

Chapter 7

Grasping and Manipulation

7.1 Introduction

7.2 Grasping

7.3 Orienting Parts using Gripper

7.4 Orienting Parts using Force Fields

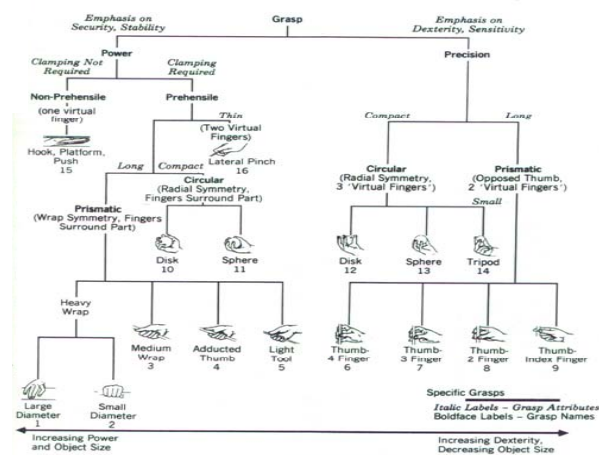
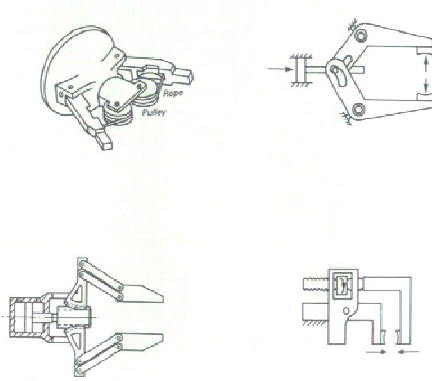


Figure 4.2 Partial Taxonomy of Manufacturing Grasps

Gripper



Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

บทที่ 7 หน้า 3

Robot Hands

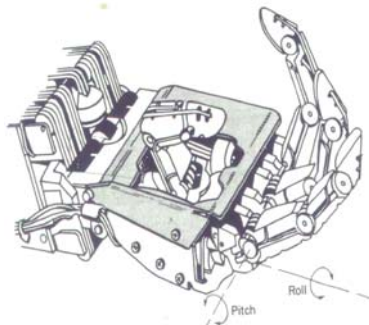


Figure 4.20 Utah/MIT Hand

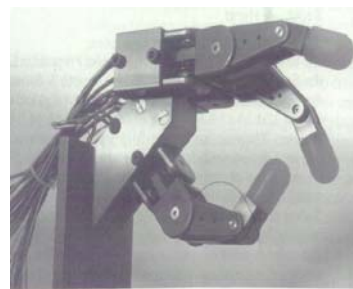


Figure 4.12 Stanford/JPL Hand (Salisbury Hand)

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

บทที่ 7 หน้า 4

Robot Hands



Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

บทที่ 7 หน้า 5

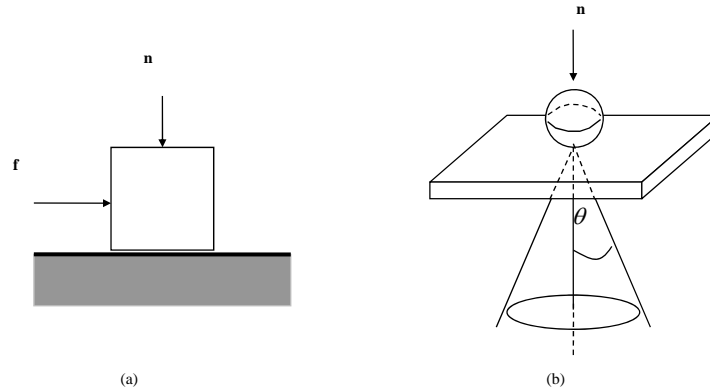
Coefficients of Friction

	μ_s	μ_k
Steel on steel	0.74	0.57
Aluminium on steel	0.61	0.47
Copper on steel	0.53	0.36
Rubber on concrete	1.0	0.8
Wood on wood	0.25-0.5	0.2
Glass on glass	0.94	0.4
Metal on metal (lub)	0.15	0.06
Ice on ice	0.1	0.03
Teflon on teflon	0.04	0.04
Human synovial joint	0.01	0.003

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

บทที่ 7 หน้า 6

Grasping and Friction



ทฤษฎีบท 1 เมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัส แรงรวมที่นิ้วกระทำต่อวัตถุวางตัวอยู่ภายในกรวยเสียดทานที่จุดสัมผัส

