실제적인 분산 비디오 부호화를 위한 분산 소스 부호화 시스템의 피드백 지연 문제 개선 방안

신 승 식^{a)}, 신 상 윤^{a)}, 장 민^{a)}, 임 대 운^{b)}, 김 상 효^{a)†}

Improvement of Feedback Delay for Practical Distributed Source Coding

Seungshik Shin^{a)}, Sang-Yun Shin^{a)}, Min Jang^{a)}, Dae-Woon Lim^{b)}, and Sang-Hyo Kim^{a)†}

요 약

본 논문에서는 실제로 사용 가능한 분산 비디오 부호화 (Distributed Video Coding, DVC) 시스템을 구현하기 위하여 기존의 문제였던 높은 피드백 재전송 횟수에 의한 복원 지연문제를 개선하는 방법을 제안한다. 이는 각 압축률 영역에 맞추어 설계된 저밀도 패리티 검사 (Low-Density Parity-Check, LDPC) 부호를 사용함으로써 복원 성능을 높이고 각 부호가 복호에 실패할 경우 다른 부호율의 LDPC 부호를 구성하기 위한 소스 공개 (Source Revealing) 기법을 사용하여 피드백 전송 수를 줄임으로써 문제를 해결한다. 모의 실험 결과, 제안된 방법에 따른 DVC 방법은 기존 방법에 비해 57%의 복호 성능 개선 효과를 얻어 피드백 재전송 횟수를 50% 이상 감소시켰다.

Abstract

Because of the system delay caused by the number of feedback retransmission in Distributed Video Coding (DVC) scheme, it is difficult to realize practical DVC in many cases. In this paper low feedback retransmission Distributed Source Coding (DSC) scheme is proposed for practical DVC scheme based on Low-Density Parity-Check (LDPC) codes because DVC system is an specific application of DSC system. This DSC scheme is achieved by using different LDPC codes optimized in each different compression rate and using source revealing scheme. Optimized LDPC codes provide us much better decoding performance which causes the 57% reduced number of iteration. Consequently, the number of feedback retransmission is decreased by 50%.

Keyword : Distributed video coding, Distributed source coding, Low-density parity-check codes, Source revealing

1. 서 론

1973년에 Slepian-Wolf는 상관관계가 있는 둘 이상의 정보원 X와 Y에 대하여, 독립적으로 부호화 하고 결합하여 복호하는 경우에도 결합하여 부호화하고 결합 복호했을 경우와 마찬가지로 그 정보원들의 최대 압축률 $H(XY)$ 을 달성할 수 있음을 밝혔다^[1]. 이러한 이론을 바탕으로 하는 분

a) 성균관대학교 정보통신공학부

Dept. Information & Communication Eng., Sungkyunkwan University

b) 동국대학교 정보통신공학부

Dept. Information & Communication Eng., Dongguk University

† 교신저자 : 김상효 (iamshkim@skku.edu)

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술 개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [K1002142, 차세대 모바일 영상서비스를 위한 초경량 비디오 부호화 원천기술개발]

· 접수일(2011년10월28일), 수정일(2011년12월19일), 게재확정일(2011년12월20일)

산 소스 부호화 (distributed source coding, DSC) 시스템은 상호 협력 없이 독립적인 압축을 수행하는 Slepian-Wolf의 부호화기를 사용한다. 이 분산 소스 부호화의 특별한 경우인 비대칭적 분산 소스 부호화 (asymmetric DSC)는 두 정보원 X 와 Y 중에서 하나를 보조 정보원으로 사용하여 복호하는 방법이다. 만약 보조 정보 Y 를 자신만의 엔트로피인 $H(Y)$ 로 압축한다면 복호화기는 보조 정보 Y 를 온전히 사용할 수 있다. 따라서 다른 정보원 X 를 부호화하는 부호화기는 X 의 복원 시 Y 가 주어진다 가정 하에 X 를 조건적 엔트로피 $H(X|Y)$ 로 압축할 수 있다. 1976년에 Wyner는 이와 같이 보조 정보가 주어졌을 때 상관관계가 있는 정보원을 압축하는 문제에서 채널 용량 (channel capacity)을 달성하는 오류정정부호를 이용하여 이론적 압축 한계를 달성할 수 있음을 밝혔다^[2]. 이는 오류정정부호가 분산 소스 부호화의 성능에 큰 영향력을 갖는다는 것을 의미한다. 분산 비디오 부호화 (distributed video coding) 시스템은 분산소스 부호화 시스템의 실제적인 응용 기술로써 연속된 프레임들의 높은 상관 관계를 이용하는 영상 부호화 기술이다. 본 논문에서는 이 분산 비디오 부호화 시스템의 복호 지연 문제를 해결하기 위해 분산 소스 부호화 시스템에 사용되는 오류정정부호의 개선 방안을 제안한다.

