

글로벌 휴머노이드 로봇 연구의 국가 클러스터링과 특징분석: SOM-K-means 기반 분류

김문구, 강성일*, 최병창, 안혜경

한국전자통신연구원, *신용보증기금, 대전대학교, 서현커뮤니케이션

mkkim@etri.re.kr, *ryan.kang79@gmail.com, cbc71@korea.kr, samoa101@naver.com

Country Clustering of Global Humanoid Robotics Research: SOM - K-means Classificationsuq

Moon-Koo Kim, Sung-il Kang*, Byoung-chang Choi, Hye-Kyung An

ETRI, *KODIT, Daejeon University, Seohyun.com

요 약

본 연구는 글로벌 휴머노이드 로봇 연구의 국가별 연구 역량을 다차원적으로 비교하기 위해, 현황 지표와 성장 지표를 통합한 클러스터링 분석을 수행하였다. 분석 변수는 연구 생산량(분수 집계 논문수), 논문당 피인용(CPP), 국제협력 비율, 네트워크 중심성(Closeness)과 각 지표의 성장(대칭 성장률, 로짓 차이, Z-score 차이)으로 구성하였다. 방법론으로는 Self-Organizing Map(SOM)을 통해 다차원 구조를 시각화한 뒤, SOM 코드북 벡터에 대해 K-means를 적용하여 국가 군집을 도출하였다. 클러스터 수는 Silhouette, Davies-Bouldin, Calinski-Harabasz 지표와 해석 가능성을 종합해 5개로 결정하였다. 결과적으로 국가군은 (1) 글로벌 연구 허브, (2) 신흥 고성장 국가, (3) 영향력 급증 국가, (4) 고도 협력·고품질 선도국, (5) 네트워크 고립 국가로 구분되었다. 본 연구는 현황 중심의 정적 비교를 넘어 성장 동학과 네트워크 변화까지 반영함으로써, 국가별 발전 경로를 정책적으로 구분해 해석할 수 있는 근거를 제공한다.

I. 서 론: 연구배경

휴머노이드 로봇은 인간형 로봇의 지각, 제어, 학습, 상호작용 기술을 포괄하는 융합 연구 분야로, 제조 자동화, 재난 대응, 서비스 로봇, 헬스케어 등에서 파급효과가 크다[1]. 최근에는 대규모 학습 기반 인지 기술, 고성능 구동기, 센서 융합, 안전 제어 등 핵심 요소기술의 발전과 함께 연구 경쟁이 가속화되고 있다[2]. 이러한 환경에서 글로벌 연구 지형을 이해하기 위해서는 단순히 현재의 연구 규모나 인용 수준을 비교하는 접근만으로는 충분하지 않다. 동일한 현황을 보이더라도 성장 속도와 협력 네트워크의 변화에 따라 향후 연구 위상과 영향력은 크게 달라질 수 있기 때문이다.

기존의 국가 비교 연구는 생산량, 피인용, 협력 비율 등 정적 지표를 중심으로 국가 간 순위를 제시하거나, 특정 기간의 변화를 단순 증감률로 요약하는 경우가 많았다. 그러나 휴머노이드 로봇과 같이 빠르게 확장되는 분야에서는 연구의 “현재 위치”와 “진행 방향”을 동시에 관찰할 필요가 있다. 이에 본 연구는 현황 지표와 성장 지표를 결합하고, 다차원 데이터를 안정적으로 군집화할 수 있는 SOM-K-means 결합 절차를 적용하여 국가별 연구 패턴을 유형화하고자 한다. 이를 통해 국가 클러스터별 특성을 실증적으로 제시하고, 국제협력 및 연구정책 설계 관점에서 활용 가능한 시사점을 도출한다.

II. 본론: 연구 프로세스와 주요 연구결과

2.1 연구 설계 및 변수 구성

본 연구는 휴머노이드 로봇 관련 문헌의 계량서지 분석 결과를 바탕으로 국가 단위 지표를 구성하였다. 우선 SCOPUS를 통해 2015년부터 2025년

까지 글로벌 저널에 출판된 휴머노이드 관련 논문을 검색하였다(총 4207 논문 검색). 분석 기간은 기준기간(2015년부터 2020년)과 최근기간(2021년부터 2025년)으로 구분하였다. 클러스터링에는 총 8개 변수를 사용하였다. 현황 변수는 국가별로 논문수, 논문당 피인용(CPP), 국제협력 비율, 네트워크 Closeness 중심성으로 구성하였다. 성장 변수는 동일 지표의 시점 간 변화로 정의하되, 측정의 타당성을 위해 변수 특성에 맞춘 변환을 적용하였다. 논문수와 CPP는 대칭 성장률(Symmetric Growth Rate)을 사용하였고, 0~1 범위의 협력 비율은 로짓 변환 차이(Δlogit)를 사용하였다. 네트워크 중심성은 시점별 분포 차이를 통계하기 위해 Z-score 차이(ΔZ)를 사용하였다. 변수 간 척도 차이를 제거하기 위해 StandardScaler로 표준화(평균 0, 분산 1)를 수행하였다. 또한 다중공선성 점검을 통해 변수 간 강한 중복을 배제하였으며, VIF가 3 미만으로 유지되어 클러스터링에 활용 가능한 수준의 독립성을 확보하였다.

