

لَا إِلَهَ إِلَّا اللَّهُ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل و کنترل لغزش در جابجایی اجسام در تماس با سطوح هموار توسط انگشتان نرم

رساله دکتری مهندسی مکانیک

امین فخاری

استادهای راهنما

دکتر مهدی کشمیری و دکتر راهنمای دوم



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری رشته مهندسی مکانیک آقای امین فخاری
تحت عنوان

تحلیل و کنترل لغزش در جابجایی اجسام در تماس با سطوح هموار
توسط انگشتان نرم

در تاریخ ۱۳۹۴/۹/۲۶ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

دکتر مهدی کشمیری	۱- استاد راهنمای رساله
دکتر راهنمای دوم	۲- استاد راهنمای رساله
دکتر مشاور اول	۳- استاد مشاور رساله
دکتر مشاور دوم	۴- استاد مشاور رساله
دکتر داور اول	۵- استاد داور
دکتر داور دوم	۶- استاد داور
دکتر داور سوم	۷- استاد داور
دکتر داور چهارم	۸- استاد داور
دکتر داور پنجم	۹- استاد داور
دکتر تحصیلات تکمیلی دانشکده	سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشکر و قدردانی

خدایا تو را شاکرم به خاطر امروزم که به من عطا فرمودی...

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
(رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

همسر م به مهربانی فرشته

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
نه	فهرست اشکال
ده	فهرست جداول
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ پیش گفتار
۳	۲-۱ بخش اول
۴	۱-۲-۱ زیربخش اول
۷	فصل دوم: مطالب اصلی
۷	۱-۲ پیش گفتار
۸	۲-۲ بخش اول
۹	۱-۲-۲ زیربخش اول
۱۲	فصل سوم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۲	۱-۳ نتیجه گیری
۱۳	۲-۳ پیشنهادها
۱۴	پیوستها
۱۴	پ-۱ جزئیات معادله ها
۱۶	پ-۲ اثبات روابط ریاضی
۱۷	مراجع

فهرست اشکال

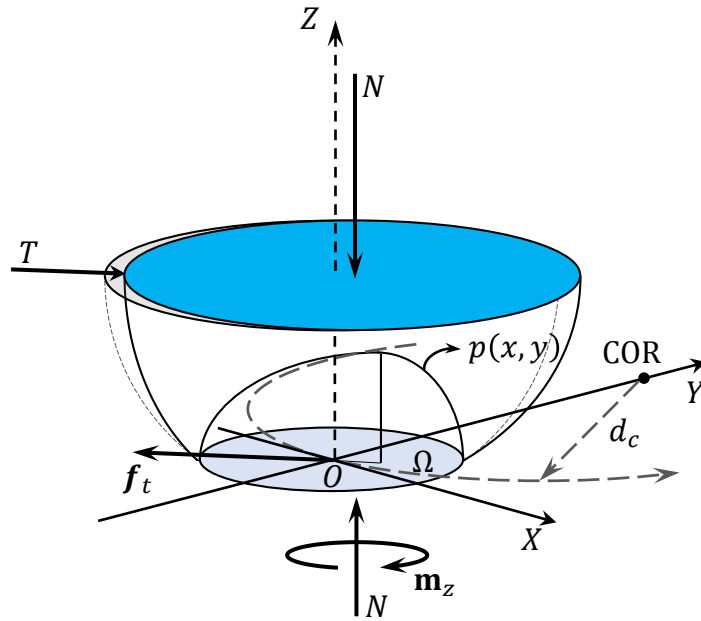
<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳.....	شکل ۱-۱: شکل نمونه.....
۳.....	شکل ۲-۱: قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر، الف) شکل نمونه اول، ب) شکل نمونه دوم.....
۸.....	شکل ۱-۲: شکل نمونه.....
۸.....	شکل ۲-۲: قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر، الف) شکل نمونه اول، ب) شکل نمونه دوم.....
۱۶.....	شکل پ-۱: تصویر مفهومی.....

فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۵.....	جدول ۱-۱: پارامترهای شبیه‌سازی
۵.....	جدول ۱-۲: مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی
۱۰.....	جدول ۲-۱: پارامترهای شبیه‌سازی
۱۰.....	جدول ۲-۲: مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی

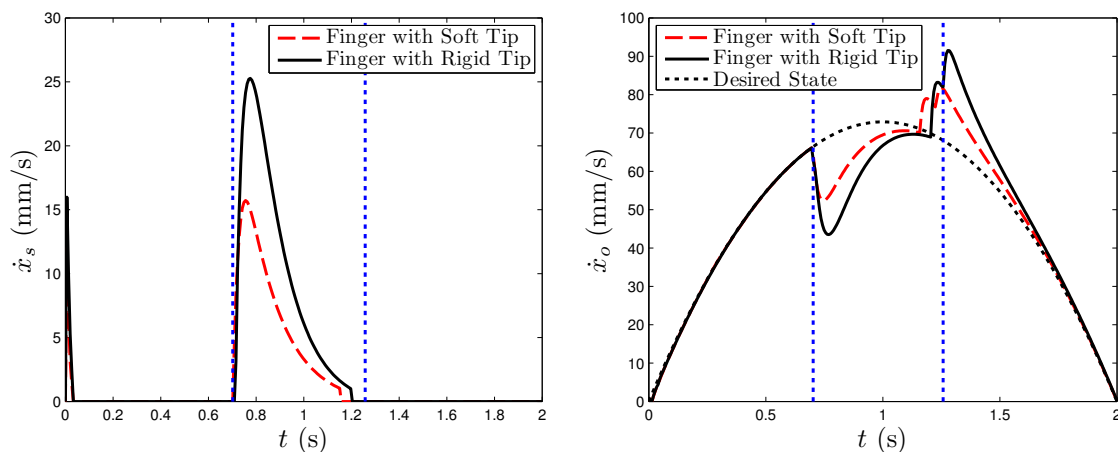
۲-۱ بخش اول

نمونه‌ای از یک عبارت انگلیسی در متن به صورت English Sentence است. نمونه‌ای از یک عبارت ریاضی در متن نیز به صورت $x^2 + y^2$ است. ارجاع به مراجع انگلیسی [۲، ۱]. ارجاع به مراجع فارسی [۴، ۳]. این نمونه‌ای از یک زیرنویس انگلیسی^۱ است. این نمونه‌ای از یک زیرنویس فارسی^۲ است. در شکل ۱-۱، نمونه‌ای از یک شکل آورده شده است.



شکل ۱-۱ - شکل نمونه

نمونه‌ای از قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر در شکل ۲-۱ آورده شده است.



(ب) زیرنویس شکل دوم

(الف) زیرنویس شکل اول

شکل ۲-۱ - قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر، (الف) شکل نمونه اول، (ب) شکل نمونه دوم

^۱English Footnote

^۲زیرنویس فارسی

جدول ۱-۱ - پارامترهای شبیه‌سازی

ضریب اصطکاک		انتهای نرم		اینرسی (Kgm ²)		جرم (Kg)		طول (m)	
μ_{o1}	0.10	c	6.74e-3	I_{c1}	$m_1 l_1^2 / 12$	m_1	0.2	l_1	0.20
μ_{o2}	0.14	γ	0.0495	I_{c2}	$m_2 l_2^2 / 12$	m_2	0.2	l_2	0.20
		C_{eq}	300 (Ns/m)			m_o	0.1	l_{c1}	0.10
		α	0.20					l_{c2}	0.10
		τ_0	0.024					R	0.02
								w	0.02

