

하모니 탐색 알고리즘의 선도 연구에 관한 최첨단 기술 동향과 사례 분석

김은성¹, 신승수², 김용혁³, 윤유림^{4*}

¹광운대학교 소프트웨어학부 학사과정, ²광운대학교 컴퓨터과학과 석사과정, ³광운대학교 소프트웨어학부 교수, ⁴가천대학교 컴퓨터공학과 부교수

State of the Art Technology Trends and Case Analysis of Leading Research in Harmony Search Algorithm

Eun-Sung Kim¹, Seung-Soo Shin², Yong-Hyuk Kim³, Yourim Yoon^{4*}

¹Bachelor Student, Dept. of Computer Software, Kwangwoon University

²Master Student, Dept. of Computer Science, Kwangwoon University

³Professor, Dept. of Computer Software, Kwangwoon University

⁴Associate Professor, Dept. of Computer Engineering, Gachon University

요약 실세계에는 다양한 최적화 문제가 존재하고 이를 해결하기 위한 연구가 지속되고 있다. 최적화 문제는 목적 함수의 결과 값을 최대 혹은 최소로 만드는 파라미터의 조합을 찾는 문제이다. 하모니 탐색은 이러한 최적화 문제 해결을 위한 인구 기반 메타휴리스틱 알고리즘으로 재즈 음악의 즉흥 연주를 모방하여 고안되었다. 하모니 탐색은 현재 토목, 컴퓨터, 에너지, 의료, 수질 공학 등 다양한 분야의 최적화 문제에 활발히 적용되고 있다. 하모니 탐색은 동작 원리가 간단하고 제약조건이 있는 최적화 문제에서 빠르게 동작한다는 장점이 있다. 특히 경험적 도함수를 통해 해를 개선하여 낮은 반복 횟수로 높은 정확도를 보인 사례들이 존재한다. 본 논문에서는 하모니 탐색의 동작 원리를 설명하고 최근 3년간 수행된 주요 연구들을 분류, 각 분류에 따라 요약 및 소개, 향후 연구 방향을 제시한다. 분류는 분야별 리뷰, 알고리즘 분석 및 이론, 실세계 문제에 대한 적용으로 나누고 실세계 문제에 대한 적용은 다른 메타휴리스틱 알고리즘과의 결합 여부, 최적화 목적에 따라 분류하여 설명한다.

주제어 : 하모니 탐색, 메타휴리스틱 알고리즘, 공학, 최적화, 특징 선택, 서베이

Abstract There are various optimization problems in real world and research continues to solve them. An optimization problem is the problem of finding a combination of parameters that maximizes or minimizes the objective function. Harmony search is a population-based metaheuristic algorithm for solving optimization problems and it is designed to mimic the improvisation of jazz music. Harmony search has been actively applied to optimization problems in various fields such as civil engineering, computer science, energy, medical science, and water quality engineering. Harmony search has a simple working principle and it has the advantage of finding good solutions quickly in constrained optimization problems. Especially there are various application cases showing high accuracy with a low number of iterations by improving the solution through the empirical derivative. In this paper, we explain working principle of Harmony search and classify the leading research in recent 3 years, review them according to category, and suggest future research directions. The research is divided into review by field, algorithmic analysis and theory, and application to real world problems. Application to real world problems is classified according to the purpose of optimization and whether or not they are hybridized with other metaheuristic algorithms.

Key Words : Harmony search, Metaheuristic algorithm, Engineering, Optimization, Feature selection, Review

*This research was supported by the MIST(Ministry of Science and ICT), under the National Program for Excellence in SW (2017-0-00096), supervised by the IITP(Institute for Information & communications Technology Promotion).

*Corresponding Author : Yourim Yoon(yryoon@gachon.ac.kr)

Received October 1, 2021

Revised November 9, 2021

Accepted November 20, 2021

Published November 28, 2021

1. 서론

하모니 탐색(harmony search; HS)[1]은 재즈의 즉흥 연주를 모방하여 고안된 메타휴리스틱 알고리즘으로 응용 과학 및 공학, 의학 등 다양한 분야에서 최적화 목적으로 사용되고 있다. 대표적인 인구 기반 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘(genetic algorithm; GA) 대비 HS 관련 논문 수의 비율은 Google Scholar¹⁾ 검색 기준 2015년 4.2%에서 2020년 14.5%로 약 10%의 증가를 확인 할 수 있다. 이를 통해 최근 최적화 문제에서 HS의 관심이 증가 추세인 것을 확인 할 수 있다.

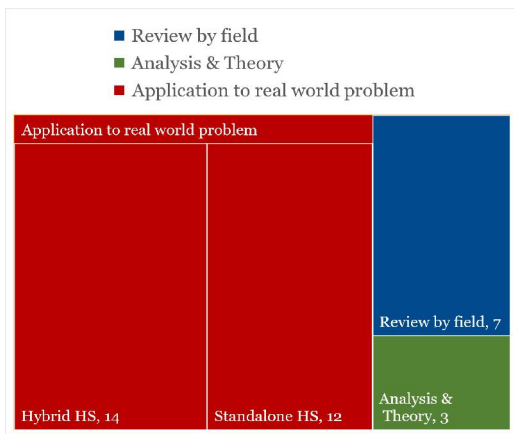


Fig. 1. Treemap of leading research about harmony search

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 HS 주요 연구들을 분류에 따라 요약하여 소개하고 향후 연구 방향을 제시한다. 주요 연구들은 분야별 리뷰 7건, 알고리즘 분석 및 이론 3건, 실세계 문제에 대한 적용 26건으로 분류하였고 실 세계 문제에 대한 적용은 다른 메타휴리스틱 알고리즘 과의 결합 여부, 최적화 목적에 따라 분류하였다.

