

LABORATORY OF MECHANICAL SYSTEMS DESIGN  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

東京工業大学  
工学院 機械系  
機能システム学分野

# 高精度パラレルメカニズムの開発

○菅原 雄介

松浦 大輔

武田 行生

東京工業大学 工学院

### ■ スタッフ

- 教授 武田 行生
- 准教授 菅原 雄介
- 助教 松浦 大輔



### ■ 研究分野

- 機構学, 精密工学, 福祉工学, 設計工学, ロボティクス・メカトロニクス

### ■ ミッション: 機構設計技術を基盤とした人と社会を支える機械システムの開発

- 機構学の発展研究(新しい機構・機械要素の解析・設計・開発)
- 機械と関わる人間の運動・力学・感性の理解
- 機械システム・機械要素・ヒト機械協調系に関する, ロボット／メカトロ機器／システムの提案・開発, 産業・社会の問題への適用

# 機能システム学分野(武田・菅原研究室)

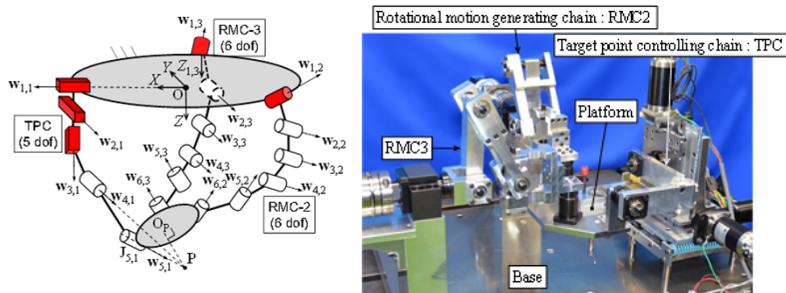
## 現在の研究



Tokyo Tech

### ■ パラレルメカニズムの研究・開発・応用

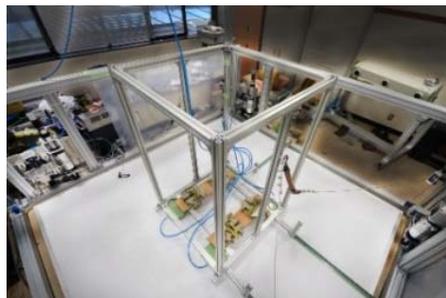
- 並進・回転分離パラレルメカニズム



- 空間平行機構を用いたパイプベンダ



- パラレルワイヤ機構を用いた地震動シミュレータ



### ■ 新しい機械要素とその応用

- 二重らせん形弾性ジョイント
- 真空用「無摺動」パラレルメカニズム

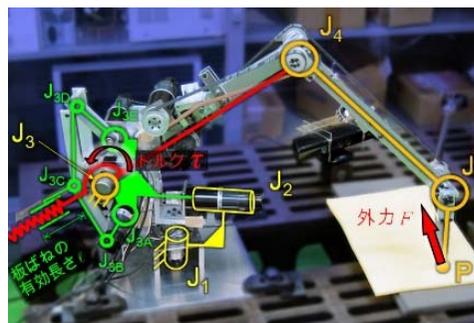


### ■ 福祉機器・ヒト支援技術

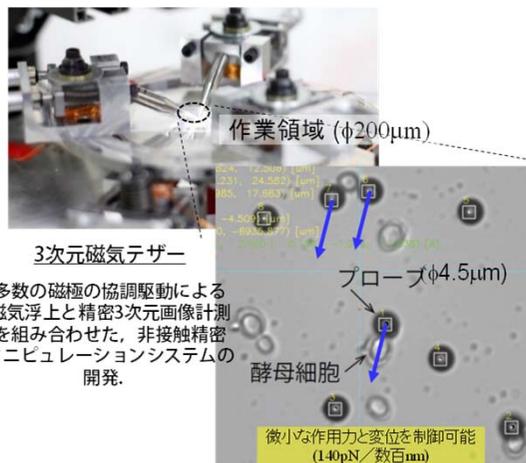
- 運動学・力学解析に基づき、使用者の意志通りに動く機械や、違和感なく容易に着脱できる人体との接触機構の設計
- 足首リハビリデバイス



### ■ 災害対応用可変剛性マニピュレータ

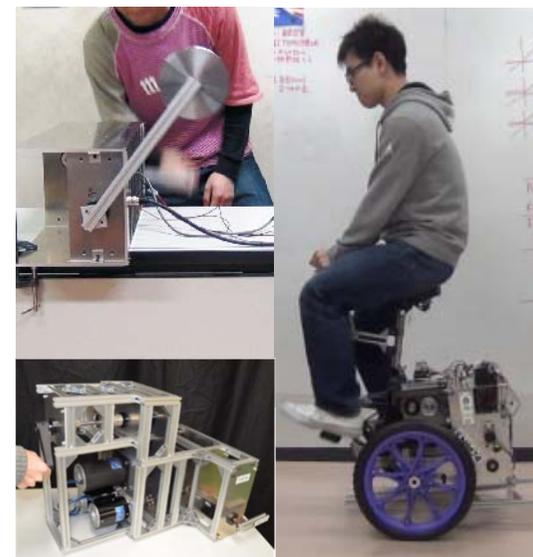


### ■ 3次元磁気テザー



### ■ 人カロボティクスの提案と展開

- 人間が加える動力により駆動され、多様な知的運動を実現するロボットシステムの提案と開発、インテグレーションによる人カ機械の知能化
- 回生サーボクラッチの開発
- 人カパーソナルモビリティの研究



### ■ 空力浮上式鉄道「エアロトレイン」

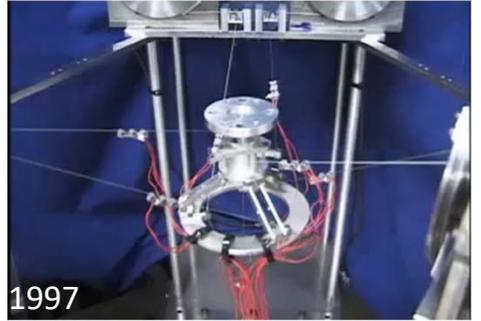
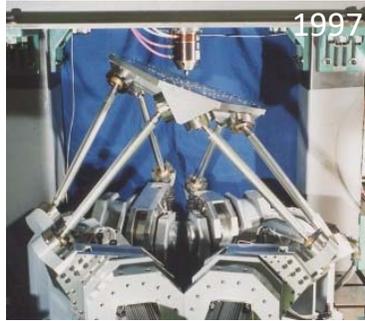
- 地面効果により空力的に浮上走行を行う高速鉄道システム
- 安定性に優れた機体の設計と制御の研究



# パラレルメカニズム



Tokyo Tech

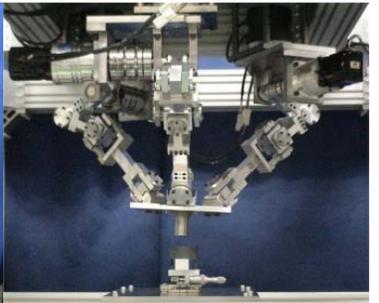
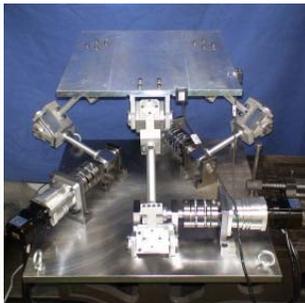
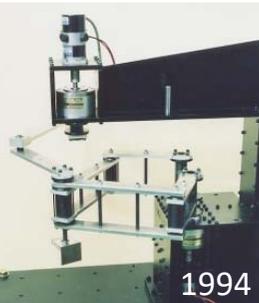
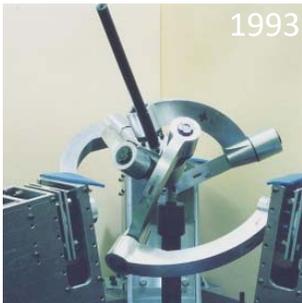


Manipulators

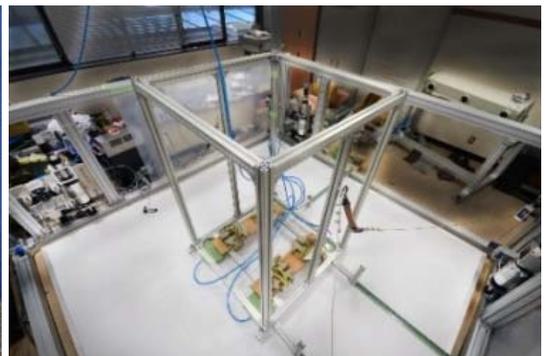
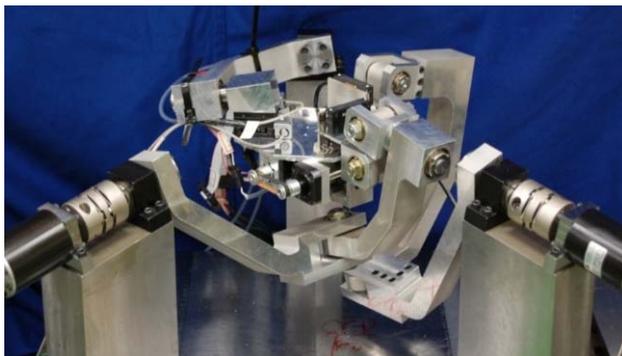
Machine Tool

Positioning Manipulator

VR



Manipulators



Pipe Bender

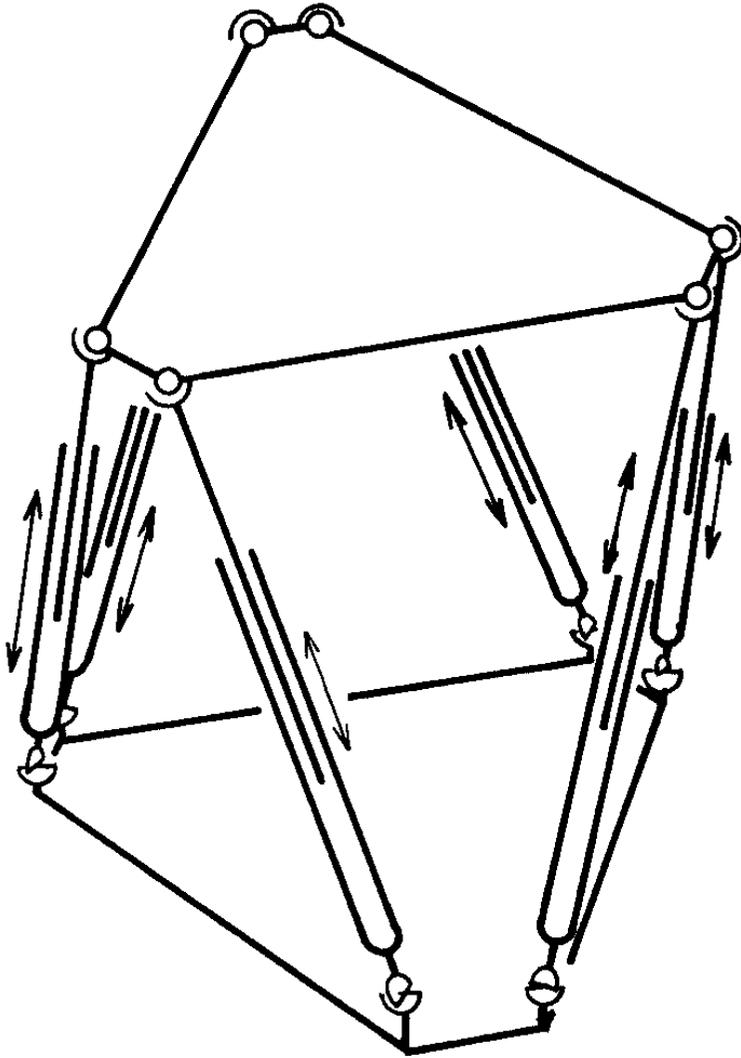
Machine Tool

Manipulator in Vacuum

Simulator

# パラレルメカニズムとは

それぞれが複数の対偶を持つ複数のリンク系(連結連鎖)により, 静止リンクと出力リンクが並列に連結された機構の総称.



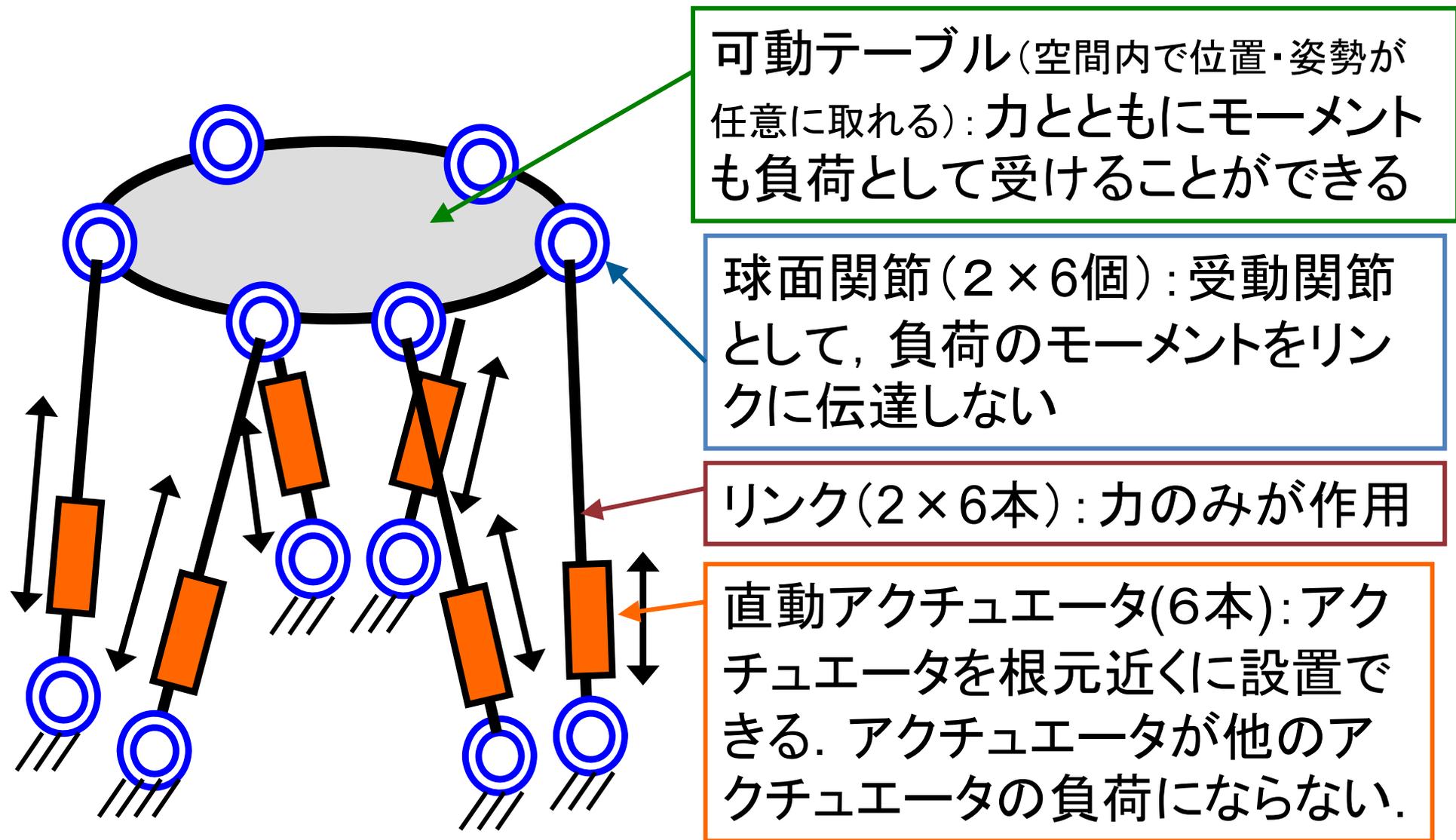
パラレルメカニズムの代表例  
(Stewart-Gough platform)

# パラレルメカニズムの運動例



1987年の試作機

# パラレルメカニズム



代表的なパラレルメカニズムの構成  
(通称: Stewart-Gough Platform)

# パラレルメカニズムの特徴(1)

(運動学, 力学の観点からのまとめ)

- ・可動部が軽量であり, 高速度, 高精度, 高エネルギー効率である.

