

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E47274

การวางแผนการเปลี่ยนการจับวัตถุปลาตามแหล่งยว วัตถุทรงเหลี่ยมหน้า  
และวัตถุที่อุกค้ำหนกกับอุกค้ำหน้า

นายณนชร์ พัดก้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ฉบับสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวางแผนการเปลี่ยนการจับวัตถุรูปหลายเหลี่ยม วัตถุทรงหลายหน้า และวัตถุที่ถูกกำหนดด้วยจุดสัมผัส

b00254230

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



นายธนธร ฟ่อคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



REGRASP PLANNING FOR POLYGONAL, POLYHEDRAL AND DISCRETE OBJECTS

Mr.Thanathorn Phoka

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

Thesis Title      REGRASP PLANNING FOR POLYGONAL, POLYHEDRAL  
AND DISCRETE OBJECTS  
By                    Mr.Thanathorn Phoka  
Field of Study     Computer Engineering  
Thesis Advisor    Assistant Professor Attawith Sudsang, Ph.D.

---

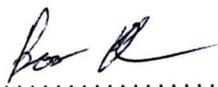
Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctoral Degree

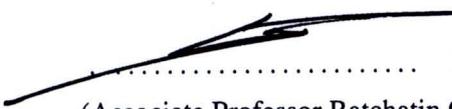
.....  ..... Dean of the Faculty of Engineering  
(Associate Professor Boonsom Lerdhirunwong, Dr.Ing.)

THESIS COMMITTEE

 ..... Chairman  
(Professor Prabhas Chongstitvatana, Ph.D.)

 ..... Thesis Advisor  
(Assistant Professor Attawith Sudsang, Ph.D.)

 ..... Examiner  
(Professor Boonserm Kijirikul, Ph.D.)

 ..... Examiner  
(Associate Professor Ratchatin Chanchareon, Ph.D.)

 ..... External Examiner  
(Assistant Professor Worasait Suwannik, Ph.D.)

ธนัชกร พอดำ: การวางแผนการเปลี่ยนการจับวัตถุรูปหลายเหลี่ยม วัตถุทรงหลายหน้า และวัตถุที่ถูกกำหนดด้วยจุดสัมผัส. (REGRASP PLANNING FOR POLYGONAL, POLYHEDRAL AND DISCRETE OBJECTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง, 119 หน้า.

**E 47274**

วิทยานิพนธ์ชิ้นนี้พิจารณาปัญหาการวางแผนการเปลี่ยนการจับเพื่อจัดวัตถุรูปหลายเหลี่ยม วัตถุรูปหลายเหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านจำนวนหลายด้าน วัตถุทรงหลายหน้า และวัตถุที่แยกเป็นส่วนซัด วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีในการคำนวณลำดับการเปลี่ยนตำแหน่งของนิ้วเพื่อเปลี่ยนจากการจับหนึ่งไปยังการจับอื่นโดยยังรักษาคุณสมบัติปิดของแรงตลอดกระบวนการ วิธีที่นำเสนอขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการค้นหาในโครงสร้างที่เรียกว่ากราฟการสับเปลี่ยนการจับ โดยที่ในแต่ละจุดในกราฟเก็บเซตของการจับที่ถูกคำนวณไว้แล้วในกรณีของวัตถุรูปหลายเหลี่ยม และวัตถุทรงหลายหน้า

สำหรับวัตถุที่แยกเป็นส่วนซัด เนื่องจากข้อมูลของจุดจับมีจำนวนมาก การคำนวณโดยสมบูรณ์ไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการจัดกลุ่มของจุดจับตามความสามารถในการออกแรงและแรงบิด จุดจับตัวแทนได้ถูกเลือกมาจากแต่ละกลุ่มเพื่อนำมาสร้างกราฟครอบคลุม เนื่องจากการจับทั้งหมดไม่ได้อยู่ในกราฟครอบคลุมวิธีในการเชื่อมโยงการจับใดๆ ไปยังกราฟนี้จึงถูกนำเสนอไว้ด้วย

ความเชื่อมต่อกันในโครงสร้างกราฟแสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนจากการจับหนึ่งไปการจับอื่น ซึ่งทำให้ปัญหาการวางแผนการเปลี่ยนการจับสามารถแก้ได้ด้วยการค้นหาในกราฟ และโปรแกรมเพื่อจำลองวิธีที่นำเสนอนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแสดงผลการทดลอง

ภาควิชา ..... วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ..... ลายมือชื่อนิลิต .๕๔๕๕๕... ฟังดา.....  
 สาขาวิชา ..... วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก   
 ปีการศึกษา ..... 2553 .....