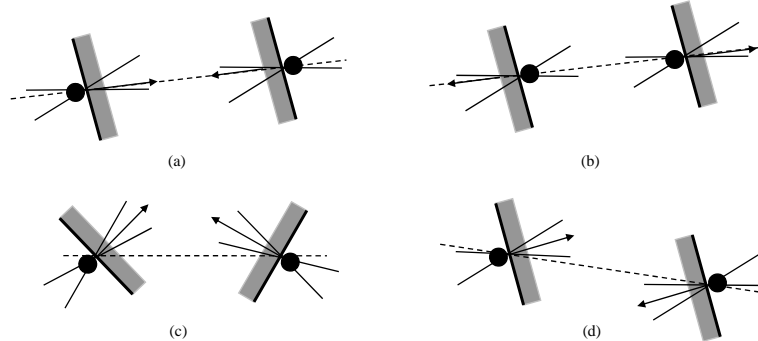
Force Closure

บทนิยาม 1 สภาพสมดุลของการจับด้วยนิ้วแข็งคือ สภาพสมดุลที่เกิดจากแรงกระทำจากนิ้วเท่านั้น (ไม่มีแรงและแรงบิดอื่นๆ เกี่ยวข้อง) โดยต้องมีอย่างน้อยหนึ่งนิ้วที่ออกแรง

บทนิยาม 2 เมื่อขนาดของแรงที่นิ้วกระทำต่อวัตถุไม่ถูกจำกัด การจับที่มีคุณสมบัติฟอร์ชโคลสเซอร์จะสามารถออกแรงหักล้างแรงหรือแรงบิดภายนอกใดๆ ที่มารบกวนได้ ทำให้วัตถุอยู่ในสภาพสมดุล ไม่ว่าจะมีการรบกวนใดๆ ก็ตาม

ทฤษฎีบท 2 เมื่อผิวสัมผัสมีความเสียดทาน การจับด้วยนิ้วแข็งซึ่งแรงกระทำจากแต่ละนิ้วอยู่ภายใน (interior) กรวยเสียดทานอย่างเคร่งครัด และสามารถทำให้วัตถุอยู่ในสภาพสมดุลของการจับ ย่อมเป็นการจับที่มีคุณสมบัติฟอร์ชโคลสเซอร์ด้วยเสมอ

Two-Fingered Force Closure

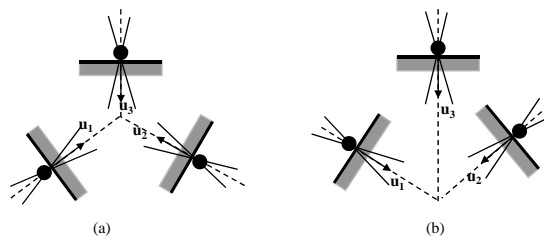


ทฤษฎีบท 3 เงื่อนไขจำเป็นและเพียงพอสำหรับจุดจับสองจุดเพื่อให้เกิดการจับที่อยู่ในสภาพสมดุล คือ เวกเตอร์ทั้งสองที่ตั้งฉากกับด้านที่สัมผัสและมีทิศทางพุ่งเข้าหาหน้าวัตถุทำมุมกันอยู่ในช่วง $(\pi - 2\theta, \pi + 2\theta)$ และเส้นเชื่อมระหว่างจุดจับสองจุดนั้นวางตัวอย่างเคร่งครัดอยู่ในกรวยเสียดทานสองด้านทั้งสองกรวย

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

บทที่ 7 หน้า 9

Concurrent Grasps



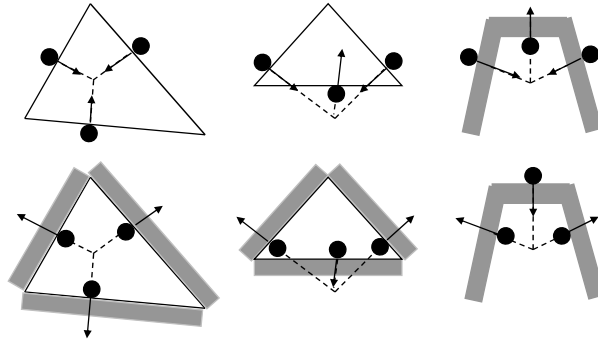
บทนิยาม 3 เซตของเวกเตอร์สแปนทางบวก (positively span) ใน \mathcal{R}^n ถ้าเวกเตอร์ใด ๆ ใน \mathcal{R}^n สามารถเขียนอยู่ในรูปผลบวกเชิงเส้นของเวกเตอร์ในเซตนี้ด้วยสัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นลบ

ทฤษฎีบท 4 เงื่อนไขจำเป็นและเพียงพอสำหรับการจับด้วยนิ้วจำนวนสามนิ้วเพื่อให้อยู่ในสภาพสมดุลโดยที่แรงที่จุดสัมผัสทั้งสามไม่เป็นศูนย์ และไม่ขนานกันคือ (Pa) เมื่อมีเส้นในแต่ละกรวยเสียดทานสองด้านที่จุดสัมผัสทั้งสามตัดกัน ณ จุด ๆ หนึ่ง และ (Pb) เวกเตอร์แรงที่วางตัวอยู่ในกรวยเสียดทานภายในที่จุดสัมผัส และขนานกับเส้นทั้งสามนั้นสแปนทางบวกใน \mathcal{R}^n

