



# تحلیل دینامیکی ربات‌های گاف-استوارت موازی با چیدمان سری

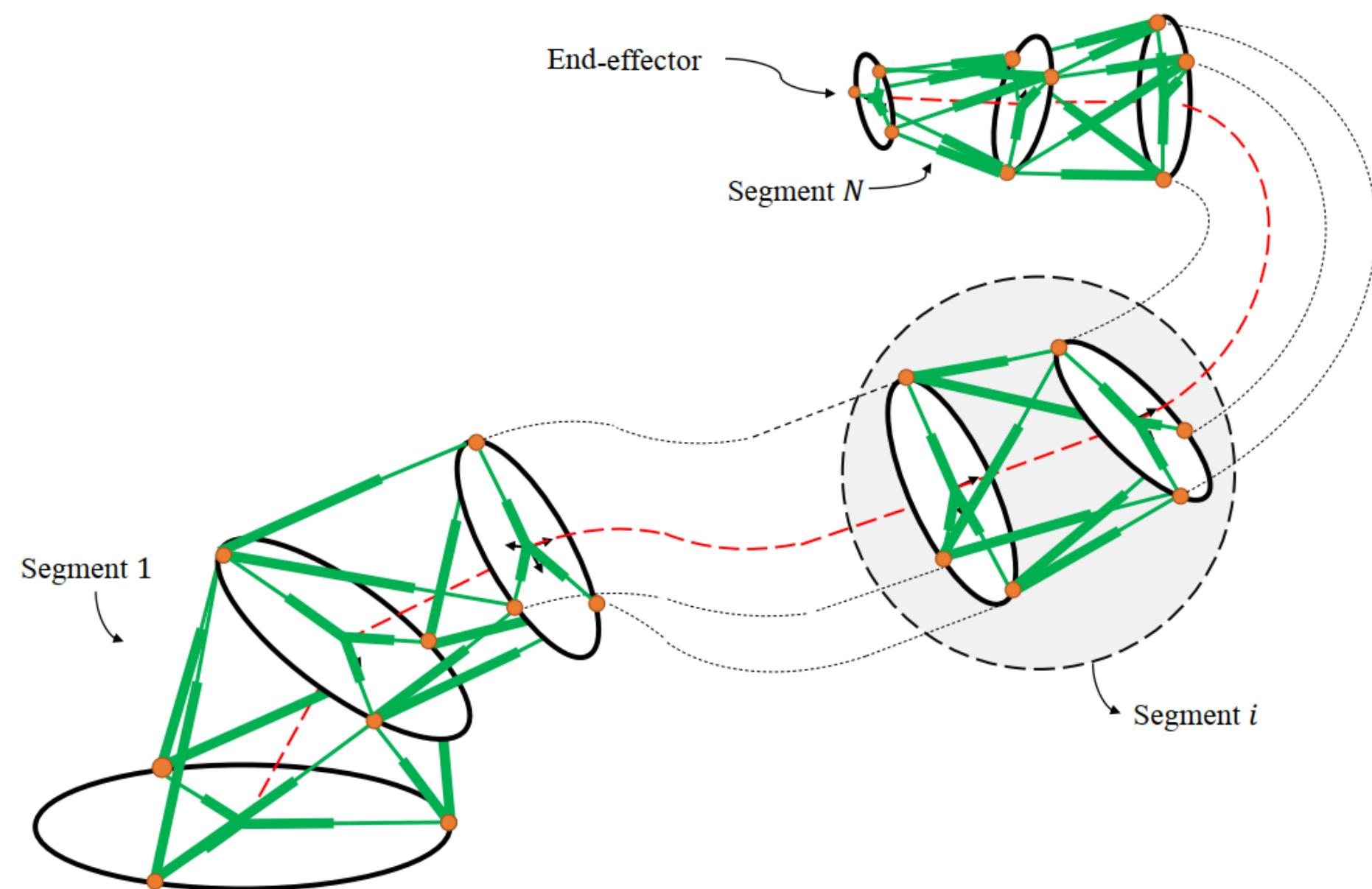
پروژه کارشناسی مهندسی مکانیک  
دانشکده فنی دانشگاه تهران

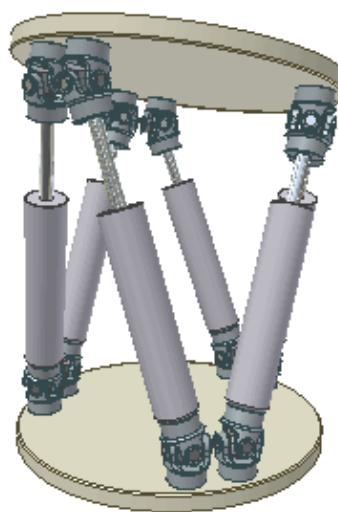
علیرضا کمالی اردکانی

اساتید راهنما:

• دکتر آرش بهرامی  
دانشکده مهندسی مکانیک

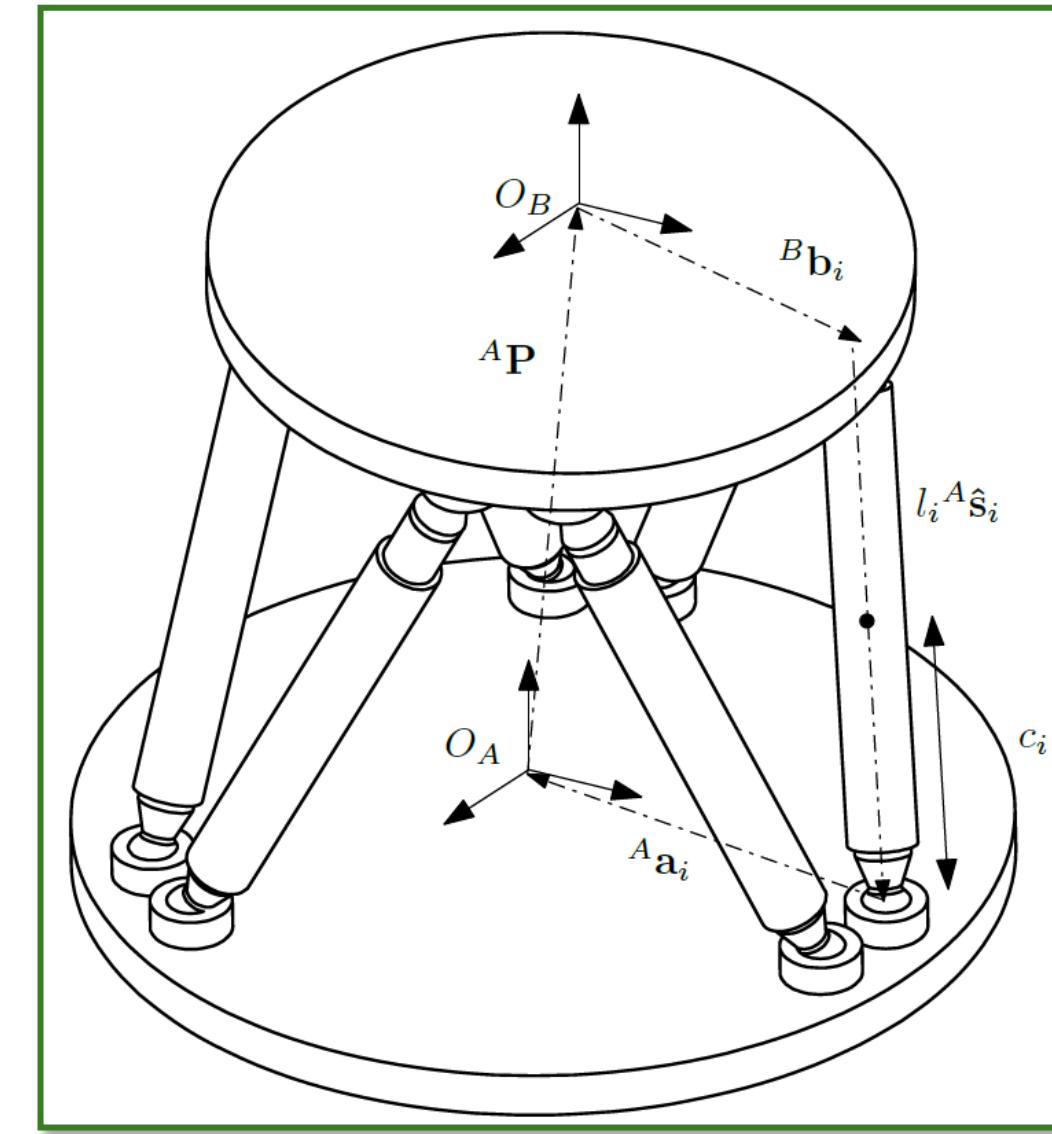
• دکتر مهدی طالع ماسوله  
آزمایشگاه تعامل انسان و ربات  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر





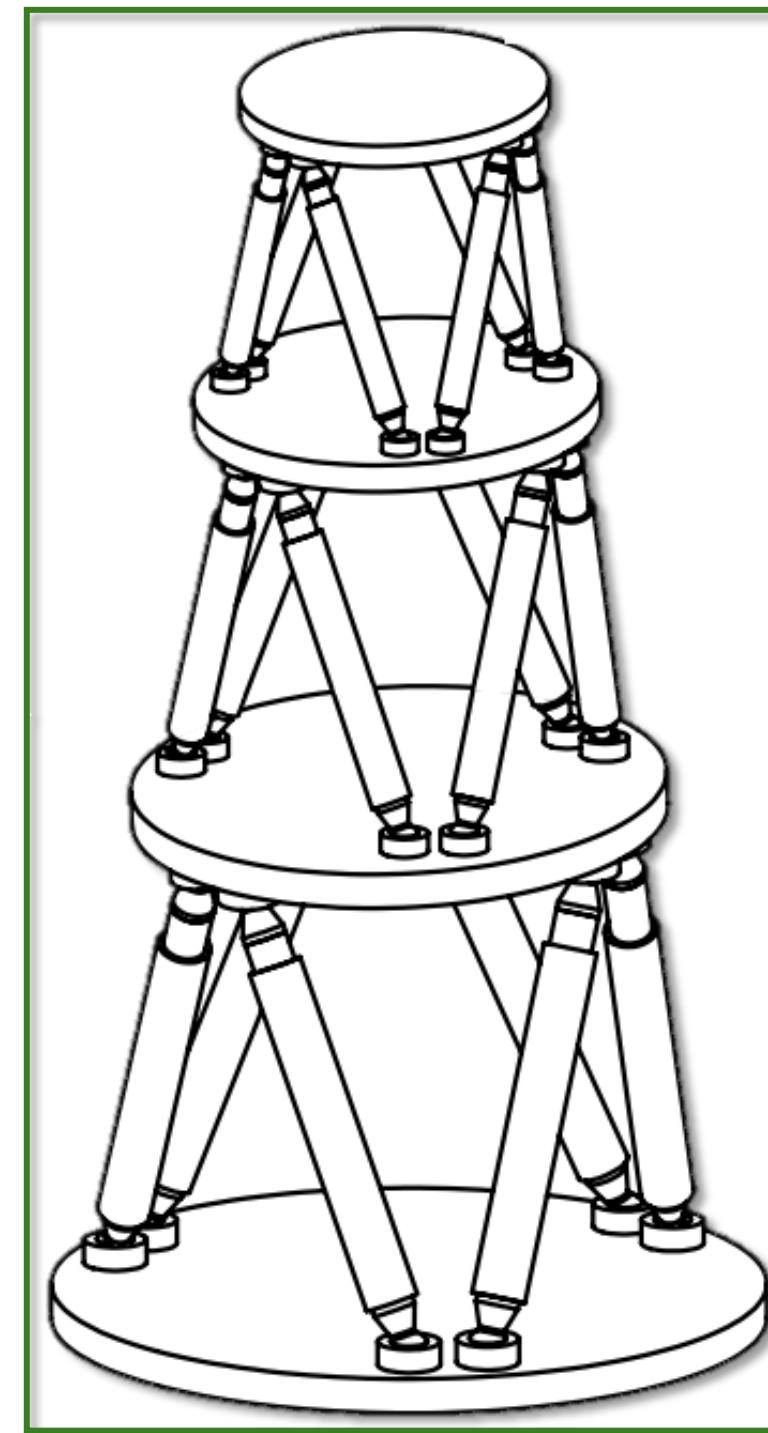
## ساختار

- مجرینهایی (دارای حرکت)
- ۶ عملگر سیلندر و پیستونی
- مفاصل (یونیورسال- کشویی- کروی)



## ساختار مورد مطالعه

ربات ترکیبی سری-موازی فرا افزونه گاف-استوارت



چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

**کلیات**



SFU

Simon Fraser University

Master of Science - MS, Mechatronic Systems Engineering  
Sep 2024 - Sep 2026

▽ Mechatronics and Artificial Intelligence (AI)



University of Tehran

Bachelor's degree, Mechanical Engineering  
Sep 2019 - Feb 2024  
Grade: 3.93

Proceedings of the 11th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2023), Dec. 19-21, 2023, Tehran, Iran

## Designing and Developing a 6-DOF Calibration Setup Based on the Gough-Stewart Platform Equipped by Potentiometer Sensors

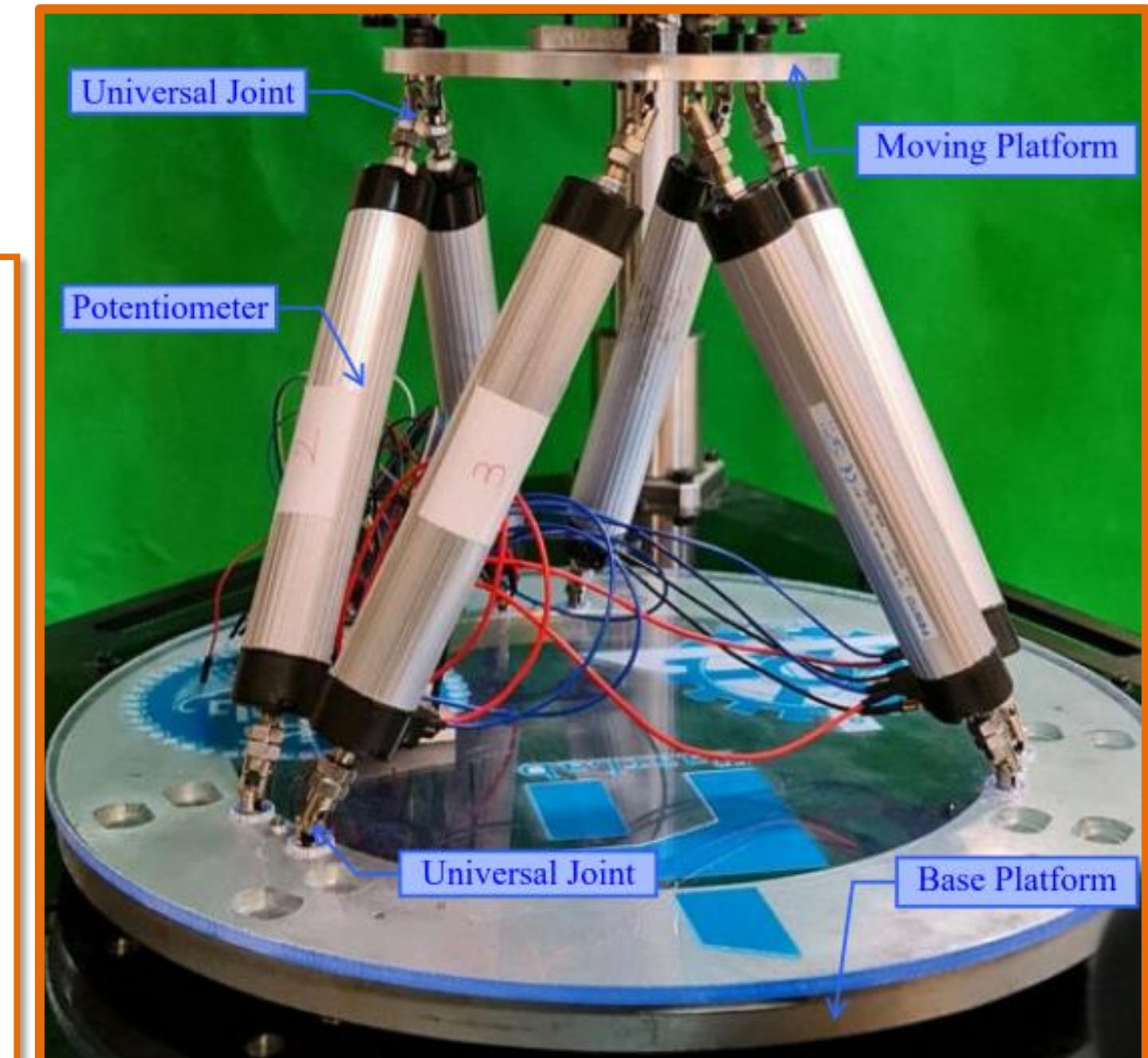
Mohammad Behdad Mohammadi Damnab  
*Human and Robot Interaction Laboratory*  
*School of Mechanical Engineering*  
*University of Tehran*  
Tehran, Iran  
behdad.mohammadi@ut.ac.ir

Mehdi Tale Masouleh  
*Human and Robot Interaction Laboratory*  
*School of Electrical and Computer Engineering*  
*University of Tehran*  
Tehran, Iran  
m.t.masouleh@ut.ac.ir

Mohammad Reza Haeri Yazdi  
*School of Mechanical Engineering*  
*University of Tehran*  
Tehran, Iran  
myazdi@ut.ac.ir

# ربات‌های موازی گاف-استوارت

در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات



(4) M. B. M. Damnab, M. T. Masouleh and M. R. H. Yazdi, "Designing and Developing a 6-DOF Calibration Setup Based on the Gough-Stewart Platform Equipped by Potentiometer Sensors," ICROM 2023

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات



**Amir Salimi Lafmejani, Ph.D.** · 2nd  
 Senior Motion Planning Engineer | Autonomous Driving | Google X | ASU | Volleyball Coach | Entrepreneur  
 San Francisco Bay Area · [Contact info](#)  
<http://www.amir-salimi-lafmejani.com>



**Arizona State University**

Doctor of Philosophy - PhD, Electrical Engineering (Control Systems)  
 2019



**University of Tehran**

Master's Degree, Mechatronics Engineering  
 2014 - 2017  
 Activities and societies: Mechatronics, TaarLab : [www.taarlab.com](http://www.taarlab.com)

Member of Control and System Identification group at TaarLab.