リンクが曲げを受けないので, 軽い部材で十分な強度が得られる. アクチュエータが静止系に近いところだけに設置できる.

- ・リンク部分および機構全体として剛性が高く, 高精度.

リンクが曲げを受けないので変形が小さく, それによる誤差が小さい.

- ・高出力である(アクチュエータの力の和が対象物(可動テーブル)に伝わる).

負荷を並列に支持するので, アクチュエータが他の負荷にならない.

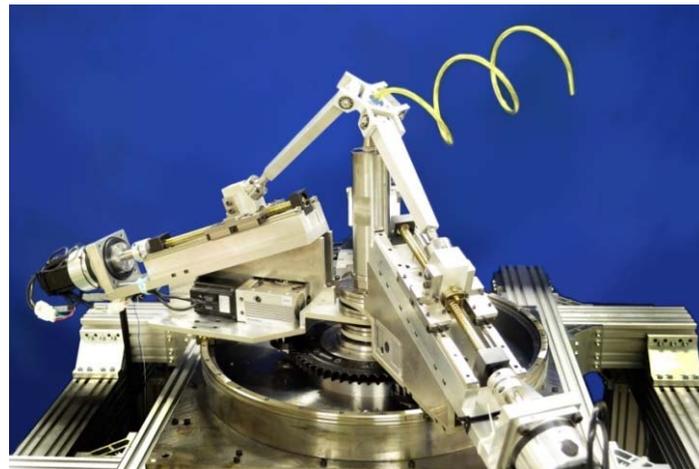
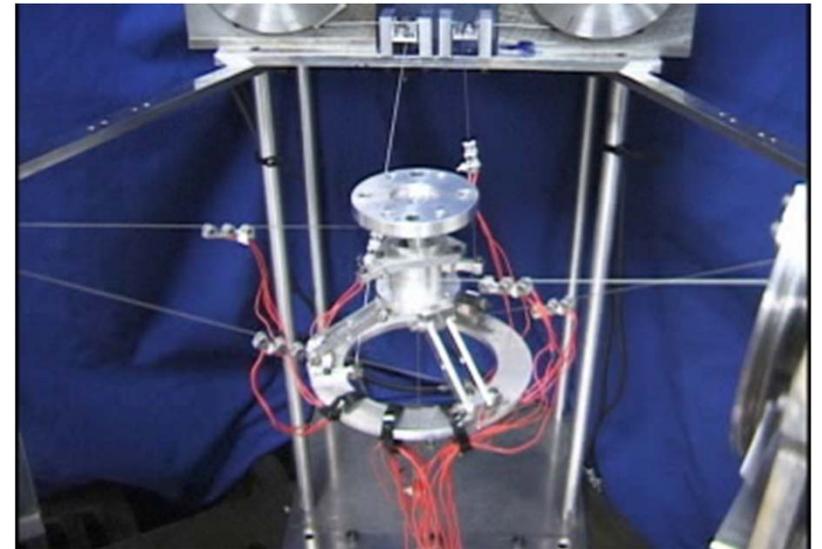
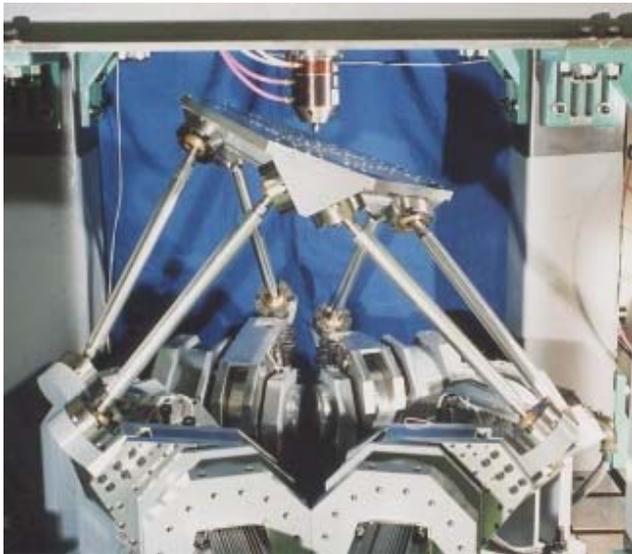
- ・入出力速度比が多様で専用機に適する

アクチュエータと対象物との仮想的な距離(腕の長さ)が0~無限大まで変えられる. 速度 $V=r\omega$ ( $r$ :腕の長さ,  $\omega$ :アクチュエータの回転速度).

# パラレルメカニズムの特徴(2)

用途(設計条件)に応じてさまざまな特徴の機構設計可能.

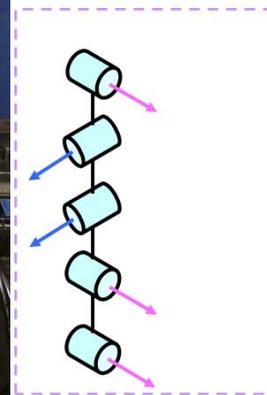
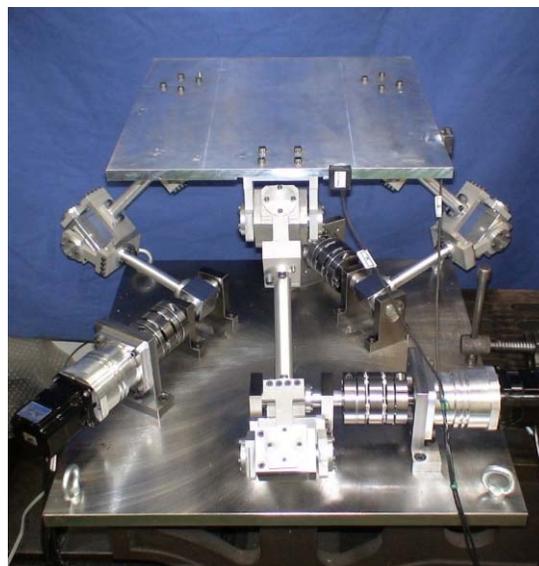
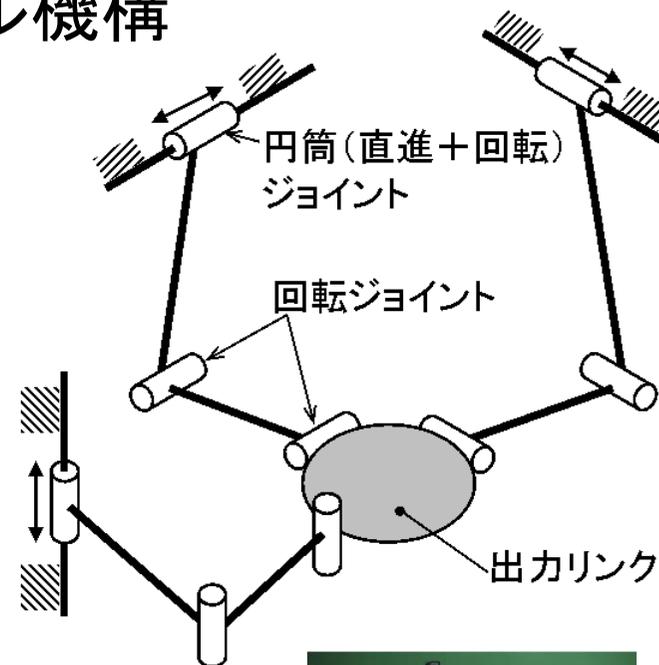
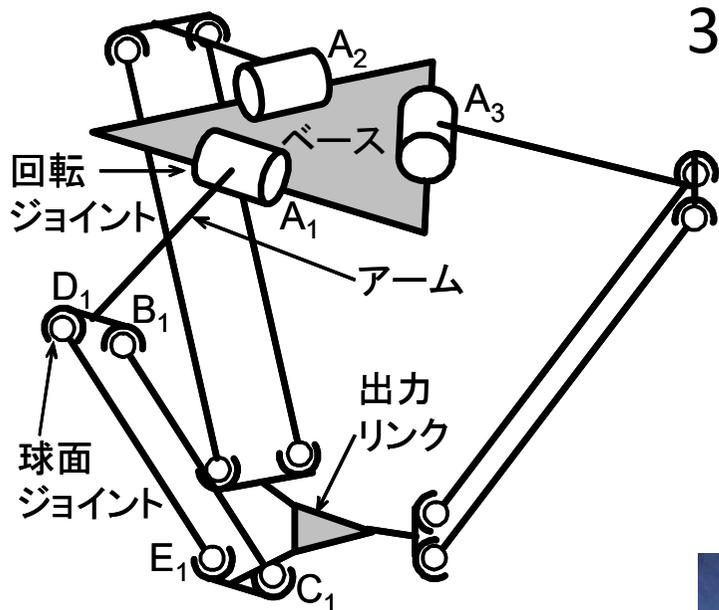
## 6自由度パラレル機構



# パラレルメカニズムの特徴(2)

用途(設計条件)に応じてさまざまな特徴の機構設計可能.

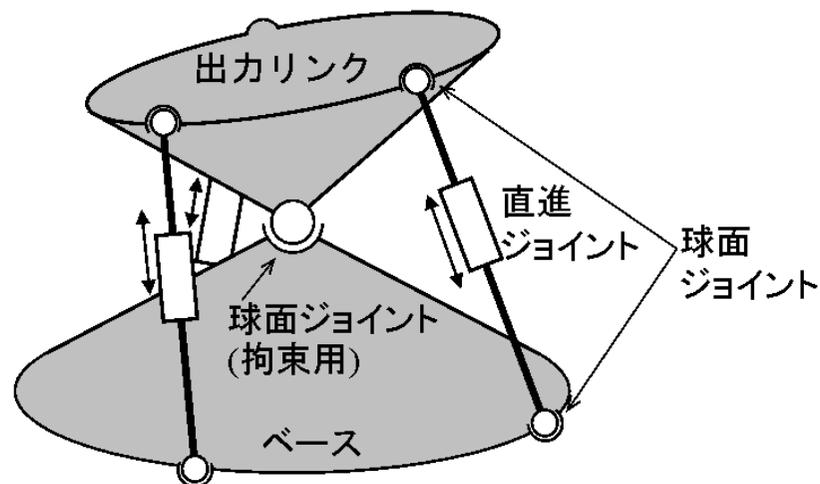
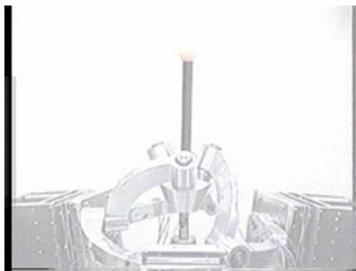
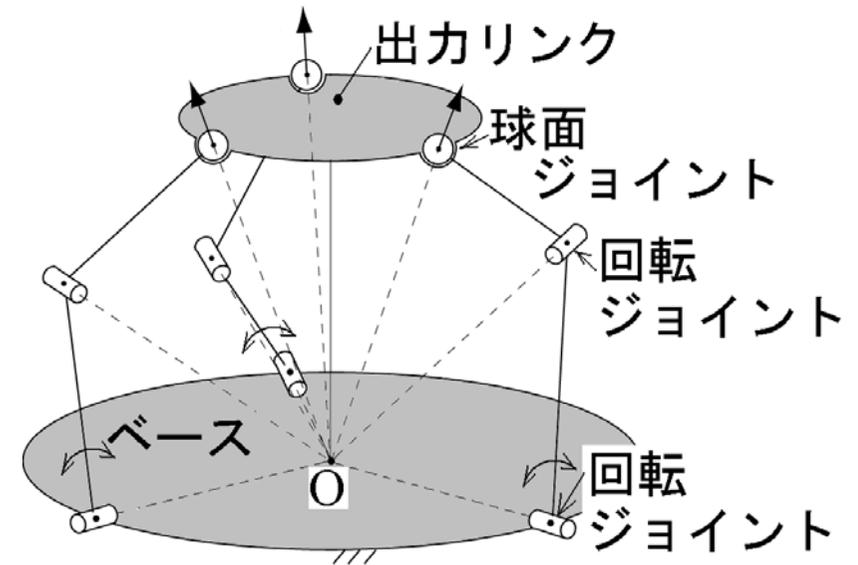
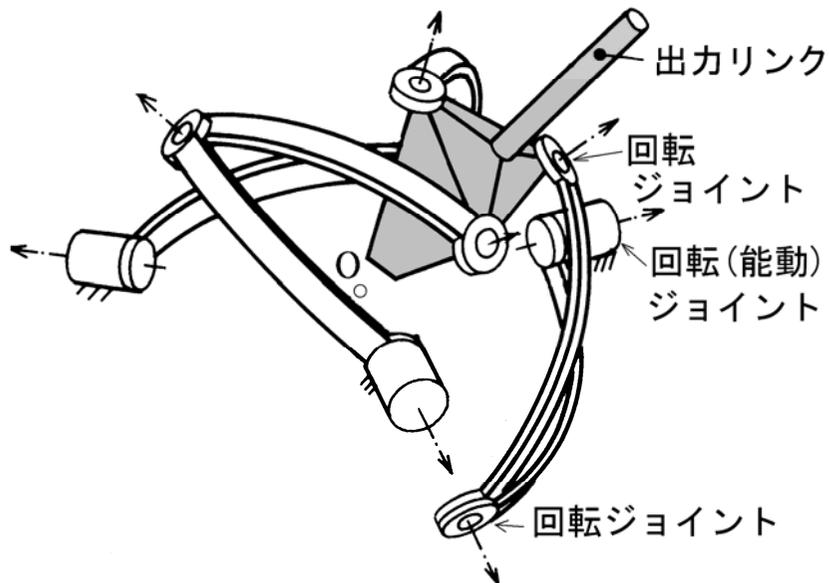
## 3自由度並進平行機構



# パラレルメカニズムの特徴(2)

用途(設計条件)に応じてさまざまな特徴の機構設計可能.

