

효율적 진동 에너지 하베스팅을 위한 학습 기반 적응형 주파수 튜닝 기법 연구

배이레, 김서현, 김준영*

성신여자대학교

20231369@sungshin.ac.kr, 20231327@sungshin.ac.kr, *jkim@sungshin.ac.kr

Learning-based Adaptive Frequency Tuning for Efficient Vibration Energy Harvesting

Ire Bae, Seo Hyeon Kim, Jun Young Kim*

Sungshin Women's University

요약

일반적인 선형 진동 에너지 하베스터는 환경에서 발생하는 신호의 입력 주파수와 하베스터의 고유 공진 주파수가 일치할 때, 최대 효율이 발생한다. 가변적인 입력 주파수의 특성상 이를 선형적으로 조정하는 부분에 대한 난제가 존재하는 바, 이를 학습 모델로 조정하여 에너지 하베스팅을 극대화하는 기법이 필수적이다. 본 연구에서는 이동형 플랫폼의 가변 진동 환경에서 에너지 하베스팅의 최적화를 위해 입력 신호의 학습 모델 기반의 주파수 정밀 조정 기법을 제안하며 이에 대한 성능 분석을 진행한다.

I. 서론

진동 에너지 하베스팅(Vibration Energy Harvesting, VEH)은 환경의 미 활용 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기술로, 자율 센서 네트워크 및 무선 센서 노드의 지속 가능한 전력 공급 솔루션으로 주목받고 있다. VEH 시스템의 효율성 경우 입력 진동 신호 주파수와 하베스터의 공진 주파수 간 일치로써 결정되는데, 외부 환경상 입력 진동 주파수 경우 변동성이 존재한다. 이와 대비해 기존 선형 VEH 시스템 경우 고정 공진 주파수 기반하에 설계되어 있어, 환경 주파수 변동 대응의 한계성을 가진다. 따라서 시스템 고유 주파수를 진동 환경에 맞게 변경하는 주파수 튜닝 기술 개선이 요구된다 [1]. 외부로부터 기계, 전기, 자기적 힘을 이용한 튜닝 방법들이 존재하나 이러한 하드웨어적 튜닝 대신 가변 진동에도 유연하게 튜닝할 수 있는 설계가 요구된다. 본 논문에서는 이동형 플랫폼에서 발생하는 가변 진동을 분석하여 최적 하베스터 유닛 결정을 위한 주파수 적응형 튜닝 시스템을 제안한다. 제안 기법 경우 이동형 플랫폼에서 발생하는 진동 주파수의 학습 기반 튜닝을 통해 하베스터의 고정 공진 주파수에 맞춘 정밀 튜닝을 소프트웨어 기반으로 가능하게 한다.

II. 에너지 하베스팅 및 시스템 구성

선형 에너지 하베스터 이론에 기초하여, 하베스터의 고유 주파수(w_n)와 입력 주파수(w)가 일치하지 않는 가변 진동 환경에서의 예상 출력 전력($|P|$)은 다음 식 (1)과 같다 [2].

$$|P| = \frac{m\zeta_e\omega_n\omega^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 Y^2}{(2\zeta_T\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right))^2 + (1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2)^2} \quad (1)$$

m 은 관성 질량(proof mass), ζ_e 는 전기적 감쇠비, ζ_T 는 전체 감쇠비($\zeta_e + \zeta_m$), Y 는 입력 진동의 변위 진폭이다. 식 (1)에서 보면 주파수 대비 입력 주파수 비율이 1 이상일 때 분모 항이 급격히 커져 전력이 감소함을 보여주며, 본 논문에서 제안한 하베스팅 시스템의 기본 근간이 된다.

기존 연구에 따라 목표 환경의 진동 특성 조사 및 분석 결과, 실제 이동형 플랫폼 환경에서 측정한 입력 진동 지배 주파수 대역이 35.57 ~

61.97Hz 임을 확인하였다 [3]. 이에 맞춰 본 연구에서는 하베스터의 공진 주파수를 본 대역 범위 내 주파수 중 40Hz, 50Hz, 60Hz로 가정한다. 진동 신호 측정을 위해 MPU6050 내부 필터 통해 초저주파 성분 및 고주파 노이즈를 물리적으로 감쇠시킨다. 이를 통해 센서 출력 신호는 하드웨어 단계 내 목표 주파수 대역으로 제한시킨다 [4]. 실제 환경 재현을 위해 TurtleBot3 Burger에 MPU6050을 부착하여 0.03m/s 속도로 주행하며 590Hz 샘플률로 데이터 수집하였다. 하베스터 효율 평가 핵심 지표인 진동 에너지 전력값 경우 입력 가속도에 정의되며 주행 중 발생하는 수직 진동의 안정적 포착을 위해, 플랫폼 표면에 수직인 z축 가속도 신호를 주 분석 대상으로 선정하였다 [5]. 수집 신호 내 주파수 분석을 위한 FFT 크기는 주파수-시간 해상도의 trade-off를 고려하여 1024이며 그림 1 내 상기 언급된 주요 진동 지배 주파수 대역 내 높은 피크가 확인이 가능하다.