TITLE

CITED BY

YEAR

[Trajectory tracking control of a pneumatically actuated 6-dof gough–stewart parallel robot using backstepping-sliding mode controller and geometry-based quasi forward kinematic ...](#)

A Salimi Lafmejani, MT Masouleh, A Kalhor  
 Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 54, 96-114

Q1 11.4 11.1 SWJTU Journal Ranking A+



76

2018

[Nonlinear MPC for collision-free and deadlock-free navigation of multiple nonholonomic mobile robots](#)

A Salimi Lafmejani, S Berman

58 Q1 N/A Robotics and Autonomous Systems, 103774

61

2021

[Kinematic modeling and trajectory tracking control of an octopus-inspired hyper-redundant robot](#)

A Salimi Lafmejani, A Doroudchi, H Farivarnejad, X He, D Aukes, ...  
 IEEE Robotics and Automation Letters 5 (2), 3460-3467

Q1 2 5.3 IF 5Y | 6

[Adaptation of gradient-based navigation control for holonomic robots to nonholonomic robots](#)

AS Lafmejani, H Farivarnejad, S Berman  
 IEEE Robotics and Automation Letters 6 (1), 191-198

Q1 2 5.3 IF 5Y | 6

[An experimental study on the direct & indirect dynamic identification of an over-constrained 3-DOF decoupled parallel mechanism](#)

M Sharifzadeh, A Arian, A Salimi Lafmejani, MT Masouleh, A Kalhor  
 Mechanism and Machine Theory 116, 178-202

Q1 1 5.3 SWJTU Journal Ranking A+

53

2020

27

2020

23

2017

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

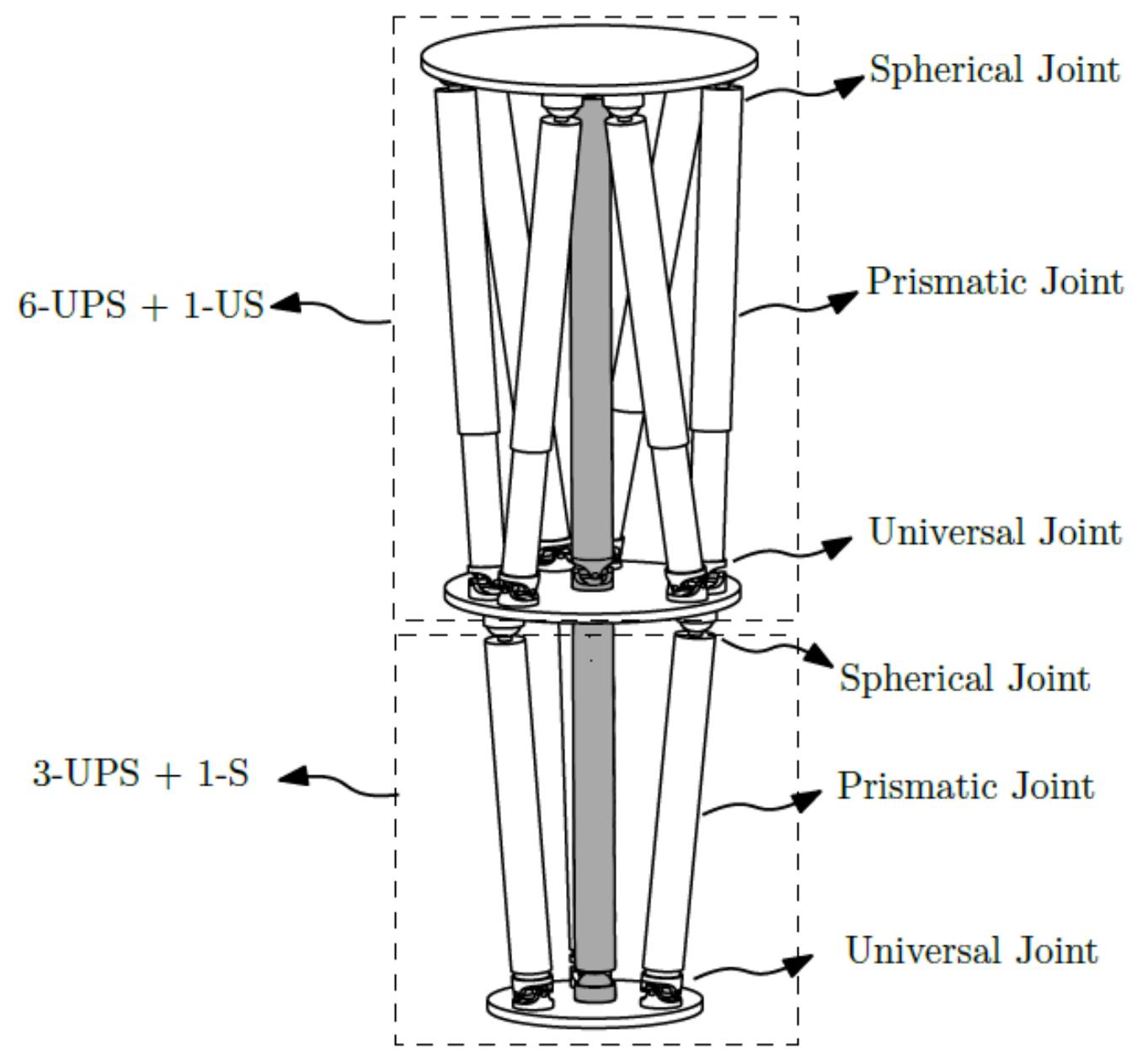
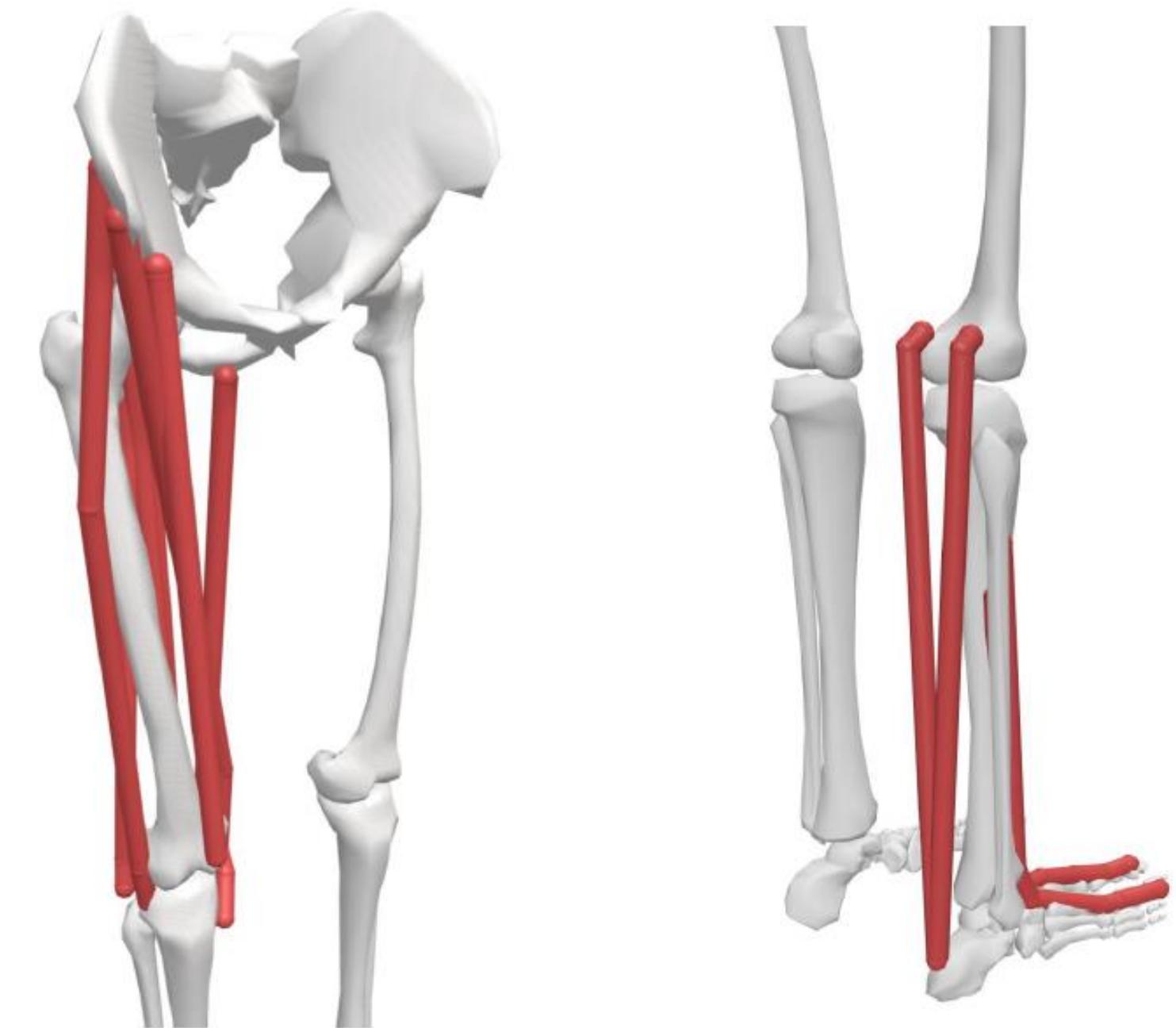
روش

ادبیات

کلیات

# کاربردها - ربات‌های الهام‌گرفته شده از طبیعت

## پای ربات انسان‌نما



[1] P. Namazian, M. Masouleh, and M. R. Zakerzadeh, "SPAR-Leg," IEEE, 2023.

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

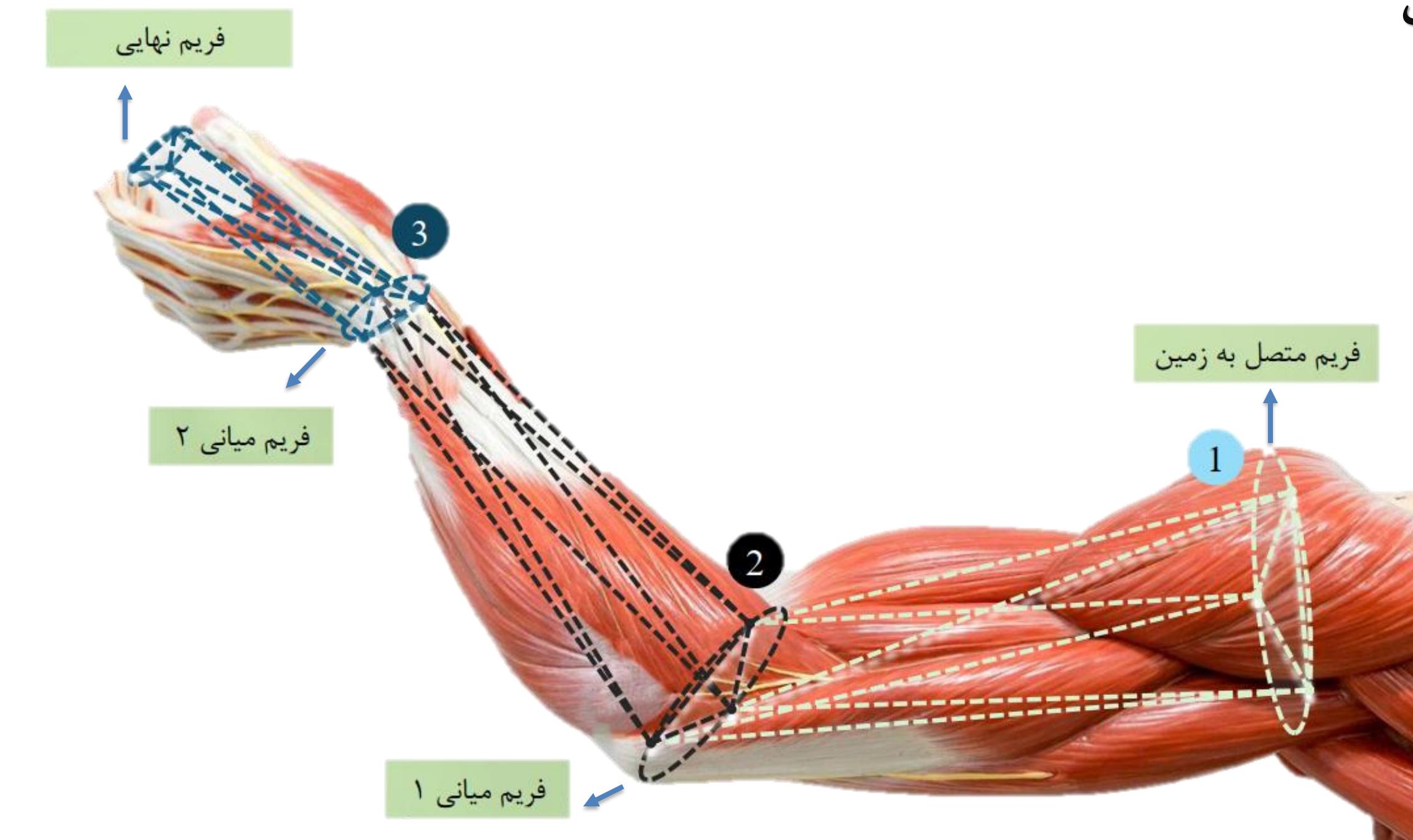
ادبیات



کلیات

# کاربردها - ربات‌های الهام‌گرفته شده از طبیعت

دست رباتیکی



[1] P. Namazian, M. Masouleh, and M. R. Zakerzadeh, "SPAR-Leg," IEEE, 2023.

