

박정현 · 강민구 · 이용화 | **보안** 팀

비전 AI 기반 건설 노동자 근골격계 부담작업 실시간 모니터링 시스템

본 작품은 현장 CCTV 영상을 활용하여 건설 노동자의 3D 관절 좌표를 실시간 추출하고, 인간공학 평가 지표(OWAS · REBA · RULA) 및 고용노동부 고시 기준에 따라 근골격계 부담작업을 정량 평가하는 실시간 지능형 관제 시스템입니다. 사각지대 연속 추적과 '시간 누적 트리거' 기반의 오진 필터링 기술을 통해 정밀 관제를 수행하며, 개인정보 비식별화 및 데이터 암호화(AES-256/SHA-256)를 거쳐 행정 제출용 유해요인조사 리포트를 자동 생성함으로써 보건관리 사각지대에 놓인 중소규모 현장의 안전보건 행정 무인화를 구현합니다.

VISION-BASED
CONSTRUCTION WORKER
MUSCULOSKELETAL
DISORDER RISK
PREVENTION
MONITORING SYSTEM

CONSTRUCTION &
MANAGEMENT

시공



박정현 Park junghyun
학번 | 2101453
E-mail | junghyeon1413@naver.com
H.P | 010-9242-4491



강민구 Kang MinGoo
학번 | 2101427
E-mail | rkdalsmpdlqj@naver.com
H.P | 010-2544-5868



이용화 Lee yonghwa
학번 | 2101467
E-mail | dldydghk8@naver.com
H.P | 010-9347-5906

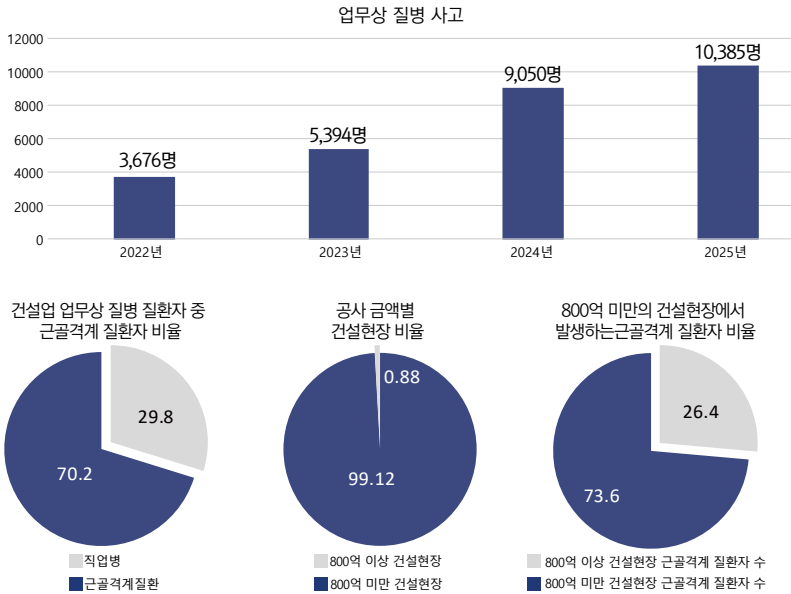


Vision AI-Based Real-Time Monitoring System for Musculoskeletal Strain Tasks for Construction Workers

비전 AI 기반 건설 노동자 근골격계 부담작업 실시간 모니터링 시스템

연구배경

- 중소 건설현장 근골격계 질환 사각지대
질병 재해 급증 | 해마다 업무상 질병 재해가 지속적으로 증가하는 가운데, 2024년 건설업 질병자의 70.2%(6,309명)가 근골격계 질환자로 이는 추락·낙하 등 2차 대형 사고의 직접적 원인.
800억 미만 현장 | 전체 근골격계 질환자의 73.6%(4,646명)가 800억 미만 중소 현장에서 발생.
제도적 한계 | 현행법상 800억 미만 현장은 '보건관리자 선임 의무'가 없어 사실상 방치된 상태.



기존기술 임계분석

- 선행 연구의 기술적 한계
웨어러블 한계 | IMU 관성 센서 · 스마트 수트는 고비용, 파손 위험, 거동 제약으로 중소 현장 적용 불가.
법정 인프라 편중 | 법정 의무 CCTV가 대형 사고 구역(타워크레인, 밀폐공간 등)에만 집중되어 미세 자세 관제 화각 확보 불가.
알고리즘 한계 | 하이앵글 기하학적 왜곡, 자재 가림 현상, 시계열 연산 부재로 인해 잦은 오진 유발.