2.2 SOM 기반 차원 축약 및 K-means 군집화

휴머노이드를 연구한 국가는 총 91개국으로 나타났으며 이 가운데, 논문 생산과 인용이 전체 기간, 해당 기간에서 각각 0.1% 이상 해당된 국가를 선별한 결과 39개국으로 나타났으며 본 국가 데이터를 바탕으로 군집분석을 실시하였다. 다차원 변수의 비선형 구조와 군집 경계를 보다 안정적으로 식별하기 위해 SOM을 먼저 적용하였다. SOM은 고차원 데이터를 2차원 격자에 사상하면서 유사한 관측치가 인접하도록 학습한다는 점에서, 국가 연구 프로파일의 연속적 분포와 부분적 중첩을 표현하는 데 적합하다[3]. 본 연구는 8×4 격자(총 32 뉴런)와 Hexagonal 토폴로지를 사용하였고, 10,000회 반복 학습, Gaussian 이웃함수, 초기 학습률 0.5 조건으로 학습하였다. 성능 지표로는 Quantization Error(QE)와 Topographic Error(TE)를 확인하였으며, 대안 격자와 비교해 데이터 표현력과 구조 보

존의 균형이 양호한 격자를 최종 선택하였다. 다음 단계로 SOM의 코드북 벡터를 대상으로 K-means를 적용하여 최종 국가 클러스터를 도출하였다. 클러스터 수(k)는 2~10 범위에서 Silhouette, Davies-Bouldin, Calinski-Harabasz 지표를 비교하고, 통계적 성능과 해석 가능성을 함께 고려해 결정하였다. 본 분석에서는 k=5가 Silhouette 0.1954, Davies-Bouldin 1.2864, Calinski-Harabasz 8.53로 가장 적합하였다.

2.3 주요 연구결과: 5개 국가 클러스터의 유형화

클러스터링 결과, 39개국은 다음과 같이 <표 1>과 같이 총 5개 유형으로 구분되었으며 이들 국가의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 글로벌 연구 허브(클러스터 1, 6개국)는 중국, 미국, 독일, 일본, 한국, 이탈리아로 구성되며, 매우 높은 연구 생산량과 최고 수준의 네트워크 접근성이 특징이다. 이 집단은 지식 생산과 확산의 중심 역할을 수행하나, 국제협력 비율은 평균 이하 수준으로 나타나 내향적 연구 구조의 강화 가능성이 관찰된다. 내부적으로는 중국의 대규모 생산, 미국의 높은 CPP 등 차별적 강점이 공존한다.

둘째, 신흥 고성장 국가(클러스터 2, 14개국)는 연구 생산의 증가가 가장 두드러지지만, 현재 CPP 수준이 낮고 협력 변화가 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 양적 확대가 진행되는 반면 질적 성과 전환과 네트워크 통합이 충분히 동반되지 않을 수 있음을 시사한다. 해당 집단은 역량 구축과 국제협력 설계의 정책적 우선 대상이 될 수 있다.

셋째, 영향력 급증 국가(클러스터 3, 5개국)는 생산량 성장 자체는 낮지만 CPP 성장과 네트워크 중심성의 개선이 크게 나타난 집단이다. 협력 변화가 증가하고 중심성이 상승한 점을 고려하면, 선택과 집중형 연구 투자, 고임팩트 국제공동연구 확대 등 “질 중심 전환” 메커니즘이 작동했을 가능성이 높다. 이 집단은 양적 확대보다 질적 성과를 견인하는 경로를 보여주는 사례로 해석될 수 있다.

넷째, 고도 협력·고품질 선도국(클러스터 4, 12개국)은 국제협력 비율이 가장 높고 CPP가 최고 수준인 집단이다. 중간 규모의 생산량에도 불구하고 협력 기반으로 연구 품질을 끌어올리는 패턴이 뚜렷하며, 글로벌 네트워크에서 높은 접근성을 유지한다. 국제협력의 품질 제고 효과가 가장 잘 나타나는 유형으로, 신흥국과의 연계 확산 거점으로 기능할 잠재력이 있다.

다섯째, 네트워크 고립 국가(클러스터 5, 2개국)는 덴마크와 슬로베니아로 구성되며, 생산량 성장에도 불구하고 협력과 중심성이 급격히 하락한 것이 핵심 특징이다. 특히 협력 지표의 로짓 차이가 큰 폭의 감소가 나타나고 있다.

종합하면, 본 연구는 국가별 연구 위상이 단일 차원에서 결정되지 않으며, 생산량, 영향력, 협력, 네트워크 위치와 그 변화가 결합된 다차원 프로파일로 이해되어야 함을 보여준다. 또한 협력과 영향력 간 연관이 관찰되며, 협력 중심 전략이 품질 향상으로 연결될 가능성을 시사한다. 반대로 생산 확대만으로는 질적 성과가 자동 확보되지 않으며, 협력 감소와 중심성 하락은 성장률이 높더라도 장기 경쟁력에 부정적일 수 있다.