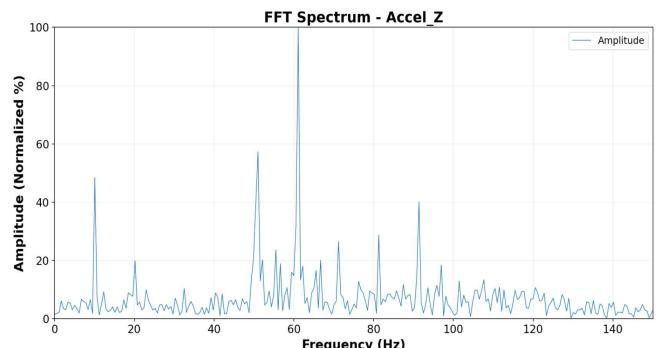


그림 1. 에너지 하베스팅 입력 신호의 주파수 대역 (FFT 크기: 1024)

다양한 입력 가속도 환경 내 시스템 주파수 특성의 일관성을 위해 FFT 값 대비 에너지 기반 정규화를 수행하였다. 이후 공진 주파수별 하베스터 물리적 특성 반영을 위해 품질 계수(Quality Factor, Q) 기반 대역폭을 적용하였다. 본 논문은 시스템의 감쇠 특성을 고려하여 $Q = 10$ 으로 가정하였으며, 식 (1)의 감쇠비와 아래와 같이 식 (2)를 통해 도출된 대역폭 내의 FFT 에너지를 합산하여 각 공진 주파수의 특징 값으로 추출하였다.

$$BW_i = \frac{f_i}{Q}, \quad (Q = \frac{1}{2\zeta_T}) \quad (2)$$

그림 2는 본 논문에서 제안하는 전체 시스템 구성도를 나타낸다. 시스템은 데이터 수집 및 전처리, ML 모델을 통한 주파수 매핑, 최종 에너지 하베스터 유닛 선택을 통한 주파수 교정 단계로 구성하였다.

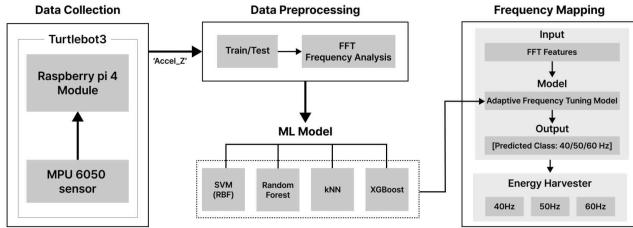


그림 2. 제안하는 전체 시스템 구성도 다이어그램

III. 실험 평가

본 실험에는 TurtleBot3 Burger 주행으로 수집한 총 180만 개의 시간 영역 샘플을 사용하였다. 수집된 원시 신호는 Window size 1024, Stride 512를 적용한 슬라이딩 윈도우 방식으로 분할하여 총 3,492개의 윈도우 샘플을 생성하였다. 이를 80:20 비율로 훈련 데이터와 테스트 데이터로 분할하여 훈련 데이터는 2,716개, 테스트 데이터는 776개로 구분하였다. 이동형 플랫폼 기반 진동 환경 특성상, 노면 변화의 영향을 많이 받는 조건에서도 각 공진 주파수의 특성이 안정적으로 유지되어야 한다. 이에 학습 모델의 일반화 성능 향상을 위해 가우시안 정규 분포 기반 노이즈 증강을 적용하였다. 노이즈 증강은 SNR -20dB, -10dB, 0dB, 5dB, 10dB의 다섯 가지 조건으로 수행하였다. 이때, 데이터 셋의 공진 주파수 50Hz에 해당하는 클래스 불균형 문제를 해결하기 위해 공진 주파수 클래스의 샘플 수를 최대 클래스에 맞추도록 증강 배수를 계산하고 이를 반복 적용하였다.

본 논문에서는 추출된 주파수 특징을 바탕으로 40Hz, 50Hz, 60Hz 중 최적의 유닛을 결정하기 위해 SVM(RBF Kernel), Random Forest(RF), kNN, XGBoost 4가지 기계학습 알고리즘을 적용하였다. 각 모델은 입력 진동의 지배적 주파수를 실시간으로 감지하여, 하베스터의 고유 주파수가 입력 주파수와 일치하는 공진 상태를 구현하는 것을 목표로 한다. 분류 성능의 정량적 평가를 위해 정밀도(Precision)와 재현율(Recall)을 통한 F1 score를 평가 지표로 활용하였다.

