DBpia

논문 13-38A-06-01

한국통신학회논문지 '13-06 Vol.38A No.06
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2013.38A.6.459

2차원 홀로그래픽 변조부호 설계를 위한 정수계획법 모형

박 태 형•, 이 재 진°

Integer Programming Models for the Design of Two-Dimensional Holographic Storage Modulation Code

Taehyung Park•, Jaejin Lee°

요 약

본 연구에서는 이차원 인접 심볼간 간섭(2D ISI) 및 인접 페이지간 간섭 (IPI)을 줄이는 홀로그래픽 저장장치를 위한 이차원 변조부호를 선택하는 문제를 고려한다. 변조부호 선택문제는 목적함수로 코드내부와 코드 상호간 인접심볼값의 차이를 최소화하고, 제약식으로는 사용된 심볼의 분포가 균등하며, 최소 해밍거리 조건이 주어진 이차정수계획법 모형으로 수식화되었다. 선택된 코드워드에서 고립된 픽셀의 발생여부를 검색하는 모형은 정수계획법 모형으로 수식화되었다. 제안된 모형들은 4-레벨 6/8 코드 및 2-레벨 6/8 코드에 적용되어 성능을 계산하였다.

Key Words : Holographic data storage, Intersymbol interfernece, Quadratic Integer Programming, Isolated pixel detection

ABSTRACT

In this paper, we introduce a modulation code design problem where best selection of two-dimensional codewords are determined to reduce two-dimensional (2D) intersymbol interference (ISI) and interpage interference (IPI). Codeword selection problem is formulated as a quadratic integer programming model that minimizes intra- and inter-symbol differences subject to uniform symbol usage and minimal Hamming distance violations. Second integer programming model detects the occurrence of isolated pixel pattern in the selected codewords. The proposed models are applied to 4-level and 2-level 6/8 codes.

Ⅰ. 서 론

홀로그래픽 저장장치는 높은 저장 용량과 빠른 전송율을 갖는다. 미디어의 체적에 정보를 저장하기 때문에 저장용량을 현저히 증가시킬 수 있고, CCD (charge-coupled device) 배열을 이용하여 2차원 픽셀 이미지 데이터를 읽기 때문에 높은 전송률을 갖는다. 이 때문에 차세대 저장장치 후보로 거론되는 여러 저장방식보다 더욱 부각되고 있다.

홀로그래픽 저장장치가 저장용량 및 빠른 전송율을 갖고 있지만, 2차원 픽셀 이미지를 읽기 때문에, 블러(blur)효과, 즉 2차원 인접심볼간 간섭(Intersymbol Interference, ISI)이 생긴다. 또한 홀로그래픽 저장장치는 여러 페이지를 같은 공간에 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭(Interpage Interference, IPI)이 생긴다. 이 외에 입력 데이터 페이지의 어긋남과 페이지 가장자리에서 발생하는 신호빔 세기의 감쇄 문제가 발생한다[1,2]. IPI의 경우 출력신호잡음을 증가시켜서 홀로그래픽 저장장치의 저장용량을 감소한다. 따라서 홀로그래픽 저장장치의 노이즈를 줄이기 위한 오류정

※ 본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-17220364).
• 주저자 : 숭실대학교 산업정보시스템공학과, tpark@ssu.ac.kr, 정회원
° 교신저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장및통신 연구실, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2013-04-193, 접수일자 : 2013년 4월 25일, 최종논문접수일자 : 2013년 5월 19일

www.dbpia.co.kr

정 코드, 변조부호, 등화기(equalization) 및 신호검출 기법에 대한 연구가 진행되었다.

