

โครงร่างวิทยานิพนธ์

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย)	การผสมผสานสนามแรงที่โปรแกรมได้เพื่อการจัดวัตถุบนระนาบแบบเร็ว
ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ)	Combination of Programmable Force Fields for Fast Planar Part Manipulation
เสนอโดย	นายพีรพงษ์ ธนกิจ
รหัสประจำตัว	4770387121
สาขาวิชา / ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ / วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
สถานที่ติดต่อ	ห้อง 20-03 ชั้น 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์	01-5971475
E-Mail	g47pto@cp.eng.chula.ac.th
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อ.ดร. อรรถวิทย์ สุดแสง attawith@cp.eng.chula.ac.th
คำสำคัญ (ภาษาไทย)	สนามแรงที่โปรแกรมได้, การจัดเรียงวัตถุ
คำสำคัญ (ภาษาอังกฤษ)	Programmable