 좌표계로 변환하였다.

$$\begin{aligned} C &= 255 - R \\ M &= 255 - G \\ Y &= 255 - B \end{aligned} \quad (8)$$

변환된 색 좌표값들을 주어진 열승화형 프린터를 이용하여 인쇄하였다. 인쇄된 측정 샘플들로부터 크로마미터를 사용하여  $L^*a^*b^*$  색 좌표계에서 색 좌표값을 측정하였다. RGB 입력 좌표값과  $L^*a^*b^*$  출력 색 좌표값을 사용하여 측정 색 좌표값들의 순서쌍을 구성한다. 구성된 측정 순서쌍들에 큐빅 B-스플라인 보간법을 적용하여  $29 \times 29 \times 29 = 24,389$ 의 크기로 확장한다.

이와 같이 확장된 순서쌍들의 입력 RGB 계조값들을

다음과 같이 각 채널당 동일하게 8개의 부분 집합으로 나누었다.  $R1=G1=B1=\{0,9,18,27\}$ ,  $R2=G2=B2=\{36,46,55,64\}$ ,  $R3=G3=B3=\{73,82,91,100\}$ ,  $R4=G4=B4=\{109, 118,128,137\}$ ,  $R5=G5=B5=\{146,155,164, 173\}$ ,  $R6=G6=B6=\{182,191,200,209\}$ ,  $R7=G7=B7=\{219,228,237,246\}$ ,  $R8=G8=B8=\{255\}$ . 각 채널의 부분 집합으로부터 한 개씩의 계조값을 임의로 선택하여 서로 다른  $8 \times 8 \times 8 = 512$ 개의 색 좌표값을 선택하고 이를 순차적으로 나열함으로써 하나의 스트링을 구성한다. 같은 방법으로 초기 모집단을 구성하는 200개의 스트링을 구성한다.

각각의 스트링에 대하여 식 (1)의  $e_{1,k}$ 를 최소화하는 선형 변환 행렬을 최소제곱법에 의해 계산한다. 계산된  $A_k$ 를 식 (3)에 대입하여 평가 함수값  $e_{2,k}$ 를 계산한다. 다음에는 식 (4)를 이용하여 적격치  $f_k$ 를 계산한다. 식 (4)에서 사용된 상수  $c_1$ 의 값은 40이었다. 사용된 상수 값은 유전 알고리즘을 통한 최소화를 위해  $f_k$ 가 양의 값을 갖도록  $e_{2,k}$ ,  $k=1, \dots, 200$ 의 초기 값들을 일단 계산한 후 이들의 최대값보다 조금 큰 값으로 설정하였다. 적격치를 계산한 후에는 식 (5)-(7)을 이용하여 복제 확률을 계산한다. 식 (6)에서 사용한  $c_2$ 는 200이고 총 반복 회수  $N_r=1200$ 번으로 하였다. 식 (6)에서의 상수 값이 너무 적을 경우에는 식 (5)를 직접 복제 확률로서 사용하였을 때 보다 스트링간의  $P_k$  차이가 오히려 감소되어 수렴 속도의 개선을 기대할 수 없게 되고 반대로 너무 클 경우에는 원하지 않는 곳으로 수렴할 가능성이 있다. 본 실험에서는  $P_k$ 값들의 범위를 고려하여 실험적으로 상수 값을 결정하였다. 계산된 복제 확률에 의해 다음 세대의 모집단을 구성하는 새로운 200개의 스트링을 생성시킨다.

복제 연산을 마친 후에는 2.4절에서 설명한 방법대로 교차 연산을 수행한다. 다음에는 돌연변이 확률 0.05를 사용하여 돌연변이 연산을 수행하였다. 이와 같은 복제, 교차, 돌연변이 연산을 1200번 반복 수행하였다. 마지막으로 얻어진 200개의 스트링 각각에 대하여 식 (3)에서 정의된  $e_{2,k}$  값을 계산하고 계산된 값이 최소가 되는 스트링을 제안하는 방법의 결과로서 나타내었다.

