

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)(11) 공개번호 10-2025-0083934
(43) 공개일자 2025년06월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 30/27 (2020.01) G06F 111/06 (2020.01)
G06F 111/10 (2020.01) G06N 10/60 (2022.01)
(52) CPC특허분류
G06F 30/27 (2020.01)
G06N 10/60 (2025.05)
(21) 출원번호 10-2023-0172751
(22) 출원일자 2023년12월01일
심사청구일자 2023년12월01일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
김형진
서울특별시 금천구 시흥대로47길 43, 9동 1205호
(시흥동, 럭키아파트)
김규리
경기도 안양시 동안구 동안로 11, 710동 1501호(호계동, 무궁화코오롱, 건영아파트)
(74) 대리인
양성보

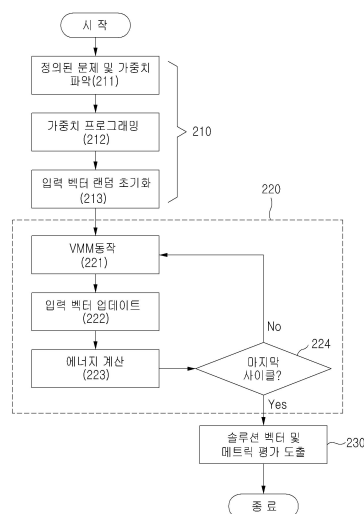
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 이징 문제 해결을 위한 가중치 프로파일 설계

(57) 요약

이징 솔버 시스템 및 그 동작 방법이 제시된다. 본 발명에서 제안하는 이징 솔버 시스템의 동작 방법은 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 설정부를 통해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 단계, 가중치 프로그래밍부를 통해 상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계 및 출력부를 통해 상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

G06F 2111/06 (2020.01)

G06F 2111/10 (2020.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711183491
과제번호	2020M3H5A1081111
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	원천기술개발사업
연구과제명	[Ezbaro] 대기환경 감지 및 분류를 위한 멤리스터 기반 하드웨어 인공지능 기술
과제수행기관명	인하대학교
연구기간	2023.01.30 ~ 2024.01.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711183638
과제번호	2021R1C1C1014530
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	우수신진연구
연구과제명	[Ezbaro] 3차원 적층형 멤리스터 크로스바 어레이 구조를 이용한 물리적 복제 불가 함수 및 하드웨어 보안 시스템 개발
과제수행기관명	인하대학교 산학협력단
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345374178
과제번호	2022R1A6A1A03051705
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국기초과학지원연구원
연구사업명	중점연구소
연구과제명	[Ezbaro] 3D 나노융합소자 연구 센터
과제수행기관명	인하대학교 산학협력단
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 설정부를 통해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 단계;

가중치 프로그래밍부를 통해 상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계; 및

출력부를 통해 상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력하는 단계

를 포함하는 이징 솔버 시스템의 동작 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 설정부를 통해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 단계는,

상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 이징 모델 및 홉필드 네트워크로 모델링하고, 상기 최대 절단 문제의 절단 수 또는 가중치 합을 최대로 하는 에너지 함수의 최소 지점을 찾기 위한 가중치의 프로파일의 가중치 범위를 설정하는

이징 솔버 시스템의 동작 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 가중치 프로그래밍부를 통해 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계는,

상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 모델링한 이징 모델에서 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)의 최소지점에 도달하기 위한 바이너리 입력에 대한 확률적 결정을 위해 노이즈 양을 결정하는 가중치 프로파일을 이용하여 가중치를 계산하는

이징 솔버 시스템의 동작 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 가중치 프로그래밍부를 통해 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계는,

상기 해밀토니안 함수의 최소지점에 도달하기 위한 노이즈 양을 결정하기 위한 가중치의 범위 및 가중치의 정확도를 포함하는 변수를 갖는 가중치 프로파일을 이용하여 프로그래밍된 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이에서의 이징 모델의 동작을 수행하고, 상기 결정된 노이즈 양에 따른 메모리 어레이의 저항 상태를 이용하여 상기 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산하는

이징 솔버 시스템의 동작 방법.

청구항 5

조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 설정부;

상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 가중치 프로그래밍부; 및

상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력하는 출력부를 포함하는 이징 솔버 시스템.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 설정부는,

상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 이징 모델 및 홉필드 네트워크로 모델링하고, 상기 최대 절단 문제의 절단 수 또는 가중치 합을 최대로 하는 에너지 함수의 최소 지점을 찾기 위한 가중치의 프로파일의 가중치 범위를 설정하는

이징 솔버 시스템.

청구항 7

제5항에 있어서,

상기 가중치 프로그래밍부는,

상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 모델링한 이징 모델에서 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)의 최소지점에 도달하기 위한 바이너리 입력에 대한 확률적 결정을 위해 노이즈 양을 결정하는 가중치 프로파일을 이용하여 가중치를 계산하는

이징 솔버 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 가중치 프로그래밍부는,

상기 해밀토니안 함수의 최소지점에 도달하기 위한 노이즈 양을 결정하기 위한 가중치의 범위 및 가중치의 정확도를 포함하는 변수를 갖는 가중치 프로파일을 이용하여 프로그래밍된 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이에서의 이징 모델의 동작을 수행하고, 상기 결정된 노이즈 양에 따른 메모리 어레이의 저항 상태를 이용하여 상기 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산하는

이징 솔버 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 메모리 반도체 어레이 구조를 통해 홉필드 네트워크(Hopfield Neural Network; HNN) 기반의 효율적인 이징 솔버 플랫폼 구현을 위한 가중치 프로파일 설계 기술에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 정보통신기술(Information & Communication Technology; ICT)의 확산과 실생활 문제를 디지털 장치를 통해 해결하고자 하는 디지털 혁신(Digital Transformation; DX) 산업에 대한 수요가 증가하고 있다.

