

환경 데이터 기반 스마트 관수 자동 제어 알고리즘 설계

정현창, 이명훈*

국립순천대학교, *국립순천대학교

gusckd555@naver.com, *leemh777@scnu.ac.kr

Design of a Smart Irrigation Automatic Control Algorithm Based on Environmental Data

Jeong Hyeonchang, Lee Meonghun*

Sunchon National Univ., *Sunchon National Univ.

요약

본 연구에서는 스마트농업 환경에서 수집되는 시계열 환경 데이터를 활용하여 관수량을 예측하는 머신러닝 기반 관수 자동 제어 알고리즘을 설계하였다. 관수 의사결정을 관수량 예측 문제로 정의하고, 토양 수분, 토양 온도, 대기 온도, 상대습도, 일사량 및 작물 계수를 입력 변수로 구성하였다. 수집된 환경 데이터는 전처리 과정을 거쳐 학습 데이터셋으로 구축하였으며, 학습된 머신러닝 회귀 모델을 활용하여 관수량을 산출하였다. 또한 예측 결과를 관수 제어에 직접 적용하기 위해 입력 검증, 예측값 타당성 검증 및 관수량 범위 제한을 포함한 관수 의사결정 알고리즘을 설계하였다. 모델의 예측 성능은 회귀 지표를 통해 평가하였다. 본 연구는 머신러닝 기반 관수 자동 제어를 위한 알고리즘 설계에 초점을 두었다는 점에서 의의가 있다.

1. 서론

기후 변화와 물 자원 이용 효율에 대한 요구가 증가함에 따라, 농업 분야에서는 관수 제어의 정밀화와 자동화를 위한 기술적 접근이 중요해지고 있다[1]. 특히 스마트농업 환경에서는 토양 수분, 기온, 습도 등 다양한 환경 데이터가 실시간으로 수집되고 있으며, 이를 활용한 관수 자동 제어 시스템이 상용 제품 형태로 보급되고 있다. 그러나 현재 활용되고 있는 다수의 관수 제어 제품은 토양 수분 또는 기온과 같은 일부 핵심 변수만을 기준으로 관수를 제어하는 구조를 갖고 있다. 이러한 방식은 시스템 구현과 운용 측면에서는 단순성이 장점이 될 수 있으나, 환경 변수 간의 복합적인 상호 작용이나 시간에 따른 변화 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 그 결과, 특정 환경 조건에서는 과잉 또는 부족 관수가 발생할 가능성이 존재한다.

스마트농업에서 수집되는 환경 데이터는 시간에 따라 변화하는 특성을 가지며, 토양 수분, 기온, 상대습도와 같은 여러 변수가 복합적으로 작용한다[2]. 이러한 특성으로 인해 단일 변수에 설정된 임계값을 기준으로 관수량을 판단하는 방식은 다양한 환경 조건을 충분히 반영하기 어렵다. 따라서 다수의 환경 변수를 동시에 고려하고, 이들 간의 관계를 종합적으로 학습할 수 있는 데이터 기반 관수 의사결정 접근이 필요하다[3].

본 연구에서는 스마트농업 환경에서 수집되는 시계열 환경 데이터를 활용하여 관수량을 예측하는 머신러닝 기반 관수 자동 제어 알고리즘을 설계한다. 관수량 산정을 데이터 기반 의사결정 문제로 정의하고, 환경 변수의 복합적 특성을 반영할 수 있는 머신러닝 모델을 적용함으로써 기존의 제한된 변수 기반 관수 제어 방식이 갖는 한계를 보완하고자 한다.

II. 본론

II.1 환경 데이터 기반 관수 문제 정의 및 입력 변수 구성

본 연구에서는 관수 의사결정을 환경 데이터에 기반한 관수량 예측 문제로 정의한다. 스마트농업 환경에서 수집되는 토양 수분, 토양 온도, 대기 온도,

상대습도, 일사량과 같은 환경 데이터는 관수 의사결정에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수로 활용된다[4]. 이러한 데이터는 일정 시간 간격으로 수집되는 시계열 형태로 구성되며, 관수 시점 이전의 환경 변화가 관수량 산정 결과에 반영 되도록 입력 벡터를 구성한다. 관수량은 특정 시점에서 시스템이 공급해야 할 물의 양을 나타내는 연속값(mm)으로 정의한다.