IPI를 줄이기 위해서는 각 페이지 마다 신호에서 발생하는 빛의 양이 비슷해야 한다. 즉, "0" 픽셀과 "1" 픽셀의 분포가 50%씩 비슷하면 신호빔의 세기(intensity)에 의한 변화가 적기 때문에 기록조건이 유사하게 되어 IPI를 줄일 수 있다[3]. 또한 2D ISI를 줄이기 위해서는 코드워드 내부의 심볼 값의 차이와 인접한 코드워드간 심볼 값의 차이가 작아야 한다. 또한 각 행열에서 같은 심볼이 길게 반복되는 구간이 없어야 한다. 또한 코드워드들이 페이지에 배열되었을 때, 고립(isolated) 픽셀의 발생이 없어야 한다[4,5]. 본 연구에서는 정수계획법(integer programming)을 이용하여 2D ISI와 IPI를 줄이는 변조부호의 디자인 방법을 소개한다.

Ⅱ. 변조부호 디자인을 위한 정수계획법 모형

위의 조건들을 만족하는 변조부호를 디자인하기 위한 정수계획법 모형을 4-레벨 6/8 변조부호를 이용하여 기술한다.

6/8 변조부호는 6비트를 입력으로 받아 8비트(4셀×2비트/셀)의 2×2 행렬의 코드워드를 내보낸다. 따라서 기본적인 부호율은 6/8(=0.75)이 된다. 2×2 행렬로 4개의 심볼을 사용하여 코드워드로 표현할 수 있는 코드워드의 수는 256개이고, 이중 64개를 선택한다. 각 코드워드는 2×2행렬의 4개 셀로 구성되고, 각 셀은 {0, 1, 2, 3} 4개의 심볼값을 갖는다. 코드 내의 셀들은 그림 1처럼 배열되어 있다고 가정한다. 아래에서 $[n]$은 집합 $\{1,...,n\}$을 나타낸다. 집합 $N=[256]$은 가능한 코드들의 집합을 나타내고, $M=[4]$은 각 코드안의 셀들을 표시한다. 0-1 변수 $x_j,\ j\in N$는 코드워드 j의 선택여부를 나타낸다. 코드워드 j, 셀 i의 심볼값을 a_{ij}로 표시하고, 코드 j에 나타난 심볼 $s\in\{0,1,2,3\}$의 발생회수를 b_{sj}로 나타낸다. 선택된 코드워드에서 발생하는 2D ISI 효과를 측정하기 위해, 코드워드 내부에서 셀간의 심볼값 차이와 코드워드들이 임의로 배열되었을 때, 인접한 코드워드들의 셀간 심볼값 차이를 고려하기 위해, 다음 두 집합을 정의한다. N_0는 코드워드 j 내부에서 비교할 셀들, 즉, 그림 1 왼쪽의 셀들 (1, 2), (1, 3), (2, 4), (3,4)를 표시한다. 마찬가지로 코드워드간의 심볼값 차이를 계산하기 위해 집합 N_1은 코드워드 (j,k)간의 심볼값 차이를 계산하기 위한 비교셀들의 집합을 나타낸다.

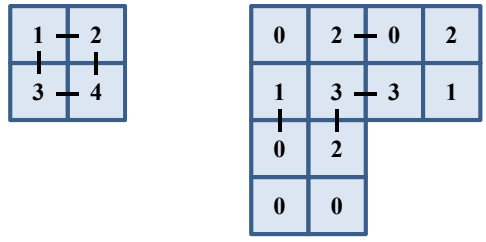

그림 1. 4-레벨 6/8 코드의 셀간 심볼값 비교를 위한 집합 N_0, N_1.
Fig. 1 The intra- and inter-codewords symbol differences sets N_0, N_1 for 4-level 6/8 codes.

