



HEXAGON LIVE

Innovation Summit
3 September 2025 | Korea

정밀 측정과 스마트 디지털 트윈의 미래

2025. 9. 3(수) | aT센터 그랜드홀(5층)

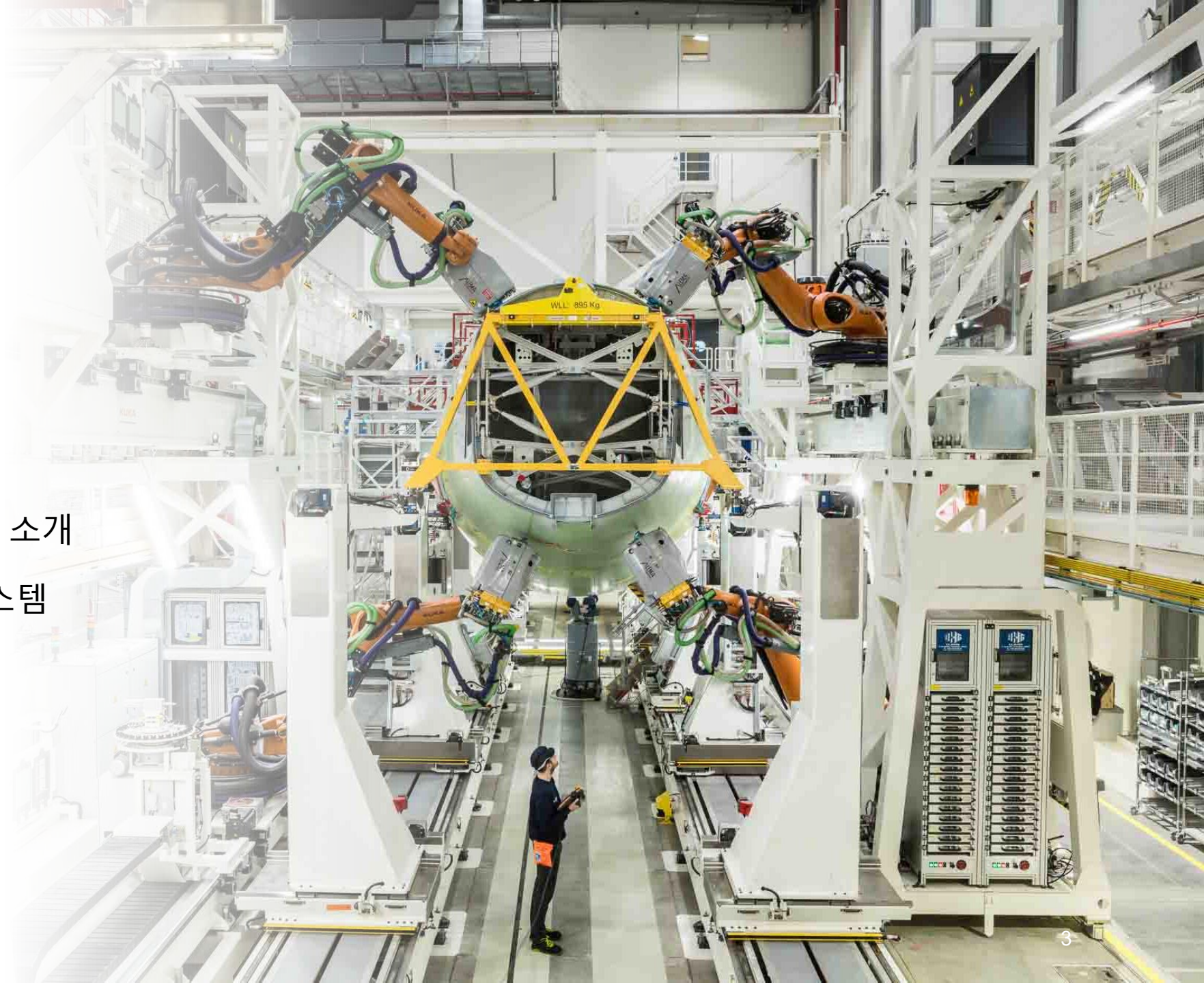


레이저 트래커 연동 실시간 피드백 제어를 이용한 고정밀 로봇 가공 기술

김성현 수석연구원/공학박사
한국생산기술연구원

목차

1. 공작기계 vs 로봇 가공시스템
2. 로봇 가공시스템 오차 원인
3. 정밀 측정 시스템 필요성
4. RTFP (Real-time feature pack) 소개
5. 레이저 트래커 연동 피드백 시스템
6. 실시간 피드백 제어 적용 결과
7. 응용 사례



대형 공작기계



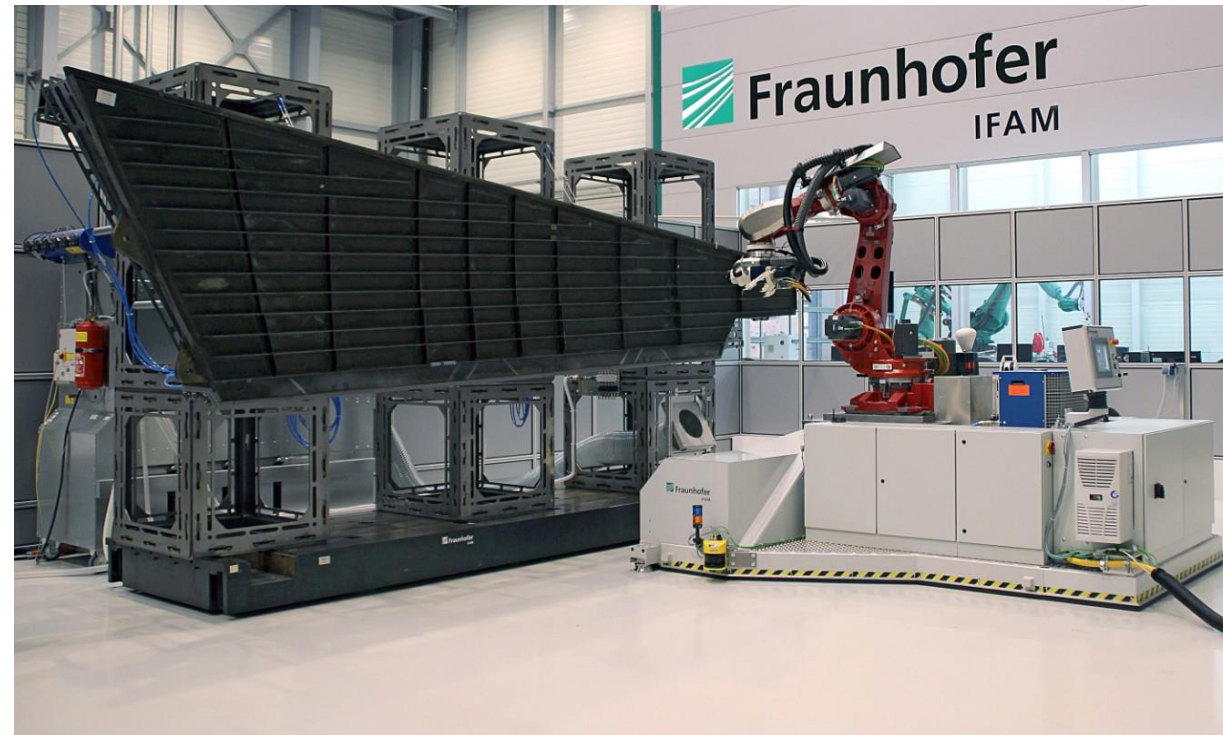
- 장점 : 높은 정밀도
- 단점 : 유연성↓, 높은 비용, 공간효율성 ↓