표 1. 데이터 수집 항목

Table 1. Data collection items

구분	변수명	단위
토양 환경 데이터	Soil moisture(θ)	%
토양 환경 데이터	Soil temperature	°C
대기 환경 데이터	Air temperature	°C
대기 환경 데이터	Relative humidity	%
복사 환경 데이터	Solar radiation	W/m ²
생육 보조 데이터	Crop coefficient(Kc)	-

II.2 데이터 전처리 및 학습 데이터셋 구축

수집된 환경 데이터는 센서 오차 및 통신 환경에 따른 이상값과 결측값을 포함할 수 있으므로, 머신러닝 모델 학습을 위해 전처리 과정을 수행한다. 본 연구에서는 Z-score 기반 방법을 활용하여 이상값을 탐지·제거하고, 선형 보간 기법을 적용하여 결측값을 보정한다[5]. 이후 변수 간 단위 차이에 따른 영향을 최소화하기 위해 정규화 과정을 적용한다. 전처리된 시계열 데이터는 일정 시간 구간을 기준으로 입력 벡터로 구성되며, 전체 데이터는 학습 데이터와 검증 데이터로 분할하여 모델 학습 및 성능 평가에 활용한다. 입력 벡터는 관수 시점 이전 일정 시간 구간의 환경 데이터를 포함하도록 구성하였다.

표 2. 전처리된 환경 데이터의 일부

Table 2. Sample of the preprocessed environmental data

날짜	토양 수분 (%)	토양 온도 (℃)	대기 온도 (℃)	상대 습도 (%)	일사량 (Wh/m ²)	작물 계수
25.08.01	31.0	23.0	29.0	73	360	0.6
25.08.05	29.2	24.2	31.5	66	380	0.6
25.08.10	27.8	25.0	33.0	61	410	0.6
25.08.15	27.5	25.2	33.5	63	400	0.6
25.08.20	26.6	25.4	34.0	59	430	0.6
25.08.25	28.5	24.8	31.2	68	390	0.6
25.08.31	29.0	24.5	31.8	67	370	0.6

II.3 머신러닝 기반 관수 의사결정 알고리즘 설계

본 연구에서는 학습된 머신러닝 회귀 모델을 기반으로 관수량을 산정하기 위한 알고리즘 절차를 설계하였다. 제안 알고리즘의 목적은 머신러닝 모델의 예측 결과를 관수 제어에 직접 적용 가능하도록 안정화하는 데 있다.

알고리즘은 각 관수량 산정 시점 t 에서 전처리 및 특징 구성이 완료된 입력 벡터 $\phi(t)$ 를 입력으로 한다. 입력 데이터는 모델 학습에 사용된 데이터 분포 범위 내에 존재하는지를 우선적으로 검증하며, 학습 범위를 벗어난 경우에는 입력값을 보정하여 예측 불안정을 완화하도록 설계하였다.

입력 검증 이후, 학습된 머신러닝 회귀 모델을 이용하여 관수량 예측값 $\hat{y}(t)$ 를 산출한다. 산출된 예측값은 그대로 사용하지 않고, 물리적 타당성 검증 단계를 거쳐 음수 또는 비현실적인 값이 발생한 경우 이를 보정한다. 이후 예측된 관수량이 시스템에서 허용 가능한 관수량 범위 내에 존재하는지를 추가로 확인하며, 범위를 초과하는 경우 사전에 정의된 값으로 제한한다.

마지막으로, 예측 결과의 신뢰도를 평가하여 데이터 이상 상황 등으로 인해 예측 신뢰도가 낮다고 판단되는 경우에는 보수적인 관수량을 적용하도록 설계하였다. 이러한 절차를 통해 최종적으로 산출된 관수량은 관수 제어 단계에 직접 적용 가능한 값으로 출력된다.