## 4771814021: MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS: FORCE CLOSURE / DISCRETE CONTACT POINTS / REGRASP PLANNING / 2D GRASPING / 3D GRASPING / GRASP HEURISTIC / DEXTEROUS MANIPULATION

THANATHORN PHOKA : REGRASP PLANNING FOR POLYGONAL, POLYHEDRAL AND DISCRETE OBJECTS. THESIS ADVISOR : Assistant Professor Attawith Sudsang, Ph.D., 119 pp.

**E47274**

This dissertation addresses the problems of planning a set of regrasp sequences for manipulating a polygon, a polygon with a large number of edges, a polyhedron and a discrete object. Assuming frictional point contact, we propose approaches for computing sequences of finger repositioning that allow the hand to switch from one grasping configuration to another while maintaining force closure during the entire process. The proposed approaches are based on exploring a structure called switching graph. For a polygon or a polyhedron, a vertex in a switching graph explicitly contains a set of force closure grasps.

In contrast, for a discrete object, the input with a large number of discrete contact points is considered. In this setting, traditional methods of complete solution is not available. Based on wrench space information of the input, our proposed algorithm clusters the input into groups and chooses a representative from each group. A global graph structure for regrasp planning is then constructed using all force closure grasps that can be formed only by representatives. Also described are approaches for finding a regrasping sequence from an arbitrary grasp to a grasp in the global structure.

The connectivity of a graph captures ability to switch from one grasp to another and allows regrasp planning to be formulated as a graph search. The proposed approaches have been implemented and computational results are presented.

Department: ... Computer Engineering ... Student's Signature *Thanathorn Phoka*  
Field of Study: .. Computer Engineering .. Advisor's Signature *Attawith Sudsang*  
Academic Year: .....2010.....

## Acknowledgements

I would like to express my gratitude to my advisor, Dr. Attawith Sudsang who has patiently tutored me from the very start of my study. Dr. Sudsang not only shapes my work but also inspires many of my thought. I also express my thankfulness to my dissertation committee: Dr. Prabhas Chongstitvatana, Dr. Boonserm Kijirikul, Dr. Ratchatin Chanchareon and Dr. Worasait Suwannik.

I also would like to thank all people, past and present, in the department of computer engineering, the Intelligent System Laboratory 2 (ISL2) at Chulalongkorn University. I appreciate the financial support from the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program under Grant No. Ph.D. 1.O.CU/49/D.1 and the 90<sup>th</sup> Anniversary of Chulalongkorn University Fund through the Ratchadapiseksomphot Fund.

I would like to thank my family for their unconditional understanding, extensive support and unceasing love which nourishes me when I need it most.

# Contents

	Page
<b>Abstract (Thai)</b> . . . . .	iv
<b>Abstract (English)</b> . . . . .	v
<b>Acknowledgements</b> . . . . .	vi
<b>Contents</b> . . . . .	vii
<b>List of Tables</b> . . . . .	xi
<b>List of Figures</b> . . . . .	xii
<b>Chapter</b>	
<b>I Introduction</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Related Works . . . . .	3
1.1.1 Robot Hands . . . . .	4
1.1.2 Contact Kinematics, Dynamic and Control of Manipulation . . . . .	4
1.1.3 Grasp Definition . . . . .	6
1.1.4 Force Closure . . . . .	7
1.1.5 Regrasp Planning . . . . .	9
1.1.6 Dexterous Manipulation Planning . . . . .	12
1.2 Problem Statement . . . . .	14
1.2.1 Contribution . . . . .	14
1.3 Dissertation Outline . . . . .	14
<b>II Grasping and Regrasping Preliminaries</b> . . . . .	<b>15</b>
2.1 Nomenclatures . . . . .	15
2.2 Contact Model . . . . .	15
2.3 Grasp and Wrenches . . . . .	16
2.3.1 Primitive Contact Wrenches . . . . .	17
2.3.2 Grasp Wrench Set . . . . .	18
2.4 Force Closure . . . . .	18
2.5 Condition of Force Closure . . . . .	19
2.6 Regrasping . . . . .	20
2.6.1 Finger Switching and Finger Sliding . . . . .	21
<b>III Regrasp Planning for a Polygonal Object</b> . . . . .	<b>22</b>
3.1 Introduction . . . . .	22
3.2 Force-closure conditions in 2D . . . . .	23