로봇 가공시스템

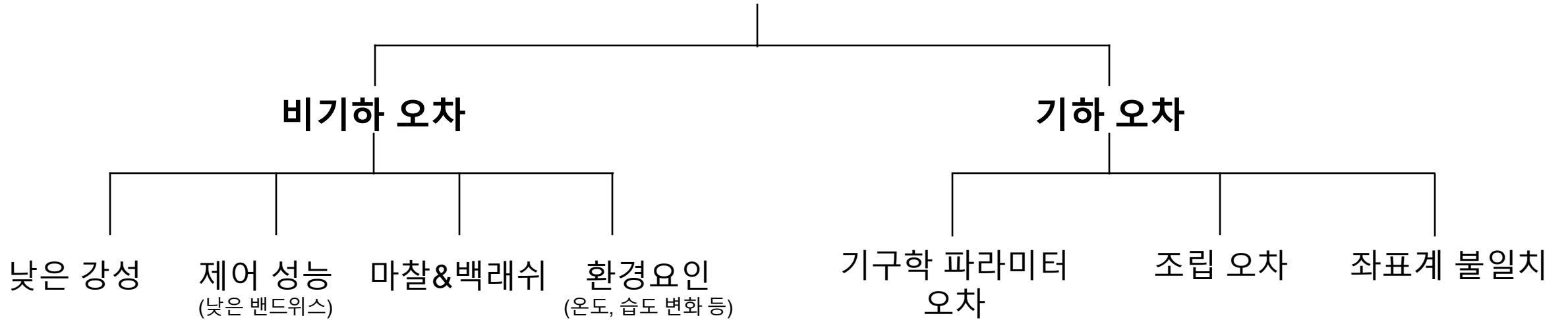


- 장점 : 유연성, 가격, 작업영역, 다자유도
- 단점 : 낮은 정밀도(가공 오차)



로봇 가공시스템 오차 원인

로봇 가공 오차



→가공 중 발생하는 오차 보정을 위해서는 센서 기반 피드백 제어 필요

→센서 필요조건 : **정확도, 실시간성**

정밀 측정 시스템 필요성



	목표 값	실제 값 (측정 값)	오차
X (mm)	1212.324	1214.239	-1.915
Y (mm)	621.323	622.329	-1.006
Z (mm)	823.782	824.283	-0.501
Rx (deg)	15.23	14.88	0.35
Ry (deg)	65.86	64.98	0.88
Rz (deg)	25.29	25.1	0.19

3차원 위치 측정 시스템

카메라, 비전 시스템

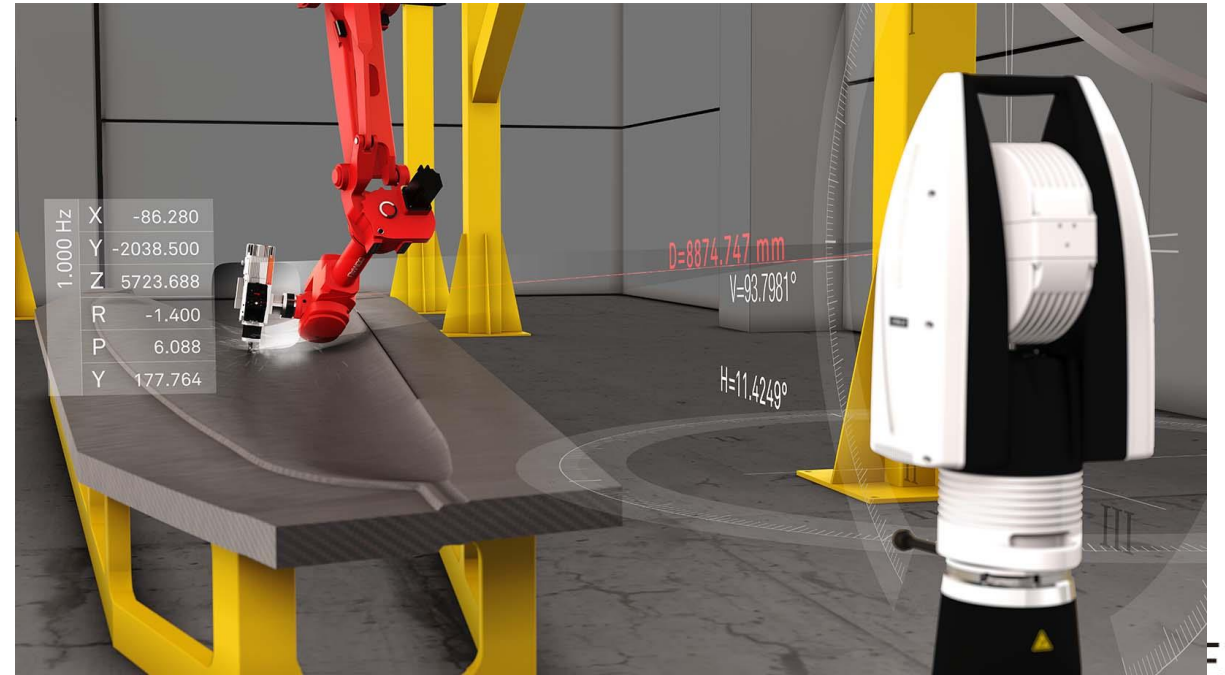
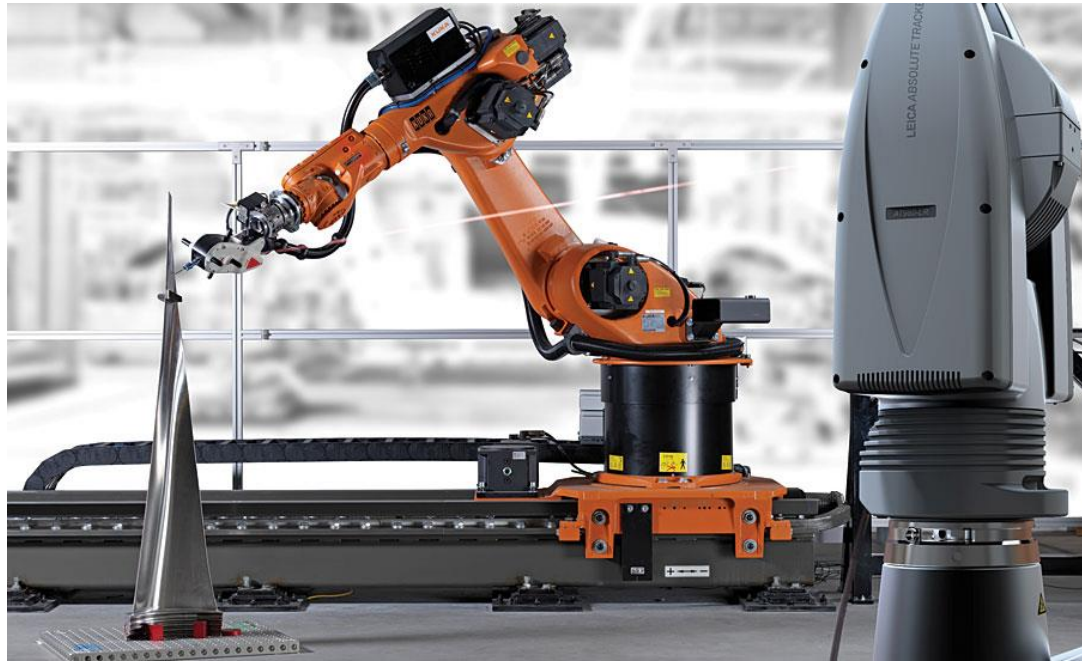