## 3自由度回転平行機構



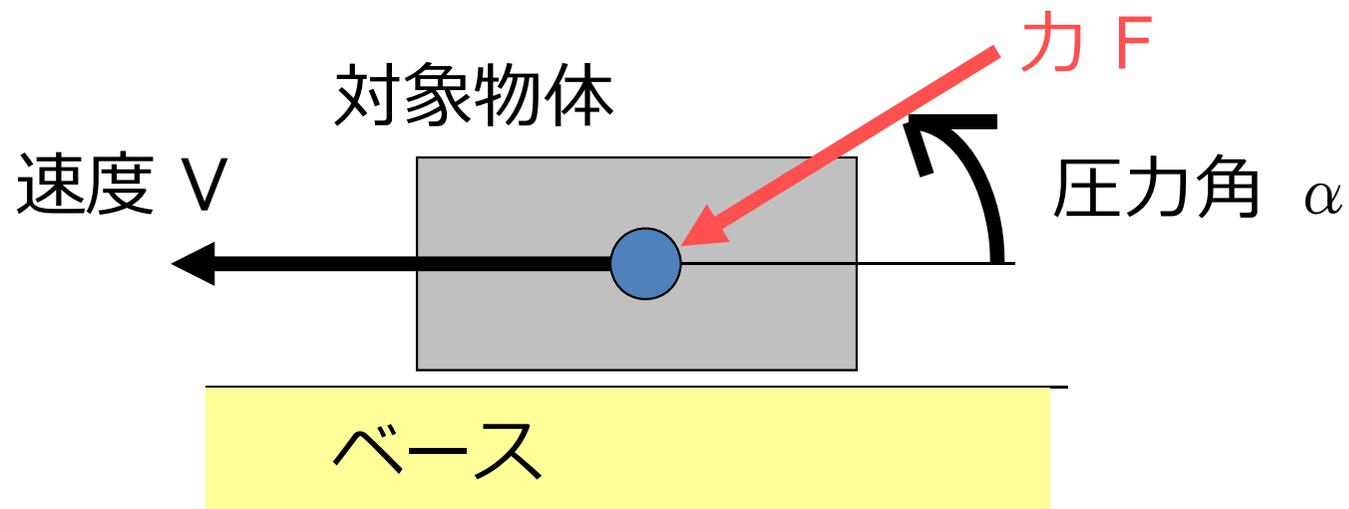


# 運動伝達性に基づくパラレルメカニズムの設計

---

# 特異点と運動伝達性

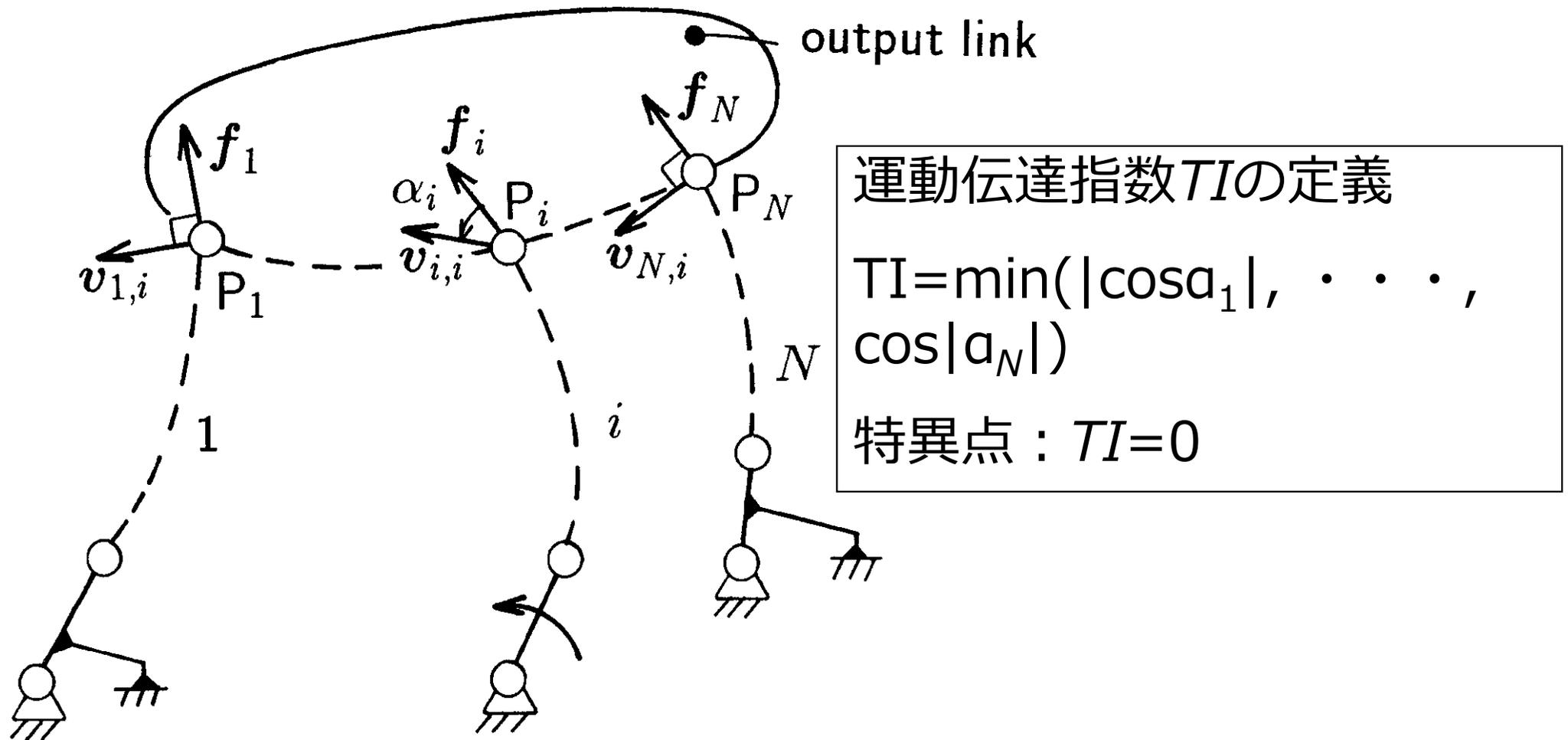
## 機構の動きやすさの評価(基本概念)



作用する力 $F$ のうち、動く方向（速度の方向）に寄与する成分は $F\cos\alpha$ なので、 $\alpha$ ができるだけ0に近くなるように設計する。 $\alpha = 90^\circ$ の時、動く方向に対して作用できる力は皆無となる（これが特異点）。

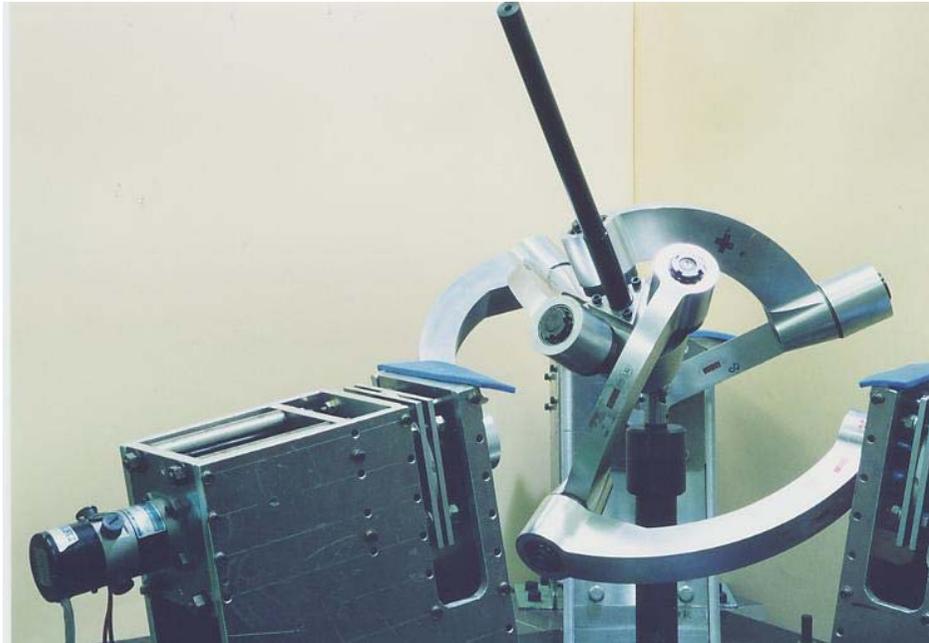
# 特異点と運動伝達性

## パラレルメカニズムにおける圧力角と運動伝達指数



$N$ 自由度パラレルメカニズムにおいて、第 $i$ 連結連鎖以外の入力リンクをすべて固定した状態のモデル図

# 運動伝達性に優れた球面パラレルメカニズムの開発 (1992～)



試作機の概観(1993)

高い運動伝達性（運動伝達性の評価とリンク間干渉回避に基づく機構設計により、大きな実用作業領域を実現）  
大作業領域の実現

揺動角： $\pm 65^{\circ} \sim 75^{\circ}$

高い繰返し精度

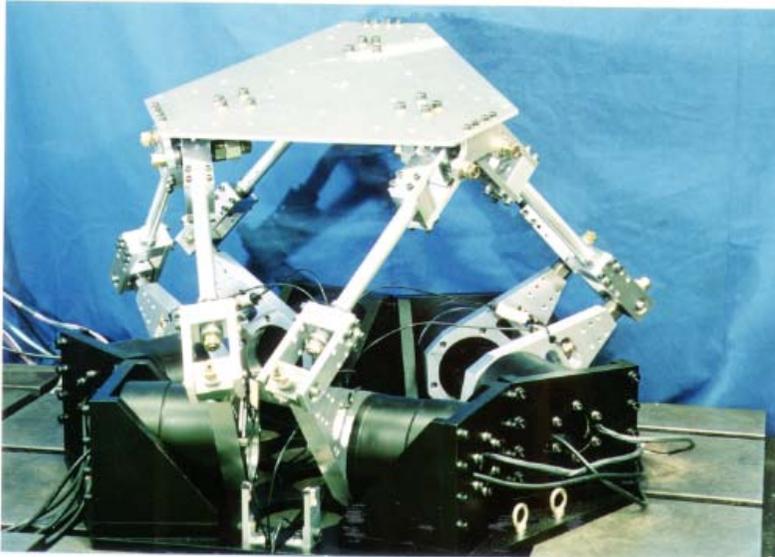
$\pm 2 \sim 8 \mu\text{m}$  (アーム長=200mm)

絶対精度： $0.043\text{deg}$  (平均) ,  $0.33\text{deg}$   
(最大値) : アーム揺動方向 (キャリブレーション後)

## Reference

Yukio TAKEDA, Hiroaki FUNABASHI and Yasutaka SASAKI, Development of a Spherical In-parallel Actuated Mechanism with Three Degrees of Freedom with Large Working Space and High Motion Transmissibility (Evaluation of Motion Transmissibility and Analysis of Working Space), JSME International Journal, Series C, 39-3(1996,September), pp.541-548.

# 運動伝達性に優れたパラレルメカニズムの設計 (1993～)



諸元：

ベース上のモータ配置円半径=240mm  
プラットフォームのジョイント配置円半径=224mm  
入力リンク長=236mm  
中間リンク長=388mm  
モータ：DDモータ  
最大トルク=30N・m  
最大回転数=2.4rps  
エンコーダ分解能=50万パルス/回転

性能：

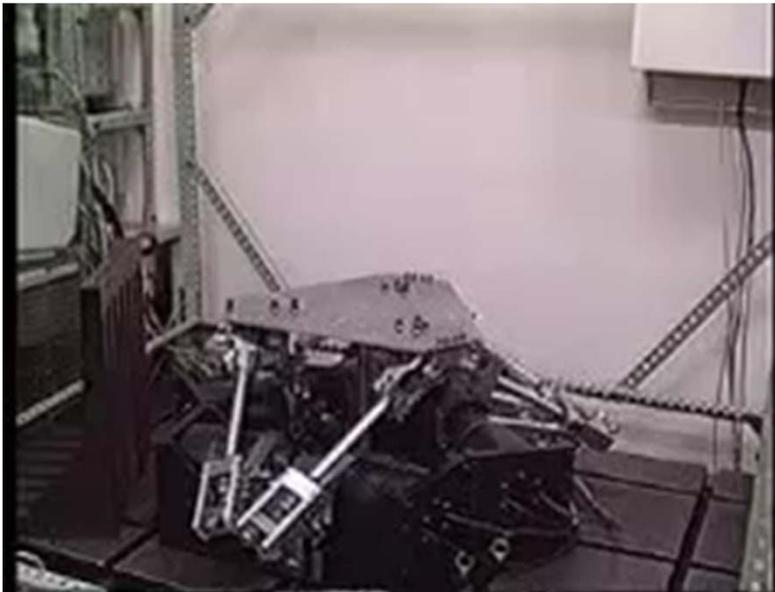
作業領域：XYZ各軸方向300mm以上の並進変位  
水平2軸回り $\pm 20^\circ$   
鉛直軸まわり $\pm 60^\circ$ の回転変位

可搬質量=20kg

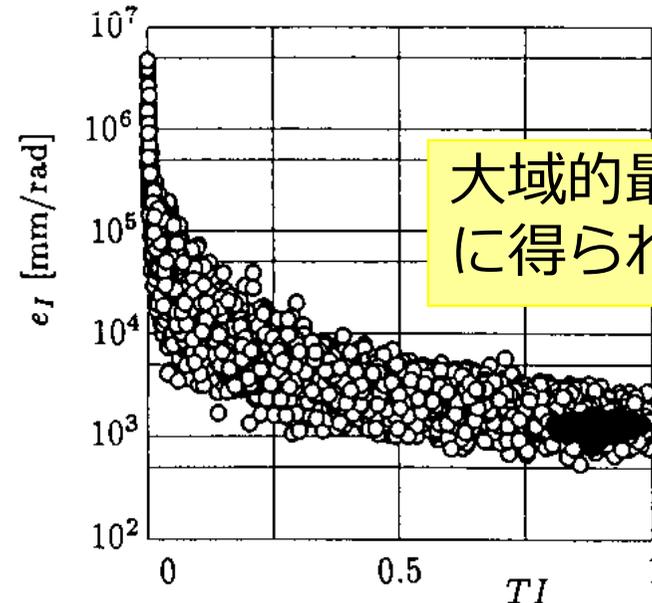
繰返し位置決め精度= $\pm 1.3 \sim 8.4 \mu\text{m}$