그림 1에서 N_0와 N_1은 셀과 셀 사이에 검은 선으로 표시되었다. 코드워드 j 내부의 심볼값의 차이합 $c_j=\sum_{(m,n)\in N_0}|a_{mj}-a_{nj}|$ 으로 나타낼 수 있고, 코드워드 (j,k)간의 심볼값 차이는 $c_{jk}=\sum_{(m,n)\in N_1}|a_{mj}-a_{nk}|$로 나타낼 수 있다. 두 코드워드 (j,k)간의 해밍거리(Hamming distance)를 $h(j,k)=\sum_{i\in M}(a_{ij}\neq a_{ik})$로 표시하고, 집합 $H_1=\{(j,k):h(j,k)<d_{\min}\}$이라고 하자. 여기에서 $d_{\min}$은 허용되는 최소 해밍거리를 나타낸다. 위의 기호를 이용하여 다음과 같은 이차정수계획법 모형을 형성한다.

$$\text{Min}\quad \alpha_1\Big(\sum_{j\in N}c_jx_j+\sum_{j<k}c_{jk}x_jx_k+\sum_s u_s\Big)+\alpha_2\Big(\sum_{(j,k)\in H_1}w_{jk}\Big) \tag{1a}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j\in N}x_j=64 \tag{1b}$$

$$\sum_{j\in N}b_{sj}x_j-u_s\geqq 64,\quad s\in 0,1 \tag{1c}$$

$$x_j+x_k-w_{jk}\leqq 1\quad (j,k)\in H_1 \tag{1d}$$

$$x_j\in\{0,1\},\quad j\in N \tag{1e}$$

$$u_s\geqq 0, s\in\{0,1,2,3\} \tag{1f}$$

식 (1a)는 이차정수계획법의 목적함수를 나타내고, 식 (1b)-(1f)는 제약식을 나타낸다. 식 (1b)는 64개의 코드워드가 선택됨을 나타내고, (1c)는 각 심볼이 균등하게 발생함을 나타낸다. (1c)의 $64\times 4/4=64$으로서, 네 개의 심볼이 25% 균등하게 발생하는 회수를 표시한다. 변수 u_s는 두 심볼이 정확하게 25% 균등하게 발생하지 않을 때의 페널티를 부여하기 위한 보조변수이다. (1d)는 선택된 코드워드간의 최소 해밍거리 만족제약식이고, (1c)와 마찬가지로 변수 w_{jk}는 페널

www.dbpia.co.kr

티 계산 보조변수이다. $h(j,k) < d_{\min}$인 코드워드 (j,k)에 대한 $w_{jk}=1$이 되는 경우는 두 코드워드 j와 k가 둘 다 최적해에 포함되었음을 의미한다. 식 (1d)와 같이 두 노드 중 한 노드만 최적해에 포함하려는 제약식을 노드 packing 제약식으로 부른다. 목적함수에서 α_1,α_2는 사용자 지정 가중치이다. (1e), (1f)는 x_j,u_s 에 대한 이진값 제약식 및 비음부호 제약식이다. 따라서 목적함수는 코드워드 내부와 인접한 코드워드의 심볼값 차이를 최소화하고, 최소 해밍 거리를 유지하며, 심볼의 발생회수가 균등한 코드워드를 계산하는 모형이다.

식 (1)에서 집합 N을 방향이 없는 그래프(undirected graph)의 노드의 집합, $E=\{(j,k): j<k\in N\}$를 링크(link)의 집합으로 정의할 때, 모형 1은 그래프 $G=(N,E)$에서 노드가중치 c_j와 링크 가중치 c_{jk}의 총합을 최소화하고, 사용되는 심볼의 분포가 균등하며, 노드 packing 제약식 (1d)의 위배를 최소화하는 부분그래프(subgraph)를 찾는 문제이다. 모형 1은 최대 clique 발견 문제와 그래프 분할(graph partition) 문제를 포함하므로, NP-hard 문제이다[6]. 링크 가중치를 최대화하는 subclique 발견 문제와 노드 packing 제약식의 위반을 허용하는 일반적인 노드 packing 문제에 대하여 정수해가 만족하는 타당한 부등식(valid inequality)들과 분지할당 탐색기법(branch-and-bound algorithm)의 연산속도를 개선하는 알고리즘이 연구되었다[7,8].