레이저 트래커 시스템



정밀 가공을 위한 측정 시스템

- 7 DOF 데이터 획득 가능한 레이저 트래커
 - 7 DOF data(X, Y, Z, Rx, Ry, Rz, Time)
 - 정확도: $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$, 1000 points/sec
 - 실시간성: 실시간 필드버스 기능 via RTFP(Real-time feature pack)



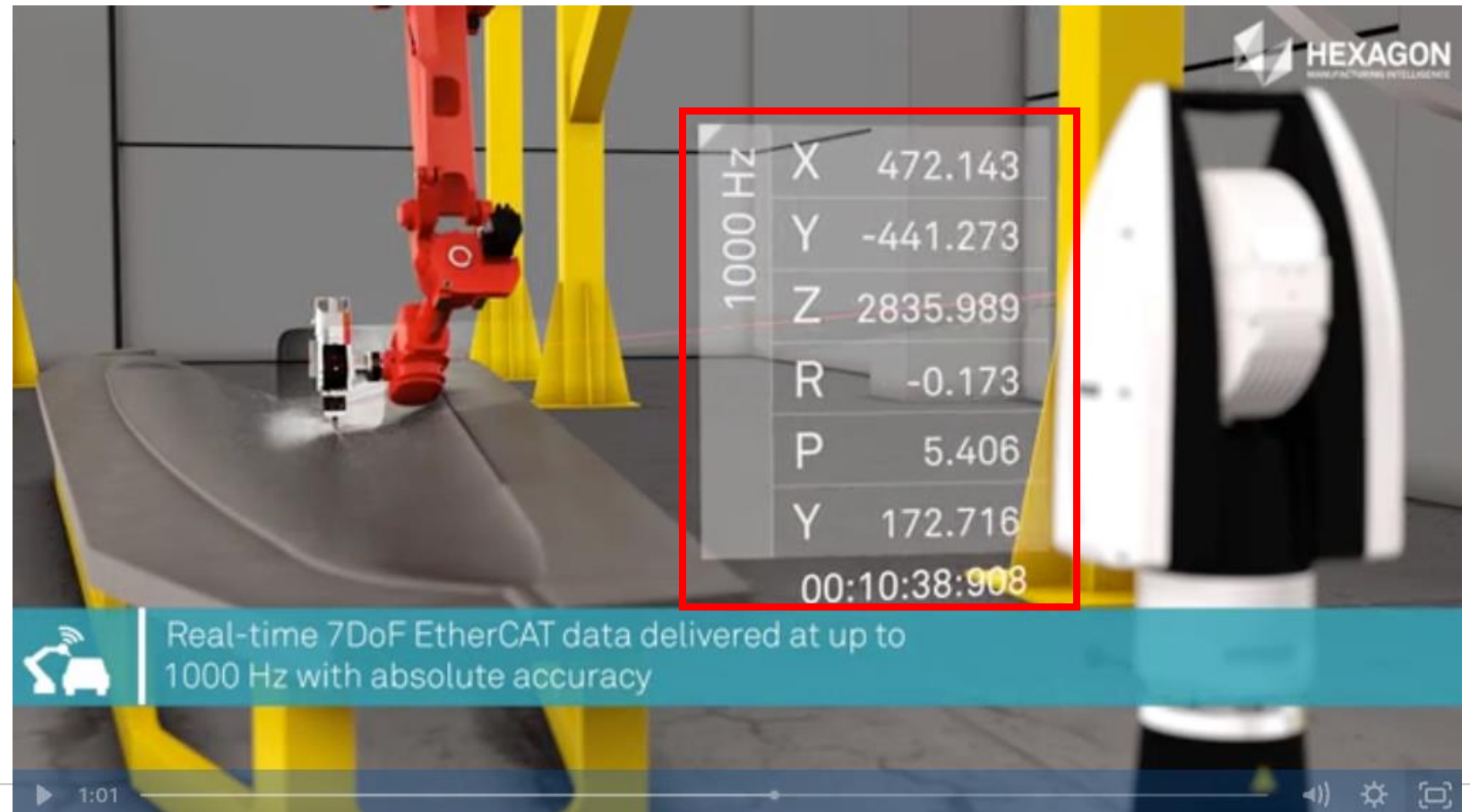
<Robot system with laser tracker>

Real-time Feature Pack

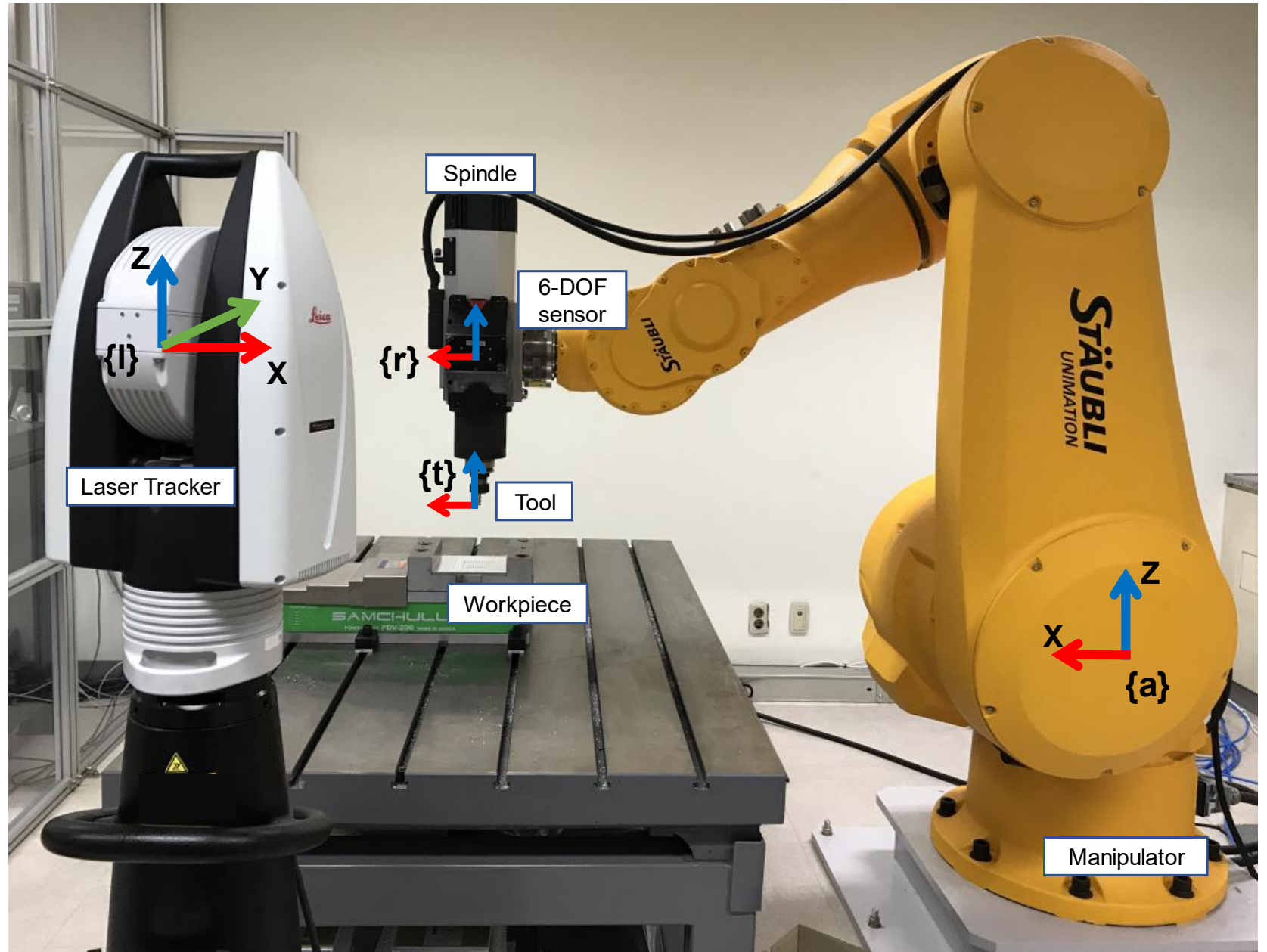
- Communicate using EtherCAT protocol
 - : Distributed Clock → Real-Time guarantee
- Position data
 - : AngleHz, AngleVt, Distance
- Orientation data
 - : Quaternions
- Timestamp (1kHz)

Name	Online	Type	Size
Status	83886080	UDINT	4.0
AngleHz	-0.00423042873014623	LREAL	8.0
AngleVt	2.5779787749052	LREAL	8.0
Distance	0.0	LREAL	8.0
Quaternion0	0.0	LREAL	8.0
Quaternion1	0.0	LREAL	8.0
Quaternion2	0.0	LREAL	8.0
Quaternion3	1.0	LREAL	8.0
TimeStamp	908550417670	ULINT	8.0