공학적 모델선택

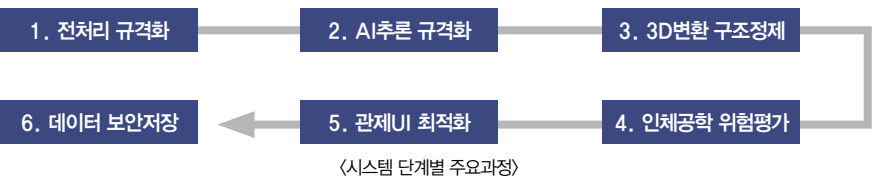
- 현장 제약 극복을 위한 YOLOv11n 경량 모델 채택
Single-Stage 연산 | Two-Stage 및 Top-Down의 연산 병목을 극복하고, Grid 기반 병렬 처리로 다중 근로자 포착 시에도 초당 30프레임(30 FPS) 실시간성 확보.
가림 현상 강건성 | Bottom-Up 방식의 관절 누락 오작동을 극복하는 '객체 인지-포즈 동시 결합' 구조로 파이프 · 자재 가림 속에서도 포즈 추론 강건성 확보.
YOLOv11n 경량화 | 파라미터를 극소화한 Nano 모델을 채택하여, 고가 GPU 없이 현장 저 사양 PC 환경에서도 원활한 구동 및 정밀 관절 좌표 확보.

구분	실시간성(30FPS)	저사양PC 구동성	다중객체 대응력	가림 현상 강건성
Single-Stage 방식	단일 네트워크 초고속 연산	경량 최적화 모델 존재	Grid 기반 병렬 처리	객체 인지-포즈 동시 결합 강건
Two-Stage 방식	순차적 2단계 연산 병목	무거운 고 사양 GPU 필수	근로자 수 증가 시 급격한 속도 저하	픽셀 단위 마스킹 정밀도 우수
Top-Down 방식	검출 객체 비례 병목	2단계 연산으로 고 사양 요구	BoundingBox 내 개별 추론	객체 검출 실패 시 추론 불가
Bottom-Up 방식	그룹화 연산 복잡도 가중	실시간 구동 시 무거운 GPU 필수	인원수 무관 연산 시간 유지	관절 누락 시 연결 오작동

해결방안

- CCTV 기반 상시 관제 및 보건 행정 무인화
상시 관제 체계 | 추가 하드웨어 도입 비용 없이 기존 CCTV 인프라만을 활용하여, 보건관리자 선임 의무가 없는 중소규모 현장의 24시간 비접촉 상시 관제 구현.
오진 제로화 제어 | 순간 포즈 인식을 넘어 인간공학 지표(OWAS · REBA · RULA)와 '시간 누적 트리거'를 결합해, 일시적 동작 오진을 차단하고 유효 위험 시간만 정밀 누적.
행정 자동화 및 보안 | 안면 비식별화 및 블록 해시 암호화(AES-256/SHA-256)가 적용된 데이터 원장을 기반으로, 법정 유해요인조사 행정 리포트를 실시간 자동 생성.

시스템 구현



전처리
규격화

- 영상 노이즈 정제 및 AI표준 규격화
노이즈 제거 | 현장 CCTV의 진동, 역광, 먼지 노이즈를 실시간 정제하여 작업자의 신체 윤곽선을 선명하게 복원.
AI표준화 | 16:9 비율 영상의 상하좌우 잘림이나 왜곡을 방지하기 위해 AI 입력 표준인 640x640 정사각형 규격으로 종횡비를 정밀 변환하여 객체 탐지 정확도 선제 확보.



AI추론
객체추적

- 실시간 경량 추론 및 다중 객체 연속 추적
30 FPS 사수 | 관절의 미세한 떨림을 시계열 필터로 1차 제어하고, 모델 경량화 최적화를 통해 정확도 손실 없이 초당 30프레임(30 FPS)의 완전한 실시간성 사수.
오류 방어 | 현장 가속 엔진 로드 실패 시 백업 파이프라인으로 즉각 자동 전환되는 Runtime Fallback 체계를 구축하여 시스템 멈춤 및 오류 방지.
사각 연속성 | 작업자의 누적 속도 및 이동 방향 기반 위치 예측 알고리즘과 고유 식별자 할당 기술을 결합해, 철골 구조물 가려짐 및 다중 작업자 동선 교차 시에도 데이터 뒤흔임 없는 연속 추적 유지.



