NOVA

Control / Robotics

Real-Time Model Predictive Control for Industrial Manipulators with Singularity-Tolerant Hierarchical Task Control

Jaemin Lee, Mingyo Seo, Andrew Bylard, Robert Sun, Luis SentisIEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2023

NOVA

Contents

01 Introduction
로봇 제어의 문제와 예측의 필요성

02 Kinematic MPC
미래 관절 움직임과 제약조건

03 Method
기준 궤적 주변의 선형화와 QP

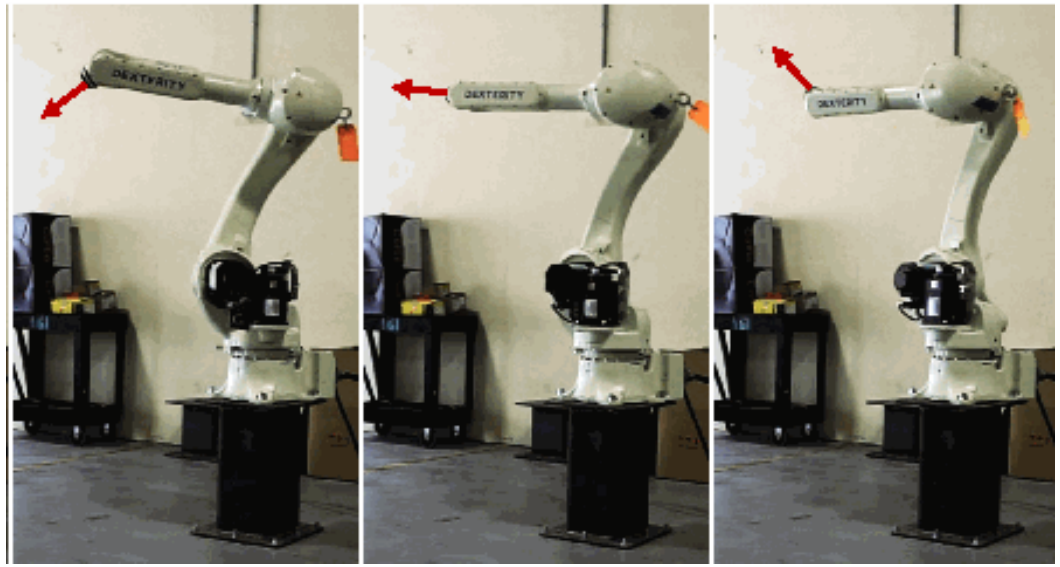
04 Dynamic MPC
토크를 고려한 확장

05 Simulations and Experiments
시뮬레이션과 실험 검증

06 Conclusion
결론

01 Introduction

산업용 로봇 제어의 복잡성 · 물리적 제약조건



- 목표 궤적으로 빠르게 · 안전하게 · 정확하게
- 물리적 한계 : 관절 위치 · 속도 · 토크 제한
- 작업간 우선순위 고려

특이점 근처에서는 작은 손끝 움직임에도 관절 명령이 급격히 바뀔 수 있다

사진: 원문 Fig. 5, RS020N 실제 로봇 실험

01 Introduction

기존 제어 방식[OSC / TSC]

→ 현재 시점을 기준으로, 최적의 움직임을 결정한다

OSC (Operational Space Control)

End-effector를 원하는 위치로 이동

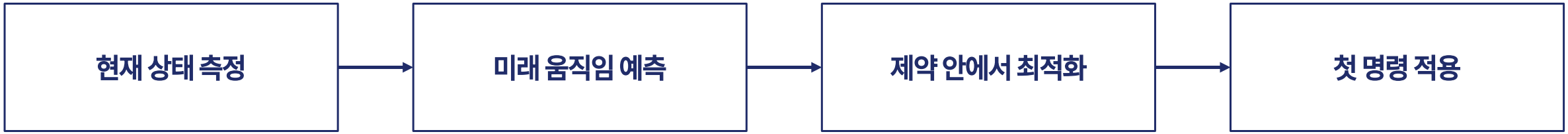
TSC(Task Space Control)