그림 1은 이와 같이 결정된 512개의 색 샘플들의 RGB 색 좌표계에서의 분포를 나타낸다. 비교를 위하여 그림 2에서는 등간격 샘플링에 얻어진 512개의 색 샘플들의 분포를 나타내었다. 그림 2의 등간격 색 샘플의 분포에 비하여 제안하는 방법에 의해 얻어진 그림 1

에서는 육면체의 바깥쪽 부분에 존재하였던 샘플들이 안쪽으로 이동한 것을 볼 수 있다. 입력 색 좌표계의 가장 자리에 위치하는 색 좌표값들은 프린터의 색 영역밖에 존재할 확률이 높고 따라서 색차가 크게 된다. 즉, 제안하는 방법에서는 색차가 큰 샘플들이 제외되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3의 가로축은 반복 횟수, 세로축은 매 반복시 200개 스트링의 평가함수값  $e_{2,k}$ ,  $k=1, \dots, 200$ 들의 평균을 나타낸다. 그림 3에서 보듯이 유전 알고리즘의 반복회수가 증가함에 따라 평균 평가함수값이 감소함을 알 수 있다.

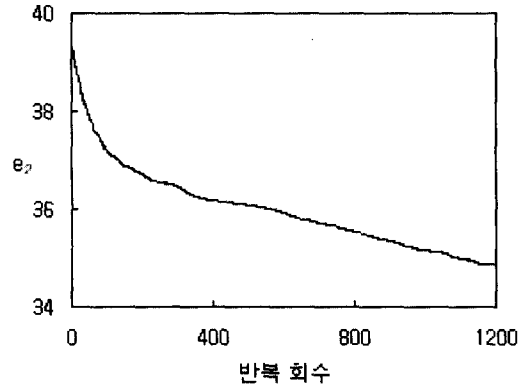


그림 3. 반복 회수에 따른 평균 평가 함수값  
Fig. 3. Averaged values of evaluation function.

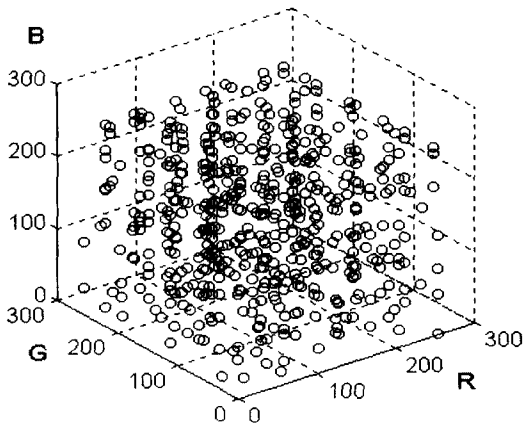


그림 1. 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플의 분포  
Fig. 1. Distribution of color samples based on the proposed method.

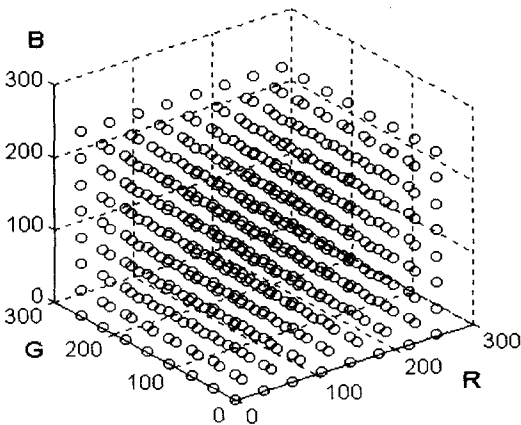


그림 2. 등간격 샘플링에 의한 색 샘플의 분포  
Fig. 2. Distribution of uniformly sampled color samples.