2. 하모니 탐색 개요

HS는 재즈 연주자들이 화음을 만드는 다음 3가지 방법을 모방하여 최적화를 진행한다. 첫째, 과거에 좋았던 화음을 연주. 하모니 메모리 채택 비(harmony memory considering rate; HMCR)에 따라 하모니 메모리(harmony memory; HM)에 저장된 해 벡터들을 선택한다. 둘째, 좋았던 화음에서 약 간의 변형을 하여

연주. 피치 조정 비(pitch adjustment rate; PAR)에 따라 HM에서 선택된 해 벡터에 약간의 변형을 거쳐 새로운 벡터를 생성한다. 셋째, 새로운 화음을 무작위로 만들어 연주. 첫 번째와 두 번째 과정을 거치지 않고 무작위로 새로운 해 벡터를 생성한다. 위 3가지 방법을 통해 최적해 탐색을 수행하며, 타 메타휴리스틱 기법에 비해 파라미터의 개수가 적어 설계가 쉽다는 장점이 있다.

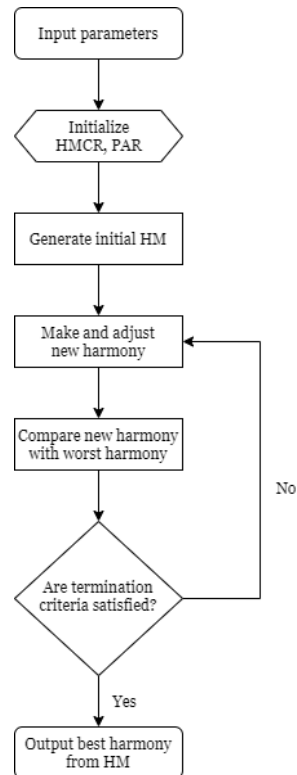


Fig. 2. Flowchart of harmony search[2]

하모니 탐색은 Fig. 2와 같이 다음의 다섯 과정으로 최적 해 탐색을 수행한다[2].

1. HMCR, PAR 파라미터 초기화 :

HMCR과 PAR 값은 애플리케이션 유형에 따라 다르며, 일반적으로 HMCR과 PAR 값의 범위는 다음과 같다.

$$0.7 \leq HMCR \leq 0.95, \quad 0.2 \leq PAR \leq 0.5$$

무작위로 새로운 해 벡터를 생성하는 무작위 선택 연산 확률은 (1 - HMCR)이며, 이 확률이 너무 높으면 해를

1) <http://scholar.google.com/>

찾을 가능성과 효율성이 감소한다. HM의 해 벡터를 변형하여 새로운 해 벡터를 생성하는 피치 조정 연산의 확률 또한 값이 너무 클 경우 의미 없는 해를 다수 생성하게 된다.

2. 초기 HM 무작위 생성 :

$$HM = \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^{HMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,1} & \cdots & x_{1,N} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{HMS,1} & x_{HMS,2} & \cdots & x_{HMS,N} \end{bmatrix}$$

$x_{i,j} = x_{i,L} + rand([0,1]) \times (x_{i,U} - x_{i,L})$
 $i = 1, 2, \dots, HMS; j = 1, 2, \dots, N;$
 $x_{i,U}, x_{i,L}$: the upper and lower bound of the i -th value

최적화 문제의 조건에 맞는 해 벡터 길이 N 과 하모니 메모리 크기(harmony memory size: HMS)를 만족시키는 무작위 해 집단을 생성하여 HM에 저장한다.

3. 새로운 하모니 X^{new} 생성 :

$X^{new} = (x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,N})$
For $i = 1, 2, \dots, N$
 $\alpha = rand([0,1]), \beta = rand([0,1])$
If $\alpha < HMCR$ **Then**
 $x_{new,i} \leftarrow rand(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{HMS,i})$
If $\beta < PAR$ **Then**
 $x_{new,i} \leftarrow x_{new,i} + rand([0,1]) \times bw_i$
Else
 $x_{new,i} \leftarrow x_{L,i} + rand([0,1]) \times (x_{U,i} - x_{L,i})$

bw : pitch adjusting bandwidth

난수 α 가 HMCR보다 작은 경우, 기존 HM에 저장된 해 벡터들 중 해당 위치의 값을 무작위로 선택하는 연산을 수행한다. 난수 β 가 PAR보다 작은 경우, HM에서 선택한 해 벡터에 난수와 bw 를 이용한 피치 조정 연산을 수행한다. 난수 α 가 HMCR 이상인 경우, 새로운 값을 무작위로 할당한다. 문제의 해 벡터 길이 N 만큼 연산을 반복하여 새로운 해 X^{new} 를 생성한다.

4. 생성된 해 X^{new} 가 기존 HM의 가장 낮은 적합도를 갖는 해 X^{worst} 보다 우수한 해일 경우, 두 해 교체

5. HM에 저장된 해들의 적합도 혹은 반복 횟수가 종료 조건을 만족할 때까지 3, 4 과정 반복

3. 분야별 리뷰

Table 1. Summary of review by field researches related to HS

Brief description	Reference
Basic HS, Modified HS, Hybrid HS	Zhang & Geem [2]
Improved versions of HS, Contribution in energy systems by using HS	Nazari-Heris <i>et al.</i> [3]
HS algorithm applications in Korea, China, and Japan	Nasir <i>et al.</i> [4]
Modified HS, Hybrid HS, Multi-Objective HS for clustering application	Abualigah <i>et al.</i> [5]
Comparison and analysis of HS and other EA performance	Vala <i>et al.</i> [6]
Structure optimization using HS, Structural control	Kayabekir <i>et al.</i> [7]
Proof of how HS converges to an optimal solution	Yoon & Geem [8]

HS에 관한 분야별 리뷰는 Table 1과 같이 분류하였다. HS 알고리즘의 구조 분석[2]에서는 HS의 구조 변형, HS와 다른 메타휴리스틱 알고리즘과의 결합에 대하여 분석하였다. HS의 구조 변형에서는 동적으로 변화하는 가변 파라미터를 이용한 적응형 하모니 탐색(adaptive harmony search; AHS)과 파라미터 설정이 없는 하모니 탐색(parameter setting free harmony search; PSF-HS)등이 있다. AHS는 새로운 해의 생성 과정에서 HMCR과 PAR을 조정하여 조기 수렴을 방지한다. PSF-HS는 HM에서 특정 연산의 사용 횟수와 특정 세대에서 사용한 연산의 유형에 따라 HMCR과 PAR이 변화한다.