계층적 제어 방식

한계 : 미래의 움직임까지 고려하지 못한다
새로운 조건 등장 시 로봇의 움직임이 급격히 변할 수 있다

01 Introduction

MPC(Model Predictive Control) : 모델 예측 기법



다음 시점에도 같은 과정 반복 수행

산업용 로봇에 적용시 문제 발생 → ① 방대한 계산량 ② 로봇의 비선형성 ③ 계층적 작업구조 → 어떻게 해결할 것인가?

01 Introduction

제안 방법 : 기존 제어방식(OSC, TSC) 활용하며 MPC 적용



위치·자세 등 작업의 우선순위를 먼저 반영

어떻게 움직일지 기준 상태·입력 제공

미래 제약을 함께 고려해 추종 오차와 급변 완화

기존 제어가 만든 움직임을 바탕으로, MPC가 앞을 보며 보정

→Kinematic MPC , Dynamic MPC

02 Kinematic MPC (운동학 MPC)

관절각을 알면 손끝의 위치와 자세를 계산할 수 있다



q : 각 관절이 얼마나 돌아갔는가

ϑ : 손끝이 어디에 있고 어느 방향을 보는가

운동학 MPC는 토크가 아니라, 예측 구간의 미래 관절 위치 q를 결정한다

02 Kinematic MPC (운동학 MPC)

관절 위치의 변화로 속도와 가속도를 표현한다

속도

$$\dot{q}_k = \frac{q_k - q_{k-1}}{\Delta t}$$

한 시간 간격 동안 얼마나 움직였는가

가속도

$$\ddot{q}_k = \frac{q_k - 2q_{k-1} + q_{k-2}}{\Delta t^2}$$

속도가 얼마나 빠르게 바뀌었는가

즉, 미래 관절 위치 q를 정하면 $\dot{q}$와 $\ddot{q}$도 따라온다.

미래의 q를 정하면, 속도 제한과 움직임의 부드러움도 함께 평가할 수 있다

02 Kinematic MPC (운동학 MPC)

상자를 옮길 때 어떤 관절 움직임을 고를까

손끝이 목표 경로를 따라가도록 미래 관절 위치 q를 고른다.

비용함수 · 줄이고 싶은 것	제약조건 · 반드시 지킬 것
손끝이 목표 경로에서 벗어나는 정도	관절이 허용 각도 안에 있어야 한다
관절 속도와 가속도의 크기	관절 속도가 허용 범위 안에 있어야 한다

더 빨리 움직이면 오차가 줄어도, 속도 한계를 넘는 후보는 제외한다.

허용되는 후보 중에서 추종 오차와 움직임의 급변을 함께 줄인다.

03 Method

비선형 문제를 기준 궤적 주변에서 선형화한다

비선형인 $g(q)$를 기준 궤적 $\hat{q}$주변에서 야코비안(Jacobian)으로 선형 근사한다.



$$\Delta\vartheta \approx J\,\Delta q$$

관절각을 조금 바꾸면 손끝이 얼마나 움직일지 근사한다.

QP 목적식 $min(q^{T}Qq + 2p^{T}q)$

제약조건 예측 구간에서 관절 위치와 속도의 허용 범위를 지킨다.

03 Method

선형화에 필요한 기준 궤적 $\hat{q}$는 어떻게 만들까



① 상자를 어디로 옮길까?

손끝을 목표 위치에 맞춘다.
그 위치를 유지할 수 있는 관절 움직임 중에서 상자의 방향도 맞춘다.

② 팔을 거의 다 펼쳤다면?

손끝을 팔이 뻗은 방향으로 조금 더 보내려 하면, 관절을 크게 움직이라는 계산이 나올 수 있다. compact SVD는 이 방향에 해당하는 작은 특이값을 제외한다.

이렇게 얻은 기준 궤적 $\hat{q}$주변에서 선형화하고, MPC로 움직임을 다듬는다.