(エンコーダ分解能の数分の1, 作業領域の $10^{-5}$ 分の1)

位置決め時間=0.192s (10kg負荷, 鉛直上向き150mm変位)



試作機(1993)



TIと出力誤差の関係 (●：最適設計で得られた機構)



# キャリブレーションの研究

---

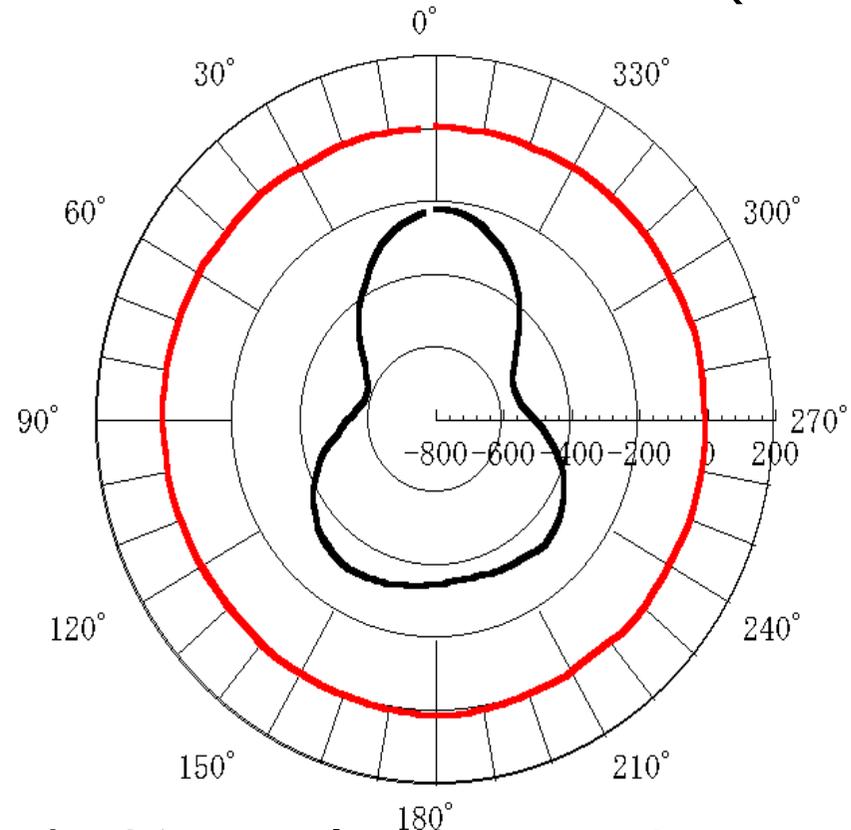
フーリエ級数を使った誤差モデルの表現に基づく効率的キャリブレーション

# 転がり球面軸受を用いた6自由度ワークテーブルの開発と キャリブレーションによる絶対位置精度の向上



設置面積 :  $1,200 \times 1,200 \text{mm}^2$   
作業領域 :  $650 \times 650 \times 350 \text{mm}^3$   
 $67 \times 60 \times 76 \text{deg}^3$   
TI : 0.483 ~ 0.930  
Pos. Resol. :  $0.644 \sim 0.518 \mu\text{m}$   
Stiffness :  $3.6 \sim 9.7 \text{N}/\mu\text{m}$

— : after calibration ( $14 \mu\text{m}$ )  
— : before calibration ( $349 \mu\text{m}$ )

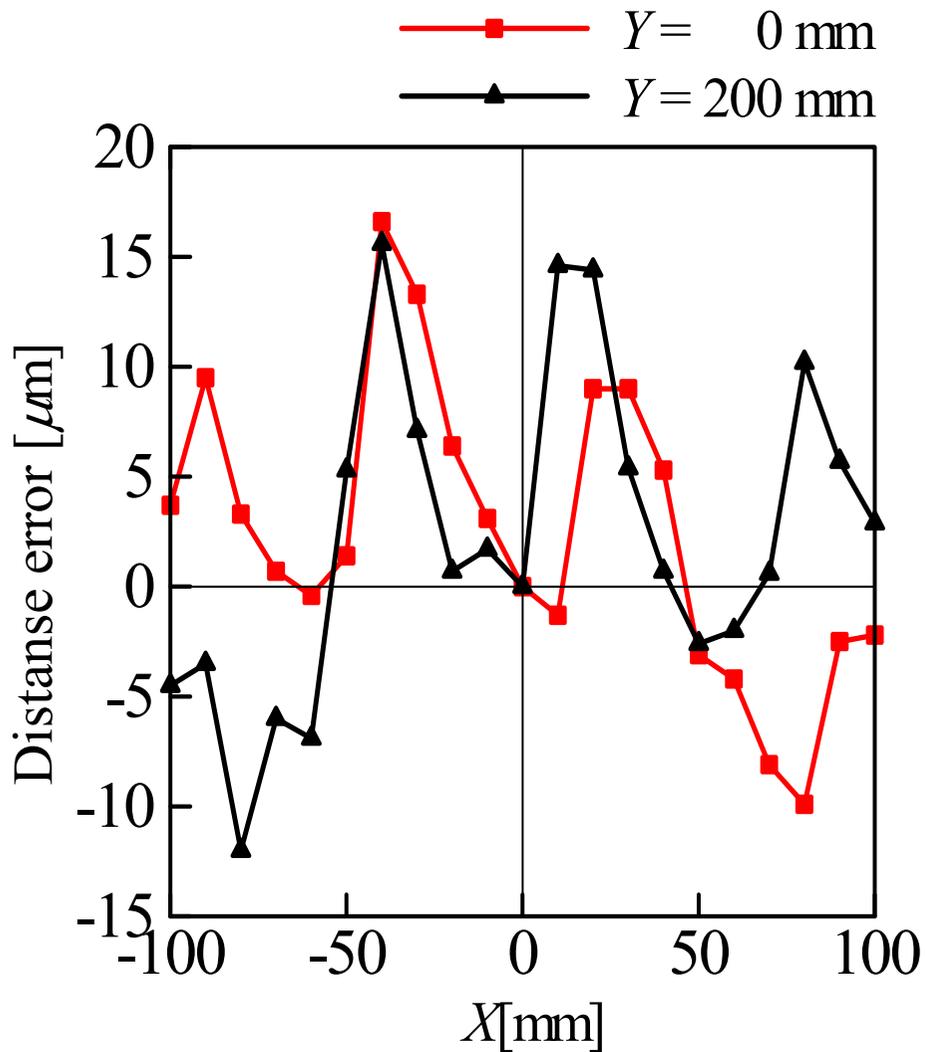


実験結果 (24個の最適円運動の  
組み合わせによるキャリブレーション  
前後の真円度評価)

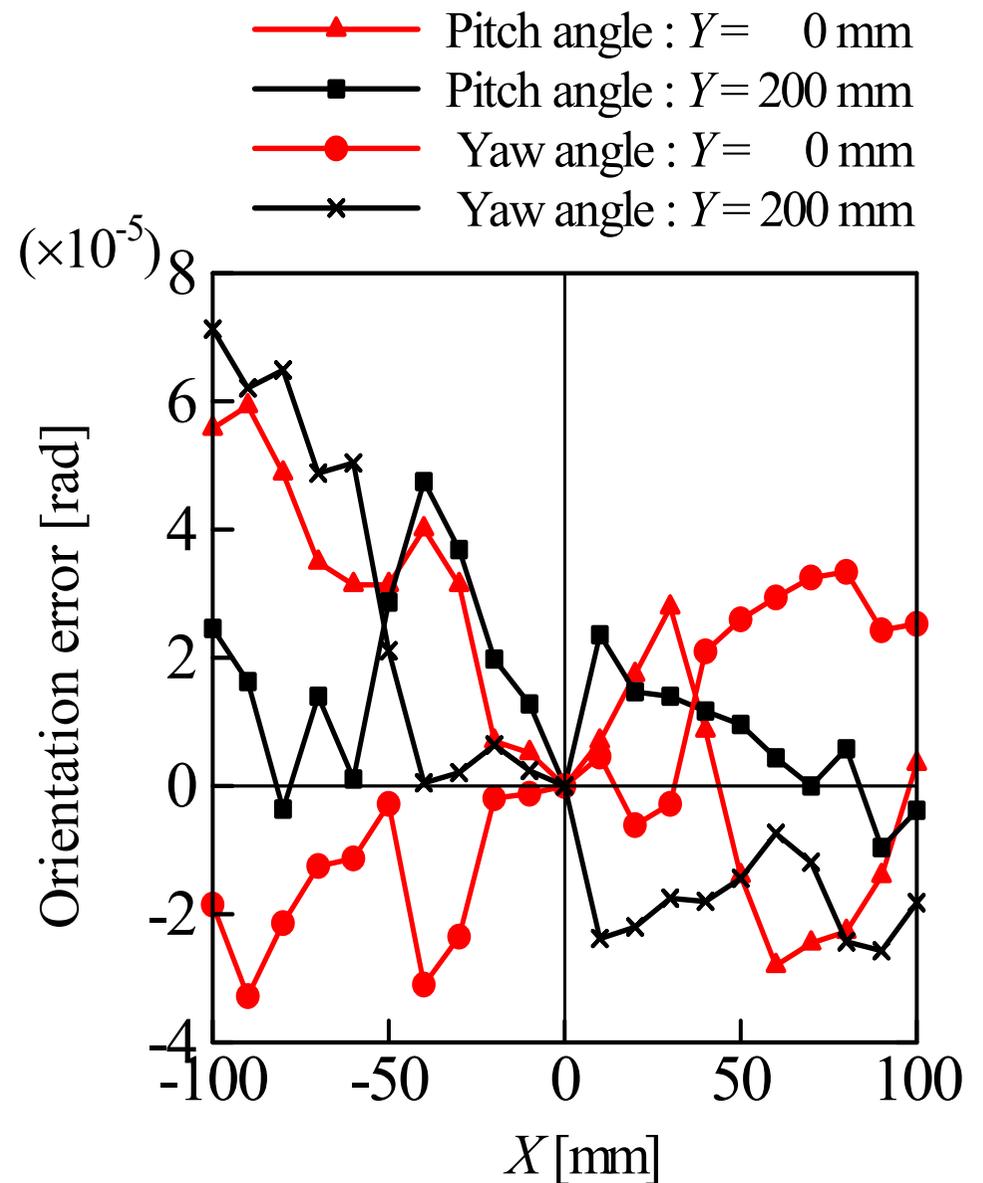
武田他 : 日本機械学会論文集C編, 67-664 (2001-12), p.4025, 武田他 : 日本機械学会論文集C編, 68-673 (2002-9) pp.2762-2769, 沈他, 日本機械学会論文集C編, 69-682(2003-6), pp.1691-1698.

# キャリブレーションの効果

Accuracy/stroke  $\cong 10^{-4}$



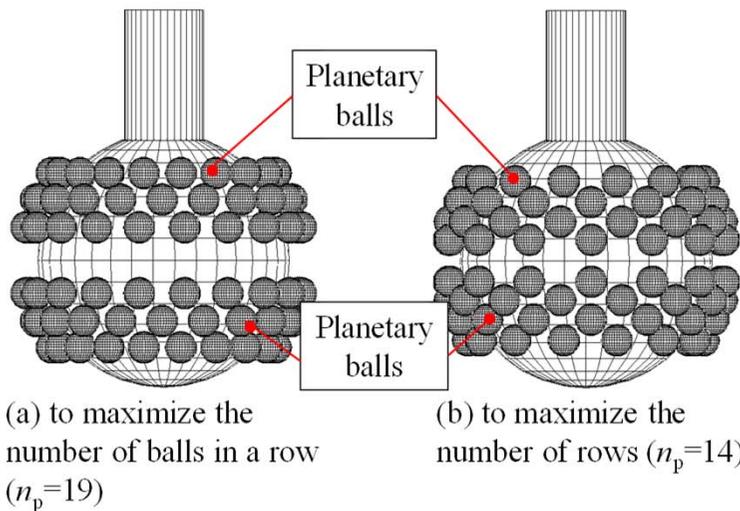
距離誤差 (進行方向)



姿勢角誤差 (ピッチ角およびヨー角)<sub>20</sub>

## ■ ヒーハイス精工(株)製球面ジョイント SRJの高精度化・高剛性化

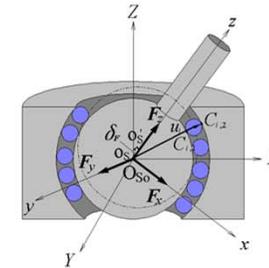
- 静的特性の解析
- ボール配置の最適設計



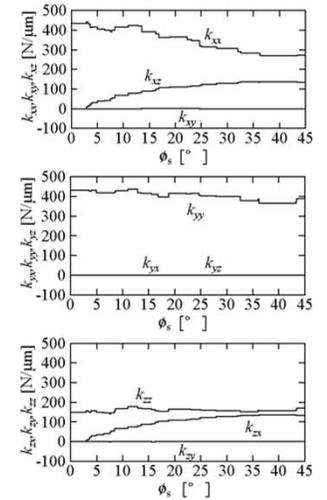
- 剛性と負荷容量を最大化するボール配置とボール径を検討

### Relationship between force and displacement of the sun ball

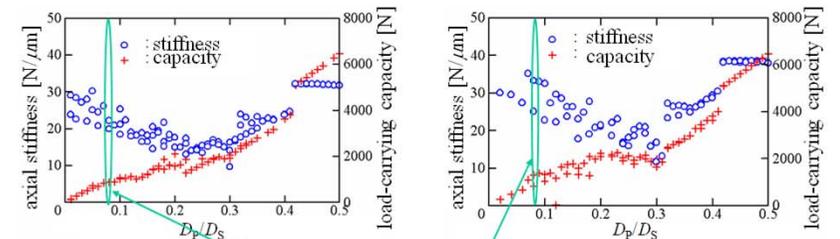
$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{Bmatrix}$$



Definition of the coordinate systems



Example of analysis



on the market

(a) no preload ( $\Delta D_P=0$ )      (b) with preload ( $\Delta D_P = 0.001 D_{P,G}$ )

Relationships between axial stiffness, static load-carrying capacity and diameter of the planetary balls ( $D_S=50.8\text{mm}$ )