에너지 시스템에서의 HS에 대한 분석[3]은 에너지 분야에서 최근 개선된 버전의 HS와 이를 활용한 에너지 시스템에 대한 연구들을 분석하였다.

한중일 각 국가들의 HS 활용 및 연구 사례[4]에서는 공학, 응용과학, 컴퓨터 과학 등의 분야에 대해 적용 사례들에 대해 설명하였다. 중국에서는 IHSMSTA(improved harmony search for material transfer scheduling algorithm)를 제안하여 제조 시스템에서의 자재 이전 문제를 해결하였다. 제안된 IHSTMA는 가변 HMCR을 이용하여 새로운 하모니를 생성한 후 지역 탐색을 수행한다. 이후, HM에 저장된 최적 하모니와 지역 탐색으로 찾은 하모니를 비교하여 추가적인 HM의 업데이트를 수행한다. 일본에서는 대표적으로 HS를 이용한 통합 특징 선택 알고리즘을 제안했으며, 연구 결과 정확도 측면에서

GA보다 더 우수한 해의 품질을 보였다. 한국에서는 대표적으로 PSF-HS를 이용한 에너지 시스템 경제 급전 모델을 제안했다. 기존 HS 방식보다 절감된 운영 비용을 도출했으며, 파라미터의 선택이 알고리즘의 성능에 영향을 준다는 점을 언급하였다.

클러스터링에서의 HS 활용에 관한 연구[5]는 데이터 클러스터링에서 k -평균 클러스터링의 단점인 초기 중심의 필요성과 탐색 영역으로의 수렴을 해결하기 위해 HS를 이용하였다. HS를 통해 초기 중심을 사용하지 않고, 기존 경사 하강법 대신 확률적 탐색을 수행하여 2차 데이터가 불필요하게 되었으며 더 높은 정확도를 보였다.

HS와 다른 진화 연산의 성능 비교와 각각의 장단점 [6]에서는 HS의 장점으로 적은 파라미터의 개수와 빠른 계산 속도, 효율적인 해 공간 탐색을 언급했다. 단점으로는 최종 반복에서 HMCR이 수렴 궤적을 변경할 수 있는 문제점과 부적절한 파라미터 선택과 튜닝하지 않은 파라미터로 인한 수렴 속도 저하를 언급하였다.

HS를 이용한 구조물 최적화 및 분석[7]에서는 기본 HS와 수정 및 하이브리드 HS 등을 통해 구조물의 크기, 비용, 이산화탄소 배출량 등의 요소들을 최적화하였다.

거리와 경험적 확률 개념을 이용한 HS의 최적해 수렴 증명[8]에서는 후보 해 벡터 집합에서 이웃하는 후보 해 벡터들 간의 거리를 정의하여 HS의 경험적 확률에 기반한 수렴 과정을 증명하였다.

4. 알고리즘 분석 및 이론

HS 알고리즘 분석 및 이론에 관한 연구는 Table 2와 같다. HM 업데이트 성공률과 수렴률을 take- k , take-all 전략으로 분석한 연구[9]에서는 고차원 최적화

문제에서 고차원 최적화를 위한 HS에 take- k 전략을 이용한 방법이 향상된 HM 업데이트 성공률과 수렴률을 보였다.

Table 2. Summary of algorithm theory and analysis researches related to HS

Brief description	Reference
Analysis method of update success rate, take- k and take-all strategy	Tuo <i>et al.</i> [9]
Problem of HS parameter setting and PSF-HS, Advanced PSF-HS	Jeong <i>et al.</i> [10]
Type-2 fuzzy system for PAR adjustment	Castillo <i>et al.</i> [11]

PSF-HS는 특정 반복 횟수에 도달하면 HMCR과 PAR 값이 0 또는 1로 설정될 수 있는 문제가 존재하고, 반복에 따른 각 연산자의 사용 횟수를 HM에 저장하여 추가 메모리가 요구된다. 이러한 문제를 고급 PSF-HS를 제안하여 해결하였다[10].

HS의 가변 PAR을 위한 Type-2 퍼지 시스템[11]에서는 HS에 지속적인 강화 Karnik-Mendel(Continuous Enhanced Karnik-Mendel)의 근사치를 사용했다. 그 결과, Type-2 퍼지 시스템의 계산 비용을 줄이고 PAR 값의 고정 문제를 해결했다.

5. 실세계 문제에 대한 적용

실세계 문제에 대한 적용에서 독립형 HS를 이용한 연구는 Table 3과 같이 12건으로 분류하였고, 다른 메타 휴리스틱 알고리즘과 결합한 HS에 관한 연구는 Table 4와 같이 14건으로 분류하였다.

Table 3. Summary of application to real world problems using standalone HS

Optimization purpose	Brief description	Reference
Parameter optimization	Vanishing Point Detection	Moon <i>et al.</i> [12]
	Dynamic parameter adaptation, Optimal Fuzzy HS(OFHS)	Castillo <i>et al.</i> [13]
	Hyperparameter Optimization, Pattern Recognition	Kim <i>et al.</i> [14]
	Optimization of cost and co2, Reinforced concrete retaining walls	Kayabekir <i>et al.</i> [15]
	Optimization of cost and co2, Reinforced concrete cantilever soldier piles	Arama <i>et al.</i> [16]
	Optimization of ply thickness and fiber orientation angles	Cakiroglu <i>et al.</i> [17]
	Optimization of structures size and cost, Cantilever soldier pile retaining walls	Bekdaş <i>et al.</i> [18]
	Optimization of structures cross-sectional area, Plate girders	Cakiroglu <i>et al.</i> [19]
	Optimization of structures size and cost, Reinforced concrete retaining walls	Arama <i>et al.</i> [20]
Combinatorial optimization	Optimization of PID parameter and structural response time	Ulusoy <i>et al.</i> [21]
	Max-Cut problem, Comparison of HS and GA	Kim <i>et al.</i> [22]
	Optimization of nozzle movement	Toklu <i>et al.</i> [23]