<Synchronous data captured by IPC>



레이저 트래커 연동 로봇 가공시스템

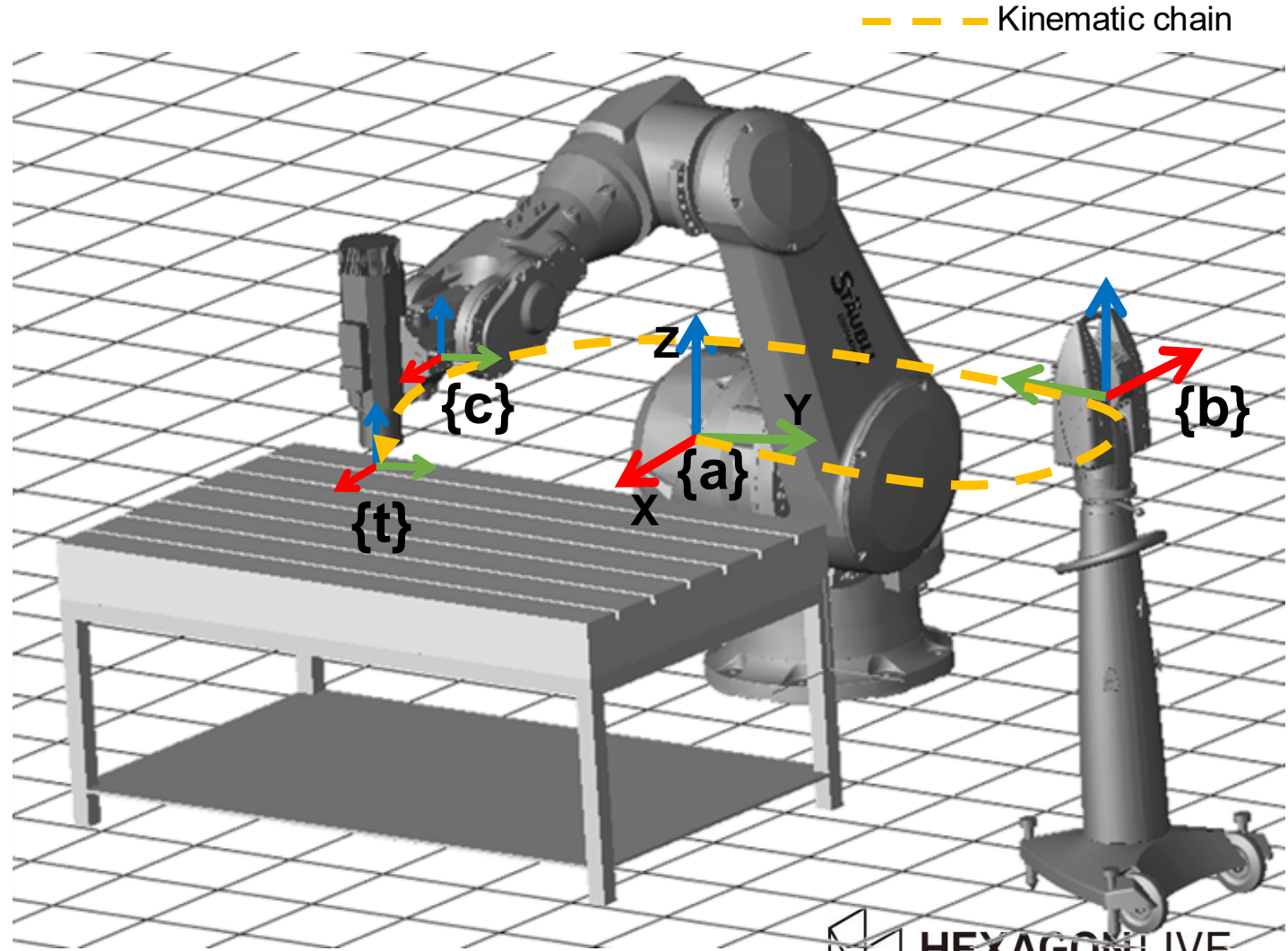


레이저 트래커 기구학 구성도

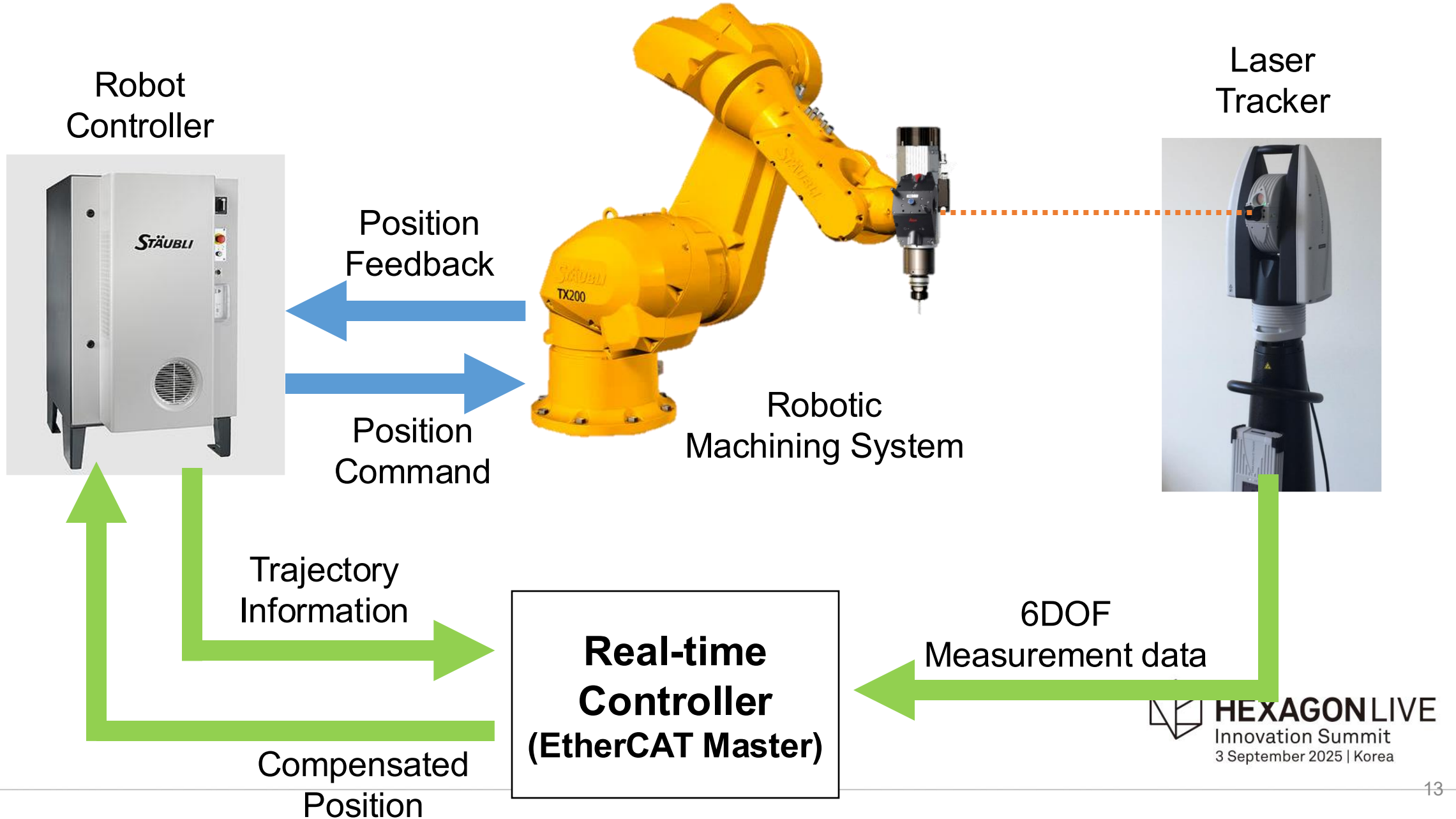
- 레이저 트래커 측정 값과 로봇 목표 위치 값 비교를 위해 기구학 체인 구성 → 목표 값, 측정 값 같은 좌표계 기준으로 변환

$$T_{at} = T_{ab} T_{bc} T_{ct}$$

- {a} : Robot base coordinate
- {b} : Laser tracker coordinate
- {c} : Reflector coordinate
- {t} : Cutting tool coordinate