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات



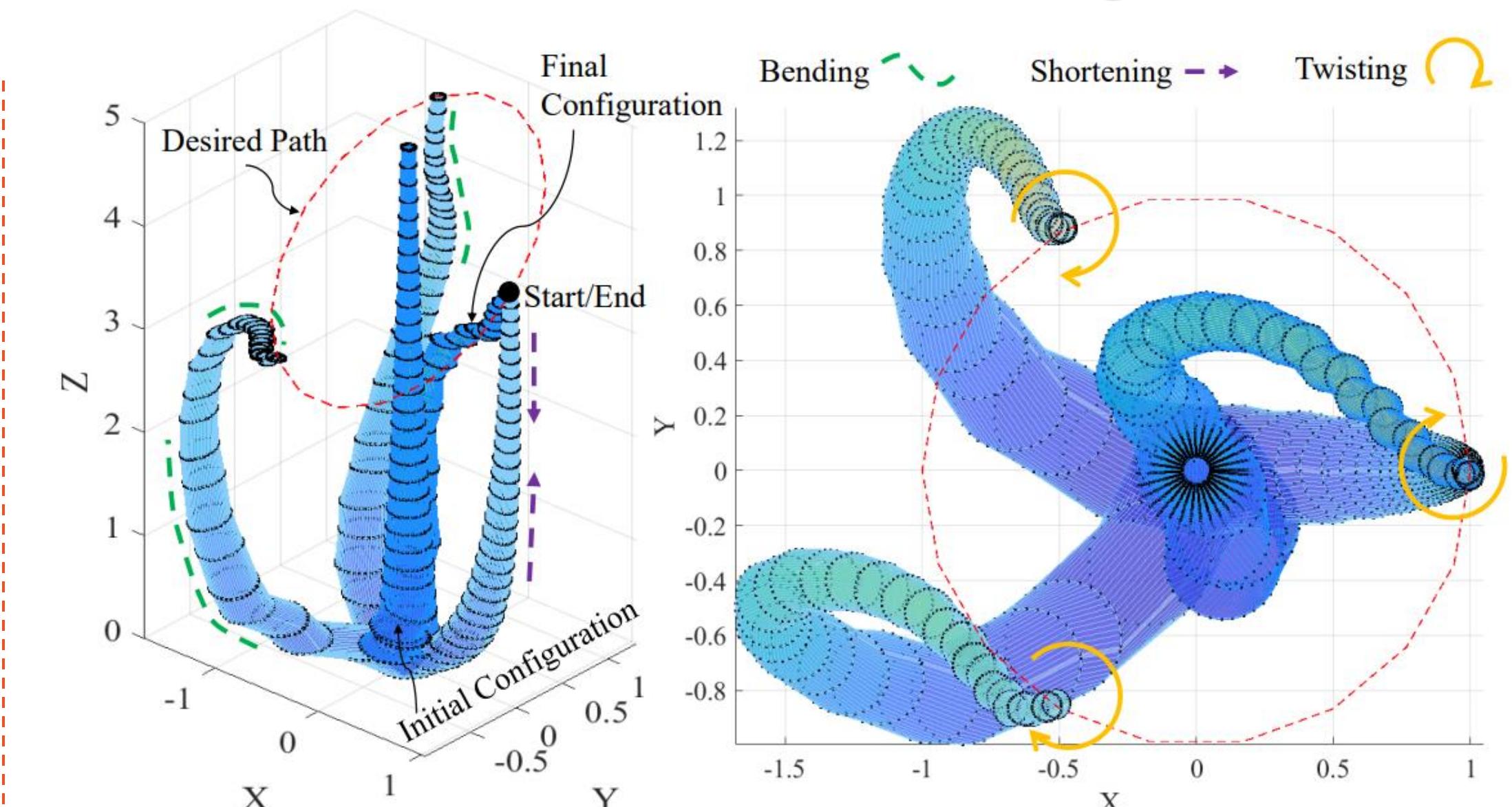
کلیات



Elephant's Trunk Manipulator

# کاربردها - ربات‌های الهام‌گرفته شده از طبیعت

## کنترل مسیر حرکتی ربات



Octopus-inspired hyper-redundant robot

(2) Hannan, Michael W. and Walker, Ian D. Kinematics and the Implementation of an Elephant's Trunk Manipulator and Other Continuum Style Robots. Journal of Robotic Systems, 2003.

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات



کلیات

نویسنده، سال	روش	قابلیت تعمیم‌پذیری	دقت	کارایی
Gallardo, 2008	کار مجازی + تئوری پیچه	*	*	**
Wang, Zheng 2010	PID + کنترل گر Kane	*	**	*
Ibrahim, 2010	نیوتون-اویلر	**	-	*
Staicu 2015	کار مجازی	**	**	**
Hu, Yu, et al. 2015	کار مجازی	**	**	**
Lu, et al. 2016	کار مجازی + پایداری یکپارچه	**	**	*
Hung, 2024	لاگرانژ + کنترل گر PD	*	***	*
Kamali, 2025	کار مجازی + ژاکوبین لینک‌ها	***	**	***

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش



ادبیات



کلیات

# روش‌های مدل‌سازی دینامیکی سامانه‌های مکانیکی

روش	مزایا	محدودیت‌ها
نیوتن- اویلر	دقت فوق العاده بالا	پیچیده برای سامانه‌های مقید، نیاز به یافتن تمامی نیروهای مقید
لاگرانژ	بسیار مدون	دشوار با وجود قیدها
کین	کارآمد برای سامانه‌های مقید	نیاز به درک بالا از نحوه عملکرد
کار مجازی	عدم بار محاسباتی بالا و مناسب برای ربات افزونه، عدم نیاز به محاسبه نیروهای مقید	دقت متوسط اما قابل قبول برای سامانه‌های افزونه

برای این پژوهش، بهترین انتخاب کار مجازی است. ✓

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

### معادله دینامیکی



معادله استاتیکی

+

(Fictitious) رنچهای مجازی

$$\sum f_{\text{ext}} - m a_c = 0$$

$$\sum {}^c n_{\text{ext}} - ({}^c I \dot{\omega} + \omega \times ({}^c I \omega)) = 0.$$

$$\sum \hat{f}_{\text{ext}} = 0$$

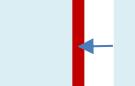
$$\sum {}^c \hat{n}_{\text{ext}} = 0,$$

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

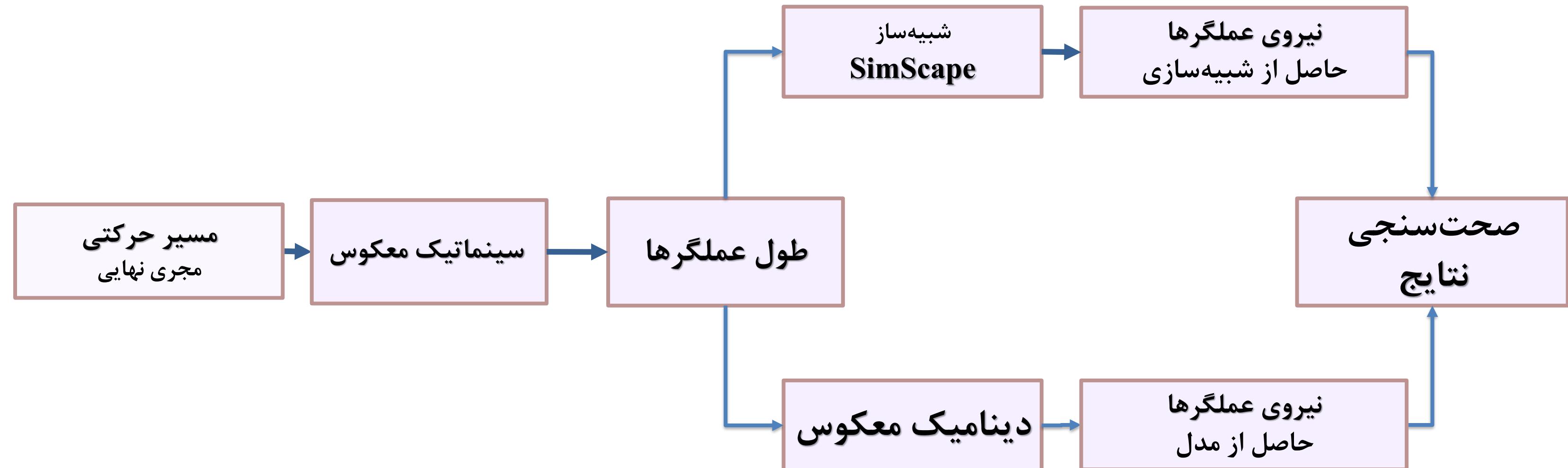


ادبیات



کلیات

# نقشه راه صحت‌سنجه مدل پیشنهادی



چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

# مدلسازی سینماتیکی

ماتریس ژاکوبین: رابط سرعت فضای کاری و فضای مفصلی

$${}^G t_N = {}^G J_N \dot{\rho} = \begin{bmatrix} {}^G V_N \\ {}^G \omega_N \end{bmatrix}$$

$${}^G J_N = \left[ V_{N-1} V_{N-2} \dots V_1 {}^G J_1 \quad V_{N-1} V_{N-2} \dots V_2 W_1 {}^G J_2 \quad \dots \quad V_{N-1} W_{N-2} {}^G J_{N-1} \quad W_{N-1} {}^G J_N \right]_{6 \times 6N}$$

ماتریس ژاکوبین

بهینه‌سازی و حل سینماتیک  
معکوس

ماتریس ژاکوبین لینک‌ها

رابطه‌ای برای سینماتیک  
لینک‌ها



پارسا نمازیان

$${}^{p^{-1}} J_p = \begin{bmatrix} \hat{s}_1^T & (b_1 \times \hat{s}_1)^T \\ \hat{s}_2^T & (b_2 \times \hat{s}_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ \hat{s}_6^T & (b_6 \times \hat{s}_6)^T \end{bmatrix}^{-1}$$

ماتریس ژاکوبین →

سرعت‌های فضای کاری

ژاکوبین صفحه N ام نسبت به صفحه G ام

سرعت‌های فضای مفصلی

بردار یکه عملگرها

ژاکوبین هر ربات موازی

ماتریس وزنی قطری

${}^G t_N$

${}^G J_N$

$\dot{\rho}$

$\hat{s}_i$

$p^{-1} J_p$

$W$

(1) P. Namazian, M. Masouleh, and M. R. Zakerzadeh, "SPAR-Leg," IEEE, 2023.

(5) P. Namazian, M. T. Masouleh, and M. R. Zakerzadeh, "A general formulation for kinematic analysis and redundancy resolution of hyper-redundant Gough-Stewart hybrid platforms, 2023."

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

# مدل‌سازی سینماتیکی

## بهینه‌سازی و حل سینماتیک معکوس

برای طی کردن مسیری مشخص در مجری نهایی ربات، عملگرهای ربات چه موقعیت و سرعتی باید داشته باشند؟

$$\dot{\rho} = J^\dagger t = W^{-1} J^T (J W^{-1} J^T)^{-1} t$$

ماتریس ژاکوبین

بهینه‌سازی و حل سینماتیک  
معکوس

ماتریس ژاکوبین لینک‌ها

رابطه‌ای برای سینماتیک  
لینک‌ها

$$\begin{cases} \min \left\{ \frac{1}{2} \dot{\rho}^T W \dot{\rho} \right\} \\ J \dot{\rho} - t = 0 \end{cases}$$

سرعت‌های فضای کاری

$G_t_N$

ژاکوبین صفحه N ام نسبت به صفحه G ام

$G J_N$

سرعت‌های فضای مفصلی

$\dot{\rho}$

بردار یکه عملگرها

$\hat{s}_i$

ژاکوبین هر ربات موازی

$p^{-1} J_p$

ماتریس وزنی قطری

$W$

(5) P. Namazian, M. T. Masouleh, and M. R. Zakerzadeh, "A general formulation for kinematic analysis and redundancy resolution of hyper-redundant Gough-Stewart hybrid platforms, 2023.

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

# مدل‌سازی سینماتیکی

## ماتریس ژاکوبین لینک‌ها

این ماتریس، ارتباط دهنده سرعت‌های فضایی کاری ( مجری نهایی ربات) به سرعت‌های فضای مفصلی (سیلندر و پیستون‌ها) است.

ماتریس ژاکوبین

بهینه‌سازی و حل سینماتیک  
معکوس

ماتریس ژاکوبین لینک‌ها

رابطه‌ای برای سینماتیک  
لینک‌ها

$$\mathbf{t}_{\text{cyl}} = \mathbf{J}_{\text{cyl}} \dot{\rho} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{cyl}} \\ \omega_{\text{cyl}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}'_{i,\text{cyl}} = \frac{1}{l_i} \begin{bmatrix} -c_{i,\text{cyl}} \mathbf{S}_{i\times}^2 & c_{i,\text{cyl}} \mathbf{S}_{i\times}^2 \mathbf{B}_{i\times} \\ \mathbf{S}_{i\times} & -\mathbf{S}_{i\times} \mathbf{B}_{i\times} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{t}_{\text{pis}} = \mathbf{J}_{\text{pis}} \dot{\rho} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{pis}} \\ \omega_{\text{pis}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}'_{i,p,\text{pis}} = \frac{1}{l_i} \begin{bmatrix} (c_{\text{pis}} - l_i) \mathbf{S}_{i\times}^2 + l_i \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^T & (l_i - c_{\text{pis}}) \mathbf{S}_{i\times}^2 \mathbf{B}_{i\times} - l_i \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^T \mathbf{B}_{i\times} \\ \mathbf{S}_{i\times} & -\mathbf{S}_{i\times} \mathbf{B}_{i\times} \end{bmatrix}$$

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

# یافته‌های بیشتر از مدل‌سازی سینماتیکی

## اهمیت مدل‌سازی صحیح سینماتیک عملگرها

تأثیر استفاده از مفصل یونیورسال به جای کروی در اتصال  
به صفحه پایه با ارائه روابط بروزرسانی شده زیر:

ماتریس ژاکوبین

بهینه‌سازی و حل سینماتیک  
معکوس

ماتریس ژاکوبین لینک‌ها

رابطه‌ای برای سینماتیک  
لینک‌ها

$$\omega_i = P^\dagger Q = P^T (P P^T)^{-1} Q$$

$$P = \begin{bmatrix} I - s_i s_i^\top \\ \omega^\top S_x \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{\ell_i} (-S_x B_x \omega + S_x v_p) \\ \frac{1}{\ell_i} (\omega^\top v_p - \ell_i (\omega^\top s_i)) \end{bmatrix}$$

(6) Taghirad, Hamid D. Parallel Robots. CRC Press, 2 2013.

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

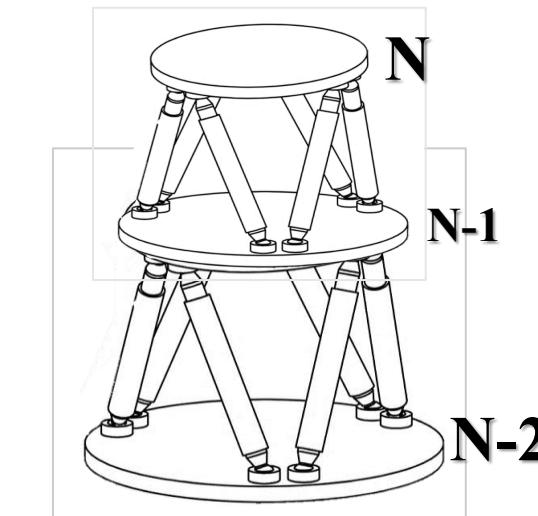
روش

ادبیات

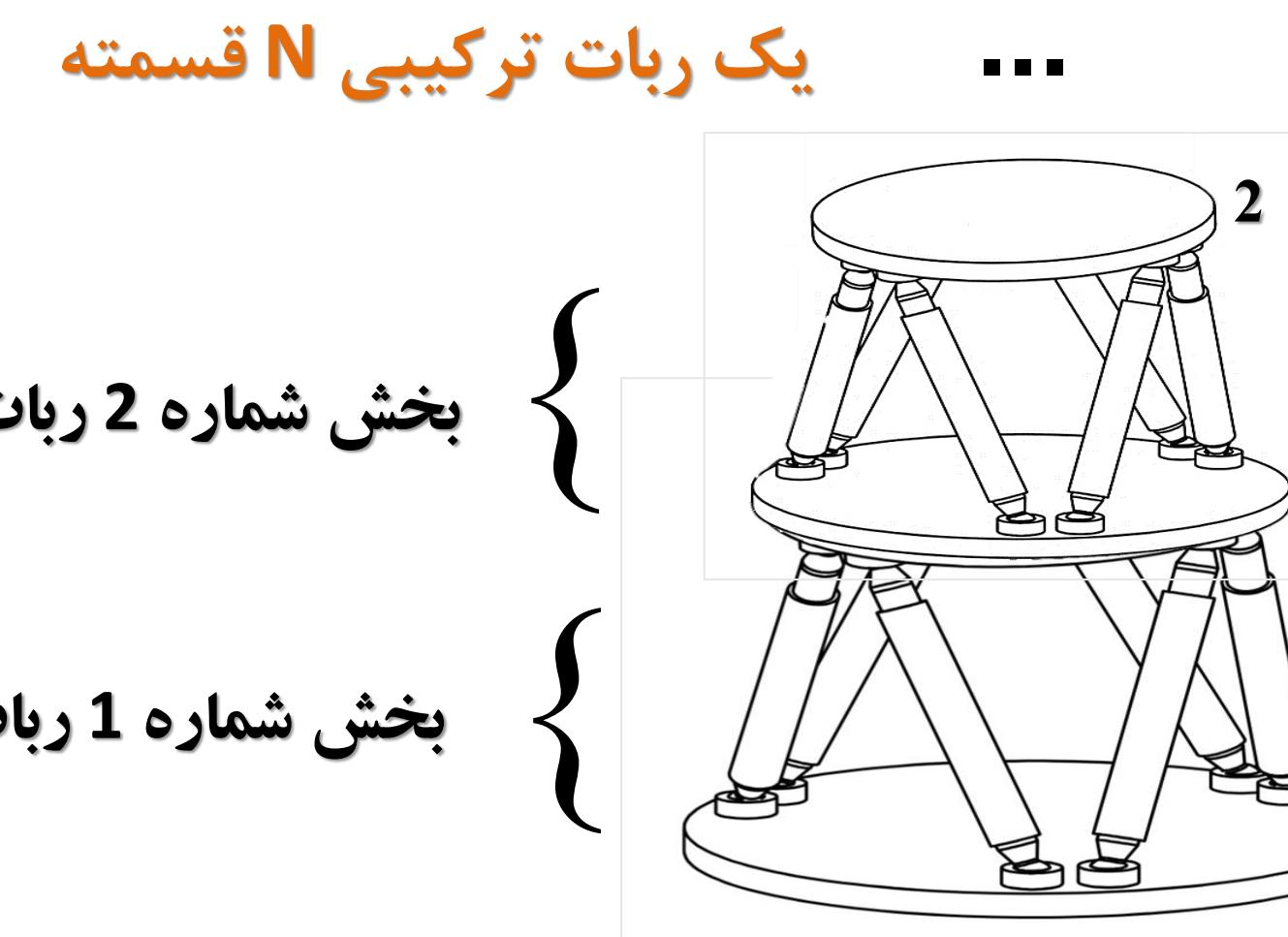
کلیات

# مدل سازی دینامیکی

بخش شماره  $N$  ربات  
 بخش شماره  $N-1$  ربات



بخش شماره 2 ربات  
 بخش شماره 1 ربات



یک ربات ترکیبی  $N$  قسمته

...