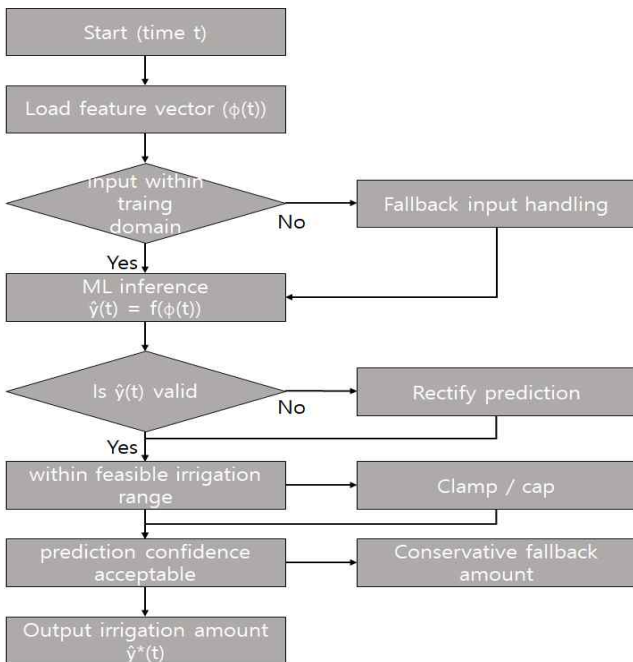


그림 1. 머신러닝 기반 관수량 예측 알고리즘 흐름도

Fig 1. Flowchart of the machine learning-based irrigation amount prediction algorithm

II.4 모델 학습 및 성능 평가 방법

본 연구에서는 환경 데이터와 관수량 데이터를 이용하여 머신러닝 회귀 모델을 학습하였다. 학습 데이터는 전처리 및 특징 구성이 완료된 환경 변수와 이에 대응하는 관수량(mm)으로 구성된 입력-출력 쌍으로 이루어진다. 모델 학습은 기존에 널리 사용되는 머신러닝 회귀 모델을 적용하여 오프라인 환경에서 수행하였다. 전체 데이터셋은 학습용과 검증용으로 분할하였으며, 학습된 모델은 II.3에서 제안한 관수 의사결정 알고리즘에 적용된다.

모델의 예측 성능은 회귀 문제에 적합한 성능 지표를 이용하여 평가하였다. 본 연구에서는 평균 절대 오차(MAE)와 평균 제곱근 오차(RMSE)를 사용하여 예측 오차 수준을 확인하였다. 성능 평가는 제안 알고리즘에 적용 가능한 수준의 예측 성능을 확보하였는지 여부를 확인하는 데 목적이 있다.

III. 결론

본 연구에서는 스마트농업 환경에서 수집되는 시계열 환경 데이터를 활용하여 관수량을 예측하는 머신러닝 기반 관수 자동 제어 알고리즘을 설계하였다. 다변량 환경 데이터의 복잡한 특성을 반영하기 위해 관수량 산정을 데이터 기반 의사결정 문제로 정의하고, 학습된 머신러닝 회귀 모델을 활용한 관수 의사결정 절차를 제안하였다.

제안 알고리즘은 토양 수분, 토양 온도, 대기 온도, 상대습도, 일사량 및 작물 계수를 입력으로 하여 관수량을 연속값(mm)으로 예측하며, 예측 결과를 관수 제어에 직접 적용할 수 있도록 입력 검증, 예측값 타당성 검증, 관수량 범위 제한 및 신뢰도 기반 보수 처리를 포함하도록 설계되었다. 이를 통해 예측 불안정 상황에서도 관수 제어에 적용 가능한 관수량을 안정적으로 산출할 수 있다.

또한 환경 데이터 전처리와 회귀 성능 지표 기반 평가를 통해 제안 알고리즘의 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구는 머신러닝 모델의 성능 비교보다는 관수 자동 제어를 위한 알고리즘 설계에 초점을 두었다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 다양한 재배 환경을 대상으로 한 데이터 확장 및 실증 적용을 통해 알고리즘의 실효성을 검증할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 2025년도 전라남도 재원으로 전남인재평생교육진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다.”

참 고 문 헌

- [1] 박선기, 김기현, “시설 재배 작물의 최적화된 생육환경을 위한 관수관리 시스템 구축 및 생육 분석에 관한 연구”, 차세대융합기술학회논문지 제4권 제3호, pp. 312-319, 2020
- [2] 노미진, “스마트 농업의 작물 생존 예측을 위한 인공지능 분석”, (사)한국스마트미디어학회, 제14권 제3호, pp. 19-26, 2025
- [3] 윤건우, 김효성, 정기열, 권순홍, 김준순, “정밀 관배수를 위한 밭작물 토양에서 머신러닝을 이용한 토양 온도 예측”, 제27권 제6호, pp. 1629-1637, 2024
- [4] 정진형, 조재현, 김승훈, 최안렬, 이상식, “근권 환경부 측정장치를 이용한 지역별 관수제어 모델링 연구”, 한국정보전자통신기술학회 논문지 제14권 제2호, pp. 168-174, 2021
- [5] 이성재, 심현, “스마트팜 데이터 품질 향상을 위한 이상치 및 결측치 보정 방법에 관한 연구”, 한국전자통신학회 논문지, 제19권 제5호, pp. 1027-1034, 2024