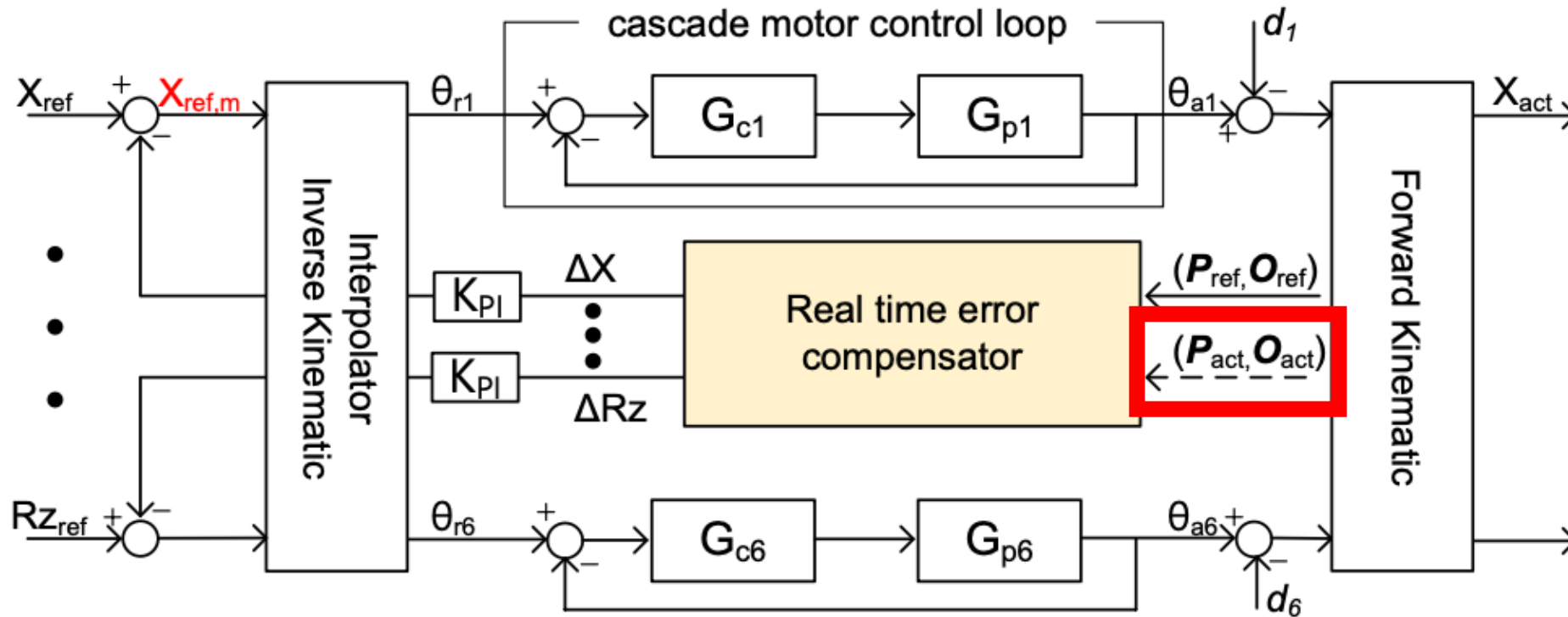


피드백 제어 시스템 구성도



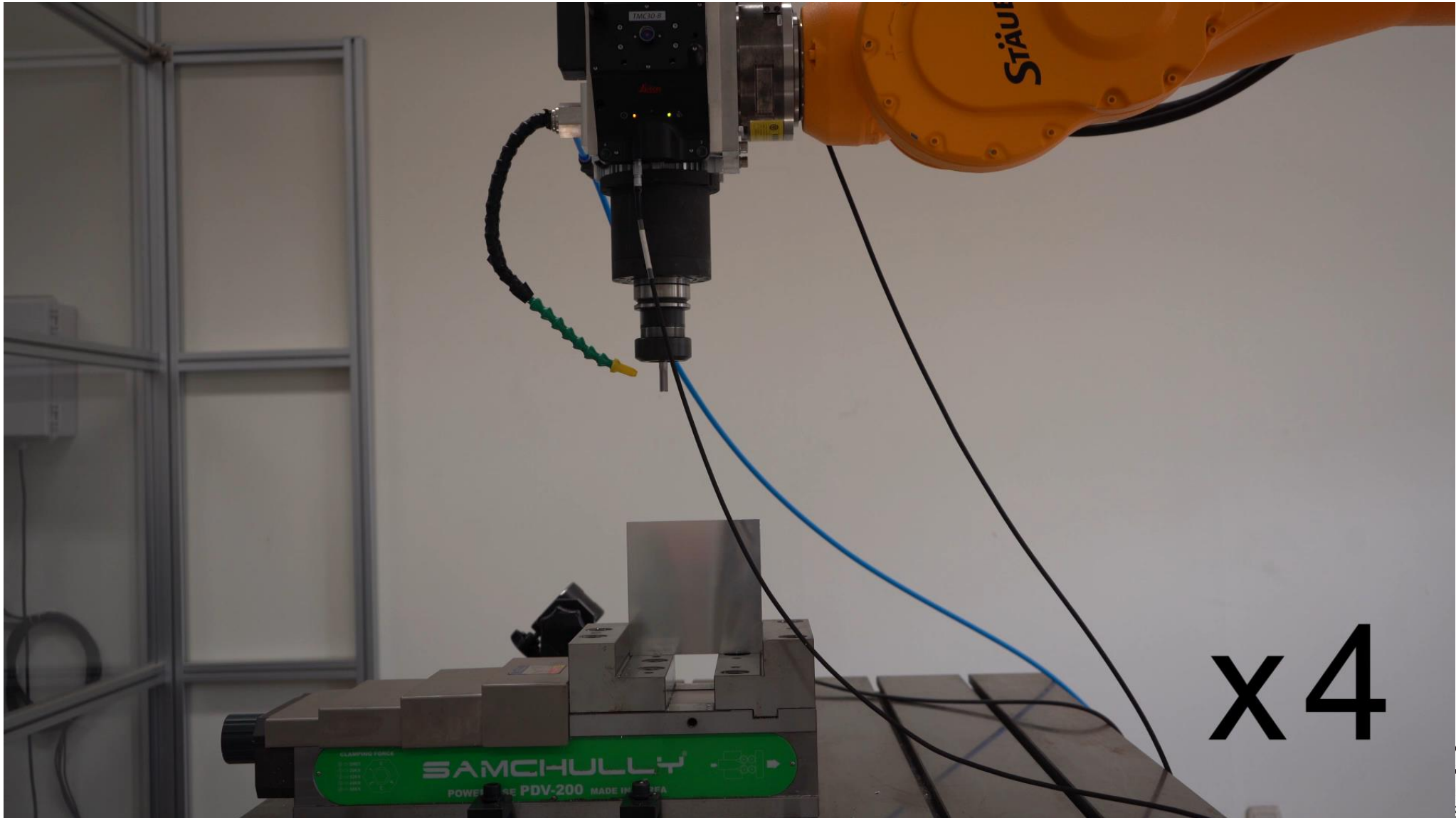
피드백 제어 알고리즘

- 기존 로봇 위치 제어 루프 밖에 추가적인 위치 제어 루프(PI) 설계
- P_{act}, O_{act} : 레이저 트래커 측정 값(로봇 좌표계 기준으로 변환)