4-레벨 코드의 경우, 코드워드 내부와 인접 코드워드간 심볼값 차이의 합으로 정의된 c_j,c_{jk} 대신에 인접 심볼값 차이가 허용기준 d_2,d_3를 초과하는 코드워드들과 코드워드쌍들의 집합을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$H_2=\{j\,|\,\max\{|a_{mj}-a_{nj}|\}>d_2,(m,n)\in N_0\} \quad (2)$$

$$H_3=\{(j,k)|\max\{|a_{mj}-a_{nk}|\}>d_3,(m,n)\in N_1\} \quad (3)$$

d_2,d_3는 심볼값의 최대차이의 상한을 정하기 위한 계수로서, 셀과 셀 사이에 급격한 심볼값 차이가 발생하는 것을 방지하기 위해 값을 정할 수 있다. 예를 들어, 이웃한 셀에 "0"과 "3"이 이웃하는 것을 방지하기 위해서는 $d_2=2$로 정하고, 식 (1d)와 마찬가지로, 제약식과 보조변수 s_{jk},t_j를 추가하면 최대심볼값 차이가 d_2,d_3 이하로 유지되는 코드워드들을 선택할 수 있다.

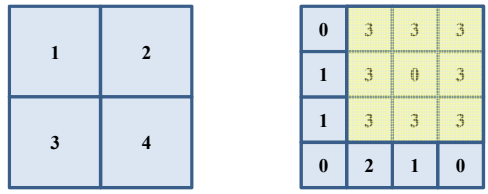

그림 2. 임의의 4개 코드워드 배열과 고립픽셀.
Fig. 2. Random arrangement of 4 codewords and isolated pixel pattern.

$$x_j-t_j\leqq 0, j\in H_2 \quad (4)$$

$$x_j+x_k-s_{jk}\leqq 1, (j,k)\in H_3 \quad (5)$$

식 (1a)의 두 번째 항은 $\sum_{j<k}c_{jk}x_jx_k$, 즉 x_jx_k 이차식을 포함하고 있다. 이러한 이차정수계획법 모형은 보조변수 $z_{jk}=x_jx_k$로 정의하고, 다음 추가 제약식을 도입하면 이진정수계획법 문제로 변환할 수 있다.

$$z_{jk}\leq x_j, z_{jk}\leq x_k, z_{jk}\geq x_j+x_k-1,\ \forall j<k \quad (6)$$

식 (6)의 추가제약식과 변수 z_{jk}를 도입할 경우, 집합 N이 커짐에 따라 최대 $O(|N|^2)$개의 제약식과 변수가 추가됨으로 연산속도가 느려진다. 따라서 이러한 이진정수계획법 모형은 $|N|$이 작은 경우 적합하다.

모형 (1)을 식 (6)을 사용하여 혼합정수계획법 모형으로 변환하는 경우, 다음과 같은 degree-제약식을 추가하여 연산속도를 감소시킬 수 있다.

$$\sum_{j<k}z_{jk}+\sum_{j>k}z_{kj}\leq 63x_k, \quad k\in N \quad (7)$$

식 (7)은 코드워드 k가 선택되는 경우, 노드 k의 인접한 노드의 최대개수를 제약하는 식이다.

Ⅲ. 고립픽셀과 정수계획법 모형

식 (1)을 이용하여 2D ISI 와 IPI 가 최소화되는 64개의 코드워드를 생성한 후, 선택된 코드워드에서 고립된 픽셀의 발생 여부를 다음과 같은 혼합 정수계획법 모형을 이용하여 검사할 수 있다. 그림 2의 오른쪽 그림 상단에는 4개의 코드워드가 임의로 배열되었을 때, 0 픽셀 주위에 모두 3 픽셀이 있는 고립된 픽셀을 보여준다. 아래에서 제안하는 모형은 주변이 0, 중앙에 3이 있는 고립된 픽셀에도 적용할 수 있다.