III. 결론

본 연구는 글로벌 휴머노이드 로봇 연구의 국가별 지형을 현황과 성장이라는 두 관점에서 통합적으로 분석하고, SOM-K-means 결합 절차를 통해 5개 국가 유형을 도출하였다. 분석 결과, 글로벌 허브 국가군과 협력·고품질 선도국이 연구 확산과 품질 측면에서 핵심 축을 형성하는 반면, 신흥 고성장 국가군은 양적 확대에서 질적 성과 전환으로의 정책적 지원이 요구되는 것으로 나타났다. 또한 영향력 급증 국가군은 협력과 네트워크 개선을 통해 질 중심 전환이 가능함을 보여주며, 네트워크 고립 국가군은 성장률이 높더라도 협력 붕괴와 중심성 하락의 가능성을 보여주었다. 특히 한국은 중국, 미국, 독일, 일본, 이탈리아와 함께 글로벌 6개 휴머노이드 로봇 연구강국을 형성하여 더욱 연구개발 투자와 기술개발이 활성화가 필요한 상황으로 나타났다.

본 연구의 학술적 의의는 현황 중심의 정적 비교를 넘어 성장 동학과 네트워크 변화까지 포함한 클러스터링 틀을 제시했다는 점에 있다. 실무적으로는 국가별 현재 위치와 발전 경로에 맞춘 맞춤형 국제협력 전략과 연구 정책 포트폴리오 설계에 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 연도별 다중 시점 자료를 확장하여 클러스터 이동과 전이 가능성을 분석하고, 토픽 모델링 등 내용 기반 분석을 결합하여 국가군 내부의 세부 연구 주제와 기술 포지셔닝을 정밀하게 비교할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] 해수 외, “피지컬 AI의 현황과 시사점,” 소프트웨어정책연구소 이슈리포트, IS-202, 202

[2] 서행아, 주경원, “글로벌 AI 패권 경쟁: 중국 동향과 시사점,” 한국과학기술기획평가원 KISTEP 브리프, 제175호, 202

[3] Kohonen, T. (2001). An overview of SOM. Self-organizing maps, 347-371.

<표 1> 글로벌 휴머노이드 로봇 연구의 국가 클러스터링 및 클러스터별 특징

클러스터	국가 구성	현황 강점 (STATUS)	성장 동력 (GROWTH)	핵심 시사점
C1. 글로벌 허브 Global Research Hubs	6개국 중국, 미국, 독일, 일본, 한국, 이탈리아	규모 최상, 중심성 최상 • 압도적 연구 생산량 (평균 10배) • 가장 높은 네트워크 접근성	안정적 • 양적 성장보다는 질적 유지 • 이미 성숙된 성장 패턴	"Dominant Players" 글로벌 연구 생태계를 주도, 기초 연구와 응용 상용화의 균형 유지 및 네트워크 리더십 지속 강화 필요.
C2. 신흥 고성장 Emerging High-Growth	14개국 베트남, 사우디, 튀르키예, 브라질 등	품질 저조 • 가장 낮은 질적 수준(CPP) • 네트워크 주변부 위치	생산 급등 • 최고 수준의 양적 성장률 • 네트워크 진입 시도 활발	"Quantity over Quality" 빠른 추격자 그룹. 급격한 양적 팽창에 비해 낮은 질적 성과 리스크. 우수 연구 코칭 및 협력 지원 시급.
C3. 영향력 급증 Rapidly Rising Impact	5개국 캐나다, 인도, 이란, 러시아, 대만	규모 보통 • 중위권 연구 규모 • 준수한 초기 인프라	CPP 폭발, 중심성 ↑ • 영향력(피인용) 비약적 상승 • 네트워크 허브로 부상 중	"Quality Leapfrogging" 질적 전환에 성공한 유망주. 높아진 위상을 바탕으로 글로벌 협력 주도권 확보 가능성 높음.
C4. 고도 협력 High Coop. & Quality	12개국 영국, 스위스, 싱가포르, 프랑스 등	품질 최상, 협력 최상 • 가장 높은 CPP 및 협력 비율 • 선진 연구 인프라 보유	안정적 • 지속 가능한 질적 성장 • 협력 네트워크 확장 지속	"Prestige Leaders" 강소국 및 선진 유럽 국가 중심. 개방형 혁신의 모범 사례이며, 기술 표준 및 윤리 논의 주도에 적합.
C5. 네트워크 고립 Network Isolated	2개국 덴마크, 슬로베니아	소규모 • 작은 연구 규모 • 과거 높은 협력 이력 보유	생산 ↑ 협력 붕괴 • 양적 생산은 늘지만 협력 단절 • 중심성 급격히 하락	"Isolation" 다른 국가와 협력이 줄어드는 국가. 휴머노이드 연구영향력 확대를 위해 협력강화 필요