Chapter	Page
3.3 Switching Graph for a Polygonal Object . . . . .	25
3.3.1 Representing Force-closure Grasps . . . . .	25
3.3.1.1 Representing Concurrent Grasps . . . . .	26
3.3.1.2 Representing 2-finger Grasps . . . . .	28
3.3.1.3 Representing Parallel Grasps . . . . .	28
3.3.2 Finger Switching . . . . .	32
3.3.2.1 Finger Switching among Concurrent Grasps . . . . .	33
3.3.2.2 Finger Switching between 2-finger Grasps and Concurrent Grasps . . . . .	33
3.3.2.3 Finger Switching among Parallel Grasps . . . . .	34
3.3.2.4 Finger Switching between Parallel Grasps and 2-finger Grasps . . . . .	35
3.3.3 Finger Aligning . . . . .	36
3.3.4 Computing Switching Graph . . . . .	38
3.3.4.1 Computing Vertices of Concurrent Grasps . . . . .	38
3.3.4.2 Computing Vertices of 2-finger Grasps . . . . .	40
3.3.4.3 Computing Vertices of Parallel Grasps . . . . .	40
3.3.4.3.1 . . . . .	41
3.3.4.4 Computing Edges . . . . .	42
3.4 Using Switching Graph . . . . .	42
3.5 Implementation and Results . . . . .	44
3.6 Summary . . . . .	46
<b>IV Regrasp Planning for a Polygon with a Large Number of Edges . . . . .</b>	<b>51</b>
4.1 Introduction . . . . .	51
4.2 Representing force closure grasps . . . . .	51
4.2.1 Computing $G_{i,j}$ . . . . .	53
4.2.2 Extending Configuration Space . . . . .	54
4.2.3 Constructing $G$ . . . . .	56
4.3 Finger Switching . . . . .	59
4.4 Finger Aligning . . . . .	60
4.5 Constructing Switching Graph . . . . .	61

Chapter	Page
4.6 Using Switching Graph . . . . .	62
4.6.1 Unconstrained Regrasp Sequence . . . . .	62
4.6.2 Optimal Regrasp Sequence . . . . .	63
4.7 Experimental Results . . . . .	66
4.8 Summary . . . . .	68
<b>V Regrasp Planning for a Polyhedral Object . . . . .</b>	<b>70</b>
5.1 Introduction . . . . .	70
5.2 Force-closure conditions in 3D . . . . .	70
5.3 Switching Graph for a Polyhedral Object . . . . .	71
5.3.1 Representing Concurrent Grasps . . . . .	72
5.3.2 Finger Switching . . . . .	74
5.3.3 Finger Aligning . . . . .	74
5.3.4 Computing a Switching Graph . . . . .	75
5.3.4.1 Direct Geometric Computation . . . . .	79
5.3.4.2 Random Sampling . . . . .	79
5.4 Implementation and Results . . . . .	80
5.5 Summary . . . . .	81
<b>VI Regrasp Planning for a Triangular-Mesh Object . . . . .</b>	<b>88</b>
6.1 Introduction . . . . .	88
6.2 Regrasp Planning on Discrete Point Set . . . . .	89
6.2.1 Overview . . . . .	90
6.2.2 Spectral Clustering for Contact Point Set . . . . .	90
6.2.2.1 Affinity Matrix . . . . .	91
6.2.2.2 Spectral Clustering Algorithm . . . . .	93
6.2.3 Constructing Representative-Level Roadmap . . . . .	94
6.2.4 Planning Regrasp Sequence . . . . .	94
6.3 Experiments and Results . . . . .	97
6.4 Summary . . . . .	99
<b>VII Conclusion . . . . .</b>	<b>106</b>
7.1 Dissertation Summary . . . . .	106
7.2 Further Improvement and Extension . . . . .	107