2. 결정된 색 샘플을 이용한 색 보정 실험  
제안하는 방법으로 결정된 색 샘플의 색 보정에서의 효과를 검증하기 위하여 칼라 프린터에서의 색 보정 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 방법은 선형 변환에 의한 방법, LUT에 의한 방법, 그리고 신경 회로망을 이용한 색 보정 방법의 세 가지이다. 비교를 위하여 각각의 색 보정 방법에 대하여 제안하는 방법에 의해 얻어진 색 샘플들과 등간격 샘플링에 의해 얻어진 색 샘플들을 이용하여 동일한 실험을 수행하였다.

그림 1에 나타낸 것과 같이 제안하는 방법에 의해 얻어진 512개 색 샘플들의 집합을  $S_1 = \{X_{S_1,1}, X_{S_1,2}, \dots, X_{S_1,512}\}$ , 그림 2에서와 같이 등간격으로 샘플링하여 얻어진 512개의 색 샘플들의 집합을  $S_2 = \{X_{S_2,1}, X_{S_2,2}, \dots, X_{S_2,512}\}$ 라 하자. 주어진 색 보정 방법에 대하여  $S_1$ 과  $S_2$  각각의 경우에 똑 같은 실험 방법을 적용하므로  $S_1$ 을 이용한 실험 내용만을 설명한다.

1) 선형 변환을 이용한 색 보정 실험

주어진 프린터에서의 색 왜곡을 선형 변환으로 모델링하기 위하여 먼저  $S_1$ 의 색 샘플들을 식 (8)로 변환하여 주어진 프린터로 인쇄한다. 인쇄된 색 샘플들의  $L^*a^*b^*$  좌표계에서의 좌표값을 크로마미터로 측정하고 측정된 색 좌표값들을  $\{Y_{S_1,1}, Y_{S_1,2}, \dots, Y_{S_1,512}\}$ 라 한다. 식 (9)의  $e_{3,S_i}$ 을 최소화하는 선형 변환 행렬  $A_{S_i}$ 을 최소제곱법을 이용하여 계산한다.

$$e_{3,S_i} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \| X_{S_i,j} - A_{S_i} Y_{S_i,j}' \|^2 \quad (9)$$

여기서  $M$ 은 색 샘플 등의 개수 512이고  $Y_{S_i, j}$ 는  $j$ 번째 색 샘플의 출력 색 좌표값  $Y_{S_i, j}$ 를 토대로 식 (2)와 같이  $10 \times 10$ 로 확장한 벡터이다. 또한,  $A_{S_i}$ 은 색 왜곡을 나타내는  $3 \times 10$  행렬이다.

이와 같이 주어진 프린터에서의 색 왜곡을 나타내는 행렬을 계산한 후에는 테스트 샘플을 이용하여 보정 실험을 수행한다. 색 보정 실험에 사용된 테스트 샘플은 입력 RGB 공간 내에서  $S_1$ 과  $S_2$  어느 것에도 속하지 않는 128개의 색 좌표값들을 임의로 선택하여 사용하였다. 이와 같이 선정된 테스트 샘플들을 식 (8)로 변환한 뒤 인쇄하고 크로마미터로  $L^*a^*b^*$  좌표값을 측정한다. 측정된 색 좌표값들을  $\{Y_{L,1}, Y_{L,2}, \dots, Y_{L,128}\}$ 이라 한다. 색 보정은 식 (10)과 같이 측정된 테스트 샘플들의 색 좌표값에 모델링 과정에서 계산된  $A_{S_i}$ 을 곱함으로써 이루어진다.

$$X_{L,j} = A_{S_i} Y_{L,j}, \quad j = 1, 2, \dots, 128 \quad (10)$$

여기서  $X_{L,j}$ 는 색 보정된  $j$ 번째 테스트 샘플의 입력 색 좌표값을 나타낸다. 이와 같이 색 보정된 테스트 샘플들을 식 (8)로 변환한 뒤 주어진 프린터로 출력한다. 인쇄된 테스트 샘플의  $L^*a^*b^*$  좌표값을 측정하고 이를  $\{Y_{L,1}^c, Y_{L,2}^c, \dots, Y_{L,128}^c\}$ 라 한다. 색 보정 실험의 결과인  $L^*a^*b^*$  색 좌표계에서의 평균 색차  $\Delta E$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta E = \frac{1}{128} \sum_{j=1}^{128} \|Y_{L,j} - Y_{L,j}^c\|^2 \quad (11)$$