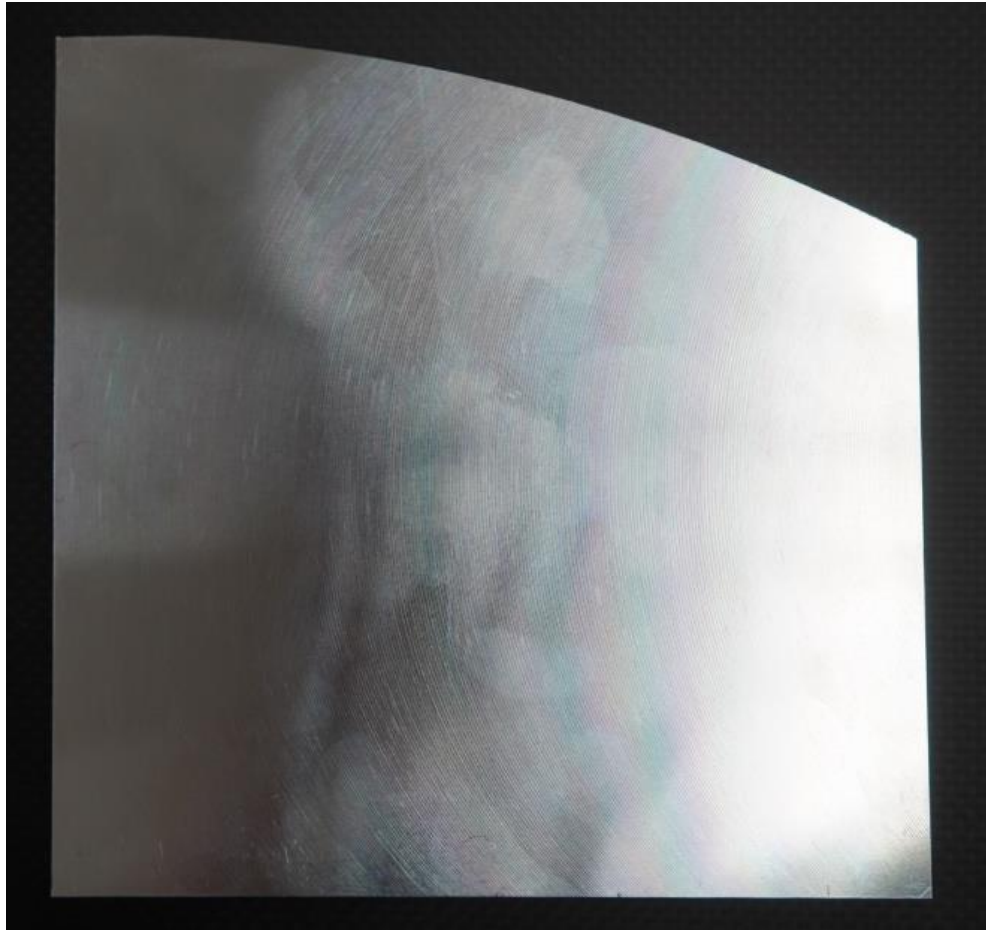
<Block diagram of real-time error compensator>

레이저 트래커 연동 피드백 제어

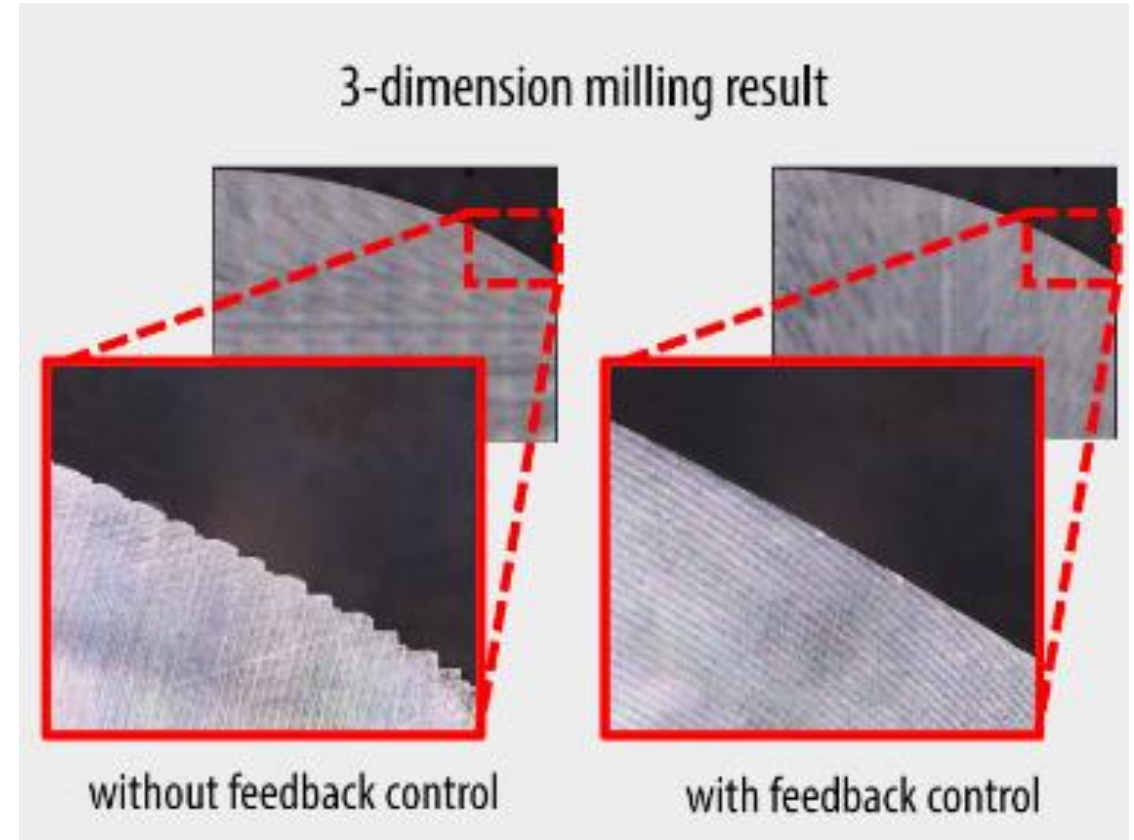


3차원 형상 가공 결과

- 3-dimensional shape is machined
(workpiece size : 150x150x20 mm)