Table 4. Summary of application to real world problems using hybrid HS

Optimization purpose	Brief description	Reference
Parameter optimization	Optimization of chlorine mass rates, HS-solver	Ayvaz & Geem [24]
	Optimization of operational cost, Multi-Player HS	Nazari-Heris <i>et al.</i> [25]
	Optimization of structures displacement, Variable HMCR and PAR	Kayabekir <i>et al.</i> [26]
	Optimization of total potential energy and nodal displacement, Hybrid of HS and Flower Pollination algorithm	Kayabekir <i>et al.</i> [27]
	Total potential optimization, Adaptive HS	Toklu <i>et al.</i> [28]
	Optimization of structures cost, Hybrid of adaptive HS and Jaya algorithm	Yücel <i>et al.</i> [29]
Feature selection	Hybrid of Mayfly algorithm and HS(MA-HS)	Bhattacharyya <i>et al.</i> [30]
	Hybrid of Artificial Electric Field algorithm and HS(EHHM)	Sheikh <i>et al.</i> [31]
	Ring Theory based HS(RTHS)	Ahmed <i>et al.</i> [32]
	Facial emotion recognition model, Supervised Filter HS	Saha <i>et al.</i> [33]
	Colon cancer detection, <i>k</i> -means clustering, Modified HS	Bae <i>et al.</i> [34]
Combinatorial optimization	Multi-Objective HS(MOHS), Comparison of MOHS and Multi-Objective EA	Prajapati & Geem [35]
	Task distribution, Adaptive HS, Power-aware algorithm	Renugadevi <i>et al.</i> [36]
Network optimization	HS Algorithm-Bollinger Bands(HSA-BB), Optimization of total operating time	Rajput <i>et al.</i> [37]

5.1. 독립형 하모니 탐색

5.1.1 파라미터 최적화

도로의 소실점 탐색은 자율 주행 분야에서 차선 감지를 위한 필수적인 기술이다. 도로 차선이 실제 3차원 공간에서는 평행하지만, 차량 운전자의 시각과 같은 2차원 영상에서는 원근법에 의해 한 점에서 만나게 된다. 도로 소실점 탐색을 위한 기존 방식은 RANSAC(Random Sample Consensus) 알고리즘으로 도로 영상을 허프 변환하여 직선 성분을 추출한 후, 두 직선을 무작위로 선택하여 교차점을 계산하는 방식을 반복하여 최적 소실점을 도출한다. 무작위 선택 방법으로 빠른 계산 속도가 장점이지만, 도로 구조물 및 다른 차량과 같은 노이즈가 존재하는 데이터에서 잘못된 소실점을 도출하는 오류가 존재한다. 제안된 HS를 이용한 도로 소실점 탐색[12]은 입력 영상에서 엣지를 추출하고 이를 허프 변환하여 직선 성분을 추출한다. 이후, 직선 성분으로부터 추정된 후보 소실점들 중에서 HS를 통해 연장된 직선으로부터 가장 많이 일치하는 점을 최적 소실점으로 선택하였다. 실험 결과 소실점들의 평균 좌표 공분산 범위는 각각 RANSAC 방식이 0.14 ~ 0.195, HS 방식이 0.084 ~ 0.092 로 HS를 이용한 소실점 탐색이 보다 안정적인 결과를 보였다.

가변 파라미터를 이용한 최적 퍼지 시스템 설계[13]에 서는 최적 퍼지 하모니 탐색(optimal fuzzy harmony search; OFHS)을 제안하였다. 실험 결과는 제안된 OFHS가 미분 진화(differential evolution) 방식보다 적은 실행 시간과 낮은 표준 편차를 보였다.

기존 호흡 패턴 인식은 일차원 합성곱 신경망을 이용한 방법이 존재한다. 일차원 합성곱 신경망의 성능은 커널의 크기 및 개수 등과 같은 하이퍼 파라미터 값에 큰 영향을 받기 때문에 최적의 하이퍼 파라미터를 찾는 문제로 귀결된다. 하이퍼 파라미터 최적화 방법 중에서도 호흡 패턴 인식은 사전 데이터가 풍부하지 않기 때문에 좋은 성능을 발휘하는 베이지안 최적화를 사용하지 못한다. 따라서 각 하이퍼 파라미터의 범위를 특정하고 그에 따른 모든 조합들을 반복 실험하는 그리드 탐색 방법을 사용하여 많은 반복과 시간이 소요된다. 제안된 방법은 기존 일차원 합성곱 신경망과 HS를 통합하여 하이퍼 파라미터 최적화를 수행한다[14]. 실험 결과 기존 그리드 탐색 사용 시 약 2백만 번의 반복으로 최적의 조합을 찾은 반면, HS로는 3,652 번의 훨씬 낮은 반복 횟수로 최적의 조합을 찾았다. 또한 평균 약 96.7%의 인식률로 기존 그리드 탐색에 비해 약 2.8% 개선하였다.

토목 공학에서는 구조물의 비용, 이산화탄소 배출량의

최적화[15,16], 합판 두께 및 배향 각 최적화[17], 구조물 크기 및 단면적, 비용 최적화[18-20], 구조적 반응 감소를 위한 PID(proportional-integral-derivative) 최적화[21]가 존재한다. 특히 토목 공학은 구조물의 하중 무게, 강도와 같은 제약 조건이 존재하는 최적화 문제에서도 HS가 우수한 성능을 보였다.