모형 (1)에서 선택한 64개의 코드워드들이 임의로

www.dbpia.co.kr

배열된 경우를 고려한다. 그림 2의 왼쪽은 4개의 코드워드가 2×2 형태로 배열되었을 때를 나타낸다. 고립된 픽셀의 발생여부는 이러한 2×2 형태로 임의의 코드워드를 배열하였을 때의 발생여부를 확인하면 가능하다. 그림 2의 오른 쪽 그림처럼, 4개 코드워드의 2×2 행렬이 구성된 경우, 고립된 픽셀의 발생여부는 전체 4×4개의 행렬에서 3×3 고립된 패턴의 발생여부를 검사하는 문제이다. 0-1 변수 $y_{kj}, k\in K=[4]$, $j\in N$ 은 그림 2의 왼쪽 2×2 행렬의 k에 코드워드 j가 위치함을 나타낸다. $z_{mn}, m\in[4], n\in[4]$은 4×4 행렬의 (m,n) 항의 심볼을 나타낸다. 3×3 고립된 픽셀 패턴은 3×3 행렬 $P_{ij}, i\in[3], j\in[3]$을 이용하여 표시한다. 고립된 픽셀의 검색은 3×3 행렬 P과 4×4행렬의 모든 3×3 부분행렬과의 L_1-거리의 최소, 즉

$$\min_{s\in[2],t\in[2]}\{\sum_{i,j=1}^{3}|P_{ij}-z_{r(i,s),c(j,t)}|\}$$

가 0이 되는 부분행렬이 있는지 여부를 판단하는 문제이다. 여기에서 $r(i,s), c(j,t)$는 변수 z의 행렬을 표시한다.

고립된 픽셀의 발생여부를 검색하는 문제는 다음과 같은 Minimin 정수계획법으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Min} \quad \min_{s,t}\{\sum_{ij=1}^{3}|P_{ij}-z_{s-1+i,t-1+j}|\} \tag{8a}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j\in N} y_{kj}=1, k\in K \tag{8b}$$

$$y_{kj}\leqq x_j, k\in K, j\in N \tag{8c}$$

$$z_{r(i,k),c(i,k)}=\sum_{j\in N} a_{ij}y_{kj}, k\in K,\ i\in M, \tag{8d}$$

$$y_{kj}\in\{0,1\}, \quad k\in[4], j\in N \tag{8f}$$

식 (8)에서 (8a)는 그림 2 왼쪽 2×2 행렬의 k에 임의의 코드워드 j가 위치함을 나타내고, (8c)는 64개의 선택된 코드워드만 2×2 배열에 포함될 수 있음을 나타낸다. (8c)에서 x_j는 데이터로 모형(1)의 해가 사용된다. (8d)는 (8b)에 따라 임의로 선택된 4개의 코드워드의 모든 픽셀이 4×4 행렬로 배열될 때, 각 항을 계산하는 식이다. 여기에서 $r(i,k), c(i,k)$는 코드워드 j가 k 위치에 있을 때, 코드 j의 셀 i 가 위치하는 행과 열을 나타낸다. 모형 (2)는 추가로 변수와 제약식을 도입하여 혼합정수계획법으로 변환할 수 있다.

Ⅳ. 계산 결과

모형 (1)의 이차정수계획법 문제는 비선형정수계획법 소프트웨어 BONMIN을 Algebraic Modeling Language AMPL과 결합하여 사용하였다[9][10]. 모형 (8)의 경우 IBM ILOG Cplex와 AMPL을 결합하여 해를 계산하였다[11]. 모형 (1)의 경우, $d_{\min}=2$인 경우, 사용된 변수의 수는 1,282개, (1e), (1f)를 제외한 제약식의 수는 1,027개이다. 고립된 픽셀을 검색하는 모형 (8)의 경우 사용된 변수는 1,040, (8f)를 제외한 제약식은 1,044개이다.