جدول ۲-۱ - مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی

روش	چگالی انرژی	ابعاد	عیب اصلی
پیزوالکتریک	۳۵/۴ mJ/cm ³	بزرگ	ولتاژ خروجی کم
الکترومغناطیس	۲۴/۸ mJ/cm ³	بزرگ	ولتاژ خروجی بسیار کم
الکترواستاتیک	۴ mJ/cm ³	فشرده در تراشه‌ها	نیاز به منبع شارژ اولیه

است. در رابطه ۱-۱، N نیروی عمودی است. نمونه‌ای از استفاده از روابط متوالی به صورت

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_s(i) - T \sum_{i=1}^k P_s(i) \leq B_s^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (2-1)$$

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_r(i) - T \sum_{i=1}^k P_r(i) \leq B_r^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (3-1)$$

است. نمونه‌ای از یک قضیه و تبصره نیز در ادامه آورده شده است.

قضیه ۱-۱. اگر ظرفیت باتری‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد، جواب بهینه‌ی $P_s^*(i)$ و $P_r^*(i)$ وجود دارد به نحوی که تابع هدف را بیشینه می‌کند و در رابطه‌ی زیر صدق می‌کند:

$$C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) \geq C \left(|h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(|h_{rd}(i+1)|^2 P_r^*(i) \right). \quad (4-1)$$

اثبات. بار دیگر فرم تابع هدف را در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است اینجا تابع هدف یک تابع دو متغیره است.

$$R(\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_r) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \min \left\{ C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s(i) \right), C \left(|h_{sd}(i)|^2 P_s(i) \right) \right\}. \quad (5-1)$$

حال بلوک i ام را در نظر می‌گیریم. اگر رابطه‌ی ۴-۱ برای i برقرار نباشد، به عبارت دیگر اگر داشته باشیم،

$$C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) < C \left(|h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(|h_{rd}(i+1)|^2 P_r^*(i+1) \right), \quad (6-1)$$

بنابراین

$$C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(|h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) = C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right). \quad (7-1)$$

پس در تابع هدف مسئله، مقدار بهینه‌ی مسئله برابر عبارت سمت چپ رابطه‌ی ۶-۱ شده است و آرگومان دوم و هم‌چنین مقدار $P_r^*(i)$ هیچ نقشی در مقدار بهینه ندارد. بنابراین می‌توانیم $P_r^*(i)$ را آنقدر کاهش دهیم تا در رابطه‌ی ۶-۱ تساوی برقرار شود بدون آنکه مقدار بهینه‌ی مسئله تغییر کند. ■

تبصره ۱-۱. از قضیه‌ی ۱-۱ نتیجه می‌گیریم که جواب بهینه‌ی مسئله‌ی P در حالت کلی یکتا نیست. به طور مثال وقتی مقدار انرژی برداشت شده در رله خیلی بیشتر از این انرژی در منبع باشد مسئله می‌تواند جواب‌های زیادی داشته باشد. بنابراین همواره می‌توان برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بدون کاهش مقدار نرخ گذردهی سیستم، کمترین مقدار توان را برای رله انتخاب کرد. بنابراین با توجه به رابطه

$$C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) \geq C \left(|h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(|h_{rd}(i)|^2 P_r^*(i) \right), \quad (8-1)$$