- توجه به تعریف تمامی متغیرها در دستگاه مختصات مناسب
- کامل درهم قرار گرفتن سیلندر و پیستون در لحظه اولیه
- توجه به تعریف رنج مجازی (بنیان این پژوهش):

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m(g - a) \\ -{}^A\mathbf{I}_n - \mathbf{n} \times {}^A\mathbf{I}\omega \end{bmatrix}$$

- حل مسئله به صورت بازگشتی از بالاترین ربات تا زمین  
(نوآوری این پژوهش)

چشم انداز

جمع بندی

یافته ها

روش

ادبیات

کلیات

# مدل سازی دینامیکی

حل مسئله به صورت بازگشتی از بالاترین ربات تا زمین



حل دینامیک معکوس برای  
بخش شماره N ربات

انتقال نیرو  
به بخش شماره N-1

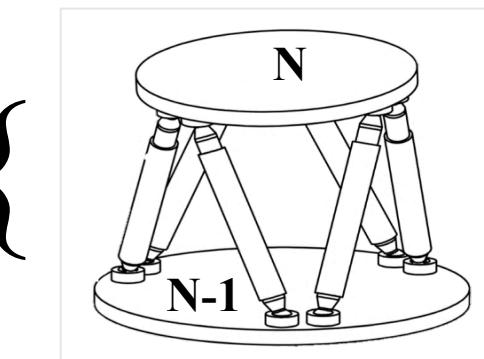
حل دینامیک معکوس  
N-1 برای بخش شماره N

...

حل دینامیک معکوس  
1 برای بخش شماره 1

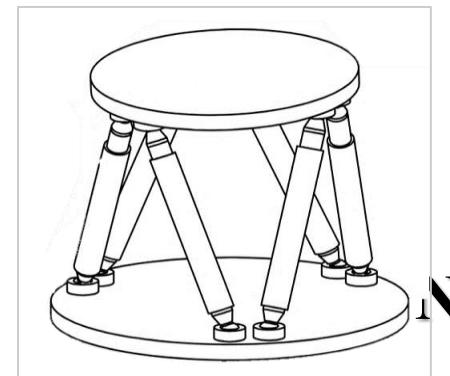
یافتن تمامی نیروی  
عملکرگرهای

بخش شماره N ربات

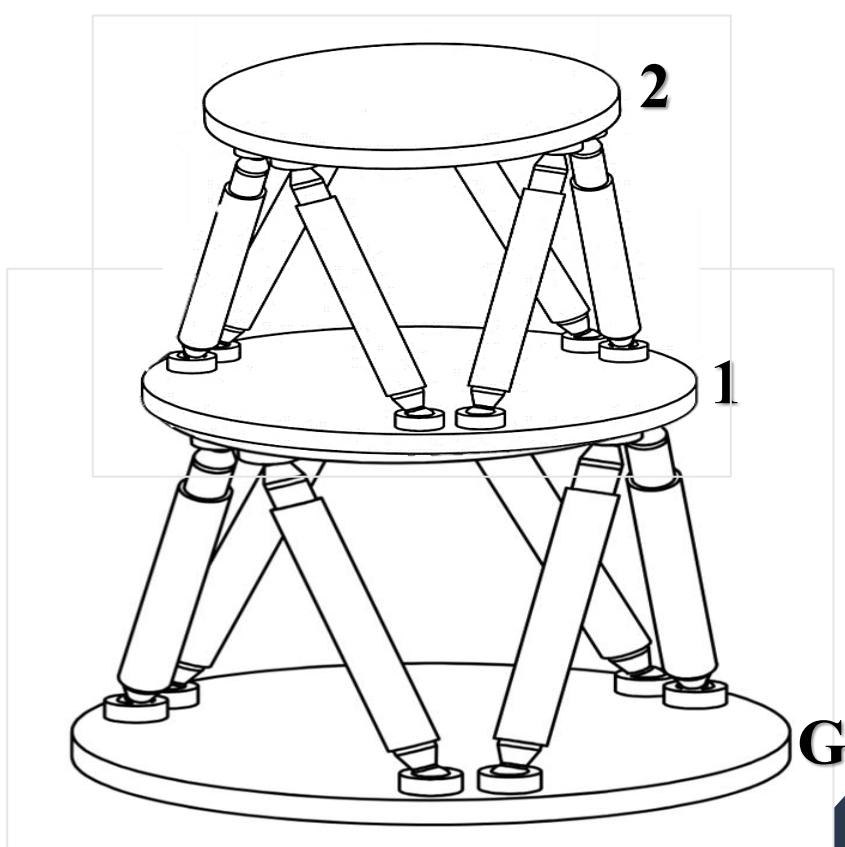


برگرفته از [1]

$$f_N = -N^{-1}J_N^{-T}(W'_{N,e} + W'_{N,cyl} + W'_{N,pis})$$



...



$$W'_{N,e} = \left[ \begin{array}{l} f_d + M_{N,e}(g' - a'_{N,e}) \\ n_d - {}^A I_{N,e} \dot{\omega}'_{N,e} - \omega'_{N,e} \times {}^A I_{N,e} \omega'_{N,e} \end{array} \right]$$

$$W'_{p,cyl} = \sum_{i=1,p}^6 J'^T_{i,p,cyl} w'_{i,p,cyl}$$

$$W'_{p,pis} = \sum_{i=1,p}^6 J'^T_{i,p,pis} w'_{i,p,pis}$$

(6) Taghirad, Hamid D. Parallel Robots. CRC Press, 2 2013.

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

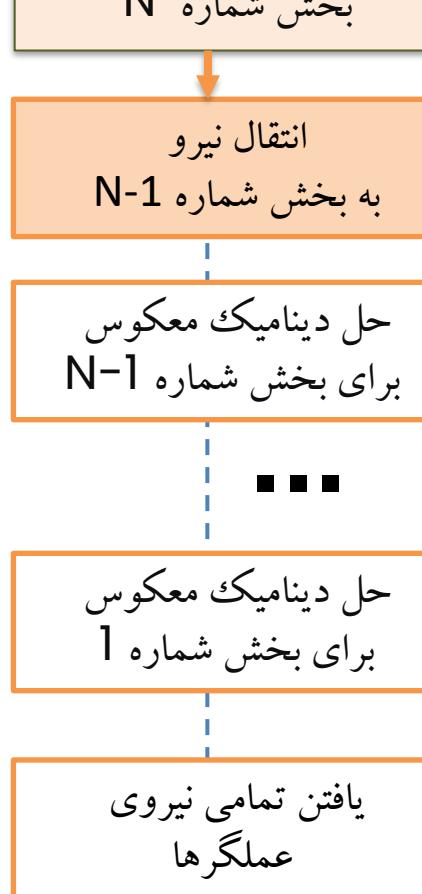
روش

ادبیات

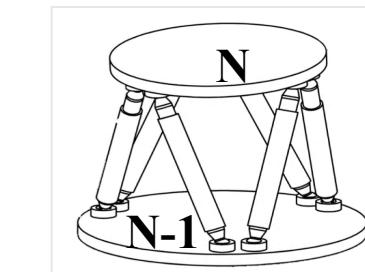
کلیات

# مدل سازی دینامیکی

حل مسئله به صورت بازگشتی از بالاترین ربات تا زمین



{ بخش شماره N ربات



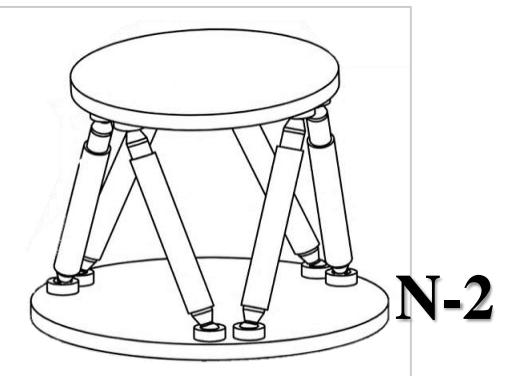
برگرفته از [6]

$$f_N = -{}^{N-1}J_N^{-T}(W'_{N,e} + W'_{N,cyl} + W'_{N,pis})$$

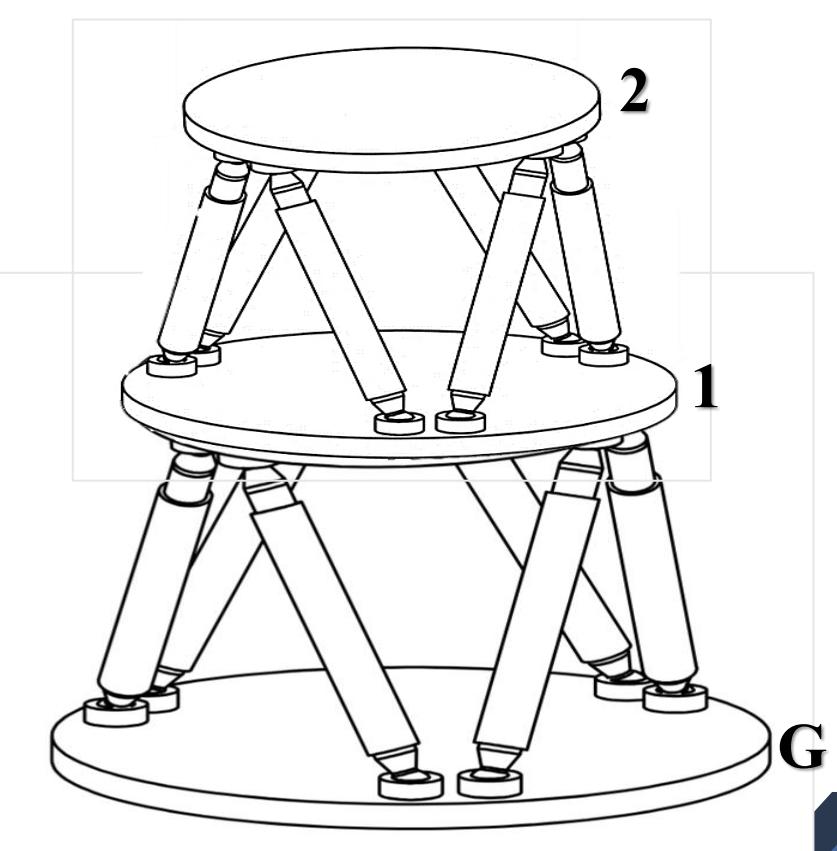
انتقال نیروها به  
بخش پایینی

$W'_{Tr}$

$$W'_{N-1,Tr} = \sum_{i=1,N-1}^6 \left[ \begin{matrix} f_{i,N} + m_{cyl}g' \\ -A_{i\times}f_{i,N} + m_{cyl}(D_{i\times}g') \end{matrix} \right]$$



...



(6) Taghirad, Hamid D. Parallel Robots. CRC Press, 2 2013.

چشم‌انداز

جمع‌بندی

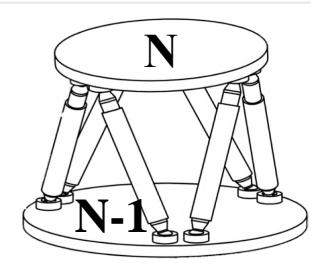
یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

# مدل سازی دینامیکی

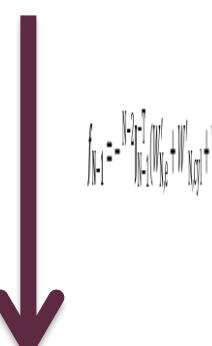


حل مسئله به صورت بازگشتی از بالاترین ربات تا زمین

$$W'_{N-1,Tr} = \sum_{i=1,N-1}^6 \left[ f_{i,N} + m_{cyl}g' \right] - A_{ix}f_{i,N} + m_{cyl}(D_{ix}g')$$

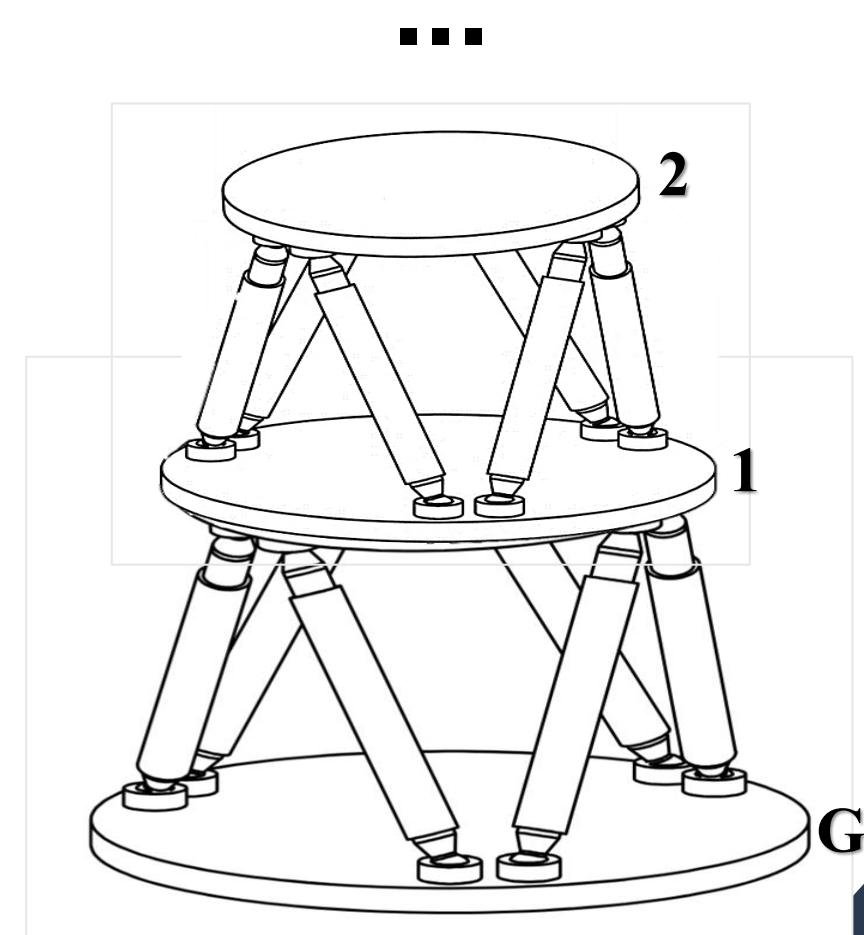


$$f_{N-1} = -^{N-2}J_{N-1}^{-T}(W'_{N,e} + W'_{N,cyl} + W'_{N,Tr})$$



انتقال نیروها به  
بخش پایینی

$$W'_{N-2,Tr} = \sum_{i=1,N-2}^6 \left[ f_{i,N-1} + m_{cyl}g' \right] - A_{ix}f_{i,N-1} + m_{cyl}(D_{ix}g')$$



حل دینامیک معکوس برای  
بخش شماره N

انتقال نیرو  
به بخش شماره N-1

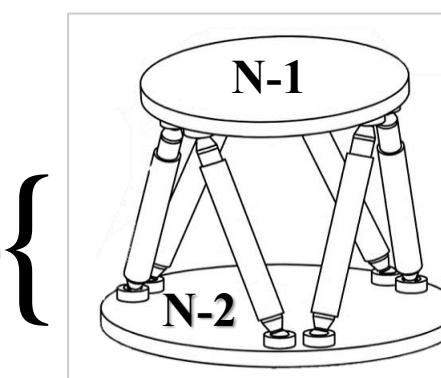
حل دینامیک معکوس  
برای بخش شماره N-1

...