표 1에는 4-레벨 6/8 코드 및 2-레벨 6/8 코드에 대하여 $\alpha_1, \alpha_2, d_{\min}$의 값에 따른 목적함수와 해밍거리 위반한 정도를 기록하였다. 각 문제는 (코드종류, α_1, α_2, $d_{\min}$) 으로 표현되었다. 코드종류 4M은 2×2 행렬로 된 4-레벨 6/8 코드이고, 코드종류 8B는 4×2 행렬로 된 2-레벨 6/8 코드이다[4]. 표 1에서 "obj. value"는 모형 (1)의 목적값을 표시하고, v_1는 최적해에서 $\sum_{(j,k)\in H_1} w_{jk}$를 표시하고, $|H_1|$은 $h(j,k)<d_{\min}$이 되는 (j,k)의 개수를 표시한다. v_2, v_3는 최적해에서 식 (2), (3)을 위배하는 정도를 나타낸다. v_2, v_3는 4-레벨 코드인 문제 4M에 대하여만 계산하였다.

표 1에 포함된 7개의 문제 모두 식 (1c)의 보조변수 $u_s=0, \forall s$인 최적해를 구하였다. 따라서 각 심볼은 선택된 코드워드에서 4M의 경우 25%씩, 8B의 경우 50% 씩 사용되었다. 문제 (4M, 1, 1, 2)에서 , 목적함수는 4,115 이다. 이중 해밍거리를 위반한 정도, 즉 $\sum_{(j,k)\in H_1} w_{jk}$는 190 이고 이 때, (j,k) 중 해밍거리가 $d_{\min}$보다 작은 링크는 1,536이다. 이 해의 식 (2), (3)을 위반한 회수는 17, 223 이었다. (4M, 1, 1, 2)와 (4M, 0, 1, 2)를 비교할 때, $\alpha_1=0$으로 정하면 해밍거리 위배를 최소화하는 코드워드들을 선택할 수 있음을 알 수 있다. 또한 $d_{\min}$이 증가함에 따라, 해밍거리 위배 정도가 증가함을 알 수 있다. 문제 (8B,0,1,2)의 경우, 해밍거리 위배를 하지 않는 코드워드들의 조합을 계산하였다.

그림 3에는 문제 (4M, 0, 1, 2)와 (8B, 0, 1, 3)에 대하여, 식 (8)의 변수 $z_{r(i,k),c(i,k)}$값을 보여준다. 두 경우 모두 0 픽셀 주위에 3 혹은 1이 둘러싼 3×3 고립된 픽셀이 있는 코드워드들의 조합이 가능함을 알 수 있다. 모형 (8)은 단순히 (1)의 최적해에서 고립된 픽셀 패턴의 발생여부를 검색하는 용도 이외에 (1)과 결합하여 고립된 픽셀의 발생이 불가능한 코드워드 조합을 결정하는 모형을 위해 개발하였다.

www.dbpia.co.kr

표 1. 4-레벨 6/8 및 2-레벨 6/8 코드의 계산결과.
Table 1. Computation result for 4-level and 2-level 6/8 codes.

Problem	obj. value	v_1	$\|H_1\|$	v_2	v_3
(4M,1,1,2)	4,115	190	1,536	17	223
(4M,0,1,2)	12	12	1,536	24	780
(4M,1,0,2)	3,926	191	1,536	17	219
(4M,0,1,3)	400	400	8,448	26	767
(8B,1,1,2)	2,553	147	1,024	-	-
(8B,0,1,2)	0	0	1,024	-	-
(8B,0,1,3)	192	192	4,608	-	-