[0003] 이에 한 예시로 이징 머신을 통한 조합 최적화 문제 해결이 있다. 이는 물류 비용 감축, 반도체 회로의 레이아웃을 고안한 집적도 향상, 최단 거리 계산 문제가 수학적으로 모델링 되어 최대/최소의 목적을 이루기 위해 하드웨어로 최적의 답을 구해낸다. 이는 기존 CPU 기반 컴퓨팅 기술 대비 다양한 문제를 쉽게 정식화할 수 있으며

대규모 문제를 단시간 내에 해결할 수 있다는 장점을 갖는다. 특히, 노이즈를 이용한다는 점에 있어서 정확한 아날로그 컴퓨팅 구현에 대한 종래기술의 물질, 공정, 신호처리 등의 노력으로부터 벗어날 수 있다는 장점도 갖는다.

선행기술문헌

비특허문헌

- [0004] (비특허문헌 0001) [1] Cai, F., Kumar, S., Van Vaerenbergh, T. et al. Power-efficient combinatorial optimization using intrinsic noise in memristor Hopfield neural networks. Nat Electron 3, 409-418 (2020). doi <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0436-6>

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0005] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 이징 솔버 플랫폼 구현을 위한 가중치 프로파일 설계 기법을 제공하는 데 있다. 본 발명은 메모리 반도체 어레이 구조를 통해 홉필드 네트워크(Hopfield Neural Network; HNN) 기반 효율적인 이징 솔버 플랫폼 구현을 위한 가중치 프로파일 설계 기법을 제안한다. 이징 문제의 해답, 다시 말해 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)의 최소지점에 도달하기 위해 바이너리 입력에 대한 확률적인 결정 과정이 요구되며, 이때 구현되는 메모리 반도체 소자에 적절한 노이즈 양이 요구된다. 따라서 정의되는 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위해 노이즈 양을 결정하는 적절한 가중치 프로파일(예를 들어, 변수 1: 범위, 변수 2: 정확도)의 제시를 통해 효율적인 이징 솔버 동작을 수행하고자 한다.

과제의 해결 수단

- [0006] 일 측면에 있어서, 본 발명에서 제안하는 이징 솔버 시스템의 동작 방법은 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 설정부를 통해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 단계, 가중치 프로그래밍부를 통해 상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계 및 출력부를 통해 상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력하는 단계를 포함한다.
- [0007] 상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 설정부를 통해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 단계는 상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 이징 모델 및 홉필드 네트워크로 모델링하고, 상기 최대 절단 문제의 절단 수 또는 가중치 합을 최대화 하는 에너지 함수의 최소지점을 찾기 위한 가중치의 프로파일의 가중치 범위를 설정한다.
- [0008] 상기 가중치 프로그래밍부를 통해 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계는 상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 모델링한 이징 모델에서 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)의 최소지점에 도달하기 위한 바이너리 입력에 대한 확률적 결정을 위해 노이즈 양을 결정하는 가중치 프로파일을 이용하여 가중치를 계산한다.
- [0009] 상기 가중치 프로그래밍부를 통해 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계는 상기 해밀토니안 함수의 최소지점에 도달하기 위한 노이즈 양을 결정하기 위한 가중치의 범위 및 가중치의 정확도를 포함하는 변수를 갖는 가중치 프로파일을 이용하여 프로그래밍된 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이에서의 이징 모델의 동작을 수행하고, 상기 결정된 노이즈 양에 따른 메모리 어레이의 저항 상태를 이용하여 상기 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산한다.
- [0010] 또 다른 일 측면에 있어서, 본 발명에서 제안하는 이징 솔버 시스템은 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 설정부, 상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일

을 업데이트하는 가중치 프로그래밍부 및 상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력하는 출력부를 포함한다.

발명의 효과

[0011] 본 발명의 실시예들에 따르면, 두 가지 변수를 갖는 가중치 프로파일을 바탕으로 프로그래밍 된 메모리 어레이 기반 HNN으로 이징 문제를 효율적으로 해결할 수 있다. 기존 메모리 소자에서 지양하는 상태 중첩(overlap)과 달리, 본 발명의 실시예에 따른 이징 솔버 시스템은 하드웨어 자체에서 발생하는 노이즈를 이용하여 문제를 푼다. 노이즈 신호에 대해 영향이 큰 높은 소자의 저항 상태와 노이즈 영향을 작게 받는 낮은 소자의 저항 상태를 고려하여, 소자의 상태로 정의되는 가중치가 높은 저항 상태에 몰려있을수록, 더 높은 노이즈 신호를 기대할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0012] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑 과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 이징 솔버 시스템의 동작 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 저항성 변화 메모리 크로스바 어레이의 스택을 나타내는 예시도이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 최대 절단 문제에 대해 랜덤으로 생성한 인스턴스를 나타내는 예시도이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 가중치 프로파일의 최적화된 프로그래밍을 설명하기 위한 도면이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 이징 솔버 시스템의 구성을 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0013] 본 발명은 메모리 반도체 어레이 구조를 통해 홉필드 네트워크(Hopfield Neural Network; HNN) 기반 효율적인 이징 솔버 플랫폼 구현을 위한 가중치 프로파일 설계 기술을 제안한다. 이징 문제의 해답, 다시 말해 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)의 최소지점에 도달하기 위해 바이너리 입력에 대한 확률적인 결정 과정이 요구되며, 이때 구현되는 메모리 반도체 소자에 적절한 노이즈 양이 요구된다. 따라서 정의되는 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위해 노이즈 양을 결정하는 적절한 가중치 프로파일(예를 들어, 변수 1: 범위, 변수 2: 정확도)의 제시를 통해 효율적인 이징 솔버 동작을 수행할 수 있다.