지금까지 제안하는 방법에 의해 얻어진 512개 색 샘플들의 집합  $S_1$ 을 이용하여 주어진 프린터에서의 색 왜곡을 선형 변환으로 모델링하고 계산된 보정 행렬로서 테스트 샘플에 대하여 수행하는 과정을 설명하였다. 계산된 평균 색차  $\Delta E=4.58$ 이었다. 등간격으로 샘플링하여 얻어진 512개의 색 샘플들의 집합  $S_2$ 를 이용하여 같은 실험을 수행했을 때의 평균 색차는  $\Delta E=5.12$ 이었다. 두 가지 실험에서 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플을 사용하였을 때 평균 색차가 감소함을 확인할 수 있었다.

## 2) LUT를 이용한 색 보정 실험

먼저 제안하는 방법에 의해 얻어진 512개의 색 샘플들을 이용하여 LUT를 구성하는 방법과 주어진 테스트 샘플에 대하여 구성된 LUT를 사용하여 색 보정을 수

행하는 과정을 설명한다. 먼저 LUT의 구성은 다음과 같다. 512개의 색 샘플들을 주어진 프린터로 인쇄한다. 인쇄된 색 샘플들의  $L^*a^*b^*$  좌표계에서의 좌표값을 크로마미터로 측정하고 입력 좌표값과 측정된 좌표값들로서 다음과 같은 512개의 순서쌍 즉, 초기 LUT를 구성한다.

$$\{(X_{S_i,1}, Y_{S_i,1}), (X_{S_i,2}, Y_{S_i,2}), \dots, (X_{S_i,512}, Y_{S_i,512})\} \quad (12)$$

식 (12)의 순서쌍들을 큐빅 B-스플라인 보간법을 이용하여  $29 \times 29 \times 29=24,389$ 의 순서쌍들로 확장한다. 이와 같이 확장된 LUT를 색 보정에 사용하게 된다.

색 보정에 사용된 테스트 샘플들은 3.2.1절에서와 동일한 128개이다. 먼저,  $i$ 번째 테스트 샘플의  $L^*a^*b^*$  색 좌표값,  $Y_{L,i}$ 가 LUT에 존재하는지의 여부를 확인한다. 존재할 경우 해당되는 LUT상의 RGB값을 보정된 색 좌표값으로 취한다. 존재하지 않을 경우에 주어진 테스트 샘플에 대하여 보정된 RGB 색 좌표값을 계산하는 방법은 다음과 같다. 먼저,  $i$ 번째 테스트 샘플의  $L^*a^*b^*$  색 좌표  $Y_{L,i}$ 와 가장 가까운 즉,  $\Delta E$ 가 최소인 세 점을 LUT의  $L^*a^*b^*$  공간 내에서 찾는다. 이와 같이 찾아낸  $L^*a^*b^*$  색 좌표계의 세 점들과 테스트 샘플의  $L^*a^*b^*$  색 좌표간의 거리를 오름차순으로 정렬한 결과를  $w_1 < w_2 < w_3$ 이라 하자. 또한, LUT상에서 이들 세 점에 대응되는 RGB 색 좌표계에서의 좌표값을 각각  $Q_1, Q_2, Q_3$ 라 하자. 주어진 테스트 샘플에 대하여 보정된 RGB 색 좌표값은 다음의 식 (13)과 같이 계산된다.

$$Q = \frac{w_3}{W} \times Q_1 + \frac{w_2}{W} \times Q_2 + \frac{w_1}{W} \times Q_3 \quad (13)$$

여기서,  $W=w_1+w_2+w_3$  이다.