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

บทที่ 7 หน้า 10

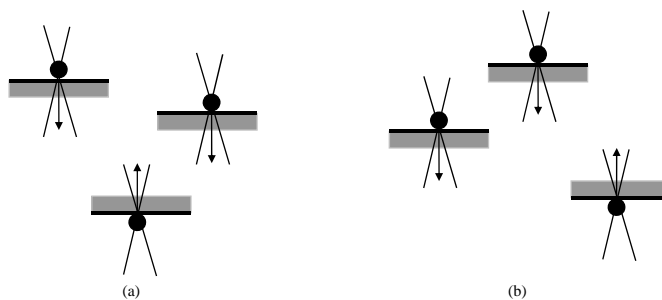
Concurrent Grasps



Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

บทที่ 7 หน้า 11

Parallel Grasps

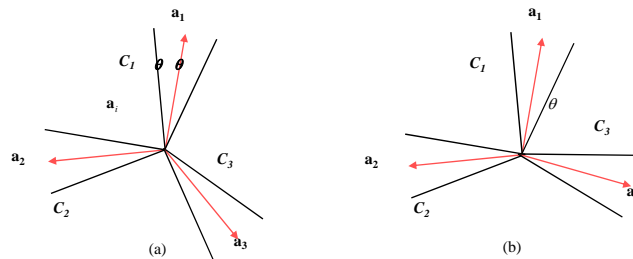


ทฤษฎีบท 5 เงื่อนไขจำเป็นและเพียงพอสำหรับการจับด้วยนิ้วจำนวนสามนิ้วเพื่อให้อยู่ในสภาพสมดุลด้วยแรงที่ขนานกันโดยที่แรงที่จุดสัมผัสทั้งสามไม่เป็นศูนย์คือ มีเส้นในกรวยเสียดทานสองด้านที่จุดสัมผัสทั้งสามขนานกัน และเวกเตอร์แรงที่ขนานกับสามเส้นนั้น (ซึ่งวางตัวอยู่ในกรวยเสียดทานภายในที่จุดสัมผัส) มีเวกเตอร์ที่ขนานกับเส้นที่อยู่กลางที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับสองเวกเตอร์ที่เหลือ

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุดแสง

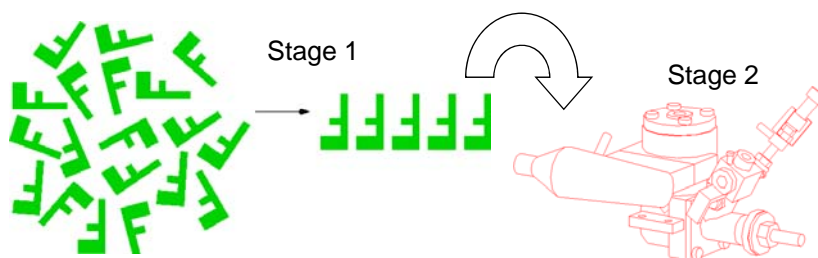
บทที่ 7 หน้า 12

Positively Span



บทนิยาม 4 กำหนดให้ $C_i (i=1,2,3)$ คือกรวยซึ่งมีกึ่งกลางคือ a_i ด้วยครึ่งมุม θ สามารถกล่าวได้ว่าเวกเตอร์สามเวกเตอร์ $a_i (i=1,2,3)$ สเปนทางบวกด้วยมุม θ (θ -positively span) ใน \mathbb{R}^2 เมื่อสามเวกเตอร์ใด ๆ $b_i \in C_i (i=1,2,3)$ ใด ๆ สเปนทางบวกใน \mathbb{R}^2

Part Manipulation



- A very important operation in automation
- Specific problems:
position, orient, sort, and separate parts

“Traditional” Parts Feeders



Commercial Vibratory Bowl Feeder
[McKnight Automation]

Programmable Part Feeder

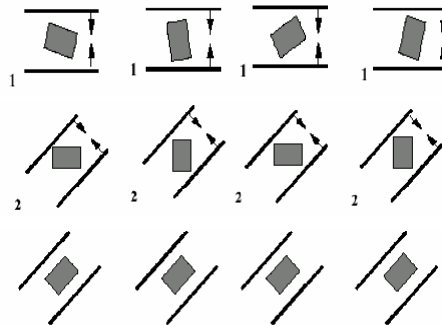
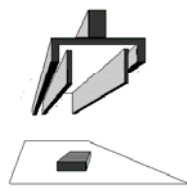