Machined workpiece



로봇 위치 오차 측정 결과

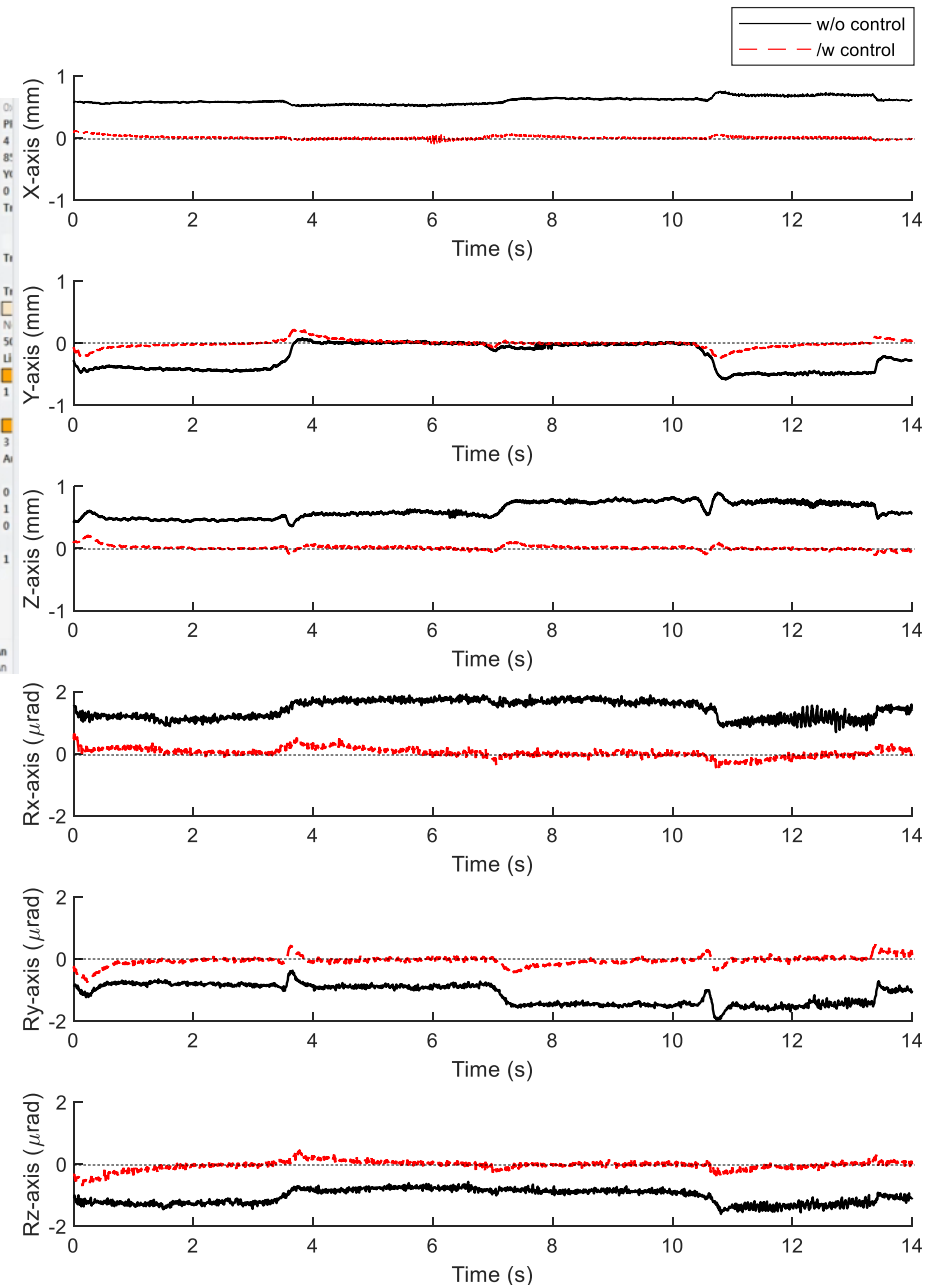


Table. Machining error of robotic milling experiment measured by laser tracker (RMS value).

Axis	Without control		With control	
	Calibrated DH parameter	Nominal DH parameter	Calibrated DH parameter	Calibrated DH parameter
X	607	25	28	
Y	306	74	66	
Z	634	39	40	
Rx	1.5	0.2	0.2	
Ry	1.2	0.2	0.2	
Rz	1.1	0.2	0.2	



<Following errors during robotic machining>

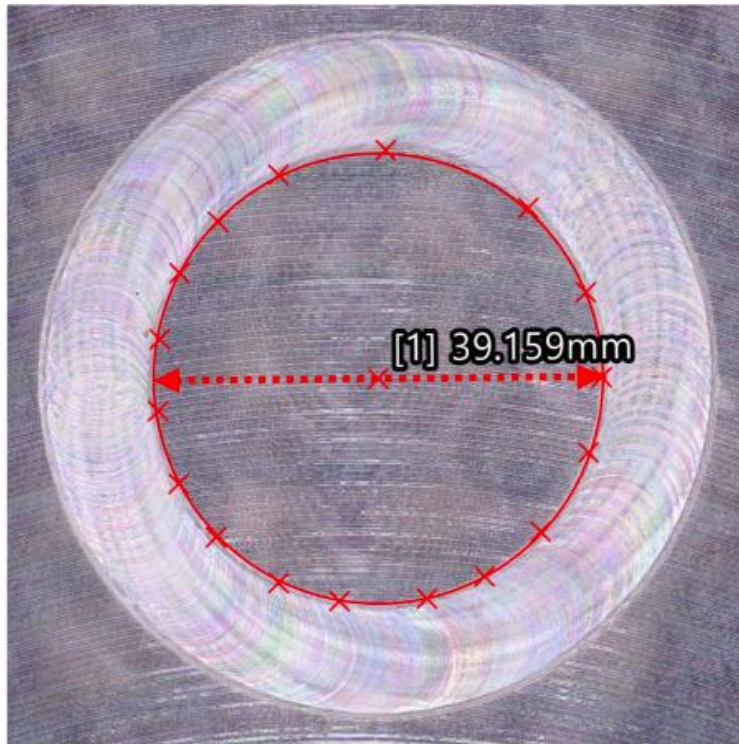
레이저 트래커 연동 피드백 제어

Circle slot milling results

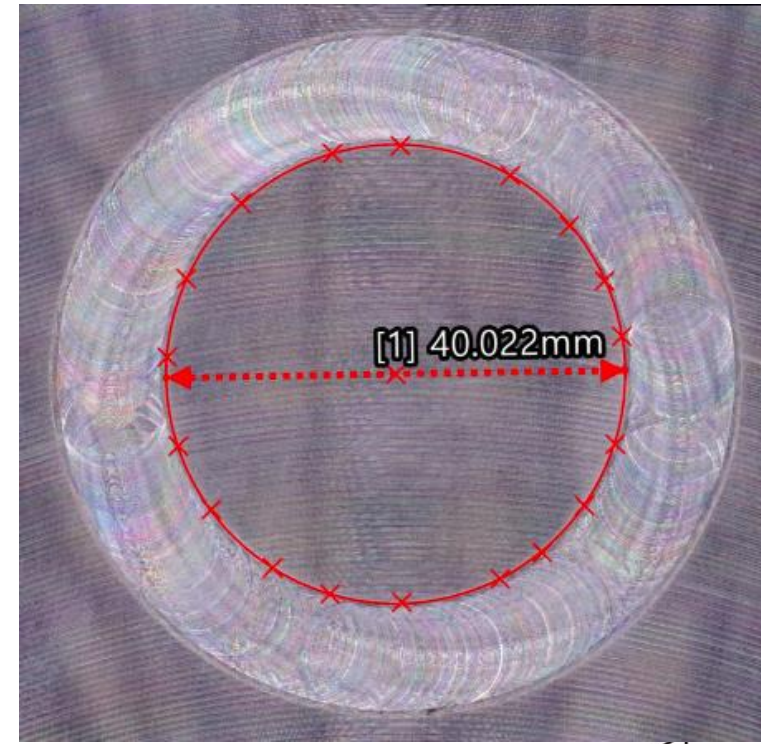
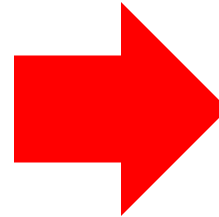
- Reference diameter: 40 mm
- Machining error reduced from 841 μm to 22 μm (RMS value).

Machining condition

Workpiece : Aluminum 7073
Feedrate : 900 mm/min
Spindle speed : 6,000 rpm
Depth of cut : 2 mm
Tool diameter : 10 mm
of flutes : 3



(a) without control (error: 841 μm)



(b) with feedback control (error: 32 μm)

Thank you for listening