03 Method

운동학 MPC의 전체 계산 흐름

01 기준 만들기

목표 손끝 궤적 → 계층적 역운동학 → 기준 관절 궤적 q^* 생성

02 최적화 문제 만들기

g(q)를 야코비안으로 선형화 → 비용함수와 위치·속도 제약 구성 → QP로 최적 관절 위치 q 계산

03 명령 적용하기

첫 관절 위치 명령 선택 → 하위 위치 제어기에 전달 → 다음 주기에 다시 계산

04 Dynamic MPC(동역학 MPC)

같은 움직임도 하중에 따라 필요한 토크가 달라진다

같은 경로 · 속도 · 가속도로 움직여도

가벼운 물체

모터에 필요한 토크가 상대적으로 작음

무거운 물체

더 큰 토크가 필요해 모터의 부담 증가

모터가 낼 수 있는 토크에는 한계가 있다

미래에 필요한 토크를 예측해 모터 한계 안에서 움직임을 계획

04 Dynamic MPC(동역학 MPC)

무거운 물체를 다루려면 필요한 토크까지 예측해야 한다

$$M(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) = u$$

관성과 가속도

관절을 가속하는 데 필요한 힘

중력과 움직임에 따른 힘

자세와 속도에 따라 달라지는 부담

u는 관절 토크 / 상태 x는 관절 위치 q와 관절 속도 $\dot{q}$

04 Dynamic MPC(동역학 MPC)

현재 상태와 토크로 다음 순간의 움직임을 예측한다

$$x_k = [q_k{}^T, \dot{q}_k{}^T]^T$$

상태 x는 관절 위치 q와 관절 속도 $\dot{q}$를 함께 표현

같은 위치라도 속도가 다르면 다음 움직임이 달라진다

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + r_k$$

$A_k x_k$현재 상태의 영향 $B_k u_k$토크 입력의 영향 r_k 근사 보정항

기준 궤적 주변에서 선형화하고, 일정한 시간 간격으로 이산화

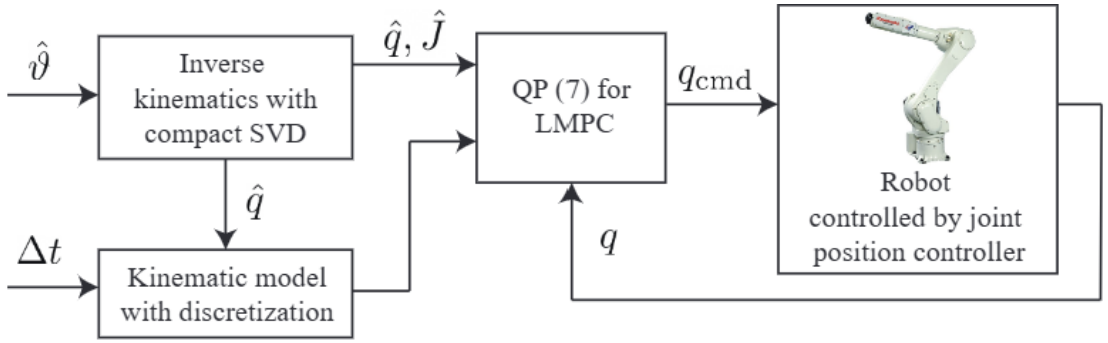
04 Dynamic MPC(동역학 MPC)

동역학도 선형화·이산화해 QP로 푼다

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + r_k$$

비교 항목	운동학 MPC	동역학 MPC
결정 대상	미래 관절 위치	미래 상태와 토크
주요 비용	추종 오차·속도·가속도	추종 오차·속도·토크
경계 제약	관절 위치·속도	관절 위치·속도·토크
모델 관계	위치 차분으로 속도 표현	선형화한 동역학을 등식으로 적용