[0014] 본 발명의 실시예에 따르면, 두 가지 변수를 갖는 가중치 프로파일을 바탕으로 프로그래밍 된 메모리 어레이 기반 HNN으로 이징 문제를 효율적으로 해결하고자 하는 발명이다. 기존 메모리 소자에서 지양하는 상태 중첩(overlap)과 달리, 본 발명의 실시예에 따른 이징 솔버 시스템은 하드웨어 자체에서 발생하는 노이즈를 이용하여 문제를 푼다. 노이즈 신호에 대해 영향이 큰 높은 소자의 저항 상태와 노이즈 영향을 작게 받는 낮은 소자의 저항 상태를 고려하여, 소자의 상태로 정의되는 가중치가 높은 저항 상태에 몰려있을수록, 더 높은 노이즈 신호를 기대할 수 있다. 이는 HNN의 에너지 함수의 최소지점에 더 효율적으로 도달할 수 있도록 한다. 메모리 어레이 내 가중치 프로파일에 따른 노이즈 응용 기술은 조합 최적화 문제(Combinatorial Optimization Problem, COP)가 적용되는 사회 전반적인 문제(예를 들어, 최단 거리 문제, 물류 비용 결정, VLSI 레이아웃 결정 등)에서 응용될 수 있다. 이하, 본 발명의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0016] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑 과정을 설명하기 위한 도면이다.

[0017] 도 1(a)는 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 설명하기 위한 도면이다.

[0018] 최대 절단(Max-cut) 문제는 N개의 노드($\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$)로 구성된 그래프 구성에서 두 개의 부분집합으로 나눌 때 두 부분집합 사이의 연결된 선의 수 또는 선이 나타내는 가중치 값이 최대한 많거나 큰 절단(cut)을 찾는 문제이다.

[0019] 도 1(b)는 이러한 최대 절단 문제를 이징 모델(110) 및 홉필드 네트워크(120)로 모델링하는 과정을 설명하기 위한 도면이다.

- [0020] 즉, 절단 수 또는 가중치 합을 최대로 가져가려는 목적은 홉필드 네트워크에서 정의되는 에너지 함수의 최소 지점일 때의 입력 X 의 조합을 찾는 것과 같은 문제에 해당한다.
- [0021] 이징 문제의 해답, 다시 말해 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)(110)의 최소지점에 도달하기 위해 바이너리 입력에 대한 확률적인 결정 과정이 요구되며, 이때 구현되는 메모리 반도체 소자에 적절한 노이즈 양이 요구된다. 따라서 정의되는 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위해 노이즈 양을 결정하는 적절한 가중치 프로파일(예를 들어, 변수 1: 범위, 변수 2: 정확도)의 제시를 통해 효율적인 이징 솔버 동작을 수행할 수 있다.
- [0022] 도 1(c)는 에너지 함수의 최적점을 찾기 위한 메모리 소자로 구성된 어레이 구조(130)를 나타내는 도면이고, 도 1(d)는 메모리 어레이 가중치 프로파일 설계를 위한 메모리 어레이로의 맵핑 과정을 설명하기 위한 도면이다.
- [0023] 메모리 소자로 구성된 어레이 구조에서 워드라인(Wordline; WL) 방향으로 이진 형태의 입력 조합을 인가할 때 비트라인(Bitline; BL) 전류는 정의된 홉필드 에너지의 음의 그라디언트 값($-\Delta E_i = -\partial E / \partial x_i$)를 의미한다. 이 비트라인 전류가 0보다 큰 값인지 또는 작은 값인지에 따라 해당 순서의 입력 X_i 가 +1 또는 -1로 결정된다. 이때 국소 최저치(local minima)에서 벗어나기 위해 크기 비교 시 확률적인 요소가 들어가야 한다. 소프트웨어 관점에서는 accept probability $P(X_i=1) = \exp(-\Delta E_i/kT)$ 를 적용하나, 하드웨어 관점에서는 비교기(comparator)의 입력이 확률성을 띠거나 외부 주입 노이즈를 통해 크기 비교 시 원래 의도하던 방향과 반대의 방향을 갖도록 의도한다. 이때 랜덤 생성기(random generator)와 같은 외부 회로를 통해 확률적인 크기 비교를 의도할 수 있다. 그러나 메모리 소자 어레이는 메모리 소자가 갖는 자체 노이즈(intrinsic noise)를 통해 외부 회로를 이용하지 않아도 되는 장점을 갖는다. 이때 가중치가 바이너리로 표현되는 비가중치 최대 절단(unweighted max-cut) 문제와 더 복잡한 아날로그 가중치 기반 가중치 최대 절단(weighted max-cut) 문제에서도 더 효율적인 해결 방법을 본 발명에서 제안한다. 가중치 프로그래밍 시 상태 간 중첩(overlap) 및 상태 내 변동(variation)이 확률적 동작의 소스로 사용될 수 있도록 프로파일을 설계한다. 이는 기존 메모리 소자의 정확한 상태 쓰기를 위한 정밀 튜닝(fine-tuning)에 대한 부담뿐 아니라 하드웨어 비이상성 개선에 대한 부담도 줄일 수 있는 접근 방식이다. 또한 하드웨어 자체의 특성을 최대한 활용하는 프로파일을 프로그래밍한다는 점에 있어 외부 노이즈 주입이나 외부 확률 동작 회로를 사용하지 않아도 되는 장점을 갖는다. 다시 말해, 하드웨어 오버헤드를 감소시킬 수 있다.
- [0025] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 이징 솔버 시스템의 동작 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.
- [0026] 본 발명의 실시예에 따른 이징 솔버 시스템의 동작 방법은 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 설정부를 통해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정하는 단계(210), 가중치 프로그래밍부를 통해 상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트하는 단계(220) 및 출력부를 통해 상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력하는 단계(230)를 포함한다.
- [0027] 단계(210)에서, 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 설정부를 통해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정한다.
- [0028] 먼저, 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악한 후, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정한다(211).
- [0029] 본 발명의 실시예에 따르면, 상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 이징 모델 및 홉필드 네트워크로 모델링하고, 상기 최대 절단 문제의 절단 수 또는 가중치 합을 최대로 하는 에너지 함수의 최소 지점을 찾기 위한 가중치의 프로파일의 가중치 범위를 설정한다.
- [0030] 설정된 가중치 범위를 가중치 프로그래밍(212)에 입력하고, 상기 가중치 범위에 대한 가중치의 프로파일을 실행하기 위해 입력 벡터를 랜덤 초기화 한다(213).
- [0031] 단계(220)에서, 가중치 프로그래밍부를 통해 상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트한다.