모든 128개의 테스트 샘플에 대해 위의 과정을 반복하여 각각의 테스트 샘플에 대하여 색 보정된 RGB 값들을 계산한다. 보정된 색 좌표값들을 주어진 프린터로 인쇄하고 크로마미터를 이용하여  $L^*a^*b^*$  좌표계에서의 색 좌표값들을  $\{Y_{L,1}^c, Y_{L,2}^c, \dots, Y_{L,128}^c\}$  측정하였다. 평균 색차  $\Delta E$ 는 식 (11)을 이용하여 계산하였다. 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플들을 사용한 LUT를 토대로 색 보정한 경우의 평균 색차는  $\Delta E=4.60$ 이었다. 또한 등간격 샘플링을 이용한 512개 샘플을 이용하여 같은 실험을 하였을 때의 평균 색차는  $\Delta E=4.88$ 이었다. 두 가지 실험에서 제안하는 방법에 의해 얻어진 색 샘플들이 등간격 샘플들보다 색 보정에 효과적

임을 알 수 있었다. 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플들을 사용하였을 경우 3.2.1절의 선형 변환 방법에서의 평균 색차  $\Delta E=4.58$ 보다 오히려 LUT를 이용한 경우 평균 색차가  $\Delta E=4.60$ 으로 증가하였다. 이는 보간 과정에서 프리즘, 슬렌트/프리즘, 큐빅 B-스플라인 등의 보간 방법<sup>[7,14,15]</sup>을 사용하는 대신에 두 가지 색 샘플들의 색 보정 효과만을 비교하기 위하여 편의상 식 (13)과 같은 단순한 선형 보간을 사용하였기 때문이다.

3) 신경 회로망을 이용한 색 보정 실험

실험에 사용한 신경 회로망 모델은 항등 매핑(identity mapping)의 기능을 갖는 변형된 역전파(backpropagation) 모델로서 전체 네트워크는 그림 4와 같이 프린터 모델과 컨트롤러 두 부분으로 구성된다. 프린터 모델과 컨트롤러의 네트워크 구조는 두 가지 모두 입력, 출력, 2개의 은닉층(hidden layer)으로 구성되며 각각 (3-10-10-3)의 뉴런(neuron)으로 이루어진다<sup>[12]</sup>. 그림 4의 네트워크는 학습 과정을 거쳐 색 보정에 사용하게 된다. 학습 과정에서는 프린터 모델과 컨트롤러를 두 단계의 과정을 거쳐 학습시키고 색 보정 시에는 컨트롤러만을 이용하게 된다.

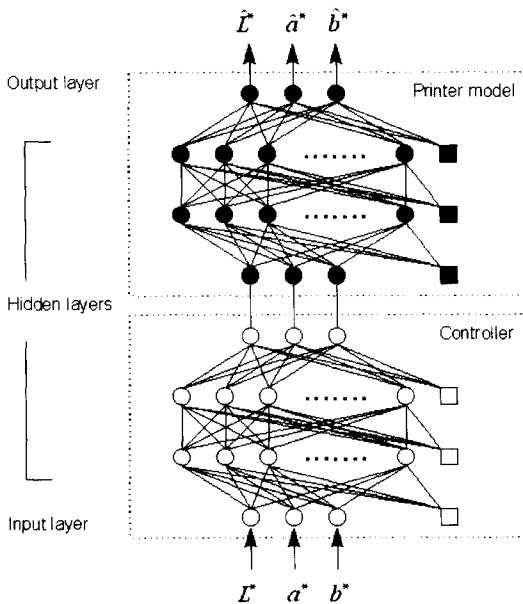


그림 4. 전체 네트워크 구조  
Fig. 4. Total network structure.