حل دینامیک معکوس  
برای بخش شماره 1

یافتن تمامی نیروی  
عملکرگرهای

{ بخش شماره N-1 ربات



-

# مدل سازی دینامیکی

حل مسئله به صورت بازگشتی از بالاترین ربات تا زمین



حل دینامیک معکوس برای  
بخش شماره N

انتقال نیرو  
N-1 به بخش شماره 1

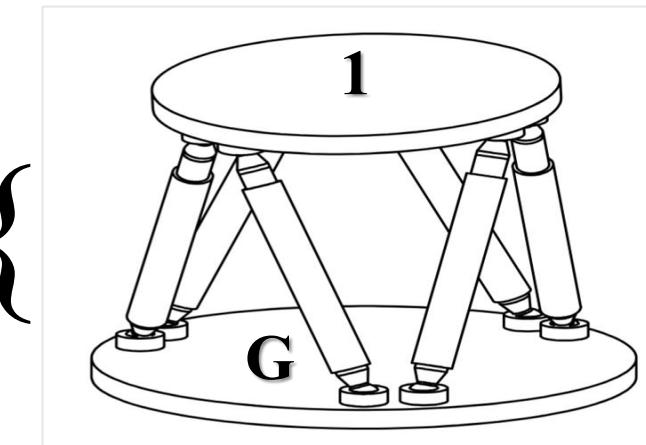
حل دینامیک معکوس  
برای بخش شماره N-1

...

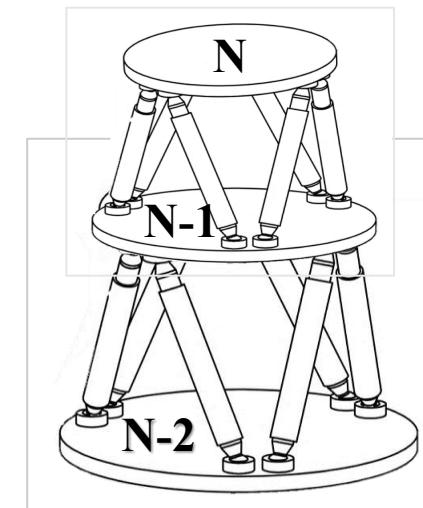
حل دینامیک معکوس  
برای بخش شماره 1

یافتن تمامی نیروی  
عملگرها

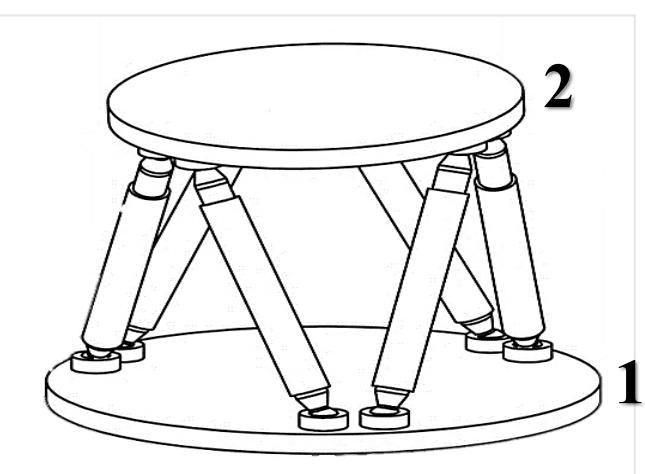
بخش شماره 1 ربات



$$f_1 = -N^{-2} J_1^{-T} (W'_{1,e} + W'_{1,cyl} + W'_{1,Tr})$$



...



چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

# مدل سازی دینامیکی



حل دینامیک معکوس برای  
بخش شماره N

انتقال نیرو  
به بخش شماره N-1

حل دینامیک معکوس  
برای بخش شماره N-1

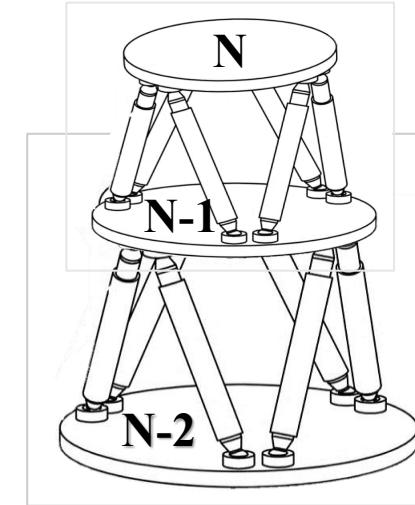
...

حل دینامیک معکوس  
برای بخش شماره 1

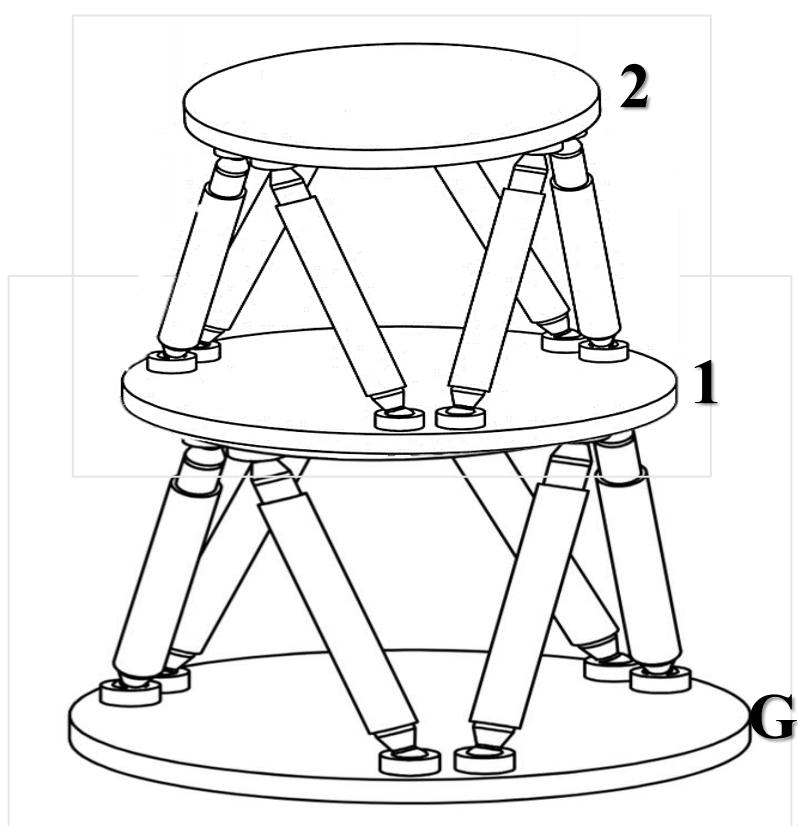
یافتن تمامی نیروی  
عملگرها

یافتن تمامی نیروی عملگرها:

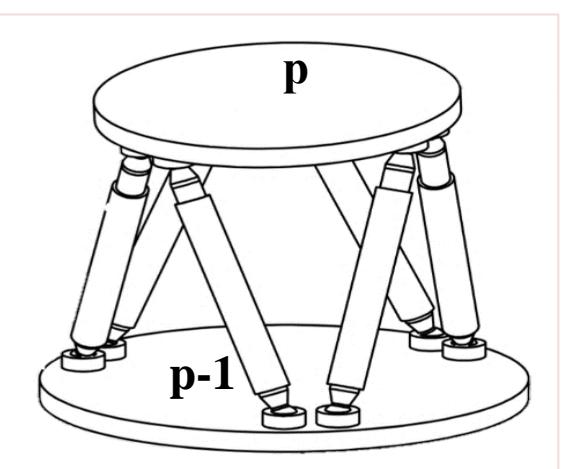
$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_N \end{bmatrix}$$



...



حل بخش شماره p ربات:



$$f_p = -p^{-1}J_p^{-T}(W'_{p,e} + W'_{p,cyl} + W'_{p,pis} + W'_{p,Tr})$$

چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش



ادبیات



کلیات



## معادله حرکت سامانه با تعداد دلخواه ربات موازی

$$W'_{p,f_p} + W'_{p,e} + W'_{p,Tr} + W'_{p,cyl} + W'_{p,pis} = 0$$

تصویر رنج مجازی	$W'$
تصویر رنج کار تزین نیروی عملگر بخش p ام ( $f_p$ )	$W'_{p,f_p}$
رنج مجازی مجری نهايی (e)	$W'_{p,e}$
رنج مجازی ناشی از انتقال (Tr) (رنج های بخش بالاتر)	$W'_{p,Tr}$
رنج مجازی سیلندر و پیستون در بخش p ام ربات	$W'_{p,cyl}, W'_{p,pis}$