5.1.2 조합 최적화

MAX CUT 문제에 대한 HS와 GA의 비교 연구[22]에서는 31개의 벤치마크 그래프에 대해 HS가 GA보다 28개의 경우에서 더 좋은 결과를 얻었다. HS의 HMCR은 0.8에서 1로 변경하면서 실험하였으며, 0.097에서 최대 평균 절단 크기를 생성하였다.

구조 공학에서는 적층 제조 구조물의 제조 시간을 감소하기 위한 적층 제조 노즐 움직임 최소화 연구[23]가 이루어졌다. HS를 통해 노즐의 유틸 이동 거리가 최소화 되는 이동 경로를 찾았으며, 유틸 이동 거리를 총 이동 거리의 최대 약 18%까지 줄였다. 특히 31개 벽에서의 실험에서는 가능한 경로의 조합 수가 2.801×10^{11} 개인 NP 문제가 된다. HS를 통해 45,000 번의 비교적 낮은 반복 횟수로 대각선 방향의 이동이 불가능한 경우 최소 유틸 이동 거리 19.5, 대각선 방향의 이동이 가능한 경우 18.27491을 도출하였다. 향후 HS를 다른 메타휴리스틱 알고리즘과 결합하여 더 낮은 반복 횟수로 노즐의 움직임을 최적화하는 연구, 적층된 콘크리트의 응결 시간을 고려한 3차원에서의 노즐 움직임 최적화 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

5.2 다른 메타휴리스틱과의 결합

HS와 타 메타휴리스틱 알고리즘과의 결합으로는 타 메타휴리스틱 알고리즘을 이용하여 해 공간을 특정한 후, 특정된 해 공간에서 HS로 최적 해를 탐색하는 방법이 존재한다[27,30,34,35,37]. HS는 HM에 저장된 해들을 활용 및 개선하여 전역 최적화를 수행한다. 이를 최적 해 탐색 성능이 우수한 타 메타휴리스틱 알고리즘과의 결합을 통해 기존 HS의 문제점인 HMCR, PAR의 고정 및 초기 수렴 문제를 해결하였으며, 추가적으로 탐색 공간의 활용 향상, 반복 횟수 감소 등의 이점을 보인 연구들이 존재한다.

5.2.1 파라미터 최적화

수질 공학에서 HS를 이용한 염소 주입 최적화[24]에서는 하이브리드 HS-Solver를 통해 염소 주입량과 위치를 효율적으로 결정하였다. 하이브리드 HS-Solver는 HS와 스프레드시트 Solver를 결합하여 HS의 전역 탐색의 특성과 Solver의 지역 탐색 성능을 결합하였다. 특히 HS와 HS-Solver의 비교에서는 최적 염소량을 얻는데 HS-Solver가 더 낮은 반복 횟수로 수렴하였다.

에너지 공학에서 다중 연주자 HS(multi player harmony search; MPHS)를 이용한 열병합 발전소 운영 비용 최적화[25]에서는 각각 두 종류의 가변 HMCR, PAR 그리고 bw 를 통해 두 개의 하모니를 생성한 후, 이를 통합하여 최적의 하모니를 도출하였다. 실험 결과는 MPHS가 기존 고래 최적화 알고리즘(whale optimization algorithm)보다 낮은 반복 횟수로 더 큰 비용 절감을 이루었다.

동조 질량 감쇠기는 바람, 지진 등에 의한 고층 건물의 진동을 줄이기 위한 방진 장치이다. 토목 공학에서 동조 질량 감쇠기를 이용한 구조물의 변위 최적화[26]에서는 HS에 새로운 파라미터 BSCR(best solution considering rate)을 도입하여 새로운 하모니를 생성하는 과정 중 HM의 가장 높은 적합도를 가진 해를 추가로 사용하였다. 또한 가변 HMCR과 PAR로 기존 해를 중심으로 최적 해를 찾으며 수렴성을 향상시켰다.

HS와 꽃 수분 알고리즘(flower pollination algorithm)의 결합을 이용한 변위 최적화[27], 적응형 HS(adaptive harmony search; AHS)를 이용한 총 위치 에너지 최적화[28], AHS와 Jaya 알고리즘의 결합을 통한 적응형 하이브리드 하모니 탐색(adaptive hybrid harmony search; AHHS)을 이용한 구조물의 비용 최적화[29]에서는 각각 결합된 HS 방식이 더 낮은 반복 횟수로 수렴하는 것을 보였다. 특히 AHHS는 최적의 해와 최악의 해를 고려하여, 각각의 해가 서로 근접할 때 향상된 수렴을 보이는 Jaya 알고리즘의 특성을 활용하여 실험 결과에서 낮은 표준 편차를 보였다.

5.2.2 특징 선택

컴퓨터 공학에서 하루살이 알고리즘(mayfly algorithm: MA)과 HS를 결합한 MA-HS를 이용한 특징 선택[30]

에서는 MA로 하루살이의 위치와 속도를 갱신하고 교배 및 돌연변이 연산을 수행한다. 이후, 최악의 적합도를 지닌 하루살이를 최적의 적합도를 지닌 자손으로 교체한다. MA로 얻은 후보 해에서 수컷 하루살이들의 위치로 HM을 초기화하여 HS로 최적화를 수행한다. MA와 HS의 결합으로 탐색 공간의 활용을 향상시켰으며, 각 알고리즘을 단독으로 사용한 경우에 비해 약 절반의 반복 횟수로 최적의 적합도를 찾았다.

HS와 인공 전기장 알고리즘을 결합한 연구[31]는 하모니에 부가적인 특성을 나타내는 전하를 추가하여 전기적 하모니 개념을 도입하였다. 이를 통해 지역 최적값에 갇힐 가능성을 줄이며 분류 정확도를 높였다.

환론 기반 진화 연산과 HS를 결합한 연구[32]에서는 그리디한 전력이 반영된 연산자를 사용하여 각 반복에서 더 적합한 특징을 찾아 하모니의 특정 벡터를 업데이트 하였다.