우수한 성능의 분산 소스 부호화 시스템은 채널 용량에 접근하는 오류정정 부호를 사용하여 구현될 수 있는데, 이러한 오류정정 부호로 저밀도 패리티 검사 (Low-density parity -check, LDPC) 부호가 있다. LDPC 부호를 사용한 분산 소스 부호화 시스템의 부호화기는 정보원을 압축하여 압축된 정보인 신드롬 (syndrome)을 복호화기에 전달한다. 그리고 복호화기는 보조 정보와 전달받은 신드롬을 가지고 오류정정 과정을 거쳐 정보를 복원한다. 이 때, 전송되는 신드롬의 양이 너무 적으면 복원에 성공할 가능성이 낮아지고, 반대로 신드롬이 너무 많으면 압축 성능이 저해된다. 따라서 부호화기는 보조 정보와의 상관관계에 따라 정보원을 적당한 양의 신드롬으로 압축해야 한다. 이 때 정보원의 비트수와 신드롬의 수의 비를 압축률이라고 한다. 하지만 만약 정보원과 보조 정보 사이의 상관관계가 수시로 변하는 분산 비디오 부호화 시스템과 같은 경우에는 압축률을 고정된 값으로 사용할 수 없다.

이러한 문제를 해결하기 위해 2006년에 Varodayan은 압축률-적응적 (rate-adaptive) LDPC Accumulated (LDPCA) 부호를 제안하였다^[4]. LDPCA 부호는 각각 다른 압축률을 갖는 LDPC 부호들의 유기적인 집합으로, 상황에 따라 서로 다른 압축률의 LDPC 부호를 구성할 수 있는 특징을 갖

그림 1. (a) 신드롬 분할을 통한 부호율 적응 방법 : k개의 신드롬을 각각 2개로 나눔, (b) 소스 공개를 이용한 부호율 적응 방법 : k개의 정확한 정보비트를 전달 받고 해당 변수노드를 지움
 Fig. 1. (a) Rate adaptive scheme using syndrome splitting : splitting k syndromes in half, (b) Rate adaptive scheme using source revealing : erase corresponding variable nodes after receiving exact k source bits

는다. 하지만 LDPCA 부호를 구성하는 개개의 LDPC 부호(member LDPC codes) 들은 구조적으로 서로 종속적이기 때문에, 각 부호들을 최적화하기 어려운 문제가 있다. 이처럼 최적화되지 않은 LDPC 부호는 해당 압축률에 최적화된 LDPC 부호에 비해 낮은 성능을 가지며, 이로 인해 복원 성공 확률이 크게 낮아진다. LDPC 부호의 복원 성공 확률이 낮을수록 더 많은 신드롬을 전송하게 되어 압축률이 낮아지고, 또 지속적으로 복원 실패를 알리기 때문에 복원 지연 문제도 발생한다. 특히 분산 소스 부호화에서의 많은 피드백 재전송에 따른 복원 지연 문제는 실제적인 분산 비디오 부호화 시스템을 구현하는데 있어 결정적인 문제로 간주된다.