- [0032] 본 발명의 실시예에 따른 VMM(Virtual Machine Manager) 동작으로 가중치의 프로파일을 수행한다(211).
- [0033] 본 발명의 실시예에 따른 가중치 프로그래밍부를 통해 상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 모델링한 이징 모델에서 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)의 최소지점에 도달하기 위한 바이너리 입력에 대한 확률적 결정을 위해 노이즈 양을 결정하는 가중치 프로파일을 이용하여 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일의 입력 벡터를 업데이트한다(222).
- [0034] 본 발명의 실시예에 따르면, 상기 해밀토니안 함수의 최소지점에 도달하기 위한 노이즈 양을 결정하기 위한 가중치의 범위 및 가중치의 정확도를 포함하는 변수를 갖는 가중치 프로파일을 이용하여 프로그래밍된 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이에서의 이징 모델의 동작을 수행하고, 상기 결정된 노이즈 양에 따른 메모리 어레이의 저항 상태를 이용하여 상기 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산한다.
- [0035] 업데이트된 입력 벡터에 따른 에너지를 계산하고(223), 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달할 때까지 사이클을 반복한다(224).
- [0036] 단계(230)에서, 출력부를 통해 상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력한다.
- [0038] 본 발명의 실시예에 따라 메모리 반도체 어레이 내 가중치 프로파일을 설계하면 정답에 해당하는 입력 조합의 수를 찾기 위한 확률적 소스-노이즈를 기대할 수 있으며, 이를 통해 문제에 따라 요구되는 가중치 세분성(granularity) 및 이징 문제 해결 과정의 효율성을 높일 수 있다. 또한 노이즈 활용을 위해 프로파일을 조절하기 때문에 기존 메모리 반도체에 요구되는 정확한 상태 표현과 상태 간 중첩(overlap) 문제를 해결하기 위한 정확한 프로그래밍에 대한 시간, 에너지 부담을 줄일 수 있다. 메모리스트 어레이가 내재적으로 갖는 비이상성을 노이즈 소스로써 활용할 수 있어 이는 고장 소자 및 비이상적 동작 특성 하드웨어에 대한 제약도 완화할 수 있다.
- [0040] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 저항성 변화 메모리 크로스바 어레이의 스택을 나타내는 예시도이다.
- [0041] 본 발명의 구체적인 실시예는 Pt/Ti/Al₂O₃/TiO_x/Ti/Pt 스택을 갖는 저항성 변화 메모리(Resistive Random Access Memory; RRAM) 크로스바 어레이를 활용한다. 해당 구조는 상하부 전극에 인가되는 전압의 크기에 따라 저항 상태가 바뀌어 연산 메모리 기능을 갖는 2단자 비휘발성 소자이다. 본 발명의 실시예에 따르면, 해당 구조에 국한되지 않으며 상태를 저장하면서 연산의 기능을 할 수 있는 비휘발성 메모리 반도체 어레이 구조에 모두 적용될 수 있다.
- [0043] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 최대 절단 문제에 대해 랜덤으로 생성한 인스턴스를 나타내는 예시도이다.
- [0044] 본 발명의 실시예에 따르면, 먼저 정의된 문제 및 가중치 값을 파악한 후 이를 하드웨어로 프로그래밍할 가중치 범위를 설정한다.
- [0045] 이를 통해 N=32 최대 절단 문제는 32×32 RRAM 어레이 가중치와 입력 벡터 조합으로 맵핑된다(410). 2비트 최대 절단 문제에 대해 랜덤으로 생성한 인스턴스는 도 4와 같다. 각 가중치는 0, 1, 2, 3 값에 해당하며 이 값은 어레이 내 소자의 평균 동작 범위로 스케일링 되어 전사된다. 이와 같이 정의된 임의의 최대 절단 문제의 가중치 행렬(410)을 32×32 RRAM 크로스바 어레이 컨덕터스 행렬(420)로 나타낼 수 있다.
- [0047] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 가중치 프로파일의 최적화된 프로그래밍을 설명하기 위한 도면이다.
- [0048] 본 발명의 실시예에 따르면, 정의된 문제 및 가중치 값을 파악한 후 이를 하드웨어로 프로그래밍할 가중치 범위를 설정한다. 이 설정하는 범위의 프로파일은 도 5의 범위(520)에 해당한다.
- [0049] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 아날로그 가중치 정보에 대한 프로그래밍 프로파일 종류를 나타낸다. 나타내고자 하는 조합 최적화 문제가 2비트, 즉 4개의 가중치 값으로 표현되는 문제를 해결한다고 가정한다.
- [0050] 본 발명의 실시예에 따른 범위(1)(511)은 소자가 갖는 동작 범위를 최대한 활용하는 방식으로, 각 상태 간 중첩(overlap) 현상이 없으며 각 상태에 대한 정확한 상태 쓰기가 가능하다. 이는 기존 메모리 소자 관점에서 중요

하게 요구되는 특성이다.