코사인 유사도 기반 지도 필터링 HS를 이용한 얼굴 감성 인식 모델[33]은 기존 인접한 피처를 선택하는 대신 코사인 유사 피처 값으로 피처를 조정했다.

의료 공학에서 HS와 k -평균 클러스터링을 결합하여 대장암 발견을 위한 특징 선택[34]이 존재한다. 제안된 방법은 k -평균 클러스터링을 이용하여 후보 유전자에서 대표 유전자를 선택한 후, HS를 통해 유전자 조합을 탐색한다. 실험 결과는 서포트 벡터 머신, 랜덤 포레스트 알고리즘이 2,000개의 유전자를 사용하여 각각 82.26%, 84.10%의 정확도를 보인 반면, 제안된 HS 방법을 이용해 8개의 소수 유전자로 93.46%의 높은 정확도를 보였다. 또한 검사 유전자 수를 줄임으로써 비용 절감의 효과로 이어질 수 있음을 언급하였다.

5.2.3 조합 최적화, 네트워크 최적화

컴퓨터 공학에서 다목적 HS를 이용한 소프트웨어 아키텍처 재구성[35]은 현재 하모니 메모리, 새 하모니 메모리, 외부 하모니 메모리의 3가지 새로운 HM을 추가하여 후보 해를 저장했다. 제안된 방식은 기존 재구성 방식보다 우수한 아키텍처 솔루션을 생성했다.

데이터 센터의 전체 소비 전력의 약 60%는 프로세서의 전력 소비에 해당한다. 따라서 프로세서의 소비 전력의 절감이 서버 전력 절감의 중요 지표가 되며, 이를 위해

데이터 센터의 작업 분산 최적화가 요구된다. AHS를 이용한 데이터 센터 로드 밸런싱 및 작업 분산[36]에서는 AHS가 전력 인식 알고리즘보다 낮은 서버 빈도로 최대 활성 서버 수를 유지하며 더 큰 전력 사용 절감을 보였다.

에너지 공학에서 태양광 발전기 연결 네트워크 보호 시스템을 위한 HS와 볼린저 밴드를 결합한 하이브리드 알고리즘[37]에서는 HM에 저장된 해 벡터를 볼린저 밴드를 이용하여 결정 변수에 대한 평균, 상한 및 하한 값을 계산하여 최적화를 수행한다. 제안된 방식이 타 메타휴리스틱 알고리즘보다 적은 릴레이 작동 시간과 반복 횟수로 수렴하였다.

6. 결론 및 향후 연구

HS는 2001년에 고안된 최신 메타휴리스틱 알고리즘임에도 불구하고, 현재 다양한 공학 분야에서 활발히 활용되고 있다. 이러한 배경에는 HS가 다음의 장점들을 갖기 때문이다. 첫째, 간단한 동작 원리로 알고리즘의 이해와 구현이 쉽다. 둘째, 초기 설정할 파라미터 개수가 적다. 셋째, HMCR 및 PAR 파라미터로 기존 해 벡터를 고려하여 더 나은 해를 도출하며, 낮은 반복 횟수로 짧은 계산 시간과 높은 수렴 정확도를 보인다.

HS는 대표적인 인구 기반 메타휴리스틱 알고리즘인 GA와 가장 많은 비교가 이루어졌으며, 본 논문에서 다룬 36건의 연구 중 10건의 연구에서 GA보다 성능의 우수성을 확인 할 수 있었다. GA는 파라미터의 개수가 많고 문제에 따른 설정이 필요하다는 단점이 있는 반면, HS는 파라미터의 개수가 상대적으로 적으며 AHS, PSF-HS 등의 가변 파라미터를 통해 파라미터 설정과 조기 수렴의 문제를 해결 할 수 있음을 확인하였다.

그러나 HS는 다음의 단점들이 존재한다. 수렴 이후의 학습에서 HMCR은 수렴 궤적을 변경하여 성능 저하와 낮은 수렴률을 일으킬 수 있다. 또한 튜닝 없이 파라미터를 사용할 경우 수렴 속도가 느려질 수 있다.

분야별 HS 주요 연구 분포를 살펴보면, 이론적 연구에 비해 응용 분야에 치우친 것을 볼 수 있다. 이는 GA의 이론적 연구 비중과 비교하면 매우 대비된다. 따라서 향후 이론적 기반을 다질 수 있는 HS의 수렴성, 파라미터 선택 및 튜닝, 타 메타휴리스틱 알고리즘과의 결합 등의 연구를 통해 알고리즘의 신빙성을 높일 필요가 있다.

또한 제약조건이 존재하는 최적화 문제에서 타 인구

기반 최적화 알고리즘보다 성능의 우수성을 보인 다수의 연구들을 확인하였다. 따라서 기존의 HS를 적용하여 문제를 해결한 토목, 에너지, 컴퓨터, 의료 분야 이외에도 다음과 같은 사례에 적용될 수 있을 것으로 보인다. 투자 가능 자산, 샤프 비율 등에 따른 주식 포트폴리오 최적화를 통해 위험도 대비 기대 수익이 가장 높은 포트폴리오를 선택하고 자산에 따라 종목 할당을 최적화 할 수 있을 것이다. 운송업에서는 최소 및 최대 적재를 제약조건에 따라 차량 별 적재를 최대화 및 운송 권역 별 배송거리 최소화를 통해 차량 공차율과 배차 차량 수를 줄여 전체 운송비를 절감 할 수 있을 것이다. 어업에서는 과잉 어획을 방지하며 이익을 최대화하기 위해 시기 별 자원량을 초과하지 않으면서 어업 비용 및 유통 가격을 고려한 최적 어획량 추정에 HS의 적용을 고려 할 수 있을 것이다. 이러한 제약조건이 존재하는 여러 실세계 문제들을 HS를 통해 해결이 가능할 것으로 기대된다.