이 논문에서는 구조적 종속 없이 독립적으로 최적화된 LDPC 부호를 사용하여 분산 소스 부호화 시스템을 구현하는 방법을 제안한다. 또한 복호를 실패할 경우를 대비하여 소스 공개(source revealing)을 통해 압축률을 적응적으로 변화시키는 방법을 제안한다. 이는 LDPCA 부호를 사용하는 경우와 비교하여 피드백 전송 횟수를 줄이며, 복호 복잡도를 크게 낮출 뿐만 아니라 압축률 개선 효과도 갖는다. 이러한 결과를 바탕으로 실시간 분산 비디오 부호화와 같은 실질적인 분산 소스 부호화 시스템을 구현할 수 있다. 본 논문의 2장에서는 부호율에 적응적으로 동작하는 LDPC 부호의 설계 방안에 대하여 알아보고, 3장에서는 각

압축률에서 독립적으로 최적화된 LDPC 부호를 기반으로 하는 새로운 분산 소스 부호화 방법을 소개한다. 4장에서는 제안하는 복호 방법을 기존의 LDPCA 부호를 사용한 분산 소스 부호화 시스템과 비교해 보고 5장에서 이 논문의 결론을 짓는다.

II. 부호율 적응적 LDPC 부호

개개의 LDPC 부호는 패리티 검사 행렬 (parity-check matrix) 로 정의되며, 이는 이분 그래프 (bipartite graph) 로 표현될 수 있다. 이러한 이분 그래프는 변수 노드 (variable node) 와 검사 노드 (check node), 그리고 이들을 잇는 연결선으로 구성된다. 이 그래프에서 변수 노드는 메시지 비트와 일대일로 대응되며, 검사 노드는 변수 노드들의 대수적 관계를 나타내는 신드롬 검사식 (syndrome-check equation) 을 의미한다. 변수 노드의 수를 n , 검사 노드의 수를 m 이라고 했을 때 LDPC 부호의 부호율은 $1 - m/n$ 으로 계산되며, 압축률은 m/n 으로 정의된다. LDPC 부호를 이용하여 신드롬 압축을 수행할 때 개개의 신드롬은 각 검사 노드와 일대일로 대응된다. 즉, 신드롬의 값은 대응하는 검사 노드에 연결된 모든 변수 노드의 이진 합 (modulo-2 sum)

그림 2. 평균 피드백 전송 횟수 비교

Fig. 2. The average number of feedback transmission

그림 3. 평균 신뢰-전파 복호 수행 횟수 비교

Fig. 3. The average number of belief-propagation iteration

이다.

LDPC 부호의 부호율-적응 (rate-adaptation) 기능은 추가적으로 수신한 신드롬으로 이미 구성되어 있는 LDPC 부호의 부호율을 변화시키는 것이다. 이 때 그래프를 구성하는 검사 노드의 수는 수신한 전체 신드롬의 수와 같다.

대표적인 LDPC 부호의 부호율-적응 방법은 신드롬 분할 (syndrome splitting) 방법이다^[4]. 이는 주어진 부호율의 LDPC 부호에서 정해진 최대 반복 복호 횟수 까지 복호를 수행했지만 복호에 실패한 경우에 k 개의 추가적인 신드롬을 전송받아 대응하는 위치의 신드롬을 분할하여 부호율을 낮추는 방법이다. 예를 들어 그림 1-(a)의 예에서와 같이 추가 신드롬 s_a 가 전송되었다면 검사노드 c_a 의 검사식은 $c_a = y_5 + y_7$ 이 되며, 기존 분할된 검사노드 c_1 의 검사식은 $c_1 = y_2 + y_4 + y_5 + y_7 + (y_5 + y_7) = y_2 + y_4$ 가 된다. 이와 같이 복호화기는 k 개의 추가적으로 신드롬을 전송받아 $1-m/n$ 부호율을 갖는 LDPC 부호를 $1-(m+k)/n$ 의 부호율을 갖는 LDPC 부호로 바꾸어 다시 복호를 시도한다.