- [0051] 본 발명의 실시예에 따른 범위(2)(512)는 소자가 갖는 동작 범위에서 높은 저항 상태(다시 말해, 낮은 컨덕턴스 상태) 범위 쪽에서 4개의 상태를 쓰는 방식이다. 단일 전자의 트랩/디트랩에 의해 발생하는 RTN 등의 노이즈 신호는 소자의 저항 상태가 클수록 더 두드러지게 발생하여 그 영향이 크다. 따라서, 노이즈 양이 보장되는 가중치 범위이다.
- [0052] 그러나 이 두 범위에는 절충안이 요구된다. 범위(1)(511)은 정확한 상태 쓰기가 가능하나, 하드웨어 내 사용할 수 있는 충분한 노이즈 양을 기대하기 어렵다. 반면 범위(2)(512)는 노이즈 양은 기대할 수 있으나 부정확한 상태쓰기로 오히려 전체 문제 푸는 속도나 정확도가 떨어질 가능성이 높다.
- [0053] 따라서, 본 발명의 실시예에서는 이 두 범위를 절충한 범위(3)(520)을 최적의 가중치 프로파일로 제안한다. 범위(3)(520)은 범위(2)(512)보다 넓은 동작 범위를 사용하면서 높은 저항 상태를 사용함으로써 두 범위의 장·단점을 절충할 수 있다. 예를 들어, 소자의 동작 범위가 $[5\mu S, 50\mu S]$ 일 경우 범위(1)(511)은 $[10\mu S, 20\mu S, 30\mu S, 40\mu S]$ 으로, 범위(2)(512)는 $[5\mu S, 10\mu S, 15\mu S, 20\mu S]$ 로, 범위(3)(520)은 그 절충안인 $[8\mu S, 16\mu S, 24\mu S, 32\mu S]$ 이 될 수 있다. 따라서 적정 노이즈 양과 정확한 상태쓰기에 대한 절충안이 범위(3)(520)이다.
- [0054] 추가로 홉필드 네트워크 및 이징 모델에서 정의되는 대각행렬 가중치(W_{ij} , $i=j$)는 '0'으로 정의되나, 메모리 상태에서 '0'을 표현하는 데에 한계가 있다. 따라서 종래기술에서는 대각행렬 요소들에 대해 소자가 나타낼 수 있는 최소 컨덕턴스(minimum conductance; G_{min})로 프로그래밍을 해왔다.
- [0055] 그러나 본 발명에서는 RRAM 소자의 포밍(forming) 동작을 통해 스위칭 동작이 가능해지는 특성을 사용하여, 대각행렬 소자들에 대해서는 스위칭 동작이 지속적으로 이루어지지 않게 하기 위해 포밍 동작을 진행하지 않도록 한다. 즉 대각행렬 소자들은 초기 높은 저항 상태(intial resistance state, IRS)를 가지며 이는 도 1의 메모리 소자에서 평균적으로 기존 스위칭 동작 시 높은 저항 상태 대비 -10승 이하의 값을 갖는다. 이는 하드웨어 내에서 표현할 수 있는 '0'의 정의를 최대한 표현한 것이라 할 수 있으며, 더 정확한 어레이 내 에너지 그라디언트 판단이 가능하다. 이를 통해 예상되는 결과는 두 가지 평가 지표를 통해 설명된다:
- [0056] (1) Hopfield Energy vs. Cycle: 최소 에너지 상태에 도달하기 위해 얼마나 입력 값의 업데이트 과정이 이루어지는지에 대한 지표이다. 최소 에너지에 도달하는 사이클 수가 적을수록 성능이 우수하다. 최적의 해를 더 빨리 찾는 것이기 때문이다. 따라서, 범위(3) 절충안으로 문제를 풀 경우 적절한 양의 노이즈로 에너지 함수의 국소 최저치(local minima)를 잘 빠져나올 수 있어 더 적은 사이클 수가 요구될 것으로 예상된다.
- [0057] (2) Success probability vs. Cycle: 여러 번 문제 해결을 시도하였을 때 정해진 사이클 수 내에 최적의 값으로 도달할 확률을 나타내는 지표이다. 이 지표도 (1)과 마찬가지로 더 적은 사이클에서부터 성공에 도달할 확률이 높은 성능을 범위(3)에서 보일 것이다. 따라서 단순히 소자 동작 범위의 G_{min} , G_{max} 값만을 사용해온 기존 메모리스트 어레이 이징 솔버 대비 자체적인 노이즈 활용을 더 기대하여 하드웨어 내 더 빠르고 에너지 효율적인 COP 해결을 기대할 수 있다.
- [0059] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 이징 솔버 시스템의 구성을 나타내는 도면이다.
- [0060] 본 실시예에 따른 이징 솔버 시스템(600)은 프로세서(610), 버스(620), 네트워크 인터페이스(630), 메모리(640) 및 데이터베이스(650)를 포함할 수 있다. 메모리(640)는 운영체제(641) 및 이징 문제 해결을 위한 가중치 프로파일 루틴(642)을 포함할 수 있다. 프로세서(610)는 설정부(611), 가중치 프로그래밍부(612) 및 출력부(613)를 포함할 수 있다. 다른 실시예들에서 이징 솔버 시스템(600)은 도 6의 구성요소들보다 더 많은 구성요소들을 포함할 수도 있다. 그러나, 대부분의 종래기술적 구성요소들을 명확하게 도시할 필요성은 없다. 예를 들어, 이징 솔버 시스템(600)은 디스플레이나 트랜시버(transceiver)와 같은 다른 구성요소들을 포함할 수도 있다.
- [0061] 메모리(640)는 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체로서, RAM(random access memory), ROM(read only memory) 및 디스크 드라이브와 같은 비소멸성 대용량 기록장치(permanent mass storage device)를 포함할 수 있다. 또한, 메모리(640)에는 운영체제(641)와 이징 문제 해결을 위한 가중치 프로파일 루틴(642)을 위한 프로그램 코드가 저장될 수 있다. 이러한 소프트웨어 구성요소들은 드라이브 메커니즘(drive mechanism, 미도시)을 이용하여 메모리(640)와는 별도의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체로부터 로딩될 수 있다. 이러한 별도의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체는 플로피 드라이브, 디스크, 테이프, DVD/CD-ROM 드라이브, 메모리 카드 등의 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체(미도시)를 포함할 수 있다. 다른 실시예에서 소프트웨어 구성요소들은 컴퓨터에서 판독

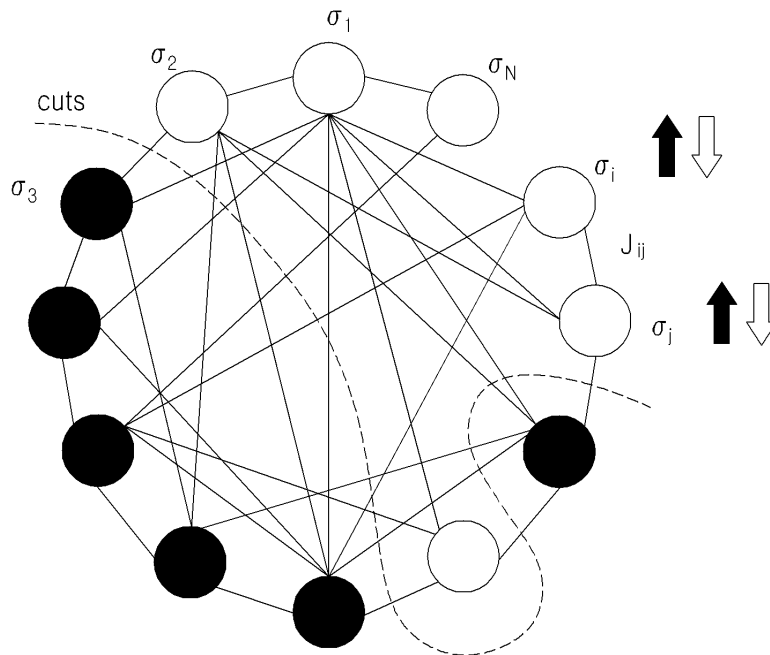
가능한 기록 매체가 아닌 네트워크 인터페이스(630)를 통해 메모리(640)에 로딩될 수도 있다.