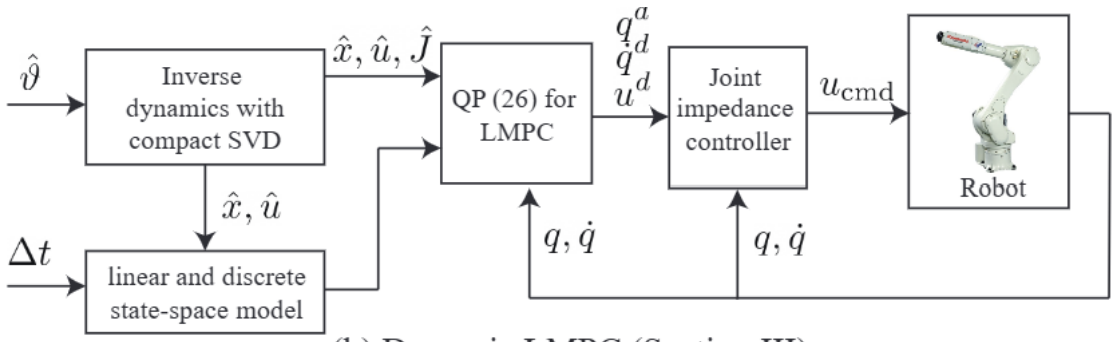
05 Simulations and Experiments



(a) Kinematic LMPC (Section II)

기호	뜻	예시
$\hat{\vartheta}$	목표 손끝 궤적	집게가 아래를 향한 채 상자를 오른쪽으로 옮긴다.
$\hat{q}$	역기구학이 계산한 기준 관절 각도	$35°$
$\hat{J}$	기준 자세에서 관절 각도 변화와 손끝 움직임의 관계	관절을 $1°$ 더 돌리면, 집게가 3.5mm더 움직인다.
Δt	한 스텝의 시간 간격	시간간격
q_{cmd}	로봇에 보내는 첫 관절 각도 명령	$28° -> 32°$
q	센서가 읽은 실제 관절 각도	$28° -> 32.5°$

05 Simulations and Experiments



(b) Dynamic LMPC (Section III)

기호	뜻	예시
$\hat{\vartheta}$	목표 손끝 궤적	집게가 아래를 향한 채 상자를 들어 올린다.
$\hat{x}, \hat{u}$	기준 관절 각도·속도와 기준 토크	기준 움직임에 필요한 토크 12 N·m
$\hat{J}$	기준 자세에서 관절 각도 변화와 손끝 움직임의 관계	관절을 1° 돌리면 집게가 위로 3.5 mm 움직인다.
Δt	한 스텝의 시간 간격	0.1초
$q^d, \dot{q}^d, u^d$	QP가 정한 목표 각도·속도와 계획 토크	토크 한계 10 N·m 안에서 9 N·m로 계획
u_{cmd}	로봇에 보내는 최종 토크 명령	하위 제어기가 9 → 9.5 N·m로 보정
$q, \dot{q}$	실제 관절 각도와 속도	센서값 28°, 0°/s에서 계획 시작