또 다른 LDPC 부호의 부호율 적응적 방법은 소스 공개 (Source Revealing) 방법이다^[5]. 이 방법은 신드롬의 수를 늘리는 신드롬 분할 방법과는 달리 변수 노드의 수를 줄여 부호율을 낮춘다. 복호에 실패한 복호화기가 피드백 경로 (feedback path)를 통해 부호화기에 복원 실패를 알리면, 부

호화기는 신드롬 대신 메시지 비트의 정확한 값을 전달한다. 메시지 비트를 수신한 복호화기는 복원하고자 하는 비트의 정확한 값을 일부 수신하였기 때문에 이를 복원할 필요가 없으므로 대응하는 변수 노드들을 지운다. 단, 변수 노드를 지우기 전에 이에 연결된 검사 노드에 대응하는 신드롬을 알맞게 보정해주어야 한다. 예를 들어 그림 1-(b)의 소스 공개 부호율 적응적 방법은 $1-m/n$ 의 부호율의 LDPC 부호가 복호 실패 후에 전달받은 정확한 변수 노드 값을 통해 부호율을 $1-m/(n-k)$ 로 바꾼다.

III. 최적화된 LDPC 부호를 사용한 분산 소스 부호화

기존의 LDPCA 방법에서는 신드롬 분할 방법을 사용하여 다른 부호율을 가진 LDPC 부호를 만들어 부호율 적응적인 특성을 갖는다. 이렇게 생성된 LDPC 부호들은 서로 구조적인 종속 관계를 갖기 때문에 각 부호의 해당 부호율에서 최적화되기 어렵다. 최적화 되지 않은 LDPC 부호는 동일한 부호율을 갖는 최적화된 LDPC 부호와 비교했을 때 복호 성공 확률이 현저히 낮기 때문에 피드백 전송 요청 횟수가 많아진다. 이러한 문제는 실질적인 분산 소스 부호

그림 4. 기존의 LDPCA방법을 사용한 분산 소스 부호화 시스템과 제안된 방법을 이용한 분산 소스 부호화 시스템의 평균 압축률 비교
Fig. 4. Average compression rate comparison between original and proposed scheme

화 시스템 구현에 있어서 가장 큰 문제로 지적되는 시스템 지연에 직접적인 영향을 끼친다. 본 논문에서는 각 압축률에서 최적화된 LDPC 부호를 사용하여 복원 성능을 높이고, 복호 실패시 소스 공개 방법을 사용하여 부호율 적응 과정을 수행하는 새로운 분산 소스 부호화 시스템을 제안한다.

총 L 개의 독립적인 LDPC 부호가 존재하고 각 부호의 인덱스를 i 라고 했을 때, 각 LDPC 부호를 목표 압축률인 $H(X|Y) = i/L + \alpha$ 에 맞추어 설계한다. 이 때 α 는 Slepian-Wolf가 제안한 압축률의 이론적 한계 $H(X|Y)$ 와 실제 오류 정정부호가 달성하는 압축률의 성능 차이를 고려하여 실험적으로 결정한다. 만약 각 LDPC 부호가 해당 부호율에서 복호에 실패하였을 경우에는 소스 공개 방법을 사용하여 추가적인 신드롬을 전송받고 다시 복호를 시작한다.

제안하는 분산 소스 부호화 방안은 다음과 같은 절차를

갖는다.

1. 부호화기는 복호기에서 필요한 부호율에 최적화된 LDPC 부호의 색인 i 를 요청한다.
2. 복호화기는 압축하고자 하는 정보원 X 와 보조 정보원 Y 의 예측된 상관관계 $H(X|Y)$ 에 일정량의 부호율 보정 값 α 를 더한 압축률 $H(X|Y) + \alpha$ 에 최적화된 LDPC 부호를 선택한 후, 해당 부호의 색인을 부호화기에 전달한다.
3. 부호화기는 색인 i 에 의해 선택된 부호로 신드롬을 생성해서 복호기에 전송한다.
4. 복호기는 정보원 X 의 복호를 시도한다. 만약 복호에 실패하였을 경우 소스 공개를 통해 낮은 부호율의 부호를 만들기 위해 피드백 채널을 통해 정보 비트를 요청한다.
5. 부호기가 복호기에 $k = n/L$ 개의 정보비트들을 전송한다.