- Hardware vs. Software
 - ออกแบบและสร้างใหม่ vs โปรแกรมใหม่
- No sensors

Grasper

Ken Goldberg, "Orienting Polygonal Part without Sensors"
Algorithmica Vol.10 No.2 pages 210-225, 1993

- Squeeze action
- No sensors



Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 17

Assumptions

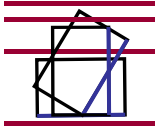
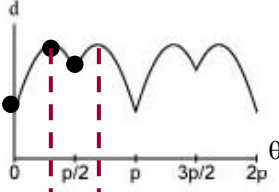
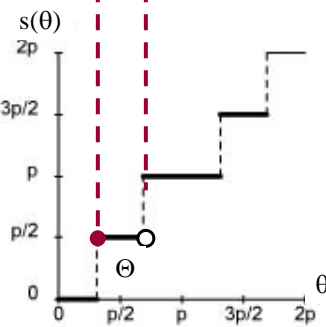
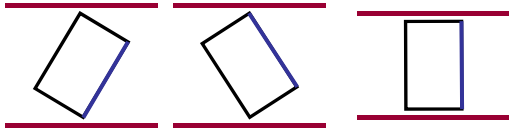
- All motions in plane and inertial forces are negligible
- Gripper consists of two parallel linear jaws
- Gripper motion orthogonal to jaws
- Convex hull treated as rigid planar polygon
- Part is isolated
- Part's initial position is constrained within jaws
- * Jaws make contact simultaneously
- Once contact made, surfaces remain in contact
- Zero friction between part and jaws

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 18

Definitions

- **Diameter function**
- **Squeeze function**

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง บทที่ 7 หน้า 19

Symmetry

- $S(\theta+T) = s(\theta)+T$; T period
- $T = 2\pi / r(1+(r \bmod 2))$
 - r - rotational symmetry
 - $r = 1$ $T = \pi$: no symmetry
 - $r = 3$ $T = \pi/3$: equilateral triangle
 - $r = 4$ $T = \pi/2$: square

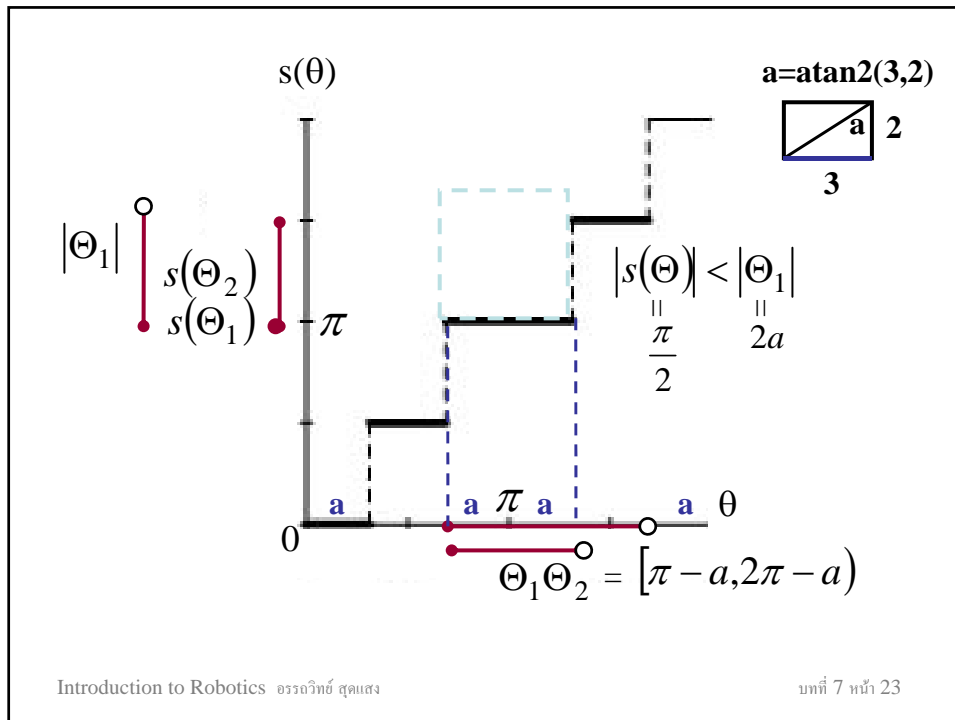
Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง บทที่ 7 หน้า 20

Parts Feeding Problem

- “Given a list of n vertices describing the convex hull of a polygonal part, find the shortest sequence of squeeze actions guaranteed to orient the part up to symmetry.”