먼저, 프린터 모델의 학습 과정을 설명한다. 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플들로 구성된 식 (12)의

순서쌍들을 프린터 모델의 입력 신호와 학습 신호로 사용하기 위하여 각각  $[0,1]$  사이의 실수 값들로 정규화 하였다. 정규화된  $(X_{s_i,1}, X_{s_i,2}, \dots, X_{s_i,512})$ 와  $(Y_{s_i,1}, Y_{s_i,2}, \dots, Y_{s_i,512})$ 의 값들을 각각 컨트롤러를 제외한 프린터 모델만의 입력과 학습 신호로 사용하여 100,000번 반복 수행함으로써 프린터 모델의 가중치(weights)와 바이어스(bias)들을 결정한다. 이와 같이 프린터 모델에 대한 학습이 끝나면 프린터 모델과 컨트롤러를 합친 전체 네트워크를 대상으로 컨트롤러 부분에 대한 학습을 수행한다. 이때 그림 4의 전체 네트워크의 입력 신호와 학습 신호로는  $L^*a^*b^*$  출력 좌표값들인  $(Y_{s_i,1}, Y_{s_i,2}, \dots, Y_{s_i,512})$ 의 정규화된 값들이 사용된다. 컨트롤러 학습 과정에서의 출력 값을 계산할 때에는 미리 프린터 모델의 학습 과정에서 결정한 가중치, 바이어스를 고정하여 컨트롤러 부분의 가중치와 바이어스들을 결정하게 된다. 컨트롤러에 대한 학습 과정에서 사용한 반복 횟수도 100,000번이었다. 컨트롤러에서의 모델링 오차 즉,  $L^*a^*b^*$  좌표계에서의 입력과 출력간의 오차는 제안하는 방법에 의한 색 샘플들을 사용하였을 때에는 2.38이고 등간격에 의한 샘플들을 사용하였을 때에는 2.29이었다. 지금까지 그림 4의 네트워크에 대한 두 가지 단계의 학습 과정을 설명하였다.

색 보정을 위해서는 그림 4의 컨트롤러만을 이용한다. 색 보정에 사용된 테스트 샘플은 1)과 2)절에서와 동일한 128개이다. 먼저, 테스트 샘플의  $L^*a^*b^*$  색 좌표계에서의 좌표값  $\{Y_{t,1}, Y_{t,2}, \dots, Y_{t,128}\}$ 을  $[0,1]$  사이의 값으로 정규화 한다. 정규화된 값을 학습된 컨트롤러의 입력 신호로 하여 컨트롤러의 출력, 즉 보정된 RGB값을 계산한다. 계산된 RGB값을  $[0,255]$ 의 값으로 스케일링(scaling)하고 식 (8)로 변환한 후 주어진 프린터로 인쇄한다. 인쇄된 테스트 샘플의  $L^*a^*b^*$  색 좌표값을 크로마미터로 측정한다. 측정된  $L^*a^*b^*$  색 좌표값  $\{Y_{t,1}^c, Y_{t,2}^c, \dots, Y_{t,128}^c\}$ 과  $\{Y_{t,1}, Y_{t,2}, \dots, Y_{t,128}\}$ 사이의  $\Delta E$ 를 식 (11)을 이용하여 계산한다. 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플들로 학습한 경우에 계산된 평균 색차는  $\Delta E=4.30$ 이었다. 등간격 샘플링에 의한 색 샘플들로 학습한 경우에는  $\Delta E=4.56$ 이었다.

표 1은 지금까지 설명한 세 가지 실험들의 결과를 요약한 것이다. 표 1에서와 같이 세 가지 색 보정 방법



표 1. 색 보정 실험 결과  
Table 1. Results of color correction experiments.

색 보정 방법		평균 ΔE	표준 편차
선형 변환	등간격 색 샘플	5.12	2.86
	제안하는 색 샘플	4.58	2.52
LUT	등간격 색 샘플	4.88	2.23
	제안하는 색 샘플	4.60	1.82
신경 회로망	등간격 색 샘플	4.56	2.40
	제안하는 색 샘플	4.30	2.21

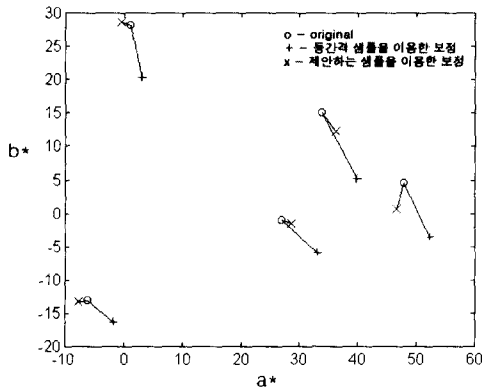


그림 5. 5개 테스트 샘플들의 a\*-b\*공간에서의 위치 (선형 변환 방법)  
Fig. 5. Location of 5 test samples in a\*-b\* space. (Linear transformation based method)