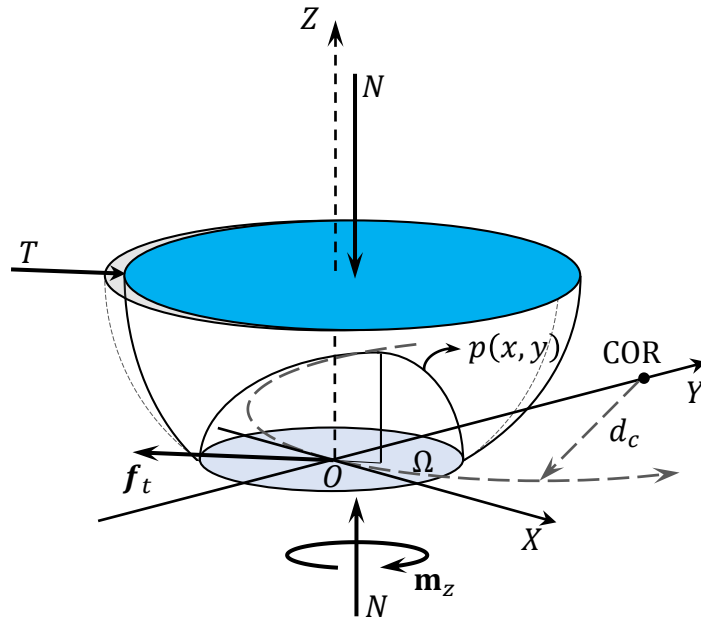
و با استفاده از رابطه ۸-۱ خواهیم داشت،

$$R_r(i) = \min \left\{ C \left(|h_{rd}(i)|^2 P_r(i) \right), C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s(i) \right) \right\}. \quad (9-1)$$

بنابراین می‌توان با انتخاب کمترین توان و نرخ برای رله از مصرف بی‌رویه‌ی انرژی جلوگیری کرد. فرض بزرگ بودن ظرفیت باتری به این دلیل است که اگر ظرفیت باتری محدود باشد برای کاهش $P_r^*(i)$ با محدودیت مواجه هستیم. چون در صورت کاهش بی‌از حد توان رله ممکن است از ناحیه‌ی شدنی مسئله خارج شویم. به هر حال برای هر دو حالت ظرفیت نامحدود و محدود باتری جواب مسئله یکتا نیست و همواره می‌توان با کاهش توان رله مصرف انرژی را کاهش داد.

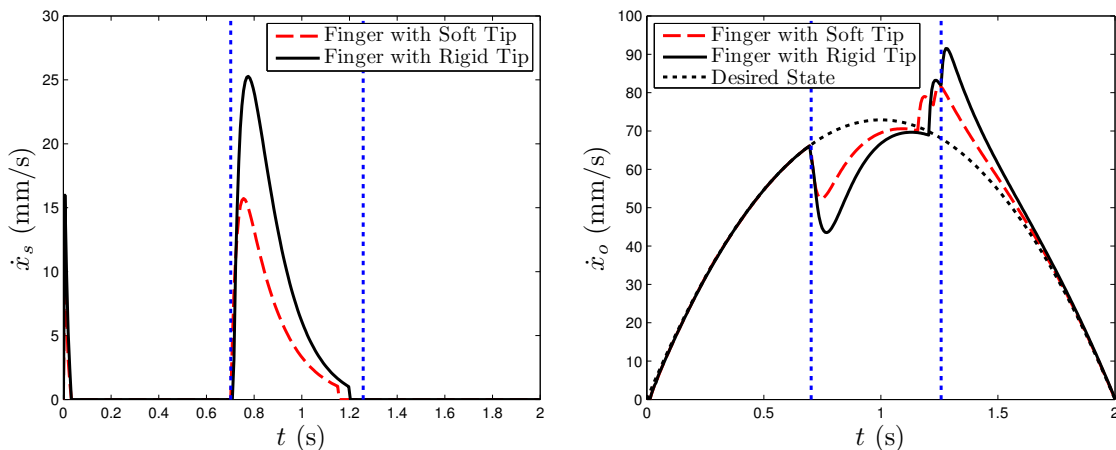
۲-۲ بخش اول

نمونه‌ای از یک عبارت انگلیسی در متن به صورت English Sentence است. نمونه‌ای از یک عبارت ریاضی در متن نیز به صورت $x^2 + y^2$ است. ارجاع به مراجع انگلیسی [۲، ۱]. ارجاع به مراجع فارسی [۴، ۳]. این نمونه‌ای از یک زیرنویس انگلیسی^۱ است. این نمونه‌ای از یک زیرنویس فارسی^۲ است. در شکل ۱-۲، نمونه‌ای از یک شکل آورده شده است.