Algorithm

- Compute the squeeze function
- Find widest step in the squeeze function and set $\Theta_1 =$ corresponding s-interval
- While there exists $|s(\Theta)| < |\Theta_i|$
 - Set $\Theta_{i+1} =$ widest s-interval
 - Increment i
- Return the list $(\Theta_1, \Theta_2, \dots)$
- Continue until $|\Theta_i| = T$



Recovering the Plan

Given $(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_i) \rightarrow i$ plans
 for j between $1 \sim i$
 A plan $\rho_j = (\alpha_j, \alpha_{j-1}, \dots, \alpha_1)$

$$\alpha_i = 0$$

for $(j = i - 1, j \geq 1, j \dots)$

$$\varepsilon_j = \frac{1}{2} (|\Theta_j| - |s(\Theta_{j+1})|)$$

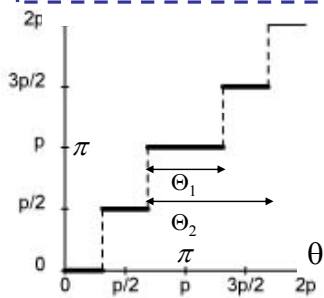
$$\alpha_j = s(\theta_{j+1}) - \theta_j - \varepsilon_j + \alpha_{j+1}$$

$$(\Theta_1, \Theta_2)$$

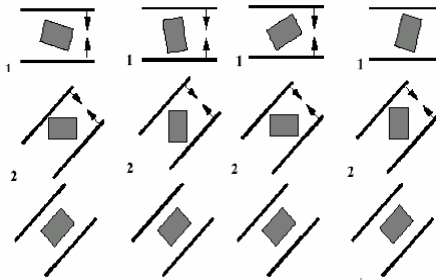
$$\alpha_2 = 0$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} (|\Theta_1| - |s(\Theta_2)|) = \frac{1}{2} \left(2a - \frac{\pi}{2} \right) = a - \frac{\pi}{4}$$

$$\alpha_2 = s(\theta_2) - \theta_1 - \varepsilon_1 + \alpha_2 = \pi - (\pi - a) - \left(a - \frac{\pi}{4} \right) = \frac{\pi}{4}$$



Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง



บทที่ 7 หน้า 25

Flexible Part Feeders

Examples:

- Parallel jaw gripper: [Goldberg 93],[Rao and Goldberg 95]
- 1 JOC and 2 JOC systems: [Erdman 95],[Erdman and Mason 96],
[Lynch 96], [Akella, Huang, Lynch Mason 97]
- Fences: [Wiegley,Goldberg,Peshkin, Brokowski 96]

New challenges:

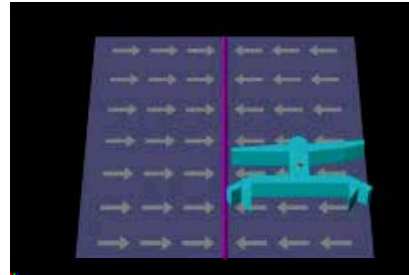
- Parts are smaller and more fragile
- Parts are manufactured in large quantities
- Efficiency, flexibility and robustness of assembly

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 26

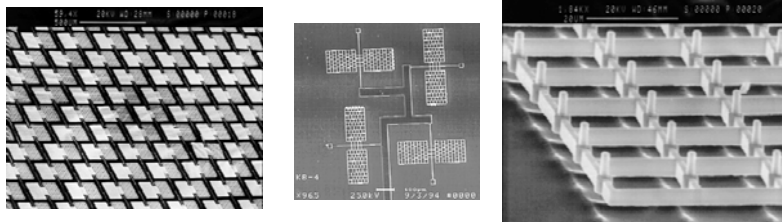
Recent Paradigm: Programmable Force Fields

- Field realized on a plane
- Force and torque exerted on the contact surface of the part
- Advantages
 - Little or no sensing
 - No damage to the parts
 - A wide variety of parts



[Simulation by Bohringer and Donald]

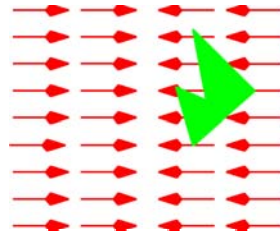
Programmable Force Fields: Implementation



- MEMS: Böhringer, Donald, McDonald 94-99
- Arrays of directed air jets: Berlin *et al.* 98-99
- Arrays of small motors, Messner *et al.* 97-00
- Vibrating plates, Reznik and Canny 98-01 and others

Programmable Force Fields: Analysis

- Abstraction:



- Part is subjected to force F and torque M
- Equilibrium configuration: position and orientation fixed
- Part is at an equilibrium: $F = 0$ and $M = 0$

Equilibrium Configurations: A Brief History

Task: Define fields in which a given part has few equilibrium configurations

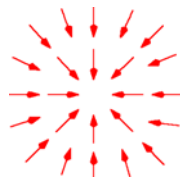
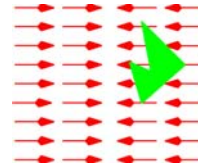
Overview:

- 1994: $O(kn^2)$ and $O(kn)$
and conjecture for unique equilibrium
- 1997: 2
- 2000: 1 existential proof
- 2001: 1 CONSTRUCTIVE PROOF

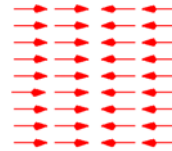
1994: Squeeze and Unit Radial Fields

[Böhringer, Donald, McDonald]

- Squeeze Fields:
 $O(kn^2)$ equilibria for polygons
- Unit Radial + δ Squeeze:
 $O(kn)$ equilibria for polygons



+ δ



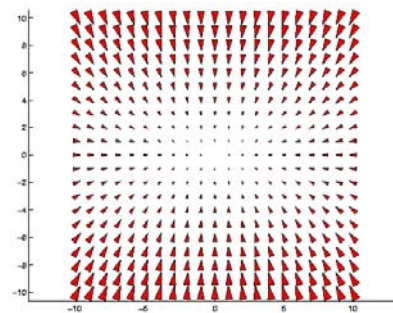
Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 31

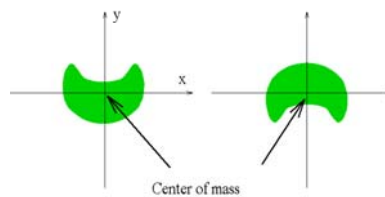
1997: Elliptic Field

[Kavraki]

$(-ax, -bx)$ with
 $a \neq b, a, b > 0$



2 stable equilibria



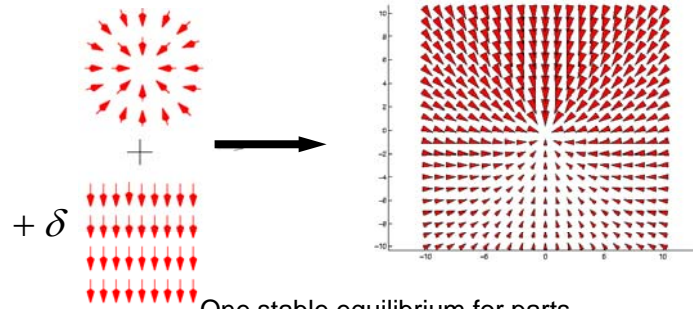
Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 32

2000: One Equilibrium

[Böhringer, Donald, Kavraki and Lamiroux] [Lamiroux and Kavraki]

Unit radial + δ Constant



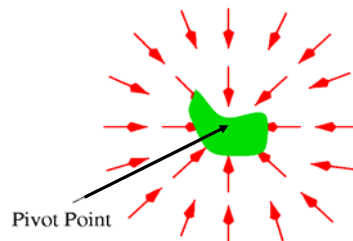
One stable equilibrium for parts
whose center of mass \neq pivot point

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 33

Pivot Point

A fixed point on the part's coordinate frame situated
at the center of the radial field at equilibrium



In general: pivot point \neq center of mass

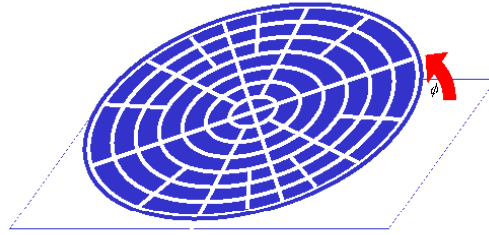
Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 34

2000: One Equilibrium

[Böhringer, Donald, Kavraki and Lamiroux] [Lamiroux and Kavraki]

Unit Radial + δ Constant



Problem: proof is not constructive

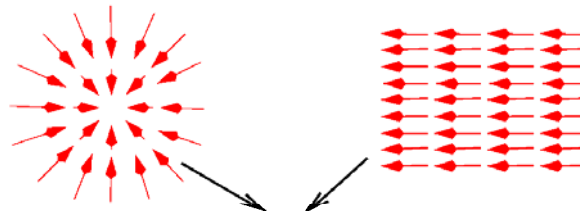
Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 35

2001: One Equilibrium + Constructive Proof

[Sudsang and Kavraki]

Linear Radial + Constant



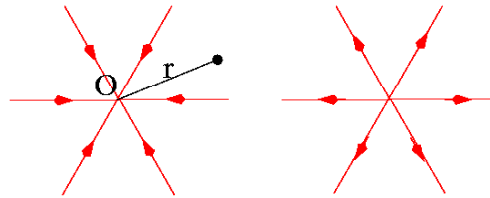
Combined in a way that depends
on the GEOMETRY of the part