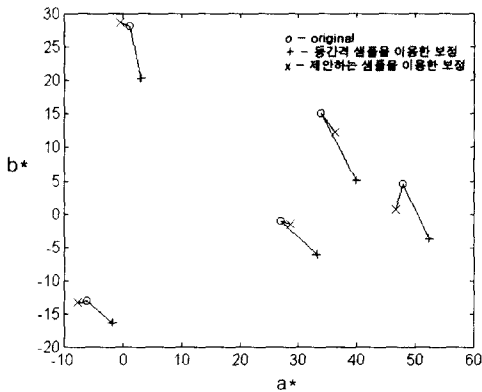


그림 6. 5개 테스트 샘플들의 a\*-b\*공간에서의 위치 (LUT)  
Fig. 6. Location of 5 test samples in a\*-b\* space. (LUT based method)

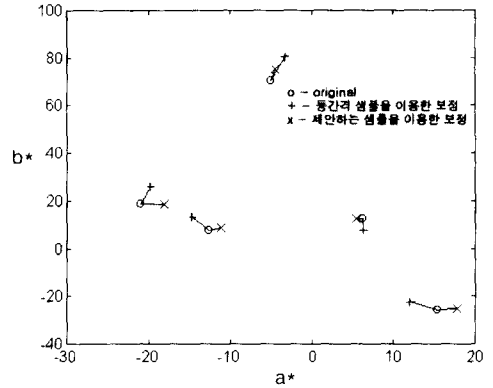


그림 7. 5개 테스트 샘플들의 a\*-b\*공간에서의 위치 (신경회로망)  
Fig. 7. Location of 5 test samples in a\*-b\* space. (Neural net based method)

에 대하여 제안하는 방법에 의해 선택된 색 샘플들로 색 보정을 수행한 경우 등간격 색 샘플들에 의한 경우 보다 평균 색차 ΔE가 감소함을 확인할 수 있었다. 또한, 색차들의 표준 편차도 감소하였다. 표 1에 나타난 모두 6가지의 색 보정 실험들 중에 제안하는 방법에 의한 색 샘플들을 사용하여 신경 회로망에 의해 색 보정을 수행하였을 때 색차가 최소값을 갖게 되었다. 또한, 그림 5, 6과 7에는 128개의 테스트 샘플 중 등간격 색 샘플에 의한 색 보정시 색차가 큰 5개 테스트 샘플들의 a\*-b\*공간에서의 위치와 등간격 색 샘플들과 제안하는 색 샘플들을 이용하여 세 가지 색 보정 방법을 적용한 후의 위치들을 동시에 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 칼라 입출력 장치의 고유한 색 영역과 색 왜곡 특성을 고려한 색 보정용 색 샘플을 결정하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법에서는 제한된 색 측정으로써 주어진 영상 입출력 기기의 색 왜곡 특성을 반영함과 동시에, 결정된 색 샘플 집합 내에 중복된 샘플을 포함하지 않도록 스트링 구조를 설계하였다. 또한, 기존의 유전 알고리즘에서 사용하는 복제, 교차, 돌연변이 연산 방법을 색 샘플 결정 실험에 적합하도록 변형하였다. 특히 복제 연산자 수행 시 수렴 속도를 증가시키기 위해 지수 함수를 이용하여 복제 확률을 계산하였으며 색차가 큰

샘플들을 제외시킬 수 있도록 평가 함수를 정의하였다. 제안하는 방법에 의해 결정된 색 샘플들을 선형 변환 방법과 Look-up-table, 신경 회로망을 이용한 색 보정 방법에 적용하여 실험하였다. 실험 결과들을 통해 등간격으로 취한 색 샘플들에 비해 제안하는 방법에 의한 색 샘플을 사용하여 색차를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