- [0062] 버스(620)는 이징 솔버 시스템(600)의 구성요소들간의 통신 및 데이터 전송을 가능하게 할 수 있다. 버스(620)는 고속 시리얼 버스(high-speed serial bus), 병렬 버스(parallel bus), SAN(Storage Area Network) 및/또는 다른 적절한 통신 기술을 이용하여 구성될 수 있다.
- [0063] 네트워크 인터페이스(630)는 이징 솔버 시스템(600)을 컴퓨터 네트워크에 연결하기 위한 컴퓨터 하드웨어 구성요소일 수 있다. 네트워크 인터페이스(630)는 이징 솔버 시스템(600)을 무선 또는 유선 커넥션을 통해 컴퓨터 네트워크에 연결시킬 수 있다.
- [0064] 데이터베이스(650)는 이징 문제 해결을 위한 가중치 프로파일링을 위해 필요한 모든 정보를 저장 및 유지하는 역할을 할 수 있다. 도 6에서는 이징 솔버 시스템(600)의 내부에 데이터베이스(650)를 구축하여 포함하는 것으로 도시하고 있으나, 이에 한정되는 것은 아니며 시스템 구현 방식이나 환경 등에 따라 생략될 수 있고 혹은 전체 또는 일부의 데이터베이스가 별개의 다른 시스템 상에 구축된 외부 데이터베이스로서 존재하는 것 또한 가능하다.
- [0065] 프로세서(610)는 기본적인 산술, 로직 및 이징 솔버 시스템(600)의 입출력 연산을 수행함으로써, 컴퓨터 프로그램의 명령을 처리하도록 구성될 수 있다. 명령은 메모리(640) 또는 네트워크 인터페이스(630)에 의해, 그리고 버스(620)를 통해 프로세서(610)로 제공될 수 있다. 프로세서(610)는 설정부(611), 가중치 프로그래밍부(612) 및 출력부(613)를 위한 프로그램 코드를 실행하도록 구성될 수 있다. 이러한 프로그램 코드는 메모리(640)와 같은 기록 장치에 저장될 수 있다.
- [0066] 설정부(611), 가중치 프로그래밍부(612) 및 출력부(613)는 도 2의 단계들(210~230)을 수행하기 위해 구성될 수 있다.
- [0067] 이징 솔버 시스템(600)은 설정부(611), 가중치 프로그래밍부(612) 및 출력부(613)를 포함할 수 있다.
- [0068] 본 발명의 실시예에 따른 설정부(611)는 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이로의 맵핑을 위해 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악하고, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정한다.
- [0069] 먼저, 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제에서 상기 조합 최적화 문제 및 상기 조합 최적화 문제에 대한 가중치를 파악한 후, 상기 가중치의 프로파일을 위한 가중치 범위를 설정한다.
- [0070] 본 발명의 실시예에 따른 설정부(611)는 상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 이징 모델 및 홉필드 네트워크로 모델링하고, 상기 최대 절단 문제의 절단 수 또는 가중치 합을 최대로 하는 에너지 함수의 최소 지점을 찾기 위한 가중치의 프로파일의 가중치 범위를 설정한다.
- [0071] 설정된 가중치 범위를 가중치 프로그래밍에 입력하고, 상기 가중치 범위에 대한 가중치의 프로파일을 실행하기 위해 입력 벡터를 랜덤 초기화 한다.
- [0072] 본 발명의 실시예에 따른 가중치 프로그래밍부(612)는 상기 조합 최적화 문제에 대하여 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달하기 위한 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일을 업데이트한다.
- [0073] 본 발명의 실시예에 따른 VMM(Virtual Machine Manager) 동작으로 가중치의 프로파일을 수행한다.
- [0074] 본 발명의 실시예에 따른 가중치 프로그래밍부(612)는 상기 조합 최적화 문제에 대한 최대 절단 문제를 모델링한 이징 모델에서 해밀토니안 함수(Hamiltonian function)의 최소지점에 도달하기 위한 바이너리 입력에 대한 확률적 결정을 위해 노이즈 양을 결정하는 가중치 프로파일을 이용하여 가중치를 계산하고, 상기 가중치의 프로파일의 입력 벡터를 업데이트한다.
- [0075] 본 발명의 실시예에 따른 가중치 프로그래밍부(612)는 상기 해밀토니안 함수의 최소지점에 도달하기 위한 노이즈 양을 결정하기 위한 가중치의 범위 및 가중치의 정확도를 포함하는 변수를 갖는 가중치 프로파일을 이용하여 프로그래밍된 홉필드 네트워크 기반 메모리 어레이에서의 이징 모델의 동작을 수행하고, 상기 결정된 노이즈 양에 따른 메모리 어레이의 저항 상태를 이용하여 상기 에너지 함수의 최적점에 도달하기 위한 가중치를 계산한다.
- [0076] 본 발명의 실시예에 따른 가중치 프로그래밍부(612)는 업데이트된 입력 벡터에 따른 에너지를 계산하고, 에너지 함수의 최적점(ground state)에 도달할 때까지 사이클을 반복한다.