본 논문에서는 HS 주요 연구들을 논문 유형 및 응용 분야에 따라 분류 및 소개하였다. 본 논문의 공헌은 향후 최적화 기술이 요구되는 실생활의 각종 분야에서 하모니 탐색의 적용이 고려될 수 있도록 하고자 한다. 소개한 여러 분야에서의 연구 사례와 이에 대한 분석을 참고하여 본 논문을 향후 이루어질 연구의 기틀로 삼았으면 한다.

REFERENCES

- [1] Z. W. Geem, J. H. Kim & G. V. Loganathan. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm Harmony Search. *Simulation*, 76(2), 60-68. DOI : 10.1177/003754970107600201
- [2] T. Zhang & Z. W. Geem. (2019). Review of Harmony Search with Respect to Algorithm Structure. *Swarm and Evolutionary Computation*, 48, 31-43. DOI : 10.1016/j.swevo.2019.03.012
- [3] M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Asadi, J. H. Kim & Z. W. Geem. (2019). Harmony Search Algorithm for Energy System Applications: an Updated Review and Analysis. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 31(5), 723-749. DOI : 10.1080/0952813X.2018.1550814
- [4] M. Nasir, A. Sadollah, J. H. Yoon & Z. W. Geem. (2020). Comparative Study of Harmony Search Algorithm and its Applications in China, Japan and Korea. *Applied Sciences*, 10(11), 3970. DOI : 10.3390/app10113970
- [5] L. Abualigah, A. Diabat & Z. W. Geem. (2020). A Comprehensive Survey of the Harmony Search Algorithm in Clustering Applications. *Applied Sciences*, 10(11), 3827. DOI : 10.3390/app10113827
- [6] T. M. Vala, V. N. Rajput, Z. W. Geem, K. S. Pandya & S. C. Vora (2021). Revisiting the Performance of Evolutionary Algorithms, *Expert Systems with Applications*, 175, 114819. DOI : 10.1016/j.eswa.2021.114819
- [7] A. E. Kayabekir, G. Bekdas, M. Yücel, S. M. Nigdeli & Z. W. Geem. (2021). Harmony Search Algorithm for Structural Engineering Problems. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms for Engineering Optimization Applications*, 13-47. DOI : 10.1007/978-981-33-6773-9_2
- [8] J. H. Yoon & Z. W. Geem. (2021). Empirical Convergence Theory of Harmony Search Algorithm for Box-Constrained Discrete Optimization of Convex Function. *Mathematics*, 9(5), 545. DOI : 10.3390/math9050545
- [9] S. Tuo, Z. W. Geem & J. H. Yoon. (2020). A New Method for Analyzing the Performance of the Harmony Search Algorithm. *Mathematics*, 8(9), 1421. DOI : 10.3390/math8091421
- [10] Y. W. Jeong, S. M. Park, Z. W. Geem & K. B. Sim. (2020). Advanced Parameter-Setting-Free Harmony Search Algorithm. *Applied Sciences*, 10(7), 2586. DOI : 10.3390/app10072586
- [11] O. Castillo, F. Valdez, C. Peraza, J. H. Yoon & Z. W. Geem. (2021). High-Speed Interval Type-2 Fuzzy Systems for Dynamic Parameter Adaptation in Harmony Search for Optimal Design of Fuzzy Controllers. *Mathematics*, 9(7), 758. DOI : 10.3390/math9070758
- [12] Y. Y. Moon, Z. W. Geem & G. T. Han. (2018). Vanishing Point Detection for Self-Driving Car Using Harmony Search Algorithm. *Swarm and evolutionary computation*, 41, 111-119. DOI : 10.1016/j.swevo.2018.02.007
- [13] O. Castillo et al. (2020). Optimal Design of Fuzzy Systems Using Differential Evolution and Harmony Search Algorithms with Dynamic Parameter Adaptation. *Applied Sciences*, 10(18), 6146. DOI : 10.3390/app10186146
- [14] S. Kim, Z. W. Geem & G. T. Han. (2020). Hyperparameter Optimization Method Based on Harmony Search Algorithm to Improve Performance of 1D CNN Human Respiration Pattern Recognition System. *Sensors*, 20(13), 3697.