$D_P/D_S \rightarrow \text{smaller} : \text{improved stiffness}$

$D_P/D_S \rightarrow \text{larger} : \text{improved load capacity}$



# 冗長パラレルロボット(粗微動駆動系)による 大ダイナミックレンジ位置決め

---

アクチュエータ単体の性能向上だけに頼らず、微小分解能(高精度)と大変位を同時実現する

## 冗長平行ルマニピュレータ

### 作業領域

(並進)  $X, Y: \pm 40\text{mm}$   
 $Z: \pm 20\text{mm}$

(回転)  $X, Y, Z: \pm 10^\circ$

### 分解能

並進 : 20nm

回転 : 0.2 $\mu\text{rad}$

### 機構の大きさ

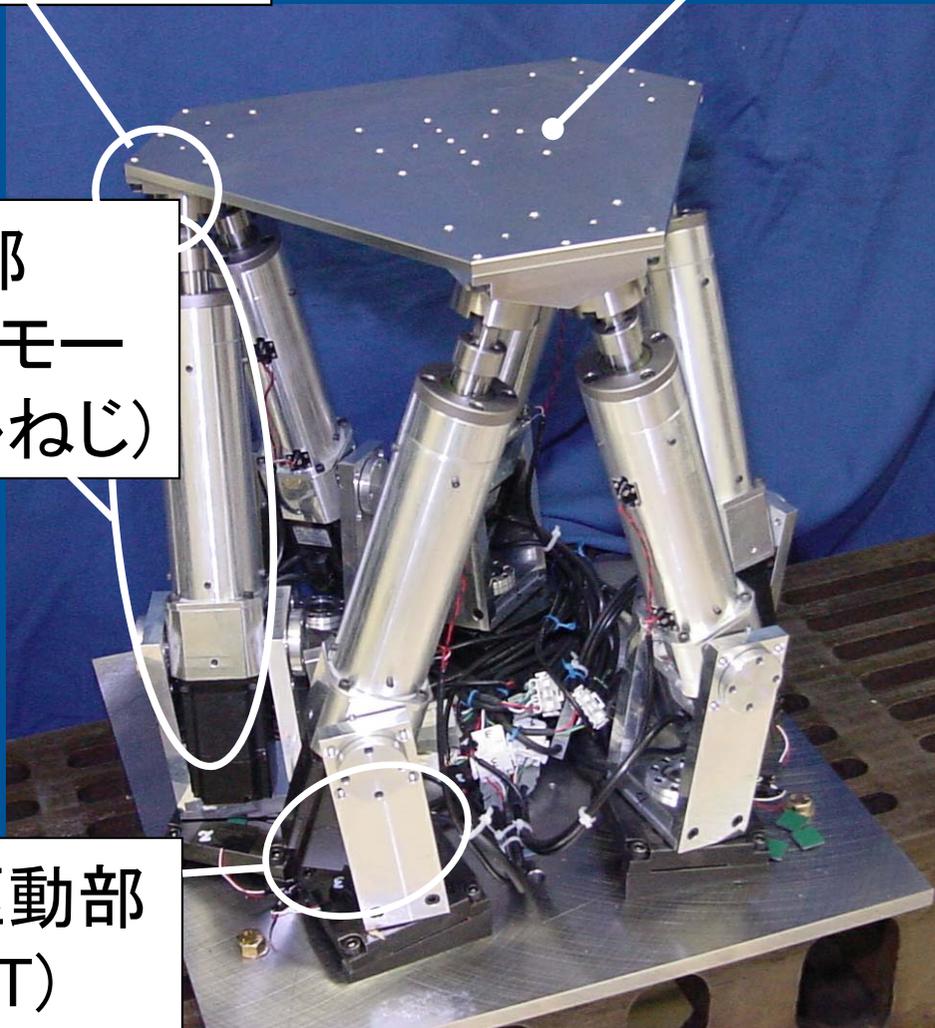
540mm  $\times$  540mm  
 $\times$  600mm

転がり球面軸受

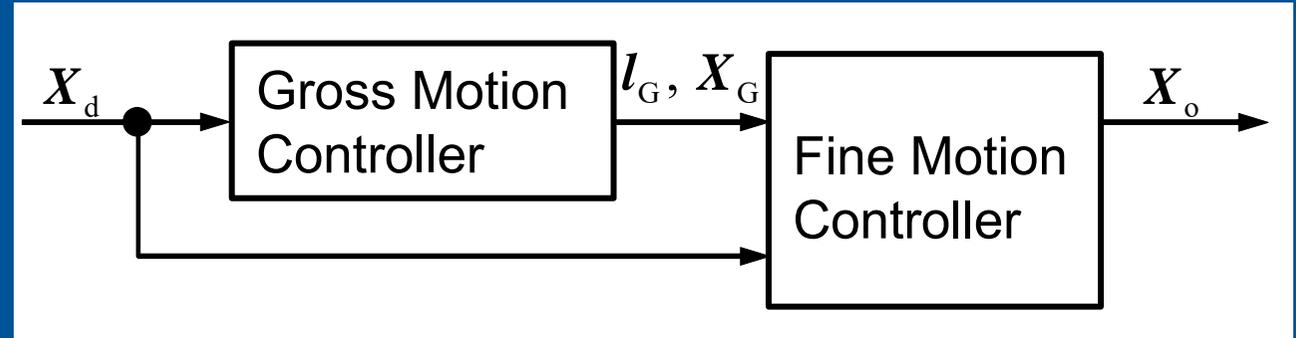
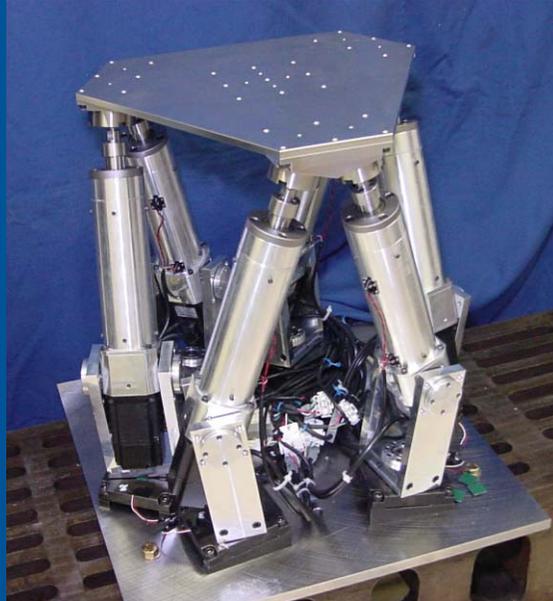
出力節

粗動駆動部  
(ACサーボモーター+ボールねじ)

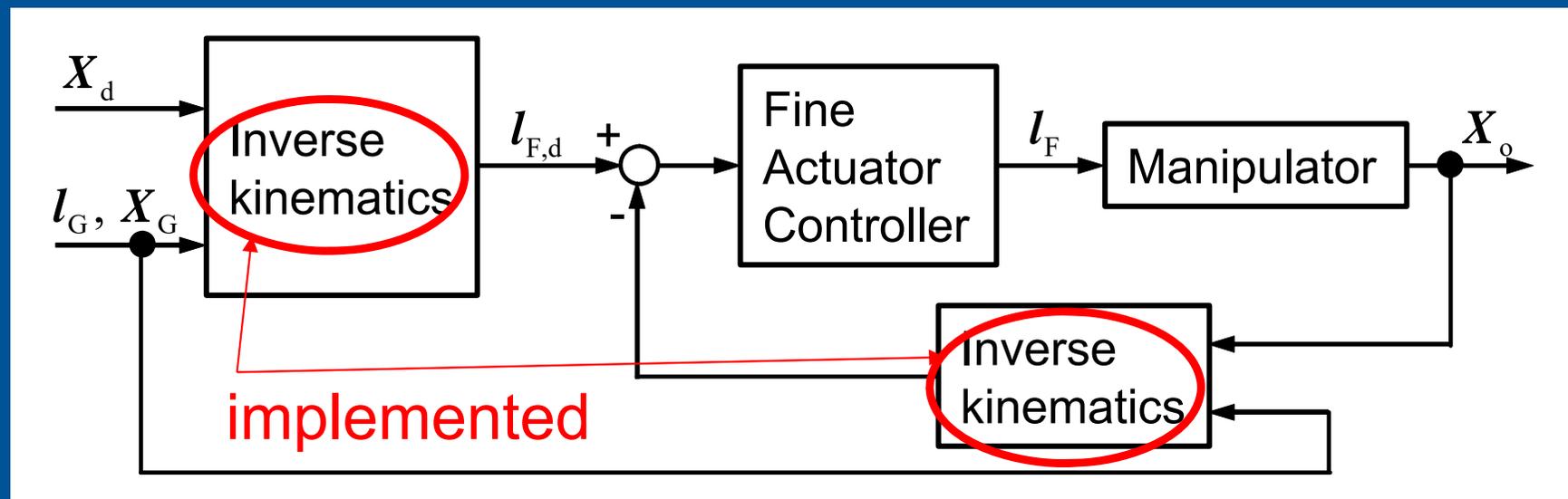
微動駆動部  
(PZT)



試作機の概観



制御系の全体構成

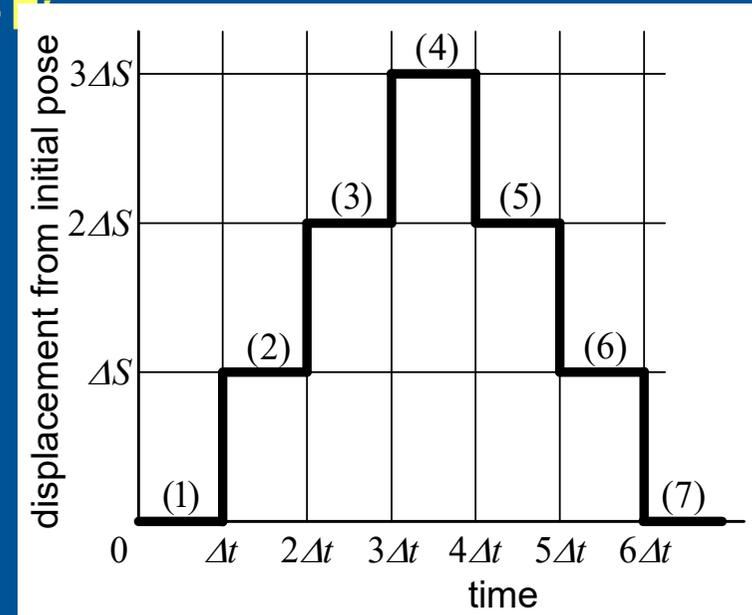


微動駆動系の制御系

## 実験1:微小ステップ応答→実際の分解能

微小変位の測定:

静電容量形変位センサ(ST-3512,  
岩通, 測定分解能: 6nm)

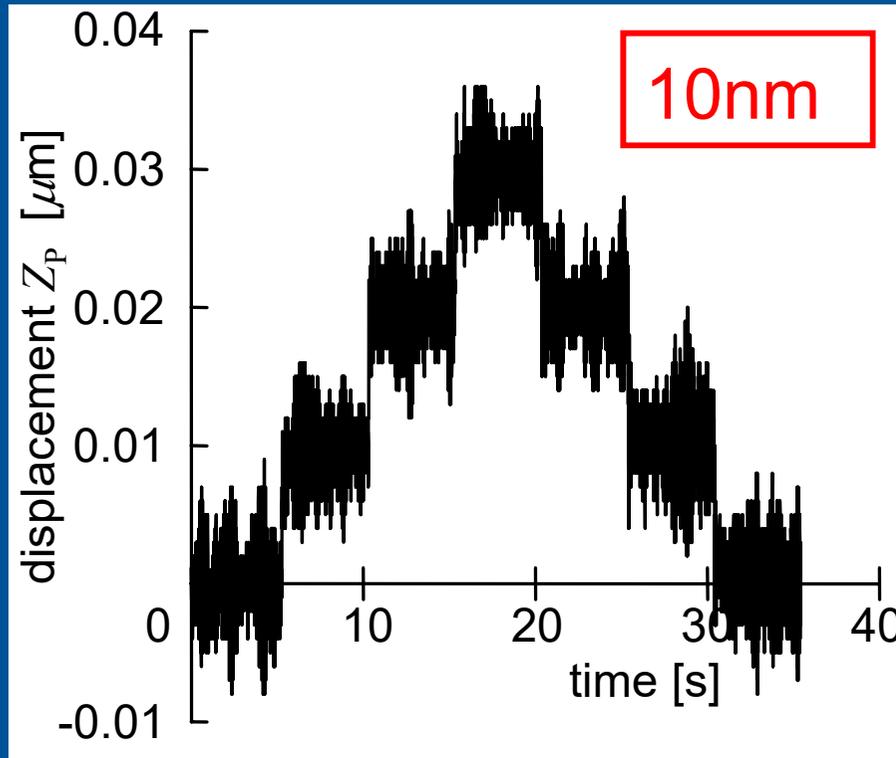


目標値の時間変化

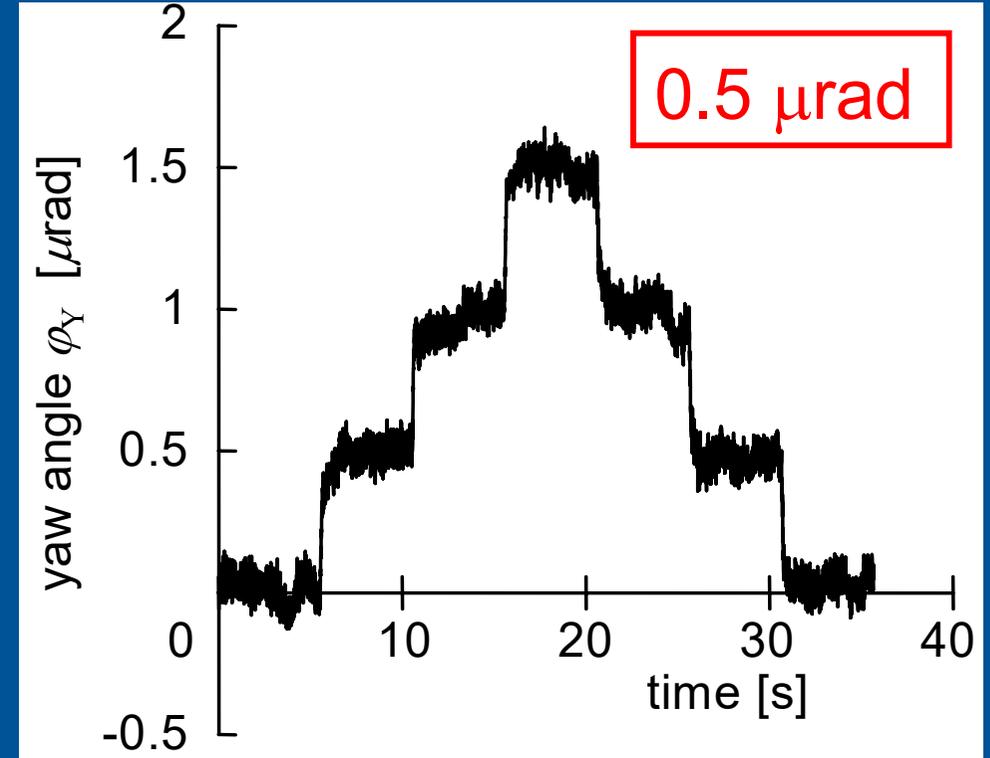
実験条件 ( $Z_c$ : 基準位置におけるZ座標)