- [0077] 본 발명의 실시예에 따른 출력부(613)는 상기 업데이트된 가중치의 프로파일을 이용하여 상기 조합 최적화 문제에 대한 솔루션을 출력한다.
- [0079] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPGA(field programmable gate array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.
- [0080] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치에 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.
- [0081] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.
- [0082] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.
- [0083] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

도면1a

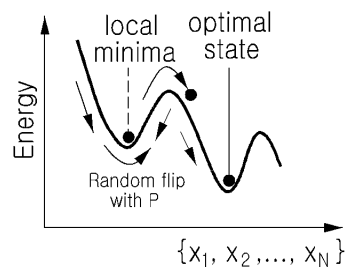


도면1b

Ising model (Hamiltonian)(110)

- N nodes (binary)
- $N(N-1)/2$ adjacency matrix
- Hamiltonian function

$$H_{\text{ising}} = - \sum_{i < j} J_{ij} \frac{\sigma_i \sigma_j - 1}{2}$$



Hopfield network (Energy)(120)

- N neurons (binary)
- $N \times N$ weight matrix ($W_{ii} = 0$)
- Energy Function:

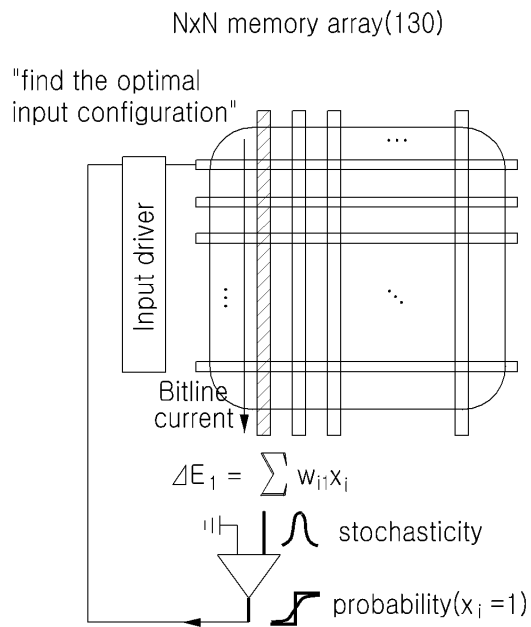
$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i < j} w_{ij} x_i x_j$$

$$\text{Energy} = -\frac{1}{2} \sum_{i < j} w_{ij} x_i x_j$$

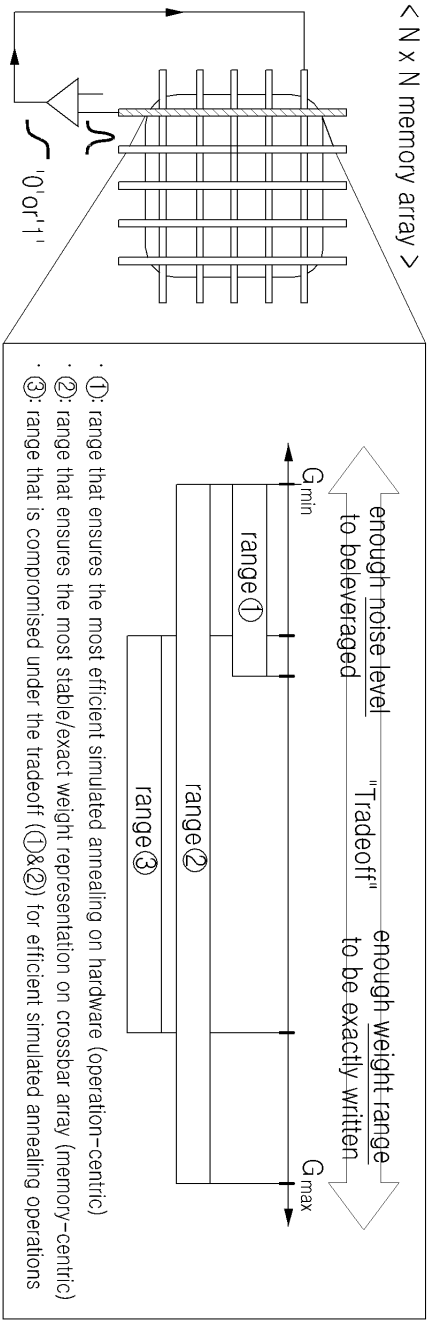
$$\Delta E_i = -\frac{\partial E}{\partial x_i} = \sum w_{ij} x_j$$

$$x_{i, \text{NEW}} = \begin{cases} -1, & \Delta E_i < 0 \text{ (with P)} \\ +1, & \Delta E_i \geq 0 \text{ (with P)} \end{cases}$$