شکل ۱-۲ - شکل نمونه

نمونه‌ای از قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر در شکل ۲-۲ آورده شده است.



(الف) زیرنویس شکل اول
(ب) زیرنویس شکل دوم
شکل ۲-۲ - قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر، (الف) شکل نمونه اول، (ب) شکل نمونه دوم

^۱English Footnote

^۲زیرنویس فارسی

جدول ۱-۲ - پارامترهای شبیه‌سازی

ضریب اصطکاک		انتهای نرم		اینرسی (Kgm ²)		جرم (Kg)		طول (m)	
μ_{01}	0.10	c	6.74e-3	I_{c1}	$m_1 l_1^2 / 12$	m_1	0.2	l_1	0.20
μ_{02}	0.14	γ	0.0495	I_{c2}	$m_2 l_2^2 / 12$	m_2	0.2	l_2	0.20
		C_{eq}	300 (Ns/m)			m_o	0.1	l_{c1}	0.10
		α	0.20					l_{c2}	0.10
		τ_0	0.024					R	0.02
								w	0.02

جدول ۲-۲ - مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی

روش	چگالی انرژی	ابعاد	عیب اصلی
پیزوالکتریک	۳۵/۴ mJ/cm ³	بزرگ	ولتاژ خروجی کم
الکترومغناطیس	۲۴/۸ mJ/cm ³	بزرگ	ولتاژ خروجی بسیار کم
الکترواستاتیک	۴ mJ/cm ³	فشرده در تراشه‌ها	نیاز به منبع شارژ اولیه

است. در رابطه ۱-۲، N نیروی عمودی است. نمونه‌ای از استفاده از روابط متوالی به صورت

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_s(i) - T \sum_{i=1}^k P_s(i) \leq B_s^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (2-2)$$

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_r(i) - T \sum_{i=1}^k P_r(i) \leq B_r^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (3-2)$$

است. نمونه‌ای از یک قضیه و تبصره نیز در ادامه آورده شده است.

قضیه ۱-۲. اگر ظرفیت باتری‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد، جواب بهینه‌ی $P_s^*(i)$ و $P_r^*(i)$ وجود دارد به نحوی که

تابع هدف را بیشینه می‌کند و در رابطه‌ی زیر صدق می‌کند:

$$C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) \geq C \left(|h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(|h_{rd}(i+1)|^2 P_r^*(i) \right). \quad (4-2)$$

اثبات. بار دیگر فرم تابع هدف را در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است اینجا تابع هدف یک تابع دو متغیره است.

$$R(\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_r) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \min \left\{ C \left(|h_{sr}(i)|^2 P_s(i) \right), C \left(|h_{sd}(i)|^2 P_s(i) \right) \right\}. \quad (5-2)$$

حال بلوک i ام را در نظر می‌گیریم. اگر رابطه‌ی ۲-۴ برای i برقرار نباشد، به عبارت دیگر اگر داشته باشیم،

$$C \left(\left| h_{sr}(i) \right|^2 P_s^*(i) \right) < C \left(\left| h_{sd}(i) \right|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(\left| h_{rd}(i+1) \right|^2 P_r^*(i+1) \right), \quad (6-2)$$

بنابراین

$$C \left(\left| h_{sr}(i) \right|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(\left| h_{sd}(i) \right|^2 P_s^*(i) \right) = C \left(\left| h_{sr}(i) \right|^2 P_s^*(i) \right). \quad (7-2)$$

پس در تابع هدف مسئله، مقدار بهینه‌ی مسئله برابر عبارت سمت چپ رابطه‌ی ۲-۶ شده است و آرگومان دوم و هم‌چنین مقدار $P_r^*(i)$ هیچ نقشی در مقدار بهینه ندارد. بنابراین می‌توانیم $P_r^*(i)$ را آنقدر کاهش دهیم تا در رابطه‌ی ۲-۶ تساوی برقرار شود بدون آنکه مقدار بهینه‌ی مسئله تغییر کند. ■