No.	初期位置	運動	方向	ステップ変位
1	(0,0, $Z_c$ ) [mm]	並進	Z	10 nm
2	(0,40, $Z_c$ ) [mm]	回転	Z	0.5 $\mu$ rad
3	(0,0, $Z_c+20$ ) [mm]	並進	Y	20 nm
4	(0,0, $Z_c$ ) [mm]	回転	X	1 $\mu$ rad

## 実験1の結果(1)

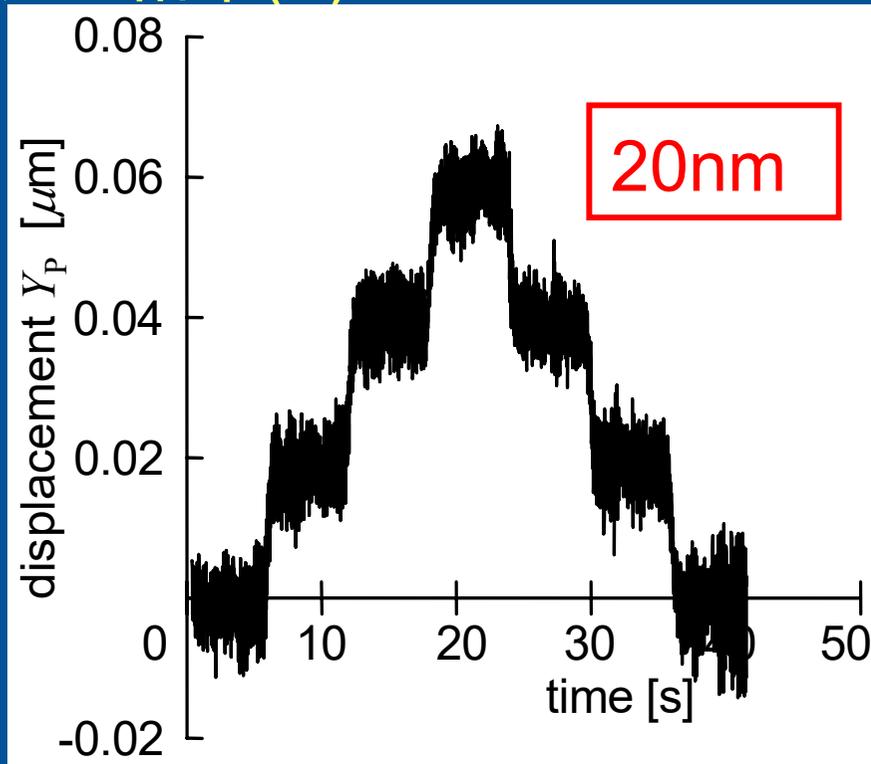


(1) Z 方向への並進  
(0,0, $Z_c$ ) mm

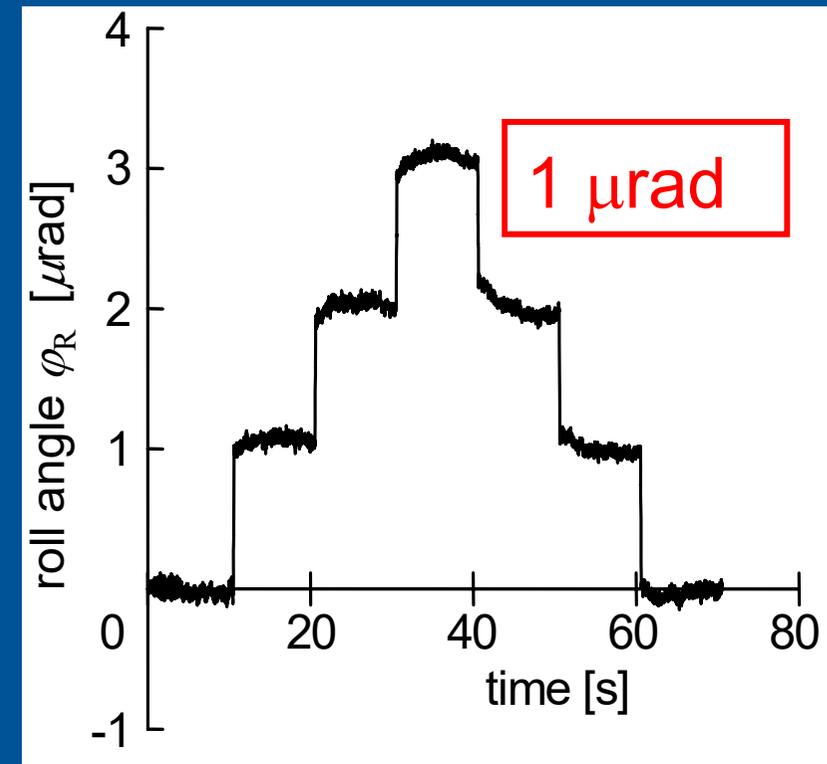


(2) ヨー軸まわりの回転  
(0,40, $Z_c$ ) mm

## 実験1の結果(2)



(3) Y方向への並進  
(0,0, $Z_c+20$ ) mm

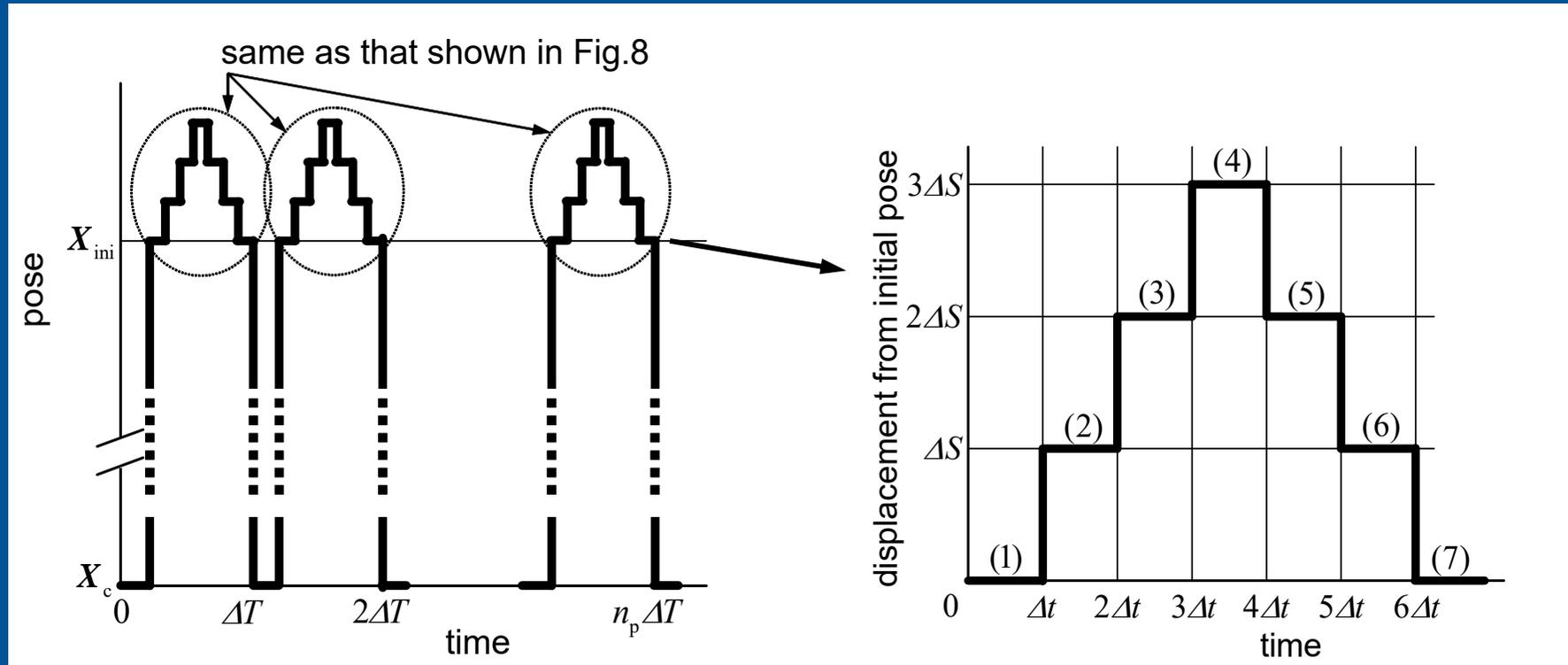


(4) ロール軸まわりの回転  
(0,0, $Z_c$ ) mm

実験1の結果のまとめ: 10~20nm, 1 $\mu\text{rad}$ レベルの微小並進・回転運動が作業領域内において実現された。

## 実験2: 繰返し精度の検証

### 大変位と繰返し微小ステップ変位の繰返し



目標値の時間変化

微小ステップ変位

**実験結果(繰返し精度):** 20~40mmの大変位+50nmの微小ステップ変位に対し, 3~6nmの繰返し精度を実現

Yukio TAKEDA, Kazuki ICHIKAWA and Wei GUO, A Spatial Six-Dof Parallel Manipulator with Redundant Actuators for Gross and Fine Motions, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 4, No.2, 2010, pp.444-456.



# 位置・姿勢分離パラレルメカニズム 誤差補償性能を有する低自由度パラレルメカニズム

---

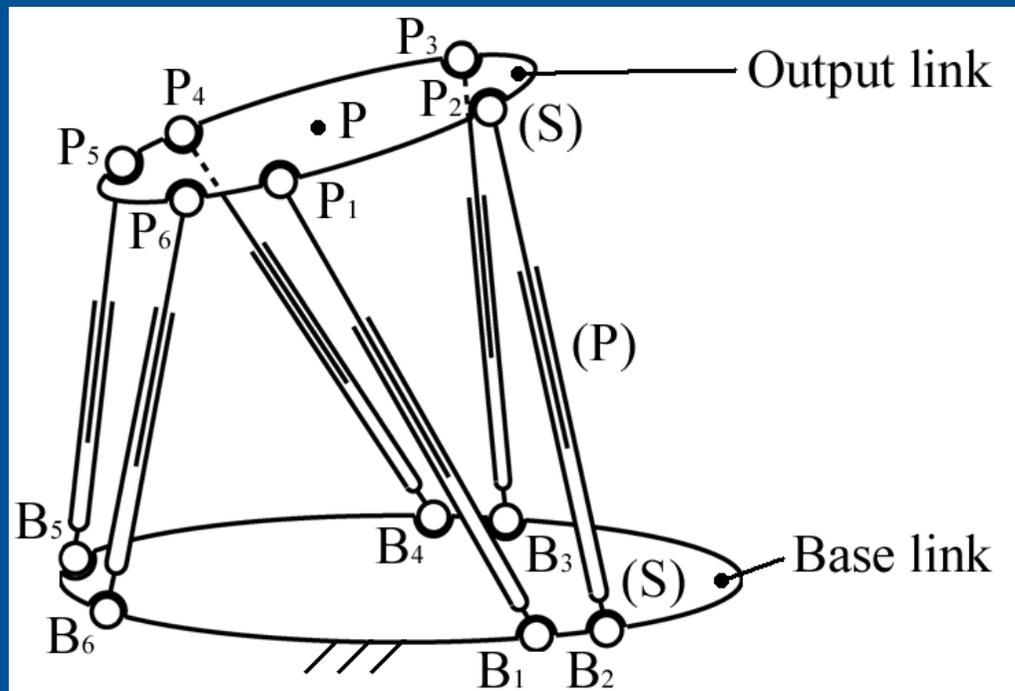
## ■ 位置・姿勢分離形6自由度パラレル機構

- 解析, 制御演算(運動学)の単純化
- 位置と姿勢の干渉による作業領域(6次元)の縮小
  - » 非干渉化による作業領域の拡大. 特に, 姿勢角の拡大.
- 設計の単純化(見通しを立てやすくする)