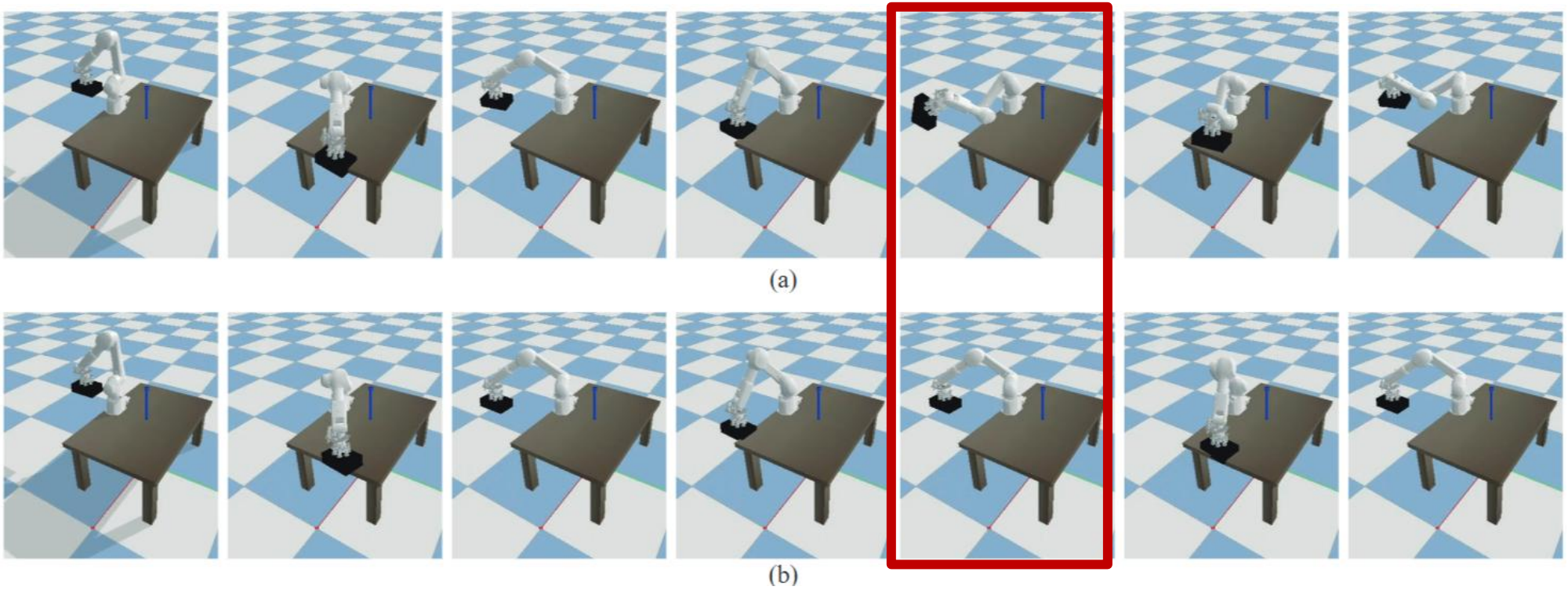
05 Simulations and Experiments

실험 1 : 12 kg 상자 운반 시뮬레이션

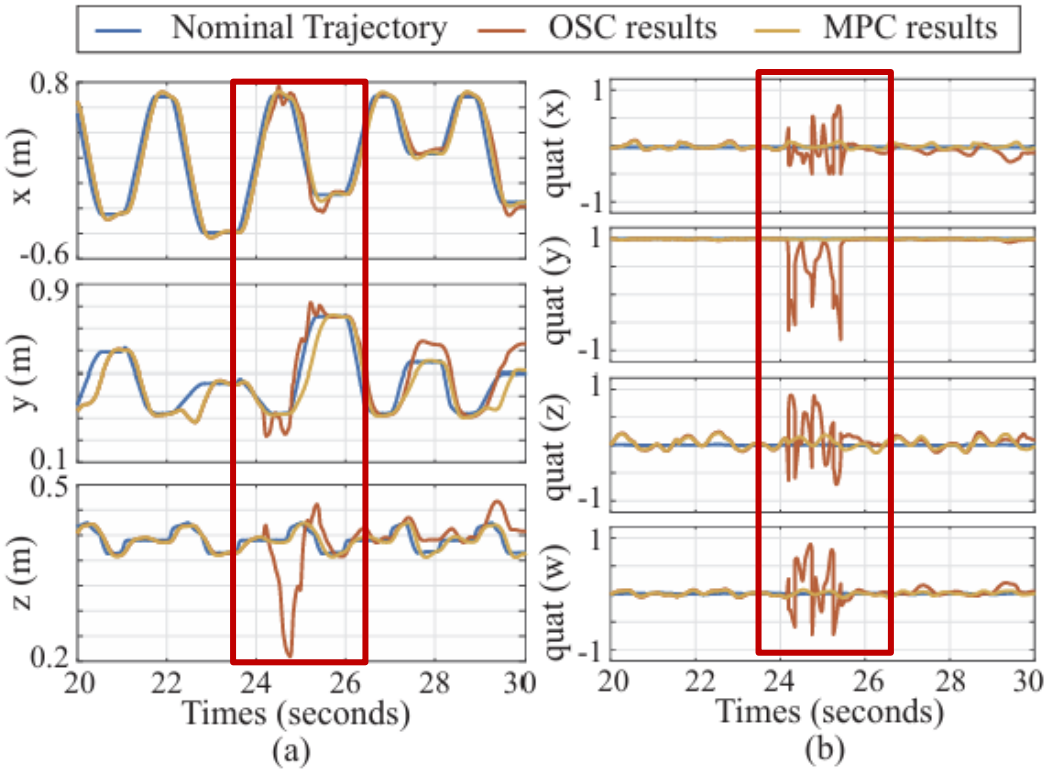
검증질문 : 무거운 상자를 옮길 때 목표 움직임을 얼마나 잘 따라가는가?