تبصره ۲-۱. از قضیه‌ی ۲-۱ نتیجه می‌گیریم که جواب بهینه‌ی مسئله‌ی P در حالت کلی یکتا نیست. به طور مثال وقتی مقدار انرژی برداشت شده در رله خیلی بیشتر از این انرژی در منبع باشد مسئله می‌تواند جواب‌های زیادی داشته باشد. بنابراین همواره می‌توان برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بدون کاهش مقدار نرخ گذردهی سیستم، کمترین مقدار توان را برای رله انتخاب کرد. بنابراین با توجه به رابطه

$$C \left(\left| h_{sr}(i) \right|^2 P_s^*(i) \right) \geq C \left(\left| h_{sd}(i) \right|^2 P_s^*(i) \right) + C \left(\left| h_{rd}(i) \right|^2 P_r^*(i) \right), \quad (8-2)$$

و با استفاده از رابطه ۲-۸ خواهیم داشت،

$$R_r(i) = \min \left\{ C \left(\left| h_{rd}(i) \right|^2 P_r(i) \right), C \left(\left| h_{sr}(i) \right|^2 P_s(i) \right) \right\}. \quad (9-2)$$

بنابراین می‌توان با انتخاب کمترین توان و نرخ برای رله از مصرف بی‌رویه‌ی انرژی جلوگیری کرد. فرض بزرگ بودن ظرفیت باتری به این دلیل است که اگر ظرفیت باتری محدود باشد برای کاهش $P_r^*(i)$ با محدودیت مواجه هستیم. چون در صورت کاهش بی‌از حد توان رله ممکن است از ناحیه‌ی شدنی مسئله خارج شویم. به هر حال برای هر دو حالت ظرفیت نامحدود و محدود باتری جواب مسئله یکتا نیست و همواره می‌توان با کاهش توان رله مصرف انرژی را کاهش داد.

مراجع

- [1] Fakhari, A., Keshmiri, M., and Kao, I., “Development of realistic pressure distribution and friction limit surface for soft-finger contact interface of robotic hands”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, pp. 1–12, 2015.
- [2] Lewis, F., Dawson, D., and Abdallah, C. *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. Automation and Control Engineering, CRC Press, 2003.
- [۳] فخاری، ا و کشمیری، م، “مدل سازی دینامیکی لغزش در گرفتن و جابجایی اجسام توسط انگشتان نرم”، *مهندسی مکانیک مدرس*، جلد ۱۵، شماره ۸، صص ۳۳۲–۳۴۰، ۱۳۹۴.
- [۴] هادیان جزی، ش. *دینامیک و کنترل فرآیند گرفتن و تعقیب مسیر یک جسم توسط بازوهای همکار صفحه‌ای در حضور نامعینی*. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، رساله دکتری، ۲۰۰۸.



Isfahan University of Technology
Department of Mechanical Engineering

Slippage Analysis and Control in Manipulation of Objects in Contact with Even Surfaces Using Soft Fingers

A Thesis
Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy (PhD)

By
Amin Fakhari

Evaluated and Approved by the Thesis Committee, on December 17, 2015

- 1- Mehdi Keshmiri, Assoc. Prof. (Supervisor)
- 2- Second Supervisor, Prof. (Supervisor)
- 3- First Advisor, Assoc. Prof. (Advisor)
- 4- Second Advisor, Assist. Prof. (Advisor)
- 5- First Examiner, Prof. (Examiner)
- 6- Second Examiner, Prof. (Examiner)
- 7- Third Examiner, Prof. (Examiner)
- 8- Fourth Examiner, Prof. (Examiner)
- 9- Fifth Examiner, Prof. (Examiner)

Department Graduate Coordinator: Dean, Prof.