چشم‌انداز

جمع‌بندی

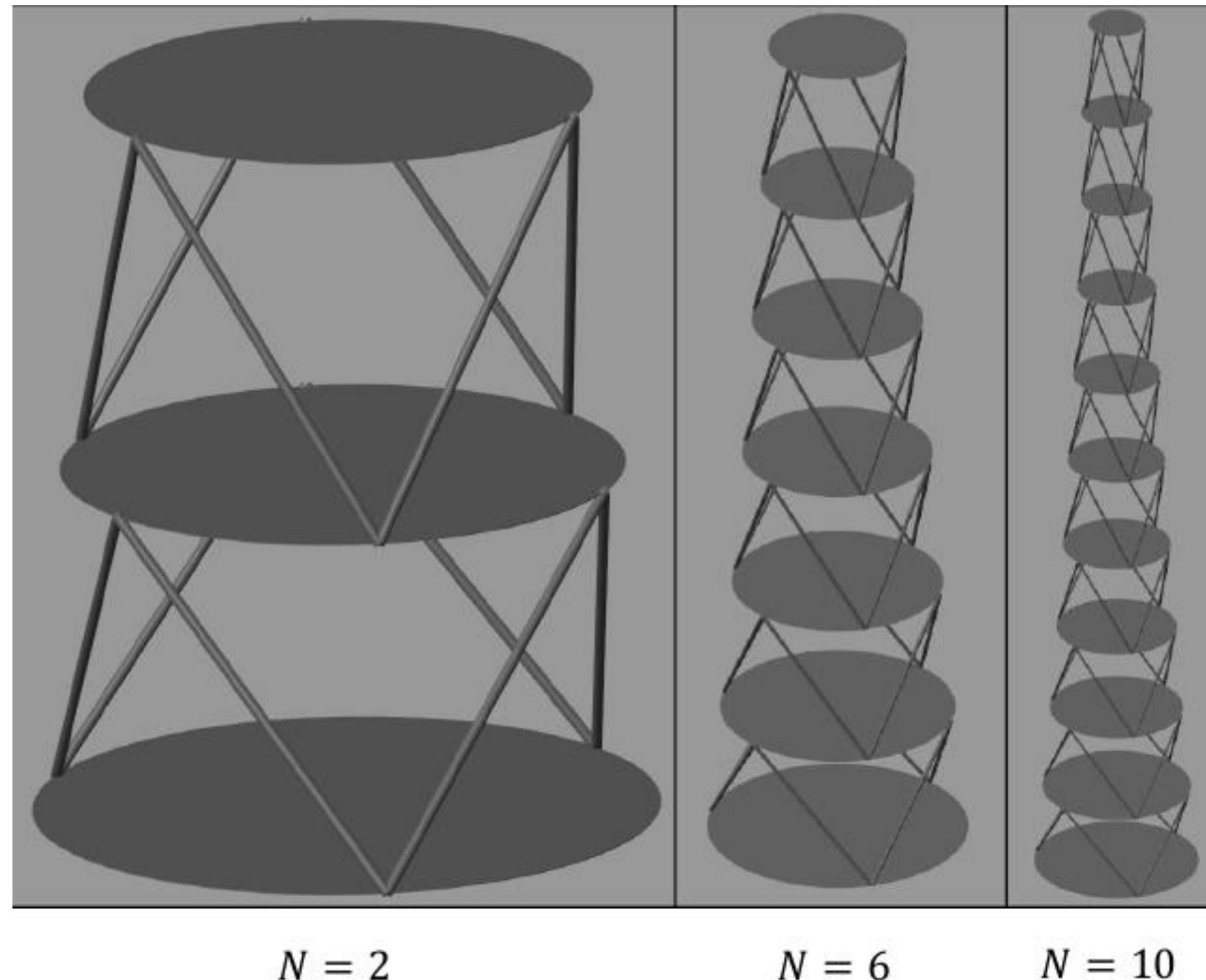
یافته‌ها

روش

ادبيات

كليات

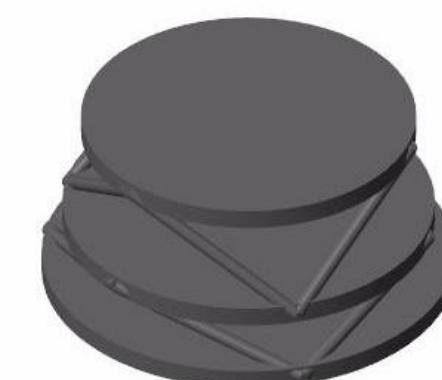
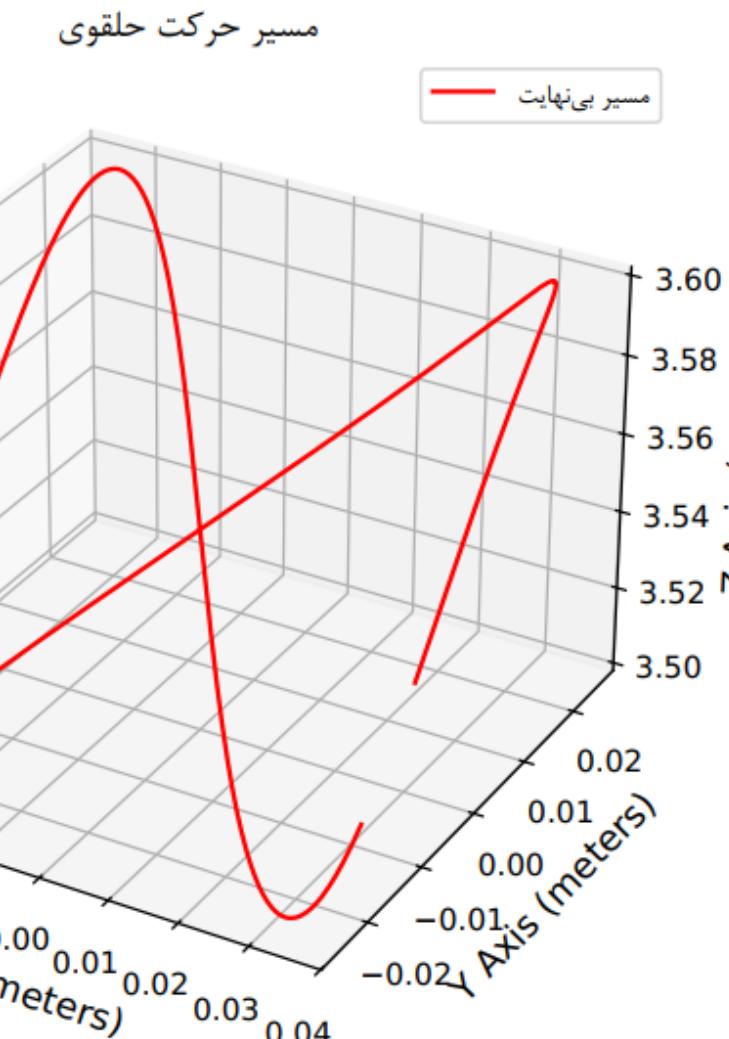
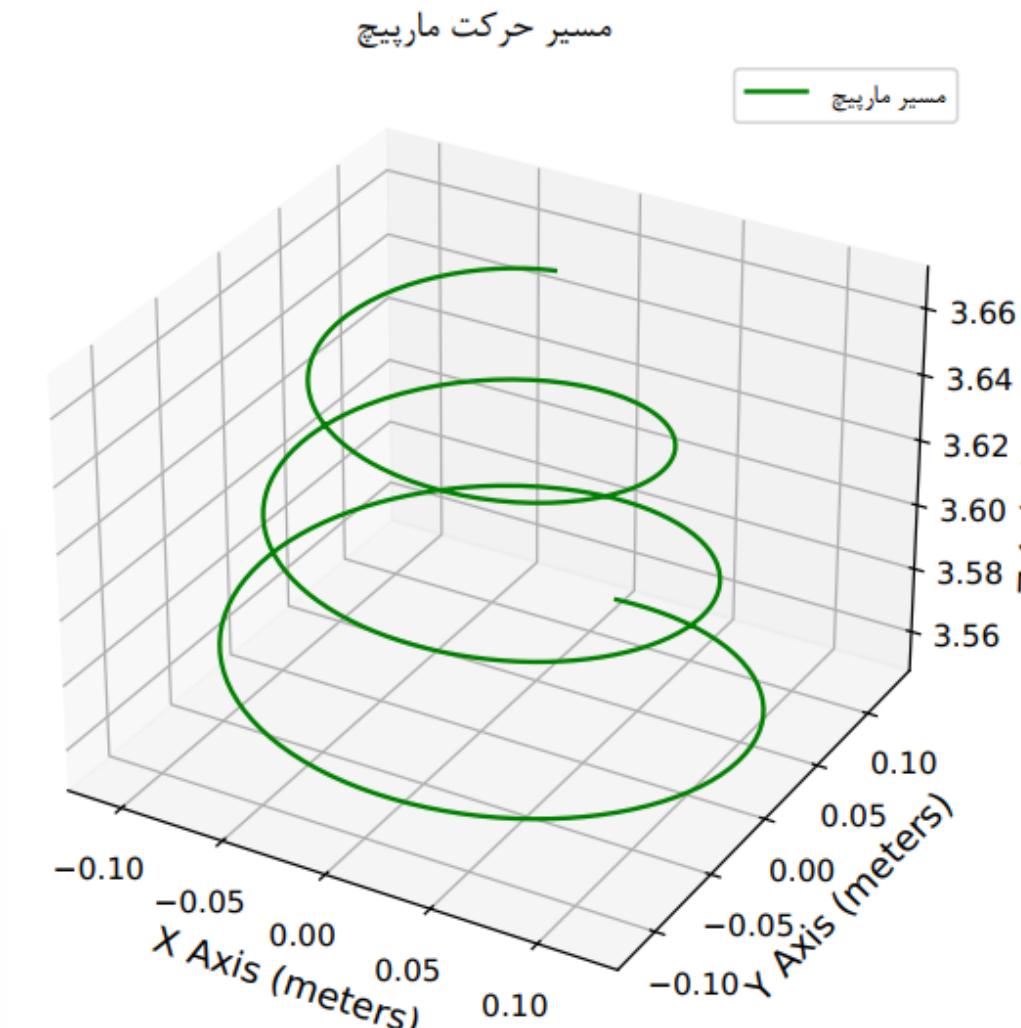
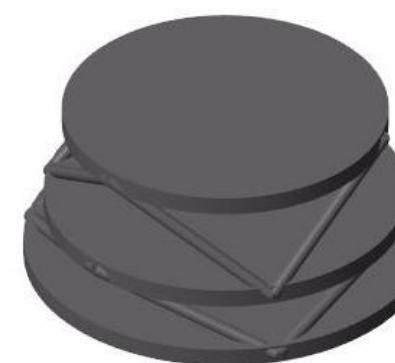
# مطالعات موردی برای تحلیل مدل



تعداد بخش ربات	۱۰	۶	۲
تعداد صفحات ربات	۱۱	۷	۳
جایه‌جایی مجری نهایی (متر)	۳/۰	۱/۸	۰/۶
طول اولیه عملگرها (متر)	۰/۳	۰/۳	۰/۳
شعاع صفحه متصل به زمین (متر)	۰/۳	۰/۳	۰/۳
ضریب مقیاس شعاع	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰
شعاع مجری نهایی (متر)	۰/۱۰۵	۰/۱۵۹	۰/۲۴۳
جرم صفحه متصل به زمین (کیلوگرم)	۲۰	۲۰	۲۰
ضریب مقیاس جرم	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵
جرم بالایی (کیلوگرم)	۱۱/۹۸	۱۴/۷	۱۸/۰۵
شعاع سیلندرها (متر)	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
شعاع پیستون‌ها (متر)	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶
جرم سیلندرها و پیستون‌ها (کیلوگرم)	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
ضخامت صفحات ربات (متر)	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
مدت زمان بررسی مدل (ثانیه)	۸	۸	۸
گام زمانی (ثانیه)	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱

## مسیر حرکتی مجری نهایی

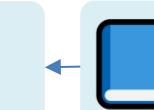
### مسیر مارپیچ



### روش



### ادبیات



### کلیات

چشم‌انداز

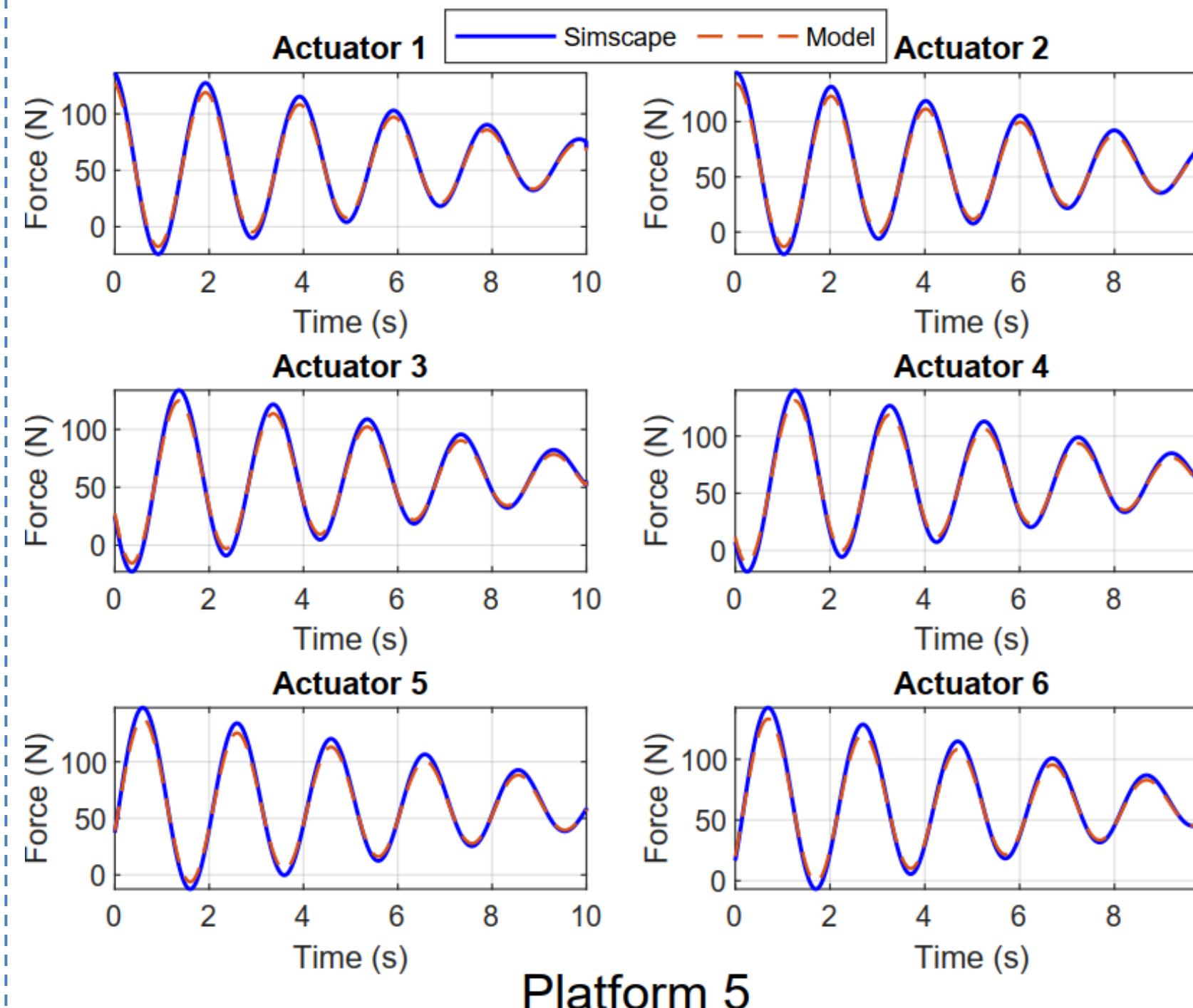
جمع‌بندی

یافته‌ها

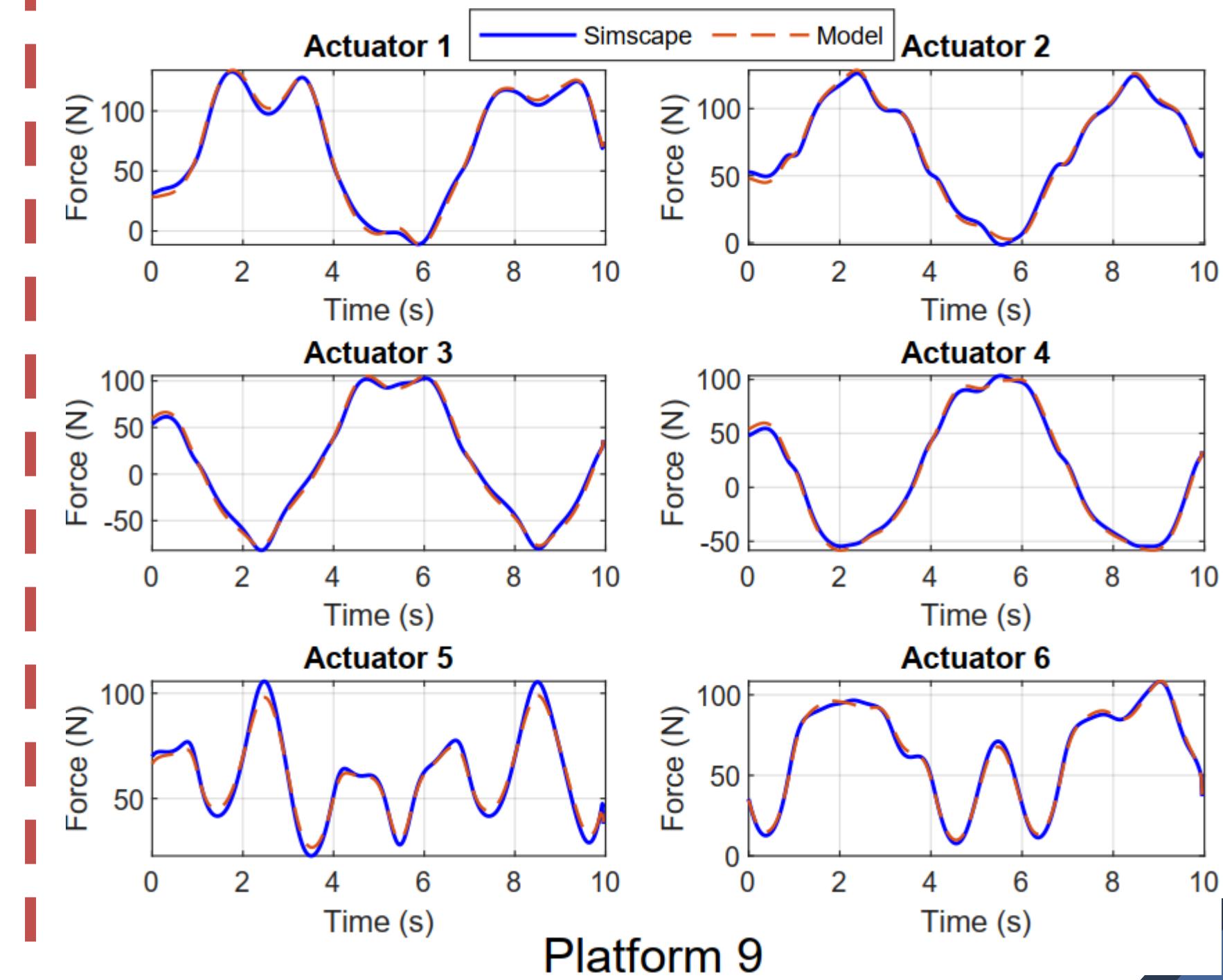
## یافته‌ها

اگر تعداد ربات  $N$  باشد، به تعداد  $6N$  نمودار صحبت‌سنجی خواهیم داشت.