실험 조건 : 로봇팔이 12 kg 상자를 옮기고, 옮기는 동안 높이와 방향도 가능한 한 유지한다.

비교 방식 : 기존 OSC와 제안한 Dynamic MPC에 동일한 목표 궤적 적용

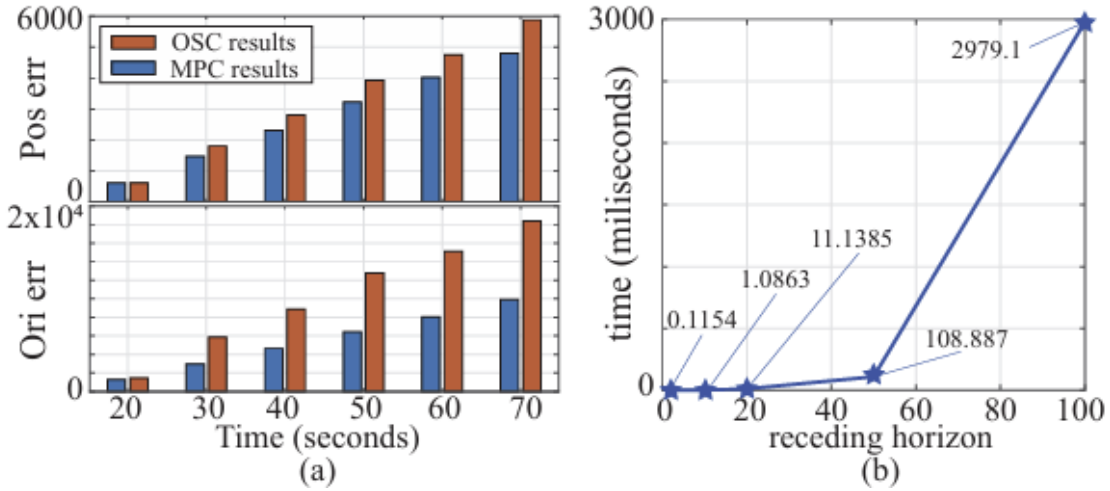


05 Simulations and Experiments



로봇팔 끝의 위치 (a)

로봇팔 끝의 방향 (b)



로봇팔 위치, 방향 오차 누적 (a)
MPC 예측 범위 (b)

05 Simulations and Experiments

실험 2 : 실제 로봇의 특이점 대응 실험

특이자세 특이자세 회피 목표 도달



06 Conclusion

실험 1 : 12 kg 상자 운반 시뮬레이션

모터의 토크 한계를 고려해 움직임을 계획

↓

기존 OSC보다 위치·자세 오차 감소

실험 2 : 실제 로봇의 특이점 대응 실험

움직이기 어려운 자세에 가까워지자 손목 자세를 바꿔 작업을 이어감

↓

특이점 부근 회피 후 목표구간 도달

NOVA

Thank you

Questions & Discussion