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 36

Notation: Radial Field

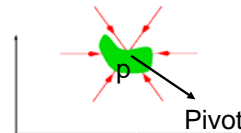
$$\langle O, f(r) \rangle$$



Ex. $\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, 1 \rangle$ is the unit radial field

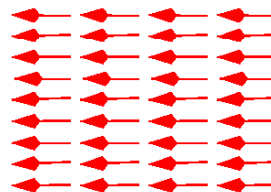
$\langle O, h + kr \rangle$ is a **linear radial** field (h, k constant) centered at O

Pivot point defined in a similar way:



Notation: Constant Field

$$f(x, y) = \begin{pmatrix} -\delta \\ 0 \end{pmatrix}$$

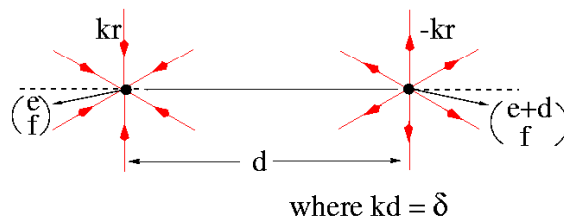


Important: A constant field can be written as
the sum of two linear radial fields

Constant Field as Sum of Linear Radial Fields

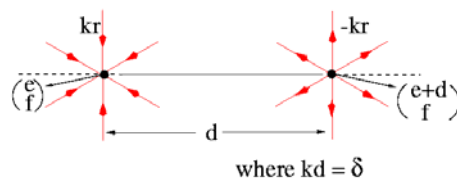
$f(x, y) = \begin{pmatrix} -\delta \\ 0 \end{pmatrix}$ is a combination of

$\langle \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix}, kr \rangle$ and $\langle \begin{pmatrix} e+d \\ f \end{pmatrix}, -kr \rangle$, where $kd = \delta$

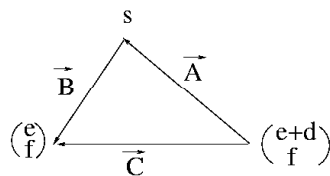


Constant Field as Sum of Linear Radial Fields

$f(x, y) = \begin{pmatrix} -\delta \\ 0 \end{pmatrix}$



Proof:



$$f(s) = k\vec{A} + k\vec{B} = k\vec{C} = k\begin{pmatrix} -d \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -kd \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\delta \\ 0 \end{pmatrix}$$

Unique Equilibrium: Main Result

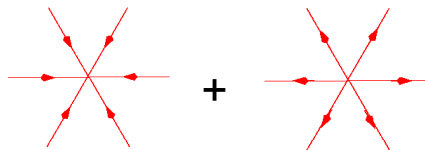
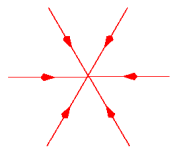
$$\begin{pmatrix} -kd \\ 0 \end{pmatrix} + \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{h} + (2k + c)\mathbf{r} \right\rangle$$

- $d, h, k, c > 0$
- d is the distance of the center of mass and the pivot point under:

$$K = \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{h} + (k + c)\mathbf{r} \right\rangle$$

- If $d > 0$ there is a unique equilibrium and at equilibrium the pivot point under K at $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ and center of mass at $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix}$

Unique Equilibrium



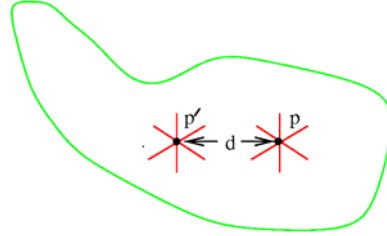
~~$$\begin{pmatrix} -kd \\ 0 \end{pmatrix}$$~~

~~$$\left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{h} + (2k + c)\mathbf{r} \right\rangle + \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, -k\mathbf{r} \right\rangle$$~~

$$\left\langle \begin{pmatrix} -d \\ 0 \end{pmatrix}, k\mathbf{r} \right\rangle$$

$$\left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{h} + (k + c)\mathbf{r} \right\rangle$$

Unique Equilibrium



$$F_1 = \left\langle \begin{pmatrix} -d \\ 0 \end{pmatrix}, k\mathbf{r} \right\rangle \quad F_2 = \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, h + (k+c)\mathbf{r} \right\rangle$$