### ۶ عملگر بخش ۵ ام ربات ۶ تایی تحت حرکت مارپیچ



### ۶ عملگر بخش ۹ ام ربات ۱۰ تایی تحت حرکت حلقوی



چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

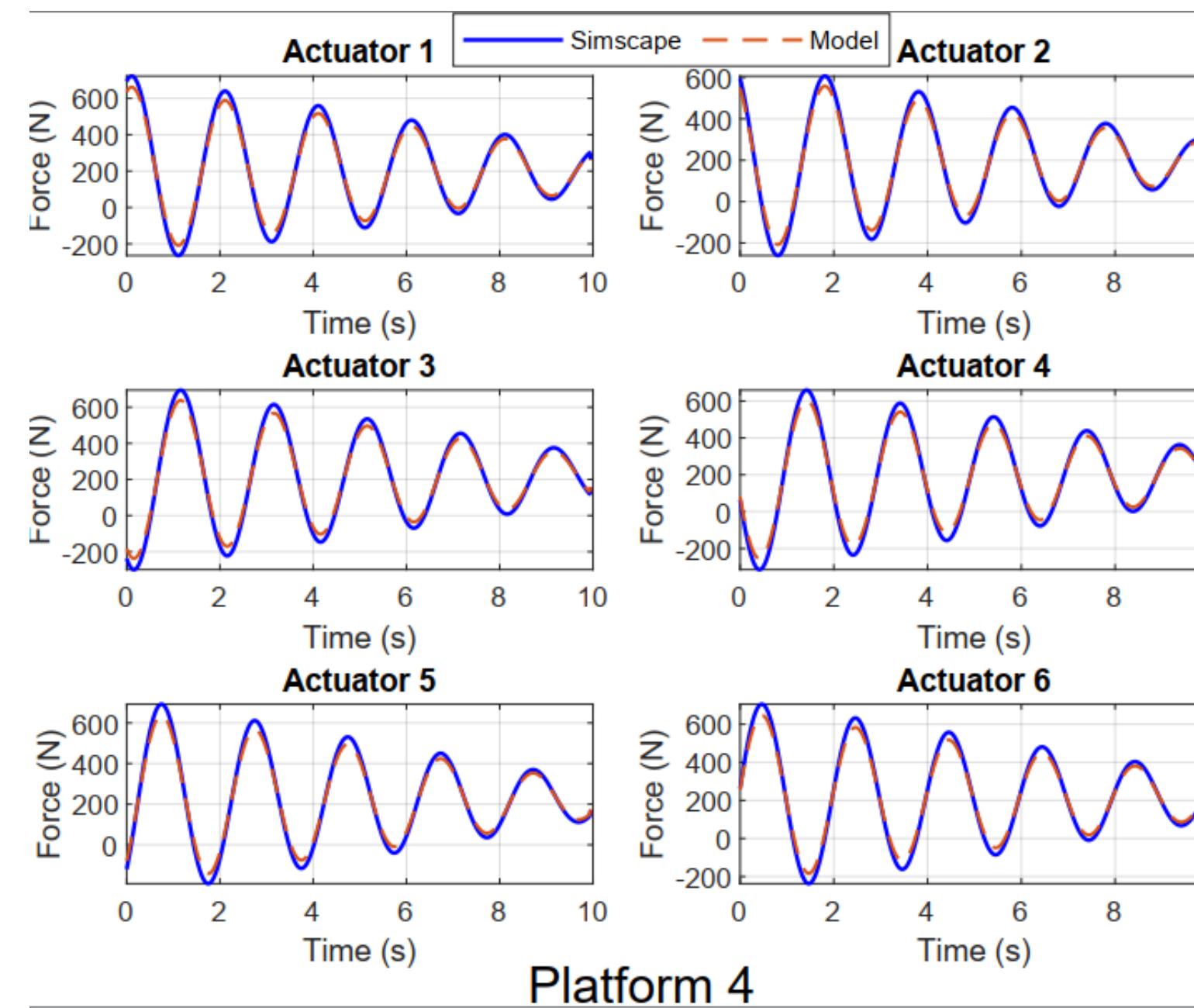
ادبیات

کلیات

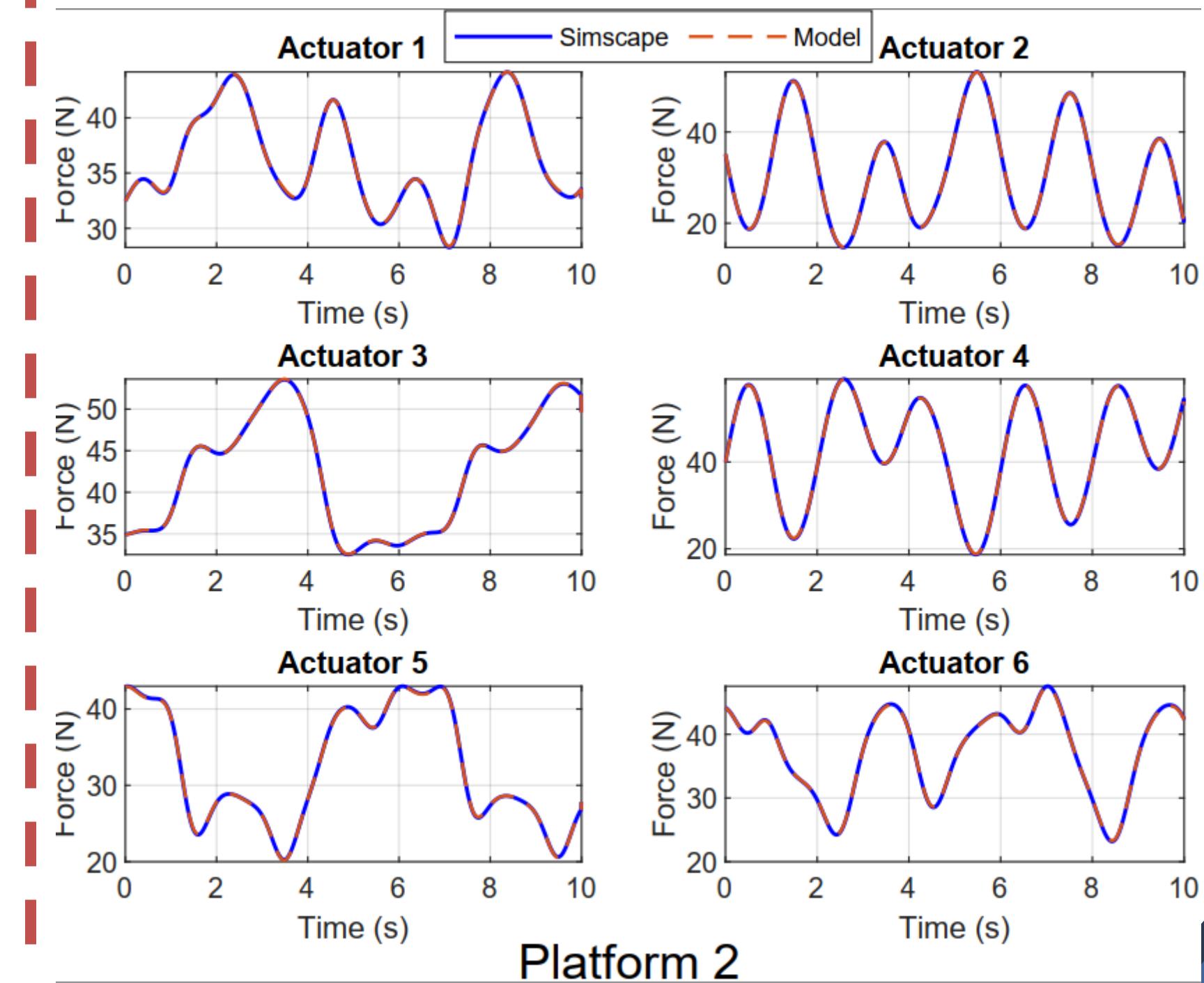
## یافته‌ها

اگر تعداد ربات  $N$  باشد، به تعداد  $6N$  نمودار صحبت‌سنجی خواهیم داشت.

۶ عملگر بخش ۴ ام ربات ۶ تایی تحت حرکت مارپیچ



۶ عملگر بخش دوم ربات ۲ تایی تحت حرکت حلقوی



چشم‌انداز

جمع‌بندی

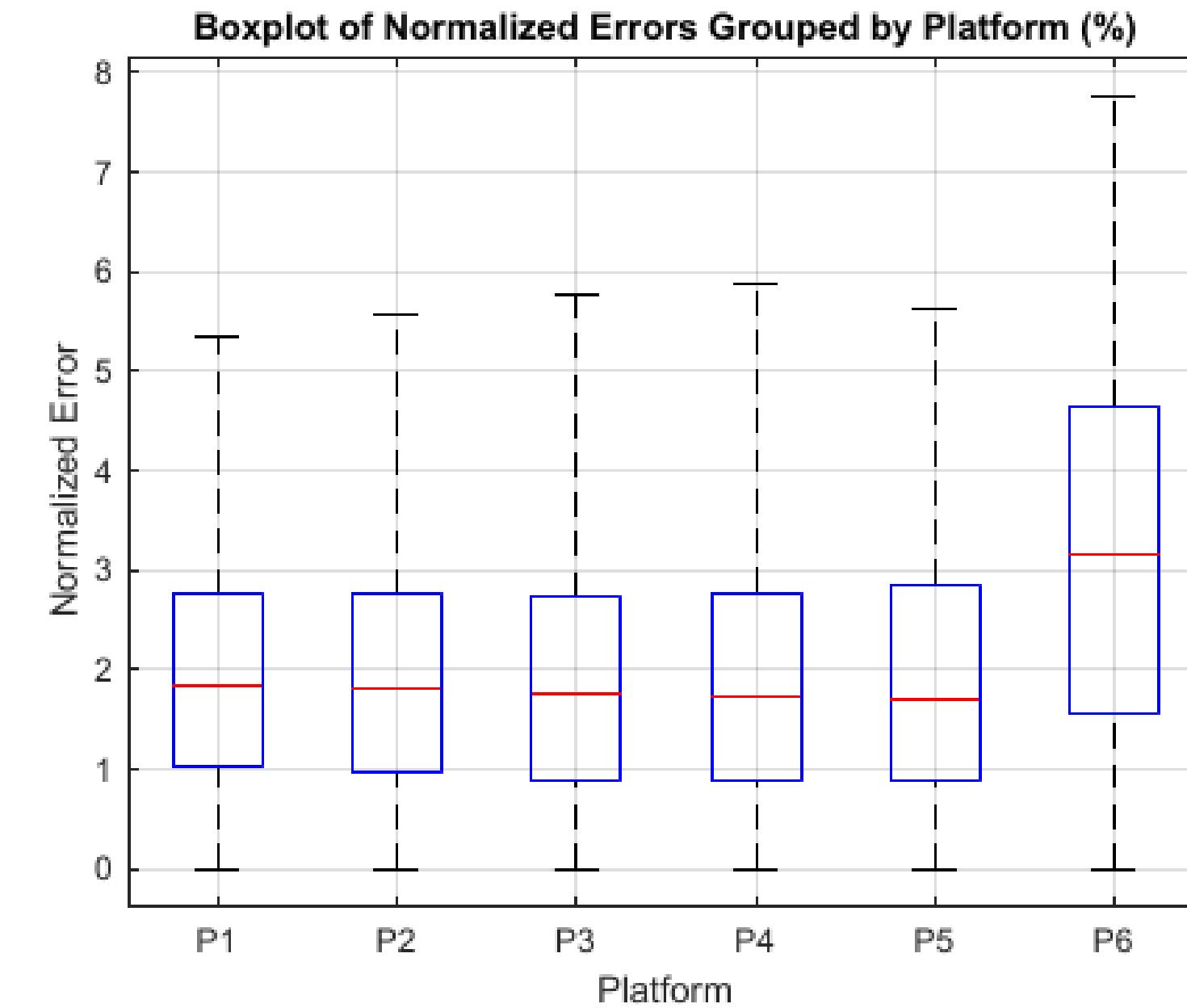
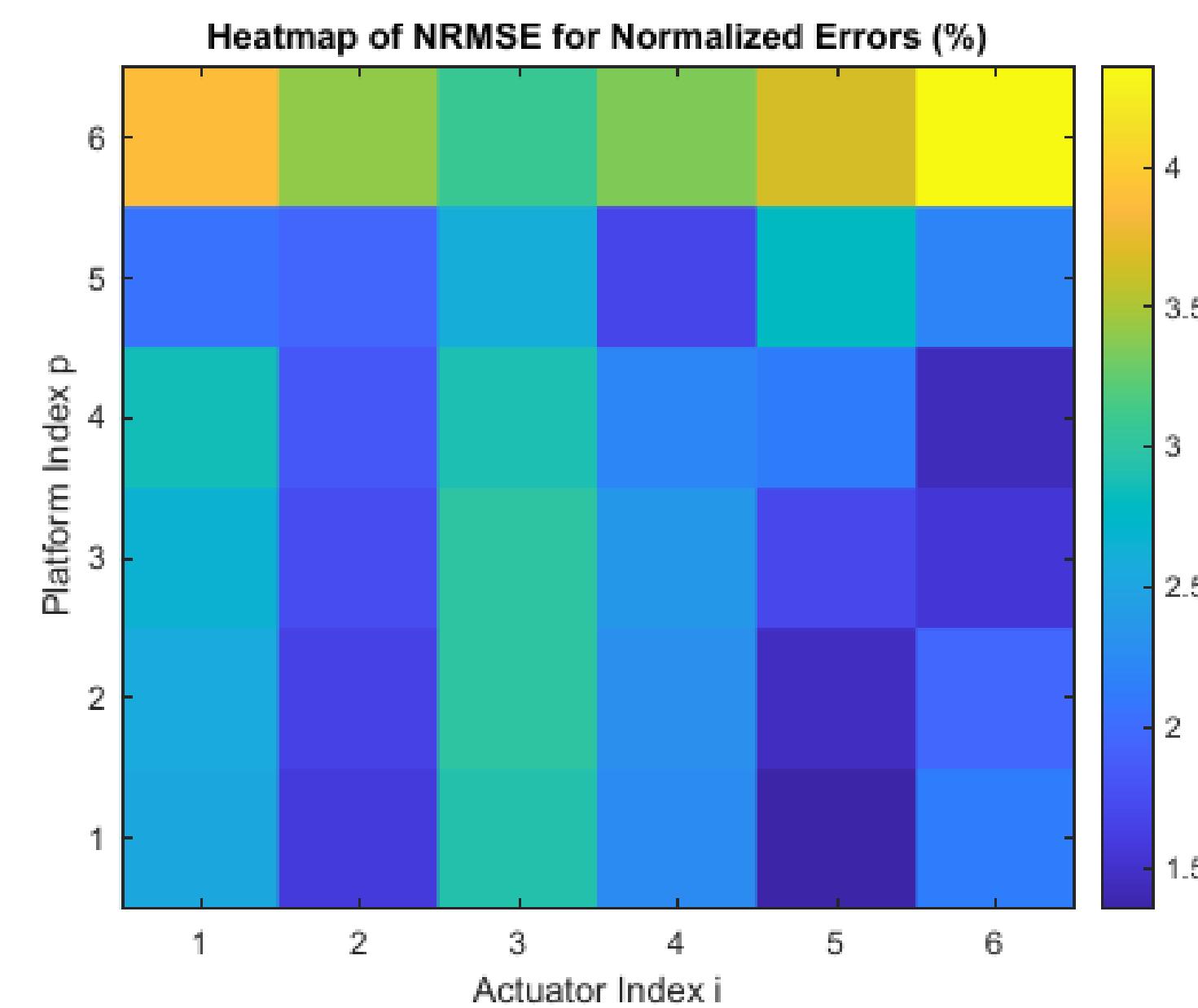
یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

## ربات ۶ تایی تحت حرکت مارپیچ



چشم‌انداز

جمع‌بندی

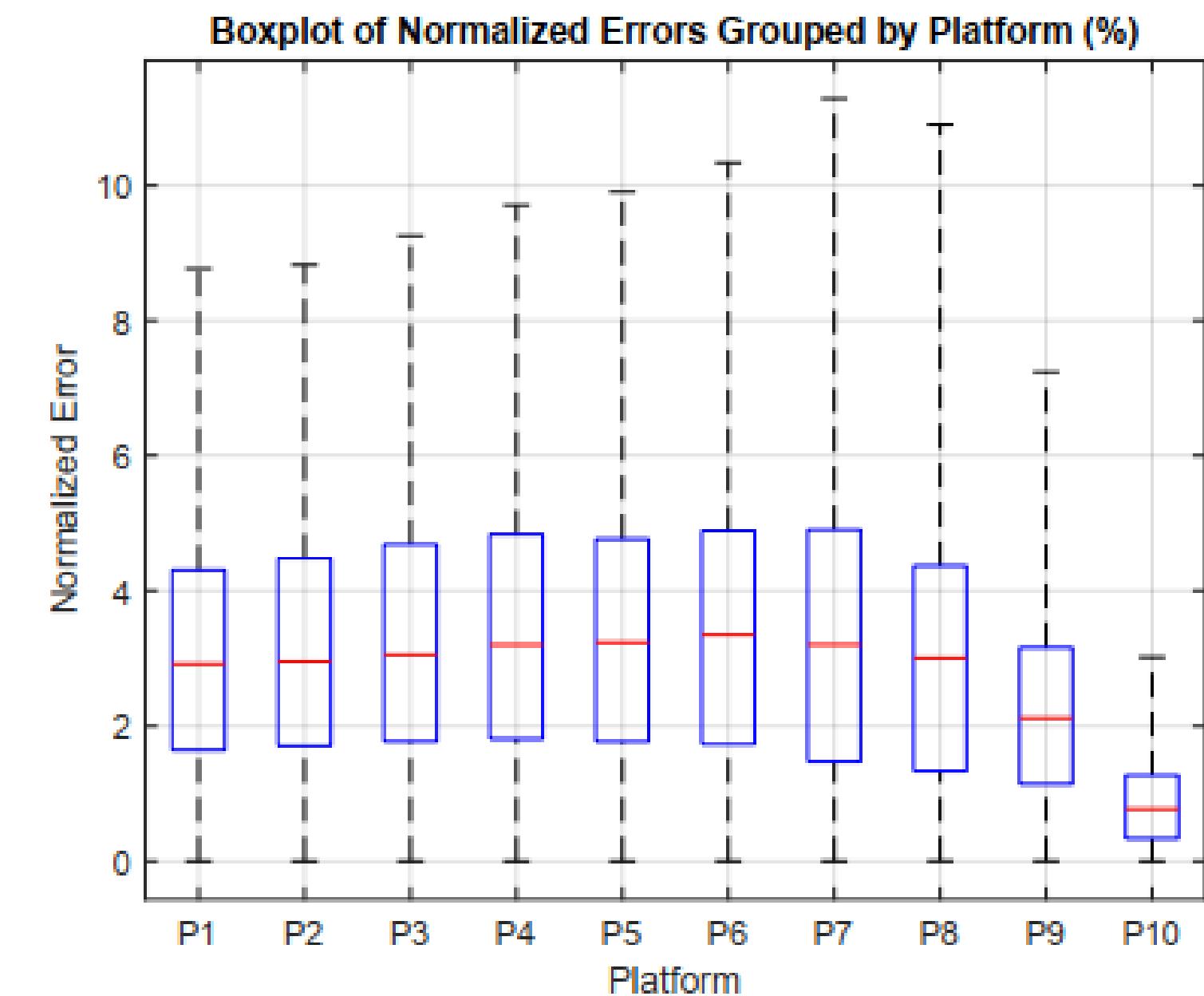
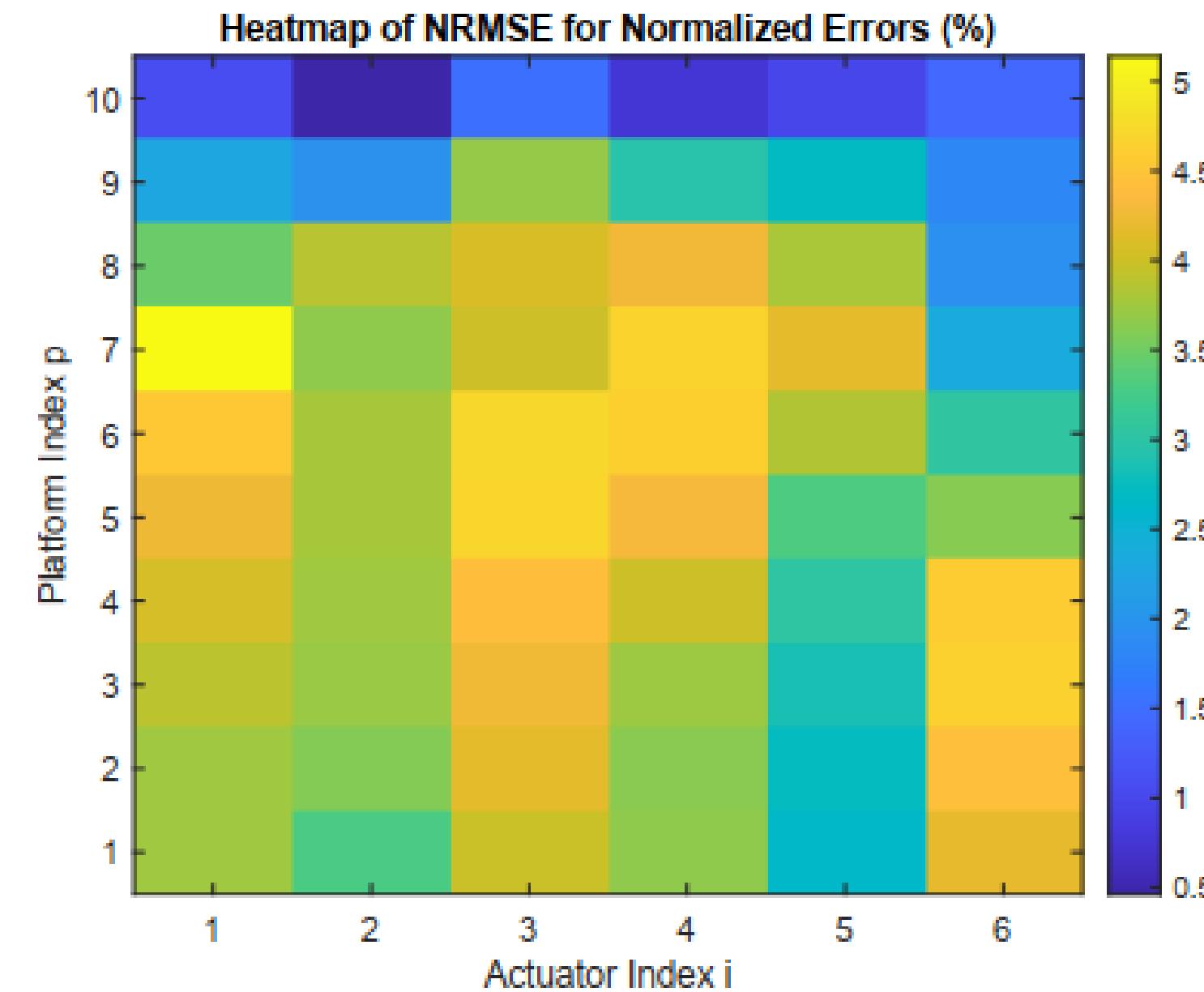
یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