표 1 공진 주파수에 대한 모델별 투닝 성능 비교 (F1 score 기준)

Freq.(Hz) Model	40	50	60
SVM (RBF)	0.74	0.13	0.36
RF	0.87	0.22	0.72
kNN	0.98	0.33	0.8
XGBoost	0.91	0.32	0.72

표 1은 각 모델이 SNR 10dB 조건에서 입력 진동의 지배 주파수를 추정하고, 이에 기반하여 공진 조건에 맞는 하베스터 유닛을 선택하는 과정 내 주파수 투닝 성능을 비교한 결과이다. 40Hz와 60Hz 진동에서의 높은 정밀도 및 재현율은 제안 시스템의 안정적인 주파수 투닝 성능을 시사한다. 반면, 50Hz 진동의 낮은 성능 경우 인접 주파수와의 중첩과 한정된 데이터 셋의 영향이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

표 2 각 SNR별 60Hz 공진 주파수 대상 투닝 성능 비교 (F1 score 기준)

SNR Model	-20 dB	-10 dB	0 dB	5 dB	10 dB
SVM (RBF)	0.00	0.00	0.04	0.15	0.36
RF	0.40	0.44	0.56	0.63	0.72
kNN	0.40	0.44	0.59	0.70	0.80
XGBoost	0.38	0.46	0.58	0.67	0.72

표 2는 각 SNR 조건별로 노이즈 환경에서의 특정 주파수 대역에 대한 성능 평가 결과이다. SNR이 증가함에 따라 모든 모델 성능이 점진적으로 향상되며, 특히 kNN 기반 투닝은 SNR 10dB에서 0.8의 높은 F1 score를 보인다. 이는 노면 변화 등 실제 환경의 노이즈에서도 최적 하베스터 유닛 선택을 신뢰할 수 있음을 시사한다.

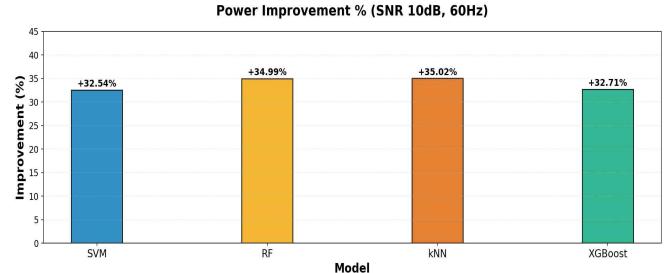


그림 3. 고정형 하베스터 대비 전력 향상을 비교

그림 3은 60Hz 공진 주파수, SNR 10dB 조건에서 학습된 투닝 알고리즘이 결정한 유닛에 따라 산출된 진동 에너지 하베스터의 예상 전력 시뮬레이션 결과이다. 예상 전력은 식 (1)에 기반으로 계산하였으며, 고정형 하베스터 대비 전력 향상률은 투닝 적용 전후의 평균 전력을 기준으로 비교하여 상대적인 개선 효과를 백분율로 정량화하였다. 모든 투닝 모델에서 고정형 하베스터 대비 전력 수확량이 유의미하게 향상했으며, 특히 kNN 기반 투닝은 기준 대비 34.8%에 달하는 높은 전력 향상률을 보여 주파수 투닝 기법의 효과를 입증한다.

IV. 결론

본 논문은 진동 환경에서 에너지 하베스터의 고유 공진 주파수에 입력 진동 주파수를 투닝하는 소프트웨어 기반의 주파수 투닝 에너지 하베스팅 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 고정형 하베스터 대비 최대 34.8%에 달하는 전력 향상률을 나타냄으로써, 실제 전력 수확량을 증가시킬 수 있음을 정량적으로 입증하였다. 향후 연구는 실제 하베스터 하드웨어를 포함한 실험적 검증과 진동 에너지 하베스팅 기반의 에너지 자립형 IoT 노드 구축 방향으로 확장할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국연구재단 논문연구과제 (2022R1G1A1009023)의 연구 결과로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] B. C. Lee and G.-S. Chung, "주파수 투닝이 가능한 진동형 에너지 하베스터에 관한 연구," *J. Sens. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 3, 2014.
- [2] Shad Roundy, Paul K. Wright, and Jan Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Computer Communications*, vol. 26, no. 11, pp. 1131-1144, 2003.
- [3] 김영철, "진동 에너지 하베스터의 원리 및 응용," *기계저널(대한기계 학회지)*, 제55권, 제4호, pp. 30-34, 2015.
- [4] TDK-InvenSense, "MPU-6050 Register Map and Descriptions," Rev. 4.2, Sep. 2013.
- [5] C. M. Kim, C.-I. Kim, J.-H. Lee, J.-H. Paik, J.-H. Cho, M.-P. Chun, Y.-H. Jeong, and Y.-J. Lee, "Design and evaluation of a piezoelectric energy harvester produced with a finite element method," *Trans. Electr. Electron. Mater.*, vol. 11, no. 5, pp. 206-211, Oct. 2010.