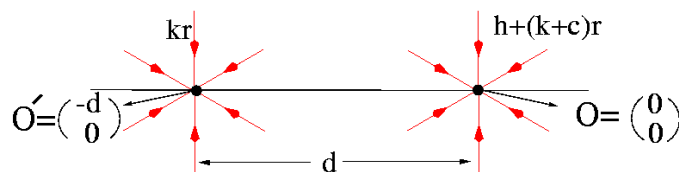
p : pivot point under F_2

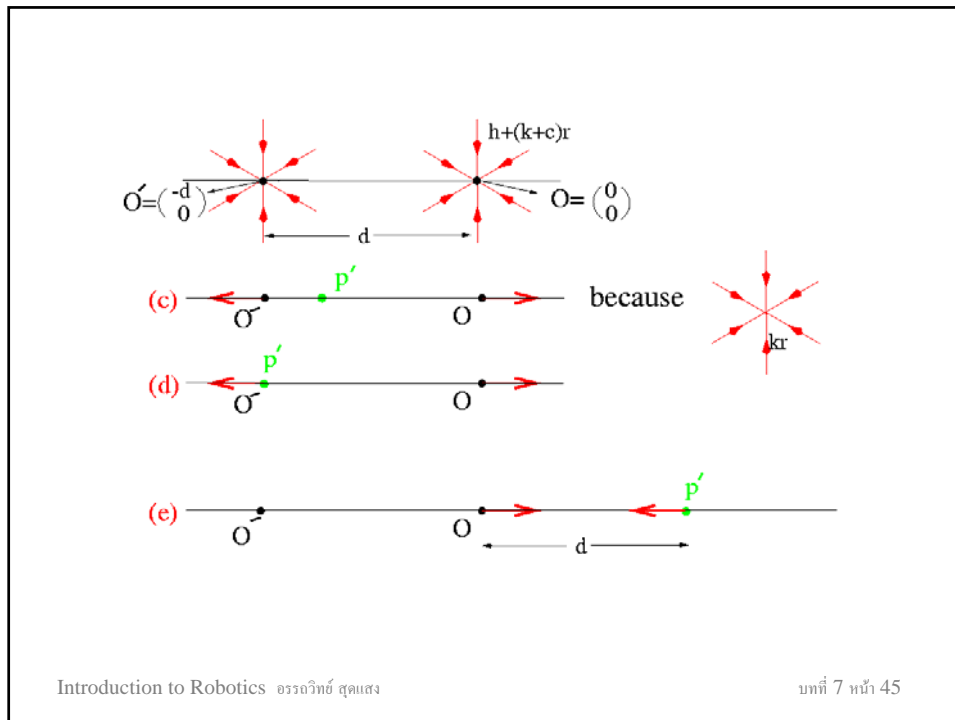
p' : center of mass

d : distance of p and p'

Why a Unique Equilibrium?

Step 1: Identifying possible equilibria





Step2: Stability Using Potential Fields

Plane: Potential

$$u(x, y) = kdx + h\sqrt{x^2 + y^2} + \frac{2k + c}{2}(x^2 + y^2)$$

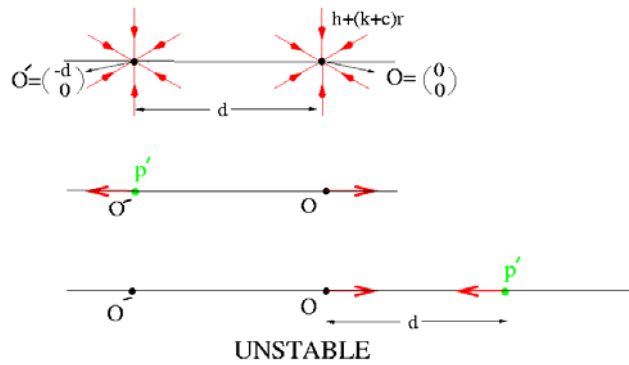
Configuration Space: Lifted Potential

$$U(q) = \int_{S_q} u(r) dr$$

S_q = surface occupied by the part at configuration q

Stability Using Potential Fields

- Equilibria Configurations = Local Minima of U
- We show U has a local minimum (and a local maximum)



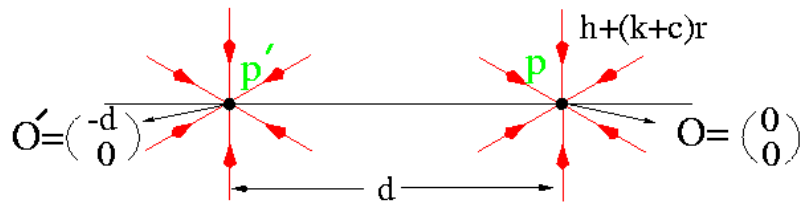
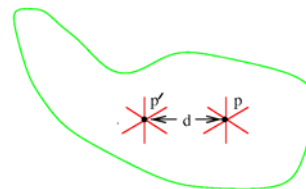
Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 47

Unique Equilibrium

p : pivot point under F_2

p' : center of mass



$$F_1 = \left\langle \begin{pmatrix} -d \\ 0 \end{pmatrix}, kr \right\rangle$$

$$F_2 = \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, h + (k + c)r \right\rangle$$

Introduction to Robotics อรรถวิทย์ สุคนแสง

บทที่ 7 หน้า 48