- DOI : 10.3390/s20133697
- [15] A. E. Kayabekir, Z. A. Arama, G. Bekdaş, S. M. Nigdeli & Z. W. Geem. (2020). Eco-Friendly Design of Reinforced Concrete Retaining Walls: Multi-Objective Optimization with Harmony Search Applications. *Sustainability*, 12(15), 6087. DOI : 10.3390/su12156087
- [16] Z. A. Arama, A. E. Kayabekir, G. Bekdaş & Z. W. Geem. (2020). CO2 and Cost Optimization of Reinforced Concrete Cantilever Soldier Piles: A Parametric Study with Harmony Search Algorithm. *Sustainability*, 12(15), 5906. DOI : 10.3390/su12155906
- [17] C. Cakiroglu, G. Bekdaş & Z. W. Geem. (2020). Harmony Search Optimisation of Dispersed Laminated Composite Plates. *Materials*, 13(12), 2862. DOI : 10.3390/ma13122862
- [18] G. Bekdaş, Z. A. Arama, A. E. Kayabekir & Z. W. Geem. (2020). Optimal Design of Cantilever Soldier Pile Retaining Walls Embedded in Frictional Soils with Harmony Search Algorithm. *Applied Sciences*, 10(9), 3232. DOI : 10.3390/app10093232
- [19] C. Cakiroglu, G. Bekdaş, S. Kim & Z. W. Geem. (2020). Optimisation of Shear and Lateral-Torsional Buckling of Steel Plate Girders Using Meta-Heuristic Algorithms. *Applied Sciences*, 10(10), 3639. DOI : 10.3390/app10103639
- [20] Z. A. Arama, A. E. Kayabekir, G. Bekdaş, S. Kim & Z. W. Geem. (2021). The Usage of the Harmony Search Algorithm for the Optimal Design Problem of Reinforced Concrete Retaining Walls. *Applied Sciences*, 11(3), 1343. DOI : 10.3390/app11031343
- [21] S. Ulusoy, G. Bekdaş, S. M. Nigdeli, S. Kim & Z. W. Geem. (2021). Performance of Optimum Tuned PID Controller with Different Feedback Strategies on Active-Controlled Structures. *Applied Sciences*, 11(4), 1682. DOI : 10.3390/app11041682
- [22] Y. H. Kim & Y. Yoon & Z. W. Geem. (2019). A Comparison Study of Harmony Search and Genetic Algorithm for the Max-Cut Problem. *Swarm and evolutionary computation*, 44, 130-135. DOI : 10.1016/j.swevo.2018.01.004
- [23] Y. C. Toklu, G. Bekdaş & Z. W. Geem. (2020). Harmony Search Optimization of Nozzle Movement for Additive Manufacturing of Concrete Structures and Concrete Elements. *Applied Sciences*, 10(12), 4413. DOI : 10.3390/app10124413
- [24] M. T. Ayvaz & Z. W. Geem. (2018). Optimum Design of the Booster Chlorination Systems by using Hybrid HS-Solver Optimization Approach. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 444-452.
- [25] M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Asadi & Z. W. Geem. (2019). Large-Scale Combined Heat and Power Economic Dispatch Using a Novel Multi-Player Harmony Search Method. *Applied Thermal Engineering*, 154, 493-504. DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.095
- [26] A. E. Kayabekir, G. Bekdaş, S. M. Nigdeli & Z. W. Geem. (2020). Optimum Design of PID Controlled Active Tuned Mass Damper via Modified Harmony Search. *Applied Sciences*, 10(8), 2976. DOI : 10.3390/app10082976
- [27] A. E. Kayabekir, Y. C. Toklu, G. Bekdaş, S. M. Nigdeli, M. Yücel & Z. W. Geem. (2020). A Novel Hybrid Harmony Search Approach for the Analysis of Plane Stress Systems via Total Potential Optimization. *Applied Sciences*, 10(7), 2301. DOI : 10.3390/app10072301
- [28] Y. C. Toklu et al. (2021). Total Potential Optimization Using Metaheuristic Algorithms for Solving Nonlinear Plane Strain Systems. *Applied Sciences*, 11(7), 3220. DOI : 10.3390/app11073220
- [29] M. Yücel, A. E. Kayabekir, G. Bekdaş, S. M. Nigdeli, S. Kim & Z. W. Geem. (2021). Adaptive-hybrid Harmony Search Algorithm for Multi-Constrained Optimum Eco-Design of Reinforced Concrete Retaining Walls. *Sustainability*, 13(4), 1639. DOI : 10.3390/su13041639
- [30] T. Bhattacharyya et al. (2020). Mayfly in Harmony: a New Hybrid Meta-Heuristic Feature Selection Algorithm. *IEEE Access*, 8, 195929-195945. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.3031718
- [31] K. H. Sheikh et al. (2020). EHHM: Electrical Harmony Based Hybrid Meta-heuristic for Feature Selection. *IEEE Access*, 8, 158125-158141. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.3019809
- [32] S. Ahmed, K. K. Ghosh, P. K. Singh, Z. W. Geem & R. Sarkar. (2020). Hybrid of Harmony Search Algorithm and Ring Theory-Based Evolutionary Algorithm for Feature Selection. *IEEE Access*, 8, 102629-102645. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.2999093

- [33] S. Saha et al. (2020). Feature Selection for Facial Emotion Recognition Using Cosine Similarity-based Harmony Search Algorithm. *Applied Sciences*, 10(8), 2816.
DOI : 10.3390/app10082816
- [34] J. H. Bae, M. Kim, J. S. Lim & Z. W. Geem. (2021). Feature Selection for Colon Cancer Detection Using *k*-means Clustering and Modified Harmony Search Algorithm. *Mathematics*, 9(5), 570.
DOI : 10.3390/math9050570
- [35] A. Prajapati & Z. W. Geem. (2020). Harmony Search-Based Approach for Multi-Objective Software Architecture Reconstruction. *Mathematics*, 8(11), 1906.
DOI : 10.3390/math8111906
- [36] T. Renugadevi, K. Geetha, K. Muthukumar & Z. W. Geem. (2020). Energy-efficient Resource Provisioning Using Adaptive Harmony Search Algorithm for Compute-Intensive Workloads with Load Balancing in Datacenters. *Applied Sciences*, 10(7), 2323.
DOI : 10.3390/app10072323
- [37] V. N. Rajput, K. S. Pandya, J. Hong & Z. W. Geem. (2020). A Novel Protection Scheme for Solar Photovoltaic Generator Connected Networks Using Hybrid Harmony Search Algorithm-Bollinger Bands Approach. *Energies*, 13(10), 2439.
DOI : 10.3390/en13102439

김 은 성(Eun-Sung Kim)

[학생회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 소프트웨어학부 학사과정
- 관심분야 : 웹 서버, 인공지능, 기계학습
- E-Mail : dmstjd365@naver.com

신 승 수(Seung-Soo Shin)

[학생회원]



- 2016년 3월 ~ 2021년 8월 : 광운대학교 소프트웨어학부 학사
- 2021년 9월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터 과학과 석사과정
- 관심분야 : 인공지능, 유전알고리즘, 기계 학습
- E-Mail : tmd0707@naver.com

김 용 혁(Yong-Hyuk Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 전산과학사 (이학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부(공학석사)
- 2005년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부(공학박사)
- 2005년 3월 ~ 2007년 2월 : 서울대학교 반도체공동연구소 연구원
- 2007년 3월 ~ 2017년 2월 : 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 조교수/부교수
- 2017년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 소프트웨어학부 교수
- 관심분야 : 최적화, 진화연산, 지식공학
- E-Mail : yhdfly@kw.ac.kr

윤 유 림(Yourim Yoon)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부(공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2014년 2월 : LG전자 연구소 선임연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 컴퓨터공학과 부교수
- 관심분야 : 최적화, 알고리즘, 진화연산
- E-Mail : yryoon@gachon.ac.kr