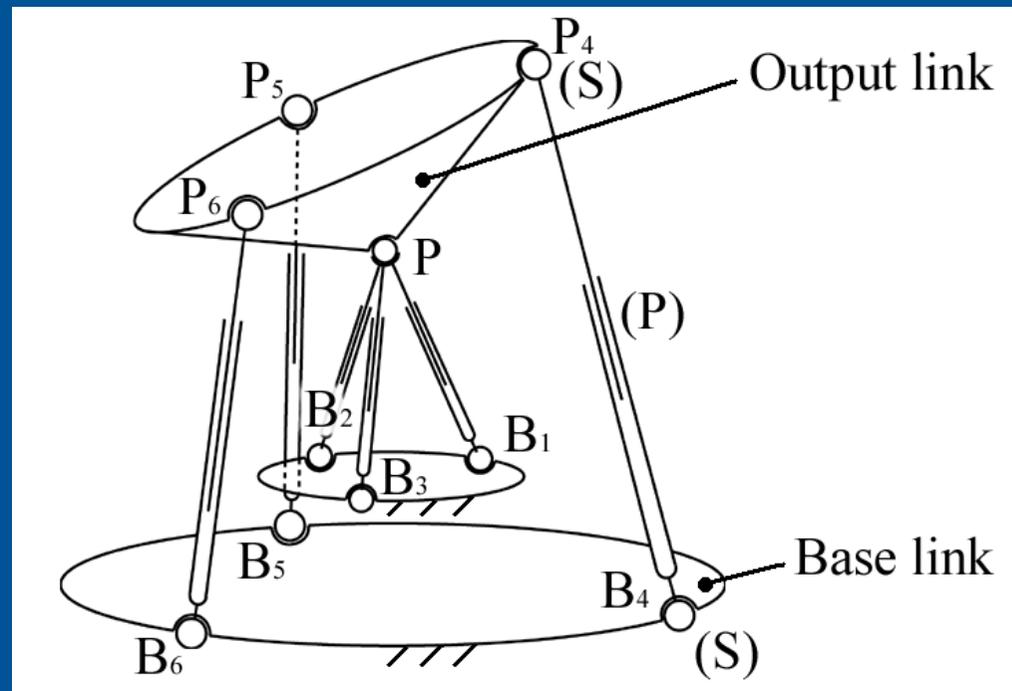
## ■ 誤差補償機能を有する低自由度パラレル機構

- 分離された姿勢自由度による角度誤差補償

# 3重球対偶を用いた6自由度空間 パラレルメカニズム



6自由度空間機構

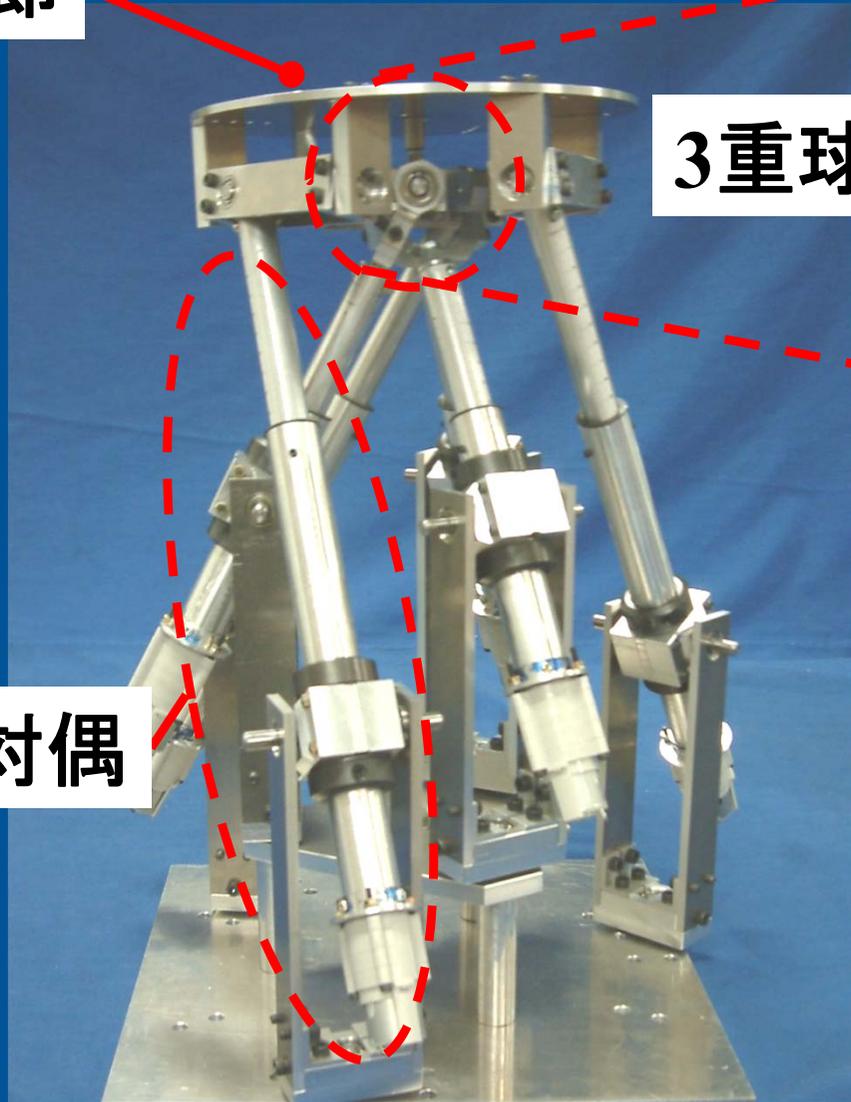


3重球対偶を出カリンク上に配置した機構  
(位置と姿勢を分離した6自由度空間機構)

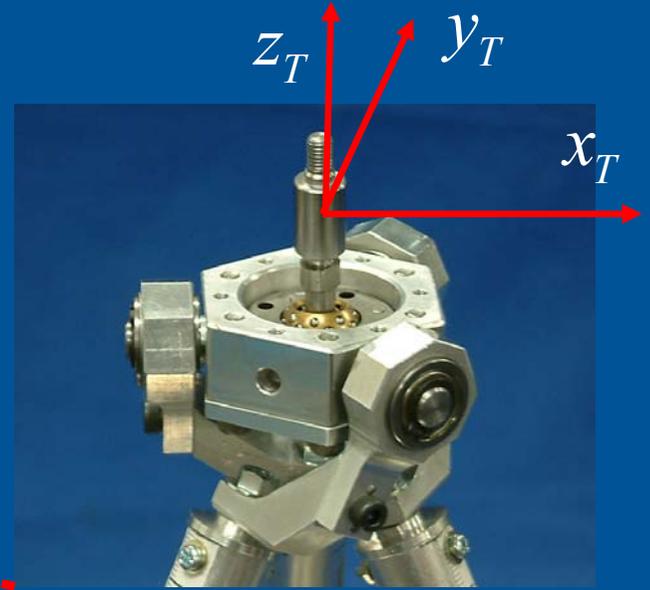
# 位置・姿勢分離形6自由度空間機構



出力節



3重球対偶



能動対偶

作業領域

並進  $X, Y: \pm 70\text{mm}$   
 $Z: \pm 40\text{mm}$

回転( $z_T$ 軸まわり)  
回転: $90^\circ$

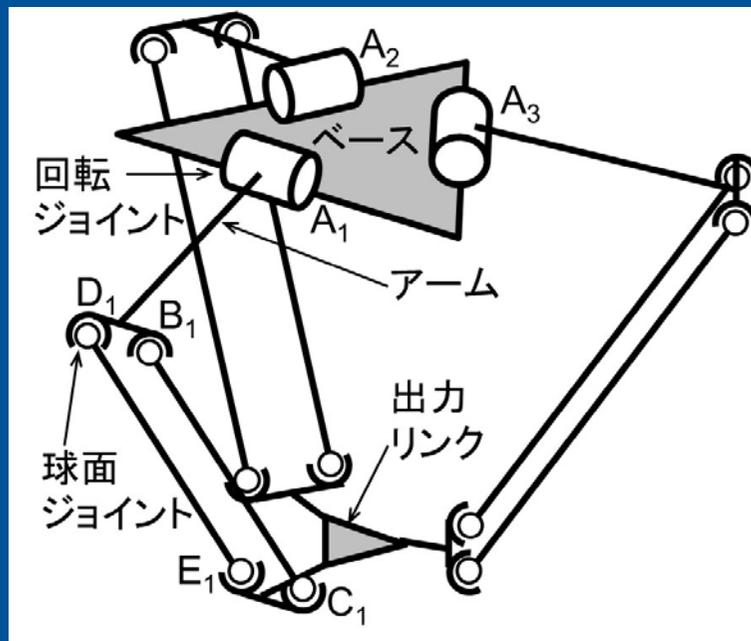
大きさ 揺動: $\pm 30^\circ$

W280mm × D280mm  
× H400mm<sub>32</sub>



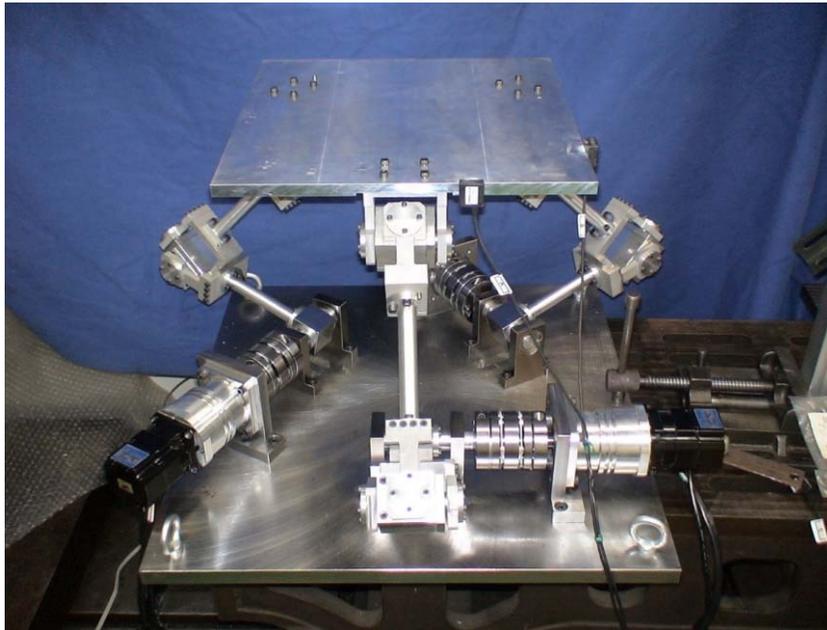
## パラレルマニピュレータ

- 姿勢誤差補償が可能な並進パラレルマニピュレータ
- 回転中心の位置誤差の補償が可能な回転パラレルマニピュレータ
- 回転中心の位置を変化可能な回転パラレルマニピュレータ

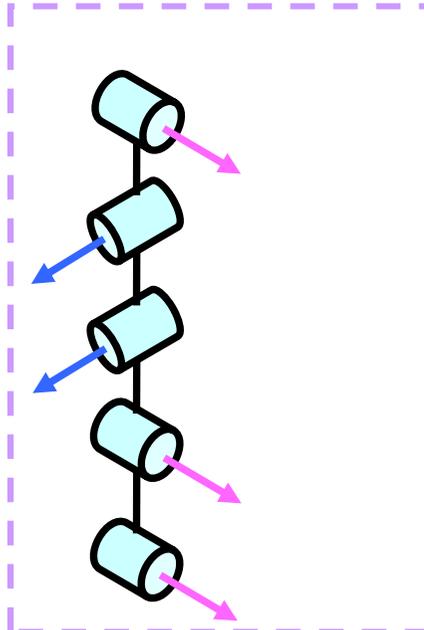


運動に伴って姿勢は変化しない  
→姿勢の精度は機械的精度に依存.  
→補償(制御)不能.  
⇒簡単な構造で姿勢の補償(制御)可能としたい.

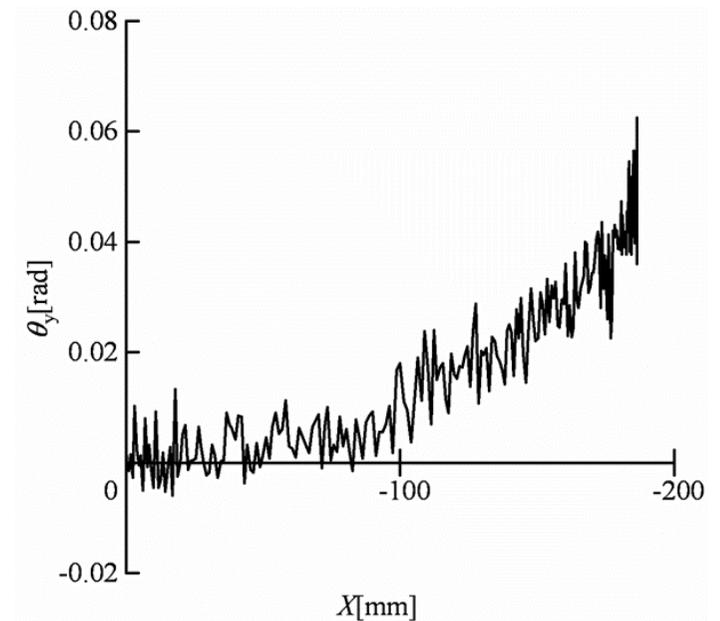
典型的な3自由度並進パラレルロボット



3-RUU形試作マニピュレータ



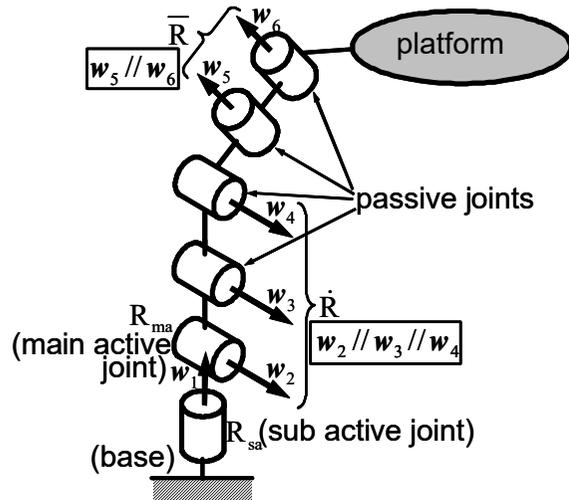
連結連鎖の構成



姿勢角の変化

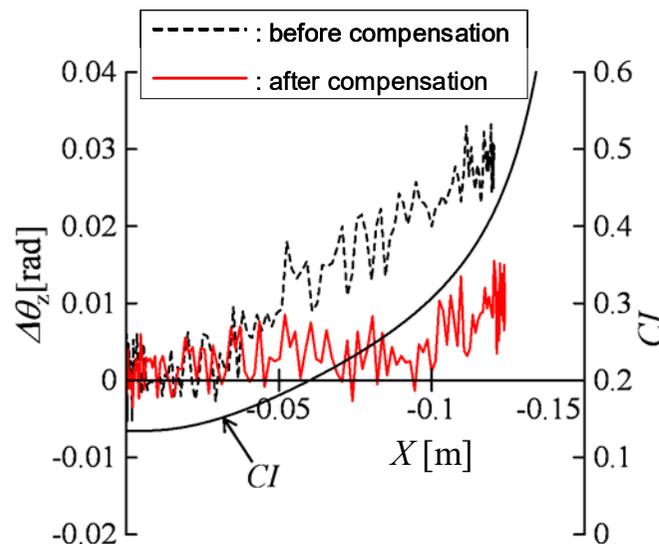
□ 並進運動のみの機構だが、実際は微小な姿勢角変化がある

# 微小姿勢誤差の補償が可能な 並進平行ルマニピュレータ

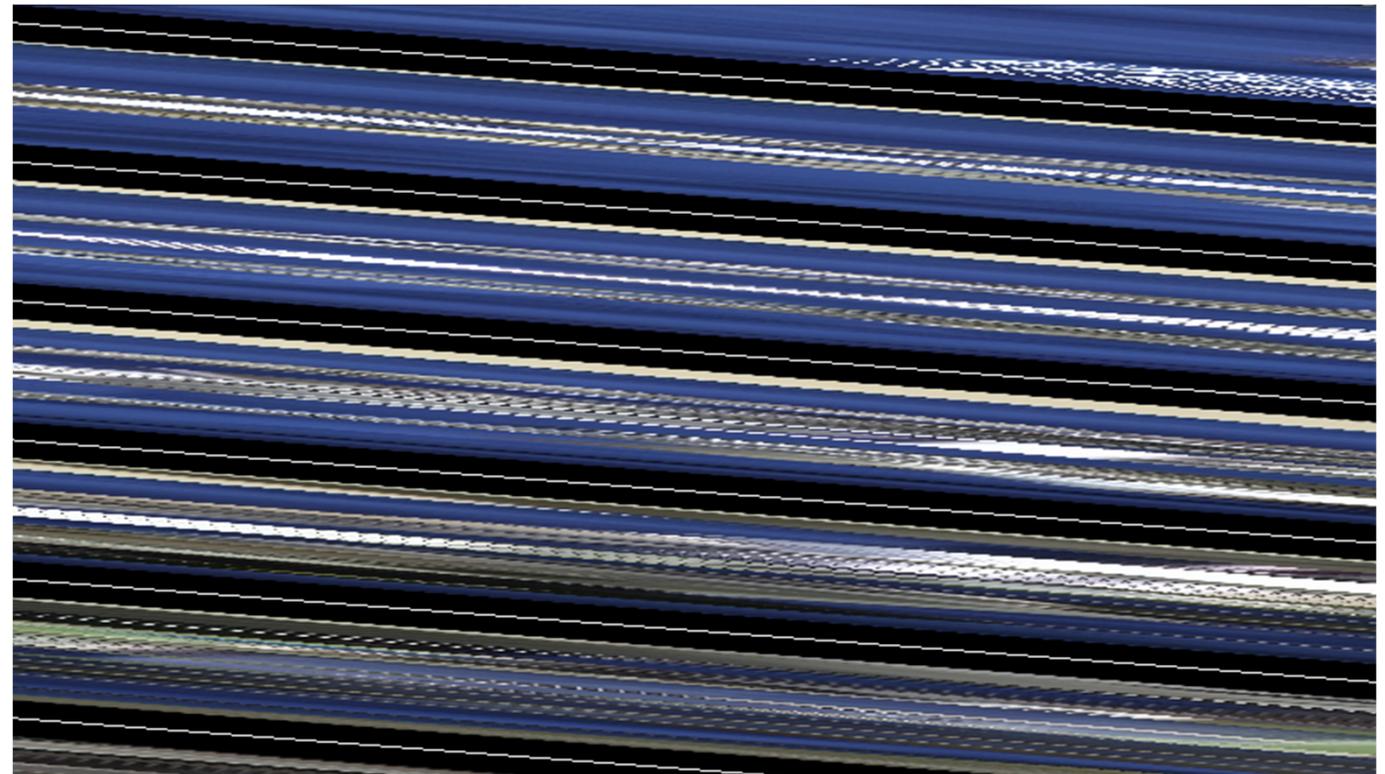


機構の構成

□ 分離された姿勢自由度による姿勢誤差の補償



姿勢補償実験の結果



田邊雅隆・武田行生: 姿勢補償性を有する並進平行ルマニピュレータ,  
日本機械学会論文集C編, 76巻763号(2010-3), pp. 727-733.