표 1. LDPC 부호의 차수 분포

Table 1. Degree distribution of LDPC codes

$H(X Y)$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
R	9/66	16/66	22/66	29/66	35/66	42/66	48/66
λ_2	0.06201	0.12954	0.13735	0.16667	0.22137	0.23077	0.31983
λ_3	0.28825	0.15166	0.30653	0.29167	0.28053	0.25962	0.21109
λ_4		0.22749				0.03846	0.02559
λ_5			0.00838	0.00868		0.04808	0.02132
λ_6	0.00613				0.02290		
λ_7			0.02345	0.06076		0.08077	0.20896
λ_8		0.02528	0.05360	0.19444	0.22901		
λ_9	0.00613		0.24121				
λ_{10}	0.01704	0.01580					
λ_{11}	0.44225						
λ_{12}		0.15166			0.04580		
λ_{13}					0.02481		
λ_{14}	0.00477				0.02672		
λ_{15}	0.01022	0.23697				0.20192	
λ_{16}						0.03077	
λ_{17}			0.02848			0.03269	
λ_{18}					0.03435		
λ_{19}	0.00647	0.03002					
λ_{20}	0.15673	0.03160	0.20101	0.27778	0.11450	0.07692	0.21322
ρ_{av}	40.7683	19.7899	13.5863	9.9375	7.5191	6.21538	4.90618

6. 복호가 성공할 때까지 4번과 5번을 반복한다.

IV. 모의 실험 결과

본 논문에서는 각 압축률에서 최적화된 부호를 사용하고 복호에 실패할 경우 소스 공개 기법을 사용하는 분산소스 부호화를 구현하고, 이를 기존의 LDPCA 부호에 비교하였다. 모의 실험에는 6336 길이의 정보원 X 과 보조 정보원 Y 를 사용하고 각 LDPC 부호에서 100회 신뢰전과 반복 복호 기법을 사용하였다. 복호에 사용될 LDPC 부호들을 표 1의 차수 분포를 참조하여 각 부호율에 최적화된 LDPC 부호를 사용한다. 각 부호들은 각각의 목표 압축률인 $H(X|Y) = i/66 + \alpha, 1 \leq i \leq 48$ 에 최적화 되어 설계되어 있고, 이론값과 실제 압축 성능을 보정해주는 압축률 보정 α 는 이 실험에서 2/66의 값을 가진다. 이 때 압축률의 증가 크기는 모두 같은 크기($6336/66 = 96$)를 사용한다. 소스 공개에 의해 갱신된 부호는 저-상관 영역에서 좋은 성능을 나타내기 때문에 압축률 $H(X|Y) \geq 48/66$ 인 경우에는 48번째 LDPC 부호를 그대로 사용한다.

그림 3은 100회 실험의 평균 신뢰-전과 반복 복호 횟수를 나타낸다. 제안된 방법에서의 반복 복호 횟수는 LDPCA 방법에 비하여 57% 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 복호 성능 개선은 그림 2에서의 평균 피드백 전송 횟수를 50% 이상 줄이는 결과로 나타났다.

그림 4은 각 방법에서 발생하는 추가 비트 전송량을 고려한 평균 압축률 성능을 나타낸 그래프이다. 제안된 방법은 기존의 LDPCA 방법에 비하여 전체적으로 좋은 압축 성능을 보이며, 특히 저-상관 영역에서 뛰어난 압축 성능을 보여준다. 결과적으로 제안된 분산 소스 부호화 시스템은 Slepian-Wolf의 이론적 압축률 한계에 평균 5.6% 안에서 동작하는 것으로 나타났다.

V. 결 론

기존의 LDPCA 부호를 기반으로 하는 분산 소스 부호화

시스템은 개개의 LDPC 부호가 해당 압축률에 최적화되기 어려웠다. 이는 각 부호의 성능 저하를 야기하여 복원 지연을 유발하였으며, 이로 인해 분산 소스 부호화를 기반으로 하는 현실성 있는 분산 비디오 부호화 시스템을 구현하는데 어려움을 초래하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각 부호율마다 독립적으로 최적화된 LDPC 부호를 사용하여 복원 성공률을 높이고 실패할 경우 소스 공개 기법을 사용하여 복호하는 방법을 제안하였다. 결과적으로 제안한 방법은 기존 LDPCA 기반의 분산 소스 부호화 시스템에 비교하여 57%의 복호 성능 개선 효과를 나타냄에 따라 피드백의 수가 50% 이상 줄어들어 실제적인 분산 비디오 부호화 시스템 구현에 기여한다.