3D변환
관절구조정제

- 시점 왜곡 보정 및 해부학적 좌표 정제
왜곡 보정 | CCTV의 하향 내려다보는 각도로 인해 발생하는 신체 비율 시점 왜곡을 동적 회전 행렬 매핑으로 실시간 교정.
해부 무결성 | 구조물에 가려 완전히 숨겨진 관절은 인체 고유의 분절 길이 역학 모델 기반으로 자연스럽게 복원하고, 골반 중심 절대 좌표로 정규화하여 해부학적 한계를 초과하는 데이터 튀어 오름 차단



인간공학
위험평가

- 인체 공학 지표 코드화 및 법정 노출 제어
지표 코드화 | OWAS(252개), REBA(144개), RULA(272개) 조건 매트릭스를 관절 좌표 기반으로 실시간 교차 연산하여 정밀 점수 산출.
통합 매핑 | 상이한 평가 지표별 점수 체계를 '안전-주의-경고-위험' 4단계 공통 등급 및 법정 조치 수준(모니터링~작업 중단)으로 일원화.
8대 부담작업 | 고용노동부 자세 중심 8대 유해요인을 자동 판정하며, **등급 3(경고) 이상 유지** 시 '시간 누적 트리거' 가동.
노출 연동 | 정밀 누적 시간을 고용노동부 법정 노출 기준(하루 총 2시간/4시간 레이어)과 실시간 연동하여 정량적 관제 자동화.

평가지표
코드화



통합매핑
표준화 평가표

구분	OWAS	REBA	RURA	조치수준
안전	1	1	1~2	조치불 필요
주의	2	2~3	2~3	모니터링 필요
경고	3	4~7	5~6	개선 계획 수립
위험	4	8~15	7	즉각 작업 중단

8대
부담작업
제어 기준표

작업 항목	노출 시간 기준	위험 누적 시간	위험 등급
집중적인 자료 입력	하루에 총 2시간 이상	0 ~ 30분	안전
같은 동작 반복 작업		30분 ~ 1시간	주의
머리 위의 손, 팔꿈치 들림			
구부리거나 비틀			
쫓그리고 앉거나 무릎을 굽힘			
한 손가락 집기 작업		1시간 ~ 1시간 30분	경고
물건을 잡는 작업	1시간 30분 ~ 2시간	위험	
반복적인 충격			하루에 총 4시간 이상

법정 노출시간
기준별
위험 누적
등급 산정표

작업 항목	평가 핵심 신체 부위	주요 분석 도구	시간 누적 트리거
집중적인 자료 입력	손, 손가락	RULA	등급 3(경고) 이상 시 가동
같은 동작 반복 작업	목, 어깨, 팔꿈치, 손목	RULA + REBA	
머리 위의 손, 팔꿈치 들림	어깨, 팔	RULA + REBA	
구부리거나 비틀	목, 허리	OWAS + RULA	
쫓그리고 앉거나 무릎을 굽힘	다리, 무릎	OWAS + REBA	
한 손가락 집기 작업	손가락	REBA	
물건을 잡는 작업	손	REBA	
반복적인 충격	손, 무릎, 팔꿈치	AI Action 분석	

띠장설치
정밀감시



- 동작별 인체공학적 위험 분석 및 독립 시계열 누적
자재 집기 (동작 1) | 무릎 각도 $\leq 60^\circ$ 및 허리 전굴 발생 시 OWAS 하지 4점 · 허리 2점 부과
→ OWAS 4등급(위험) 판정 및 고용노동부 고시 '무릎 굽힘' 위반 즉시 감지.
자재 설치 (동작 2) | 상완 외전 및 굴곡 $\geq 90^\circ$ 발생 시 RULA 상완 4점 · 전완 2점 부과
→ RULA 7등급(위험) 판정 및 '머리 위 손 작업' 위반 감지.
동적 타이머 가동 | '무릎 굽힘'과 '머리 위 손 작업' 항목별 노출 시간을 실시간 분리 정밀 누적하고, 초 단위 시계열 데이터 기반 위험 노출도 자동 기록.

가새설치
위험포착



- 비대칭 동작 임계치 매핑 및 스마트 필터링
하단 정렬 및 맞춤 (동작 1) | 요추 전굴 $>20^\circ$, 골반 회전 $>15^\circ$ 의 비대칭 동작 포착 시 OWAS 허리 4점(굽히고 비틀) 및 REBA 몸통 가중치 4점 매핑 → '구부리거나 비틀' 임계치 위반 판정.
스마트 필터링 | 스쳐 지나가는 일시적 움직임(False Positive)은 제외하고, '구부리거나비틀' 위반 자세의 지속 시간 데이터만 정밀 추적.
법정 누적 기록 | 하루 총 2시간 법정 기준 내에서 실제 누적된 유효 위험 시간만을 정밀 선별하여 최종 기록 장부에 저장.