# 当研究室で開発している そのほかの平行メカニズム

---

参考までに

# Development of Pipe Bender Using Parallel Mechanism



東京工業大学  
Tokyo Institute of Technology

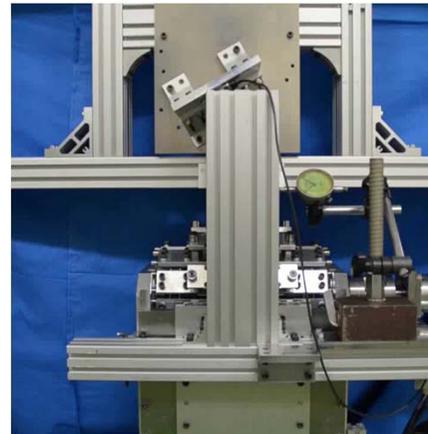
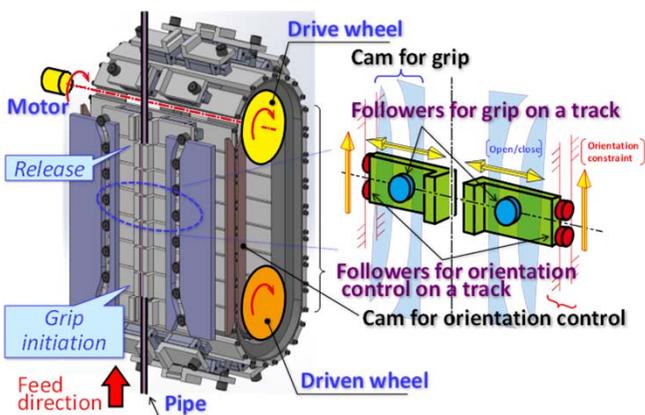
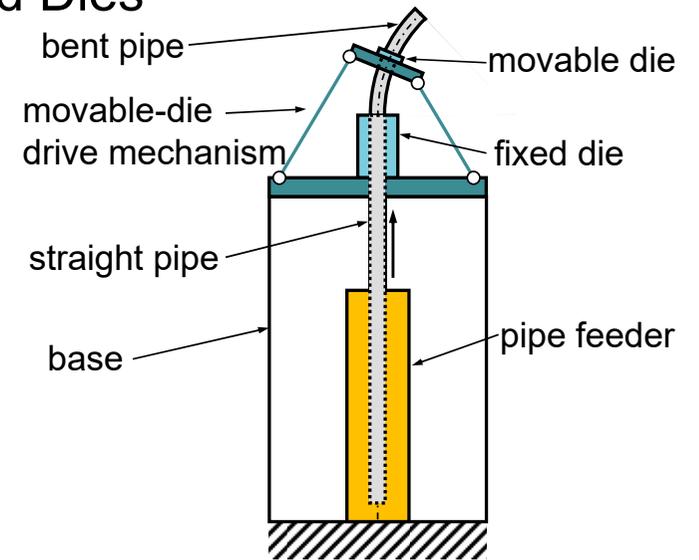
Lab. Mechanical Systems Design

Mechanism Design, Modeling of the Mechanical System  
Including Members with Elastic/Plastic Deformation

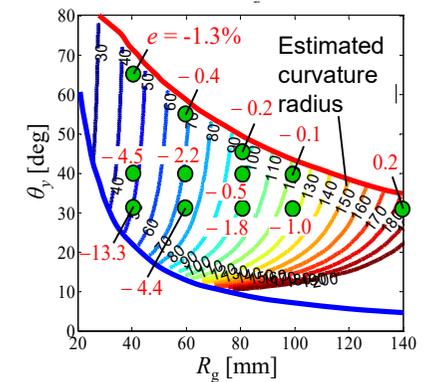
- Kinematic Design of Movable-Die Drive Mechanism with High Orientation Capability
- Design of Continuous Pipe-Feeding Mechanism Using Cam Mechanism
- Precise Pipe-Bending Based on Feed-Forward Compensation of Effects of Springback of Pipe and Clearances between Pipe and Dies
- Experimental Validation



Movable-Die Drive Mechanism Using 3-RPSR Parallel Mechanism with High Orientation Capability



Pipe-Feeding Mechanism



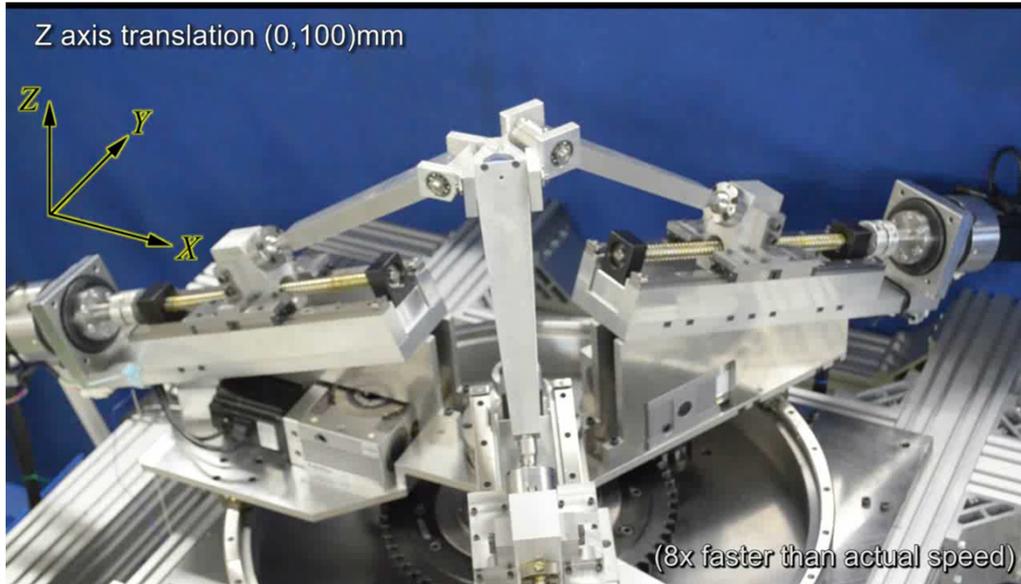
Estimated Curvature Radius and its Error Obtained with Experiments

# Pipe Bender Using Parallel Mechanism

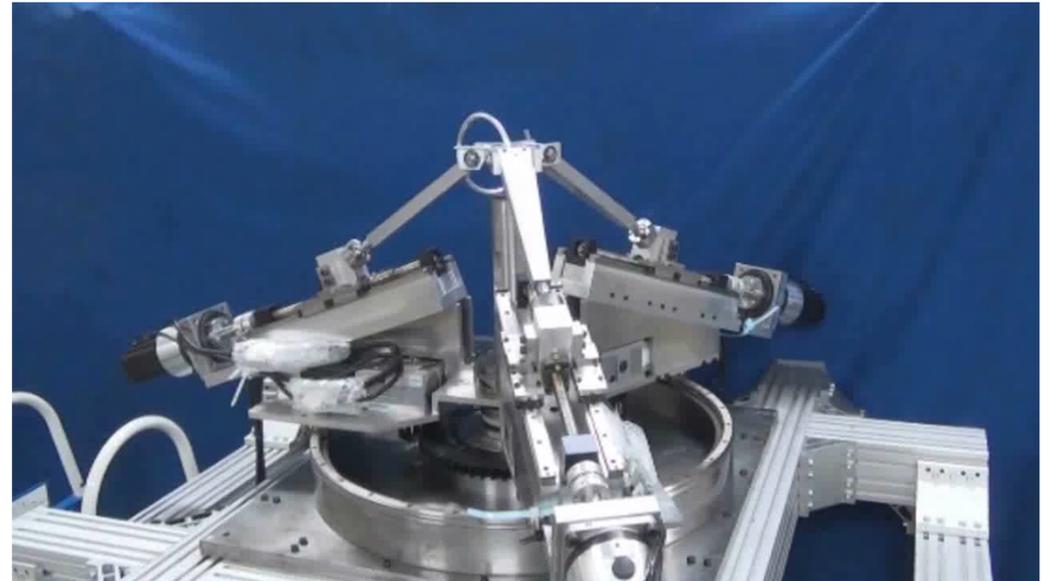
3<sup>rd</sup> Proto, 2011



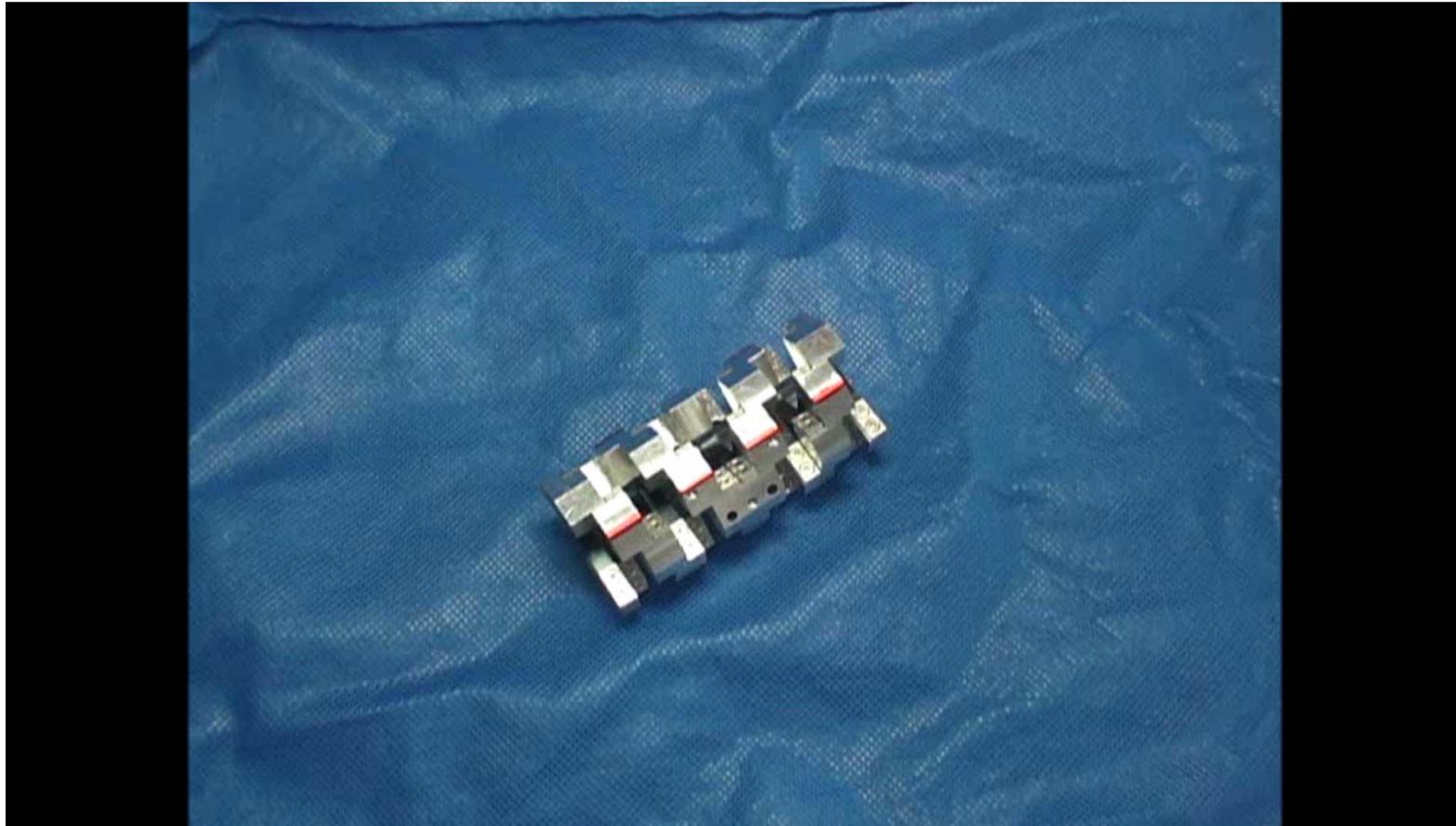
Tokyo Tech



Video (3-RPSR Mechanism)



Video (Pipe Bending)



## ■ 部材の弾性変形を利用したジョイント

- 摺動部がなく, 潤滑の必要がない
- 粉塵が発生せず, 真空中の利用も容易
- (スティックスリップが発生せず, 微視的な挙動のモデリングが容易?)

## ■ 高出力・高精度位置決めにおけるパラレルメカニズムの優位性

- 原理的に高剛性な構造(出力節を並列に支持)
- 原理的に高出力な構造(出力節を並列に駆動)
- 用途に応じて様々な特性を持つ機構の設計が可能

## ■ パラレルメカニズムの高精度化に有効な手法

- 運動伝達性評価による最適設計
- 誤差モデルに基づく効率的キャリブレーション
- 球面ジョイントの新開発
- 粗微動冗長駆動による大ダイナミックレンジとの両立
- 位置・姿勢分離式機構による誤差補償