Chapter	Page
7.3 Discussion . . . . .	109
<b>Biography . . . . .</b>	<b>119</b>

## List of Tables

Table	Page
3.1 Results of the algorithm for all grasp types . . . . .	46
3.2 Combined results . . . . .	46
4.1 Switching graph construction of 10° half-angle . . . . .	67
4.2 Switching graph construction of 15° half-angle . . . . .	68
4.3 Switching graph construction of 20° half-angle . . . . .	68
5.1 Results from direct intersection approach . . . . .	82
5.2 Results from random sampling approach for each test object with 1,000 sampling points . . . . .	82
5.3 Results from random sampling approach for each test object with 5,000 sampling points . . . . .	82
5.4 Results from random sampling approach for each test object with 10,000 sampling points . . . . .	83
5.5 Results from random sampling approach for each test object with 20,000 sampling points . . . . .	83
6.1 Result of 500 mesh objects clustered into 30 clusters . . . . .	100
6.2 Result of 500 mesh objects clustered into 50 clusters . . . . .	100
6.3 Result of 500 mesh objects clustered into 70 clusters . . . . .	101
6.4 Result of 1000 mesh objects clustered into 30 clusters . . . . .	101
6.5 Result of 1000 mesh objects clustered into 50 clusters . . . . .	101
6.6 Result of 1000 mesh objects clustered into 70 clusters . . . . .	102
6.7 Result of local planning of 500 mesh objects clustered into 30 clusters . . . . .	102
6.8 Result of local planning of 500 mesh objects clustered into 50 clusters . . . . .	102
6.9 Result of local planning of 500 mesh objects clustered into 70 clusters . . . . .	103
6.10 Result of local planning of 1000 mesh objects clustered into 30 clusters . . . . .	103
6.11 Result of local planning of 1000 mesh objects clustered into 50 clusters . . . . .	103
6.12 Result of local planning of 1000 mesh objects clustered into 70 clusters . . . . .	104

## List of Figures

Figure	Page
2.1 Coulomb friction . . . . .	16
2.2 Regrasping overview . . . . .	21
3.1 Switching diagram . . . . .	25
3.2 Construction of a focus cell . . . . .	27
3.3 2-finger force-closure focus cell construction . . . . .	28
3.4 Construction of a common cone . . . . .	29
3.5 Three contact points forming a parallel grasp . . . . .	30
3.6 Representing a common cone . . . . .	31
3.7 Finger switching between concurrent grasps . . . . .	33
3.8 Finger switching between parallel grasps . . . . .	35
3.9 Finger switching between 2-finger grasps and parallel grasps . . . . .	36
3.10 Finger aligning . . . . .	37
3.11 Generating candidate triples of concurrent grasps . . . . .	40
3.12 Generating pairs of 2-finger grasps and triples of parallel grasps . . . . .	40
3.13 Computing a vertex of parallel grasps . . . . .	41
3.14 Using switching graph . . . . .	44
3.15 Test polygons . . . . .	45
3.16 A regrasp sequence for concurrent grasps . . . . .	47
3.17 A regrasp sequence for parallel grasps . . . . .	48
3.18 A regrasp sequence for concurrent grasps and 2-finger grasps . . . . .	48
3.19 A regrasp sequence for parallel grasps and 2-finger grasps . . . . .	49
3.20 A regrasp sequence for all grasp types . . . . .	50
4.1 Computing $G_{i,j}$ . . . . .	54
4.2 Extreme points of $G_{i,j}$ . . . . .	55
4.3 Independent contact region mapping . . . . .	55
4.4 Extending configuration space . . . . .	57
4.5 Adjacencies of vertices . . . . .	58
4.6 Finger switching . . . . .	60
4.7 Finger aligning . . . . .	60
4.8 Using switching graph . . . . .	63
4.9 The largest square on Voronoi edges . . . . .	66
4.10 Determining a local optimum . . . . .	67
4.11 Test polygons . . . . .	67

Figure	Page
4.12 A regrasp sequence . . . . .	69
5.1 Inverted friction cone . . . . .	72
5.2 Union volume . . . . .	73
5.3 Moving between non-overlapping cells . . . . .	75
5.4 Moving within a focus cell . . . . .	76
5.5 Parameterization of a unit normal vector . . . . .	77
5.6 Mapping from the spherical to cartesian coordinates . . . . .	78
5.7 Two bounding boxes . . . . .	79
5.8 Test objects . . . . .	81
5.9 Shaded test objects . . . . .	84
5.10 A regrasp sequence of the object in Fig. 5.8(b) . . . . .	85
5.11 A regrasp sequence of the object in Fig. 5.8(f) . . . . .	86
5.12 A regrasp sequence of the object in Fig. 5.8(g) . . . . .	87
6.1 Transformation distance . . . . .	92
6.2 Test objects . . . . .	98
6.3 A regrasping sequence for the object in Fig. 6.2(b) with 500 triangles clustered into 50 groups . . . . .	104
6.4 A regrasping sequence for the object in Fig. 6.2(d) with 1000 triangles clustered into 30 groups . . . . .	105