작업발판
복합부하



- 복합 부하 최악 조건 가중 및 고위험 등급 포착
초기 중량물 취급 (동작 1) | 발판 인상 시 고관절 및 무릎 각도 $\leq 60^\circ$ 포착으로 REBA 하지 불안정 최고 페널티(4점) 부과 → '물건을 잡거나 드는 작업' 기준 즉시 위반.
상단 발판 거치 (동작 2) | 경추 과신전 $>20^\circ$, 어깨 확장 $\geq 90^\circ$ 감지로 REBA 목 2점 · 상완 4점 부여
→ 최종 REBA 8점 이상 고위험 등급 진입 및 '머리 위 손' 연달아 위반.
최악 조건 가중 | '물건 드는 작업'과 '머리 위 손 작업'의 유해 지표가 동시 중첩 시, 유해도 가장 높은 최악의 관절 스켈레톤 데이터를 우선 선별 · 표출하여 최종 위험 등급 즉시 산출.



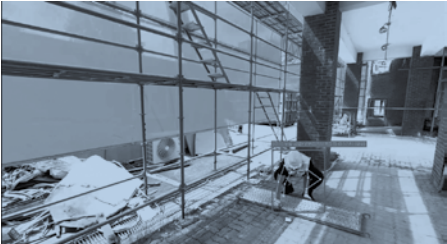
정상작업 진행 중-[등급:SAFE]



구부리거나 비틀 위반-[등급:WARNING]



구부리거나 비틀 위반-[등급:CRITICAL]



무릎 굽힘 위반-[등급:DANGER]

관제UI
최적화

- 직관적 UI 시각화 및 관제 인지 부하 최소화
직관 시각화 | 글로벌 표준 4색 바운딩 박스, 문자열 잘림 방지 로직, 고대비 타이포그래피를 적용하여 복잡한 현장 배경 속에서도 관제 시인성 및 가독성 극대화.
최악 조건 | 상 · 하지 복합 부하 동시 발생 시 가장 위험한 유해 요인을 우선 판별 · 표출하는 '최악 조건 가중 기법'을 도입하여 관제원의 인지 부하 최소화.

데이터
보안저장

- 개인정보 비식별화 및 데이터 암호화
비식별화 | 실시간 안면 마스크 처리 후 원본 영상은 즉시 파기하여 개인정보보호법 및 GDPR 기준 준수.
위변조 차단 | 군사용 AES-256 대칭키 암호화와 이진 패킷을 서명하는 SHA-256 블록 해시 체이닝을 결합하여 데이터 유실 및 위 · 변조 차단.
마스터 분리 | 복호화용 마스터키를 데이터 원장에서 물리적으로 완전 격리하여 산업 포렌식 등급의 데이터 무결성 및 신뢰성 확보.

행정업무
무인화

- 시계열 원장 기반 법정 행정 리포트 자동 생성
장부 생성 | 무결성이 검증된 시계열 데이터 원장(Timestamp, ID, 위험 요인, 누적 시간 등)을 기반으로 법정 유해요인조사 양식의 행정 리포트 실시간 자동 출력.
효율 극대화 | 수기 조사 및 작성 과정을 완전 제거하여 보건관리자가 부재한 중소규모 현장 안전관리자의 과도한 행정 업무 부담 해소.

자동출력
데이터원장
예시

	A	B	C	D	E
1	Timestamp	ID	Item	Accumulated_Time(min)	Risk_Level
2	2026-06-08 17:41:17	1	무릎 굽힘	0.03	안전
3	2026-06-08 17:41:17	1	머리 위 손 작업	0.15	안전
4	2026-06-08 17:41:17	1	구부리거나 비틀	0.02	안전

가새 설치 공정

	A	B	C	D	E
1	Timestamp	ID	Item	Accumulated_Time(min)	Risk_Level
2	2026-06-08 17:45:10	1	무릎 굽힘	0.03	안전
3	2026-06-08 17:45:10	1	머리 위 손 작업	0.18	안전
4	2026-06-08 17:45:10	1	구부리거나 비틀	0.03	안전

작업발판 설치 공정

	A	B	C	D	E
1	Timestamp	ID	Item	Accumulated_Time(min)	Risk_Level
2	2026-06-08 17:38:38	1	무릎 굽힘	0.02	안전
3	2026-06-08 17:38:38	1	머리 위 손 작업	0.12	안전
4	2026-06-08 17:38:38	1	구부리거나 비틀	0.03	안전