제안된 방법은 정보들 사이의 정확한 상관관계 예측이 가능한 경우에만 사용할 수 있다는 한계를 갖는다. 그리고 실험적인 부호율 보정값 α 를 좀더 분석적으로 접근하기 위하여 유한 길이 스케일링 분석기법을 사용하는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. D. Slepian and J. K. Wolf, "Noiseless coding of correlated information sources," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 19, no. 4, pp. 471-480, July 1973.
- [2] A. D. Wyner, "Recent results in the shannon theory," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 20, no. 1, pp. 2-10, Jan. 1976.
- [3] A. D. Liveris, Z. Xiong, and C. N. Georgiades, "Compression of binary sources with side information at the decoder using LDPC codes," IEEE Comm. Lett., vol 6, no. 10, pp. 440-442, Oct. 2002.
- [4] D. Varodayan, A. Aaron, and B. Girod, "rate-adaptive codes for distributed source coding," EURASIP Signal Processing Journal, Special Section on Distributed Source Coding, vol. 86, no. 11, pp. 3123-3130, Nov. 2006.
- [5] J. A. Eckford and W. Yu, "Rateless Slepian-Wolf codes," in Proc. Asilomar, Pacific Grove, CA, Nov. 2005.
- [6] S. -Y. Chung, G. D. Forney Jr., T. J. Richardson, and R. Urbanke, "On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the shannon limit," IEEE Comm. Lett., vol. 5, no. 2, pp. 58-60, Feb. 2001.
- [7] R. Y. Shao, S. Lin, and M. P. C. Fossorier, "Two simple stopping criteria for turbo decoding," IEEE Trans. Comm., vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.
- [8] S. -Y. Shin, Min Jang, J. W. Kang, and S. H. Kim, "New distributed Source coding scheme based on LDPC codes with source revealing rate-adaption," IEEE PacRim, pp. 917-920, Aug. 2008.

저 자 소 개

신 승 식

- 2011년 2월 : 성균관대학교 전자 전기공학과
- 2011년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 휴대폰학과 석사과정
- 주관심분야 : 오류정정부호, 정보이론, 부호이론

신 상 윤

- 2010년 2월 : 성균관대학교 전자 전기공학과
- 2010년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 휴대폰학과 석사과정
- 주관심분야 : 오류정정부호, 정보이론, 부호이론

장 민

- 2009년 2월 : 성균관대학교 전자 전기공학과
- 2011년 2월 : 성균관대학교 휴대폰학과 석사
- 2011년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 휴대폰학과 박사과정
- 주관심분야 : 오류정정부호, 정보이론, 부호이론

임 대 운

- 1994년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
- 1997년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
- 2006년 8월 : 서울대학교 전자·컴퓨터공학부 박사
- 1995년 9월 ~ 2002년 8월 : LS산전(주) 중앙 연구소 선임 연구원
- 2006년 9월 ~ 현재 : 동국대학교 IT학부 조교수
- 주관심분야 : OFDM, 부호이론, 시공간 부호, 압축 센싱

김 상 호

- 1998년 2월 : 서울대학교 전기공학부
- 2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사
- 2004년 2월 : 서울대학교 전자·컴퓨터공학부 박사
- 2004년 3월 ~ 2006년 7월 : 삼성전자, 책임연구원
- 2006년 8월 ~ 2007년 8월 : 박사후 연구원(USC)
- 2007년 9월 ~ 2011년 9월 : 성균관대학교 정보통신공학부 조교수
- 2011년 10월 ~ 현재 : 성균관대학교 정보통신공학부 부교수
- 주관심분야 : 오류정정부호, 다중 안테나 시스템, 시퀀스, 협력 통신