V. 결 론

본 연구에서는 2×2 행렬에 4개의 심볼을 저장하는 홀로그래픽 저장장치에서 코드워드 내부와 인접코드 간의 심볼값 차이가 적고, 각 심볼이 균등하게 사용되며, 주어진 해밍최소거리를 최대한 만족하는 코드워드 선택 문제를 정수계획법 모형으로 구성하였다. 또한 선택된 코드워드들의 조합에서 특정한 고립픽셀 패턴이 발생가능한지 검색하는 모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 정수계획법 모형들은 4-레벨 6/8 코드 및 2-레벨 6/8 코드에 적용되어 위에 언급한 조건들을 만족하는 코드워드들의 조합을 계산하였다. 고립된 픽셀의 발생여부를 검색하는 모형 (8)은 향후에 cutting plane을 발생시키는 부문제로 모형 (1)과 결합하여 통합모형으로 개발될 예정이다. 본 연구에서는 3x3 고립된 픽셀을 사용했지만, 어떤 형태의 고립픽셀 패턴을 적용하는 경우에도 모형 (1)과 (8)을 바로 적용할 수 있다. 본 연구에서 소개한 변조부호의 성능은 모의실험을 통한 BER측정을 추가로 필요로 한다.

2	3	3	3
3	3	0	3
3	3	3	3
0	3	2	1

1	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	0
0	1	0	0
1	1	1	1
0	1	1	1
1	1	1	1
1	1	0	0

그림 3. 고립된 픽셀이 검색된 모형(8)의 z 행렬
Fig. 3. z solution of (8) for the instances which have isolated pixels.

References

[1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, “Holographic data storage systems,” in *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, July 2004.

[2] V. Vadde and B. V. K. V. Kumar, “Channel modeling and estimation for intrapage equalization in pixel-matched volume holographic data storage,” *Appl. Opt*., vol. 38, no. 20, pp. 4374-4386, July 1999.

[3] J. Kim, J.-K. Wee and J. Lee, “Error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage,” *Japanese J. Appl. Phys*., vol. 49, Article no. 08KB04, Aug. 2010.

[4] J. Kim and J. Lee, “Error-correcting 6/8 modulation code for reducing two-dimensional intersymbol interference,” *Japanese J. Appl. Phys*., vol. 50, no. 9, pp. 09MB06, Sep. 2011.

[5] J. Kim and J. Lee, “Two-dimensional non-ioslated pixel modulation code for holographic data storage,” *J. KICS*, vol. 34, no. 2, pp. 163-168, Feb. 2009.

[6] M. R. Garey and D. S. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness,* W. H. Freeman and Co., 1979.

[7] H. D. Sherali and J. C. Smith, “A polyhedral study of the generalized vertex packing problem,” *Math. Programming*, vol. 107, no. 3, pp. 367-390, July 2006.

[8] E. M. Macambira and C. C. de Souza, “The

www.dbpia.co.kr

edge-weighted clique problem: valid inequalities, facets and polyhedral computations," *European J. Operational Research*, vol. 123, no. 2, pp. 346-371, June 2000.

[9] P. Bonami and J. Lee, *BONMIN 1.1 Users' Manual*, Retrieved Dec., 21, 2009, from http://projects.coin-or.org/Bonmin.

[10] R. Fourer, D. M. Gay, and B. W. Kernighan, *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*, Scientific Press, 1993.

[11] IBM, *IBM ILOG CPLEX V12.1: User's Manual for CPLEX*, Retrieved Dec., 19, 2009, from ftp://public.dhe.ibm.com/software/websphere/ilog/docs/optimization/cplex/ps_usrmancplex.pdf.

박 태 형 (Taehyung Park)

1986년 2월 고려대학교 산업공학과 학사
1989년 2월 고려대학교 산업공학과 석사
1998년 6월 Virginia Tech 산업시스템공학과 박사
2001년~현재 숭실대학교 산업정보시스템공학과 부교수
<관심분야> 정수계획법, 통신네트워크

이 재 진 (Jaejin Lee)

1983년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
1984년 12월 U. of Michigan, Dept. of EECS 석사
1994년 12월 Georgia Tech. Sch. of ECE 박사
1995년 1월~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원
1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신 연구소 책임 연구원
1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수
2005년 9월~숭실대학교 정보통신전자공학부 교수
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템

www.dbpia.co.kr