## ربات ۱۰ تایی تحت حرکت حلقوی



چشم‌انداز

جمع‌بندی

یافته‌ها

روش

ادبیات

کلیات

تعداد ربات موازی	نوع حرکت	خطاهای عددی استاندارد شده (درصد)				
		بیشینه خطا	کمینه خطا	میانگین خطا	خطای جذر میانگین مربعات	
۲	مارپیچ	۱.۱۴٪	۰.۰۰٪	۰.۴۲٪	۰.۴۹٪	
۲	عمودی	۰.۰۰٪	۰.۰۰٪	۰.۰۰٪	۰.۰۰٪	
۲	حلقوی	۰.۷۰٪	۰.۰۰٪	۰.۲۳٪	۰.۲۸٪	
۶	مارپیچ	۸.۲۴٪	۰.۰۰٪	۲.۴۹٪	۳.۰۳٪	
۶	عمودی	۴.۵۶٪	۰.۶۴٪	۱.۷۷٪	۲.۲۲٪	
۶	حلقوی	۷.۷۶٪	۰.۰۰٪	۲.۰۹٪	۲.۵۲٪	
۱۰	مارپیچ	۹.۱۰٪	۰.۰۰٪	۳.۳۰٪	۳.۹۶٪	
۱۰	عمودی	۰.۰۰٪	۰.۰۰٪	۰.۰۰٪	۰.۰۰٪	
۱۰	حلقوی	۱۱.۲۹٪	۰.۰۰٪	۲.۹۸٪	۳.۶۱٪	

چشم‌انداز

جمع‌بندی



یافته‌ها



روش



ادبیات



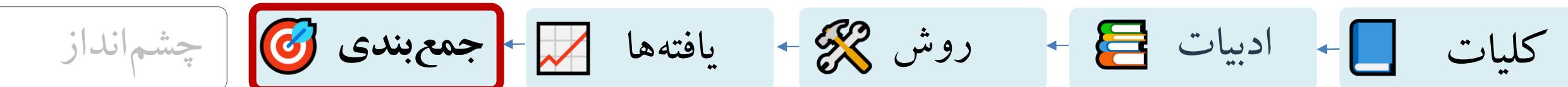
کلیات

## دلیل وجود خطا

- خطای جمع‌شونده در مسئله دینامیک: حل به صورت بازگشتی از بالای ربات تا پایین
- خطای جمع‌شونده در مسئله سینماتیک: یافتن پی‌درپی ماتریس ژاکوبین از پایین ربات تا بالا
- مشتق‌گیری عددی ماتریس‌ها
- تاثیر حرکت مجری نهایی

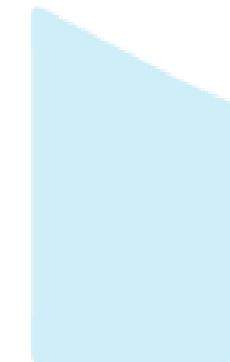
## نتیجه‌گیری

- کمترین خطا در حرکت عمودی و ربات دو قسمته با ۰/۰۰ درصد.
- بیشترین خطا در حرکت حلقوی و ربات ده قسمته با ۱۱/۲۹ درصد.
- ارائه دادن مدلی انعطاف‌پذیر برای هرنوع ربات گاف-استوارت سری-موازی با افزونگی بالا
- ارائه معادله حرکت **مدون** یافته شده از طریق **کارمزازی** با تعداد دلخواه ربات که کمتر در ادبیات موضوع پرداخته شده.
- صحتسنجی مدل توسعه داده شده با نرم‌افزار شبیه‌ساز سیم‌اسکیپ



# چشم انداز پژوهش

در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات

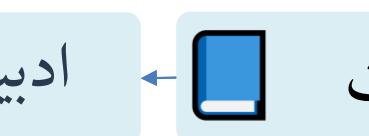


مدل سینماتیکی  
(پارسا نمازیان)



گذشته

حال



مدل دینامیکی  
(علیرضا کمالی)مدل سینماتیکی  
(پارسانمایان)**مقاله منتشر شده:** کنفرانس بین المللی رباتیک و مکاترونیک - ۱۴۰۳

# Dynamic Modeling of Double Segment Redundant Gough-Stewart Hybrid Manipulator based on the Principle of Virtual Work

Alireza Kamali Ardakani\*, Hossein Akbari\*, Parsa Namazian\*, Mehdi Tale Masouleh†, Arash Bahrami‡

\*Human and Robot Interaction Laboratory, School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

†Human and Robot Interaction Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

‡School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Emails: alirezakamali@ut.ac.ir, akbari.hossein@ut.ac.ir, pnamazian@ut.ac.ir, m.t.masouleh@ut.ac.ir, arash.bahrami@ut.ac.ir



چشم انداز



جمع‌بندی



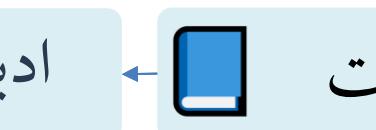
یافته‌ها



روش



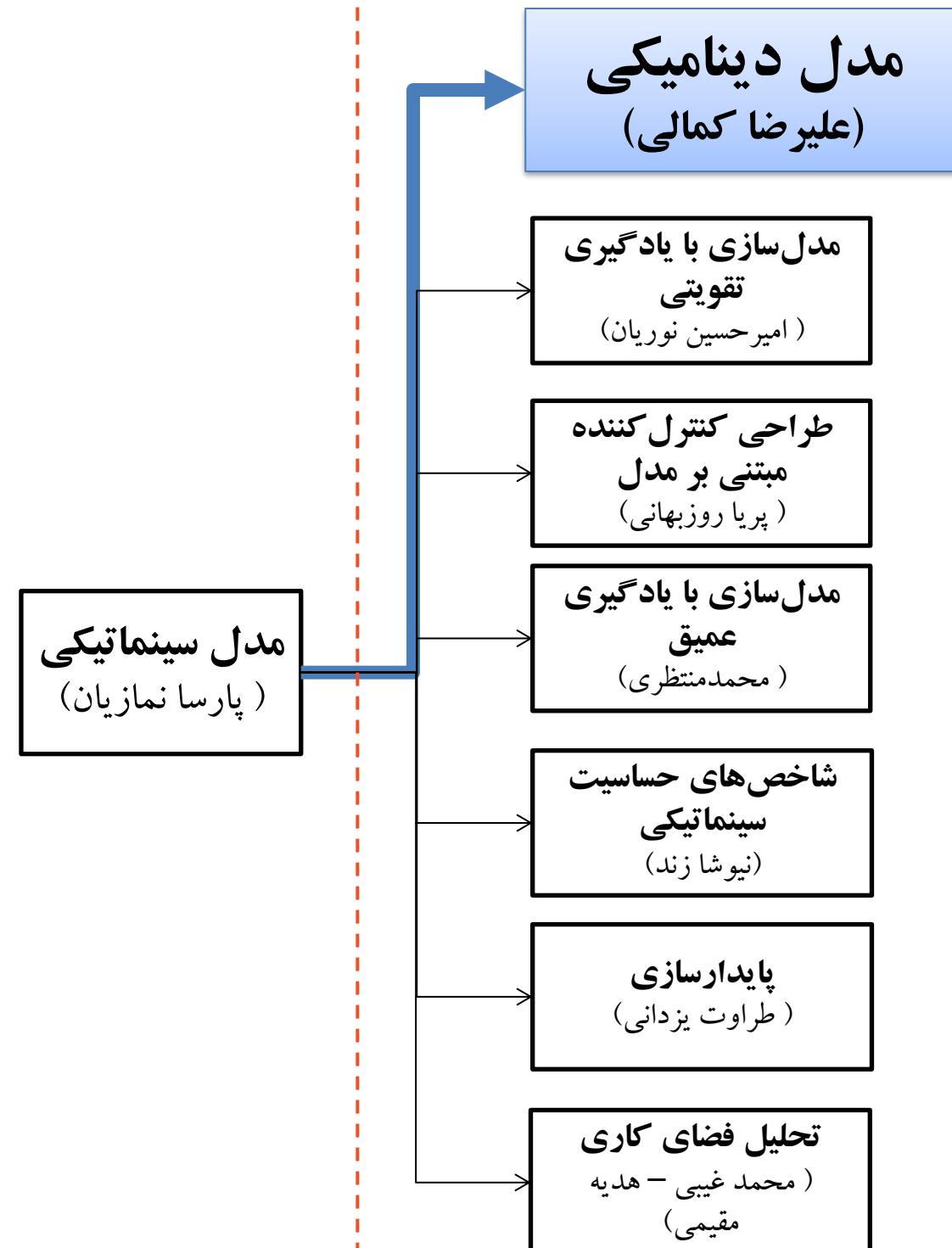
ادبیات



کلیات

# چشم انداز پژوهش

در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات



گذشته

حال

آینده



**Hossein Akbari**

· 1st  
Research Assistant at TaarLab | Mechanical  
Engineering Student | University of Tehran



**Behzad Danaei** ✅ · 2nd

Motorsports Vehicle Dynamics Engineer @ GM | PhD  
in Systems Design Engineering

Concord, North Carolina, United States · [Contact info](#)



General Motors



University of Waterloo



چشم انداز



جمع بندی



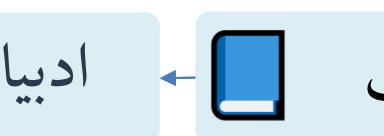
یافته ها



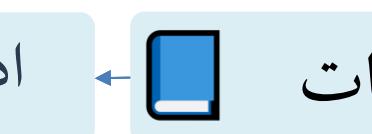
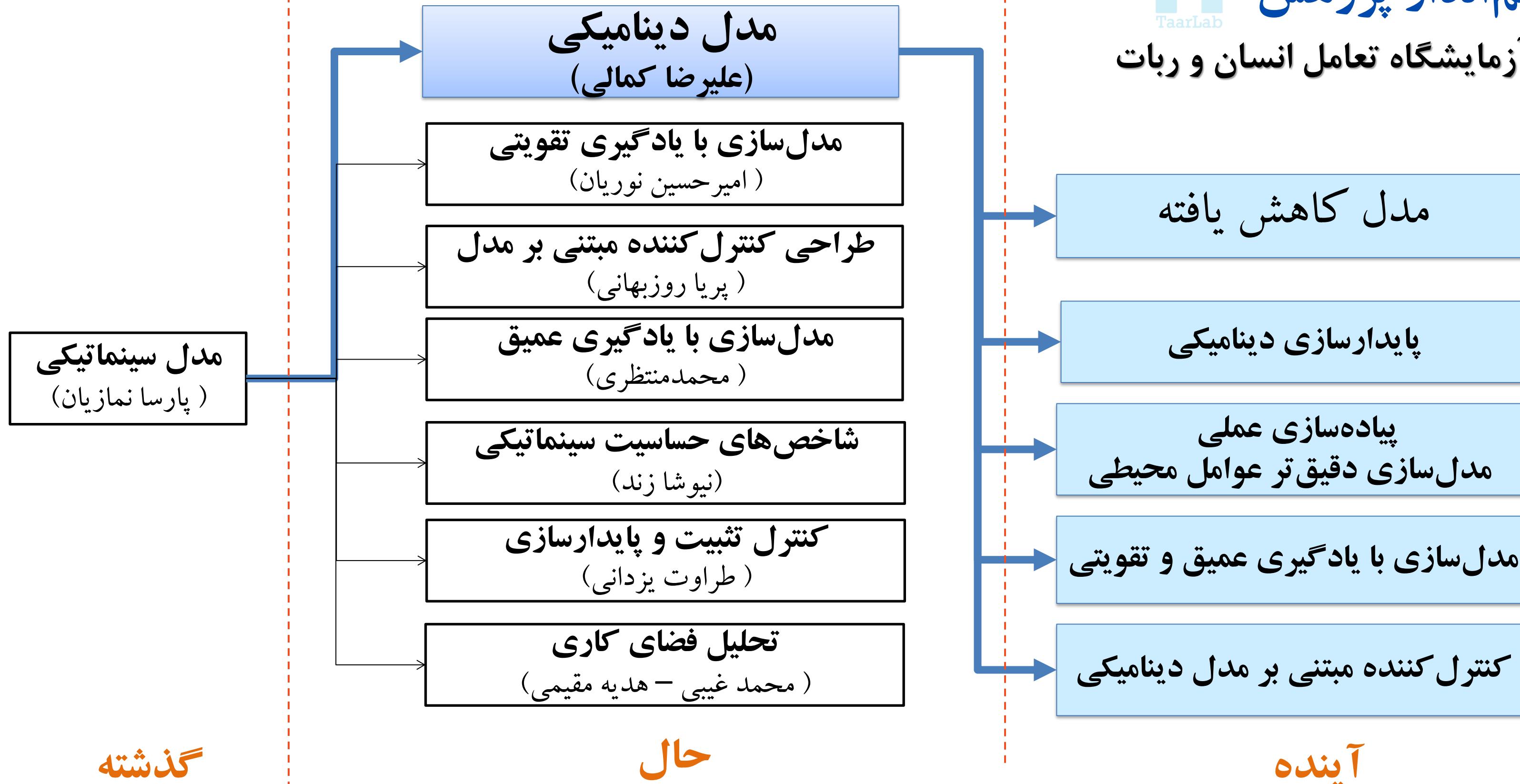
روش



ادبیات



کلیات





# ممنون از توجه شما

آزمایشگاه تعامل انسان و ربات - سفر ماسوله - تابستان ۱۴۰۳

## علیرضا کمالی اردکانی

دانشکده مهندسی مکانیک



## دکتر آرش بهرامی

دانشکده مهندسی مکانیک

## دکتر مهدی طالع ماسوله

آزمایشگاه تعامل انسان و ربات

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