※ 본 논문은 한국과학재단 연구비 지원(과제번호 951-0915-055-1)과 95-96 인하대학교 교내 연구비 지원에 의한 결과임

### 참 고 문 헌

- [1] Maureen C. Stone, William B. Cowan, and John C. Beatty, "Color Gamut Mapping and the Printing of Digital Color Images", ACM Trans. on Graphics, Vol. 7, No. 4, pp. 249-292, October 1988.
- [2] J.A. Stephen Viggiano and Nathan M. Moroney, "Color Reproduction Algorithms and Intent", IS&T and SID's 3rd. Color Imaging Conf., pp. 152-154, 1995.
- [3] Henry R. Kang, "Printer-Related Color Processing Techniques", SPIE Conf. on Color Hard Copy and Graphic Arts IV, Vol. 2413, pp. 410-419, 1995.
- [4] H. Kotera and K. Kanamori, "The New Color Image Processing Techniques for Hardcopy", SPIE Conf. on Digital Image Processing Applications, Vol. 1075, pp. 252-259, 1989.
- [5] Raja Balasubramanian, "Color Transformations for Printer Color Correction", IS&T and SID's 2nd. Color Imaging Conf., pp. 62-65, 1994.
- [6] Kyu-Seo Han, Choon-Woo Kim, "Color Correction for Scanner and Printer with a Fixed Reference Color", The 2nd. IEEE Color Imaging Workshop, pp.99-107, 1996.
- [7] Hideto Motomura, et. al., "CIELAB to CMYK Color Conversion by Prism and Slant Prism Interpolation Method", IS&T and SID's 2nd. Color Imaging Conf., pp. 156-158, 1994.
- [8] Jan P. Allebach, James Z. Chang and Charles A. Bouman, "Efficient Implementation of Nonlinear Color Transformations", IS&T and SID's 1st. Color Imaging Conf., pp. 143-148, 1993.
- [9] Benno Petschik, "Color Hard Copy - a self-tuning color correction algorithm based on a colorimetric model", SPIE Conf. on Electronic Imaging, 1991.
- [10] Raja Balasubramanian, "A Printer Model for dot-on-dot Halftone Screens", SPIE Conf. on Color Hard Copy and Graphic Arts IV, Vol. 2413, pp. 356-364, 1995.
- [11] Shoji Tominaga, "A Neural Network Approach to Color Reproduction in Color Printers", IS&T and SID's 1st. Color Imaging Conf., pp. 173-177, 1993.
- [12] Shoji Tominaga, "Color Control using Neural Network and Its Application", SPIE Conf. on Color Imaging, Vol. 2658, pp. 253-260, 1996.
- [13] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [14] Michael Unser, "B-Spline Signal Processing: Part I-Theory", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 41, No. 2, pp. 821-832, 1993.
- [15] Sarah A. Rajala and Atish P. Kakodkar, "Interpolation of Color Data", IS&T and SID's 1st. Color Imaging Conf., pp. 180-183, 1993.
- [16] 박승호, 강승우, 김춘우, "유전 알고리즘을 이용한 해프토닝 방법", 제 9회 신호처리 합동 학술대회, pp. 747-750, 1996

## 저 자 소 개



李圭憲(正會員)

1995년 2월 인하대학교 전기공학과 (학사). 1997년 2월 인하대학교 전기공학과(석사). 1997년 1월 ~ 현재 LG전자 멀티미디어연구소 연구원. 관심분야는 영상처리



金 權 宇(正會員)

1983년 서울대학교 제어계측공학과 (학사). 1985년 Purdue대학교 전기공학과(석사). 1989년 Purdue 대학교 전기공학과(박사). 1989년 - 1994년 Graphic Research Lab., 3M Company, 연구원. 1994년 - 현재 인하대학교 전기공학과 조교수. 관심분야는 영상처리, 패턴인식