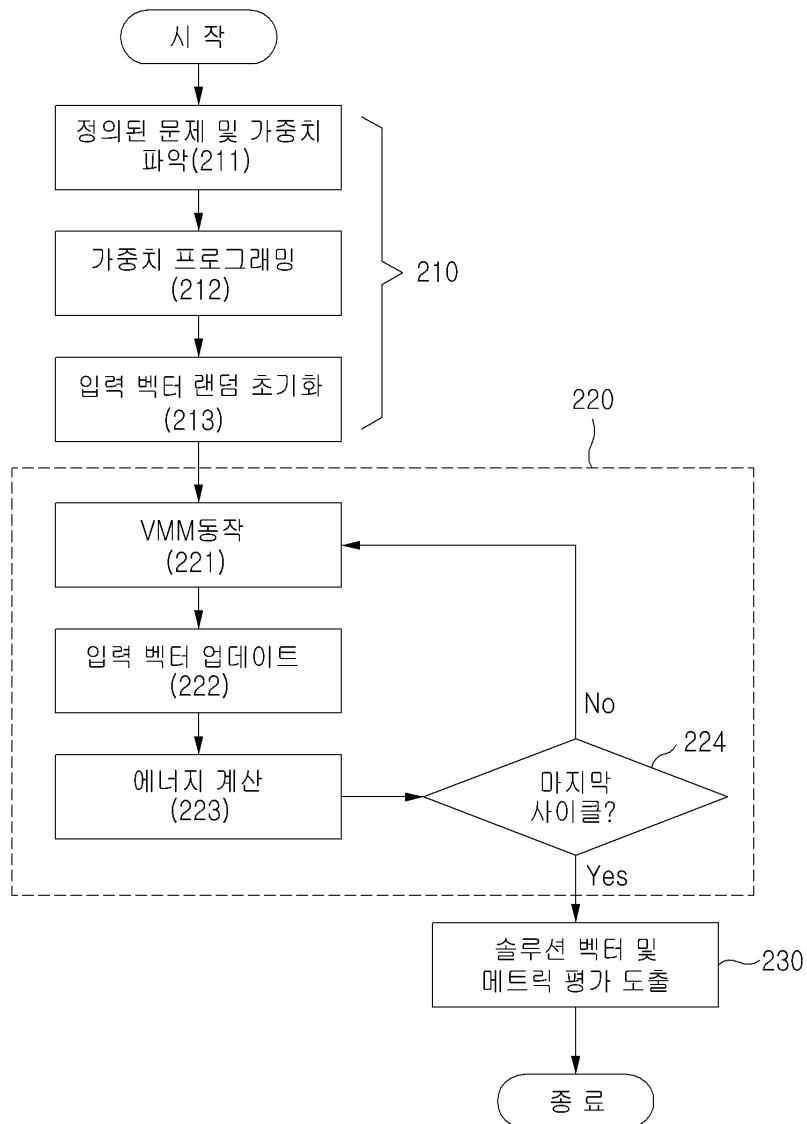
도면1c



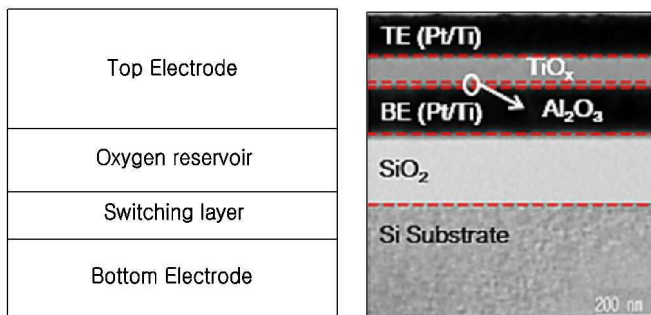
도면1d



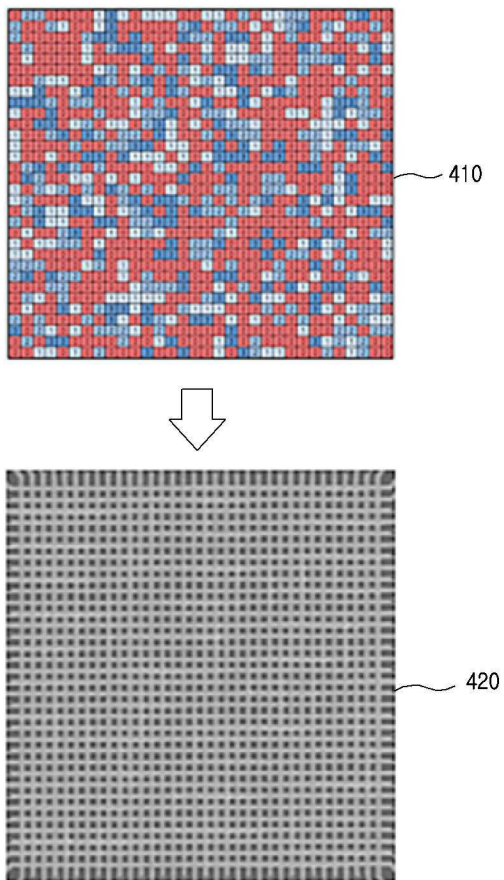
도면2



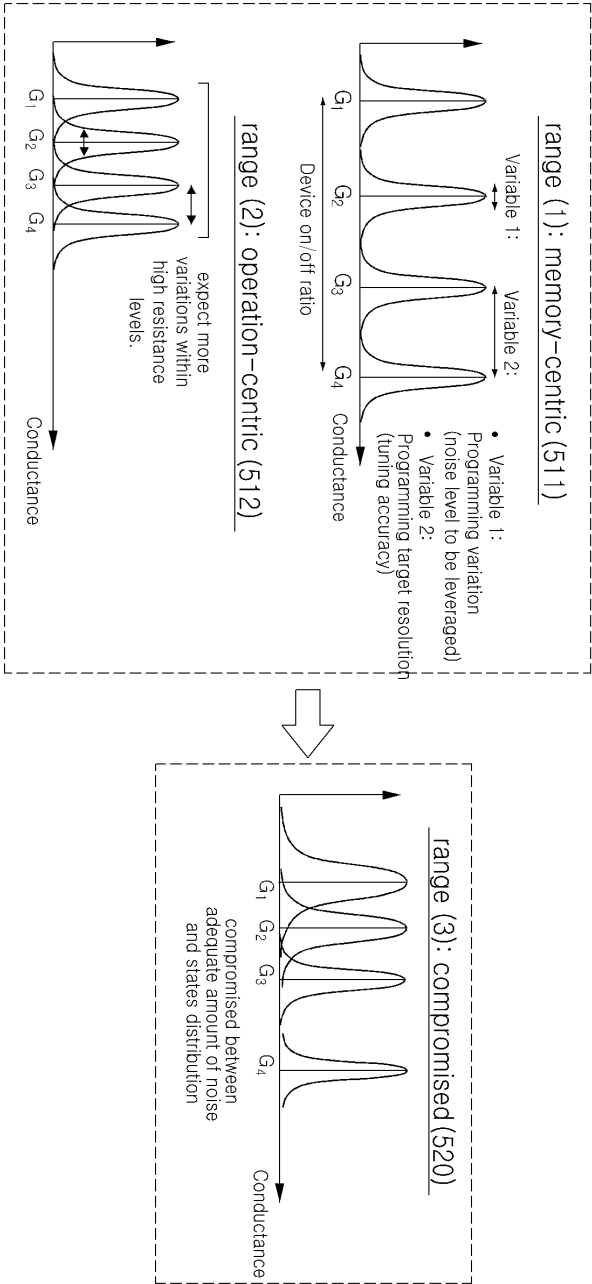
도면3



도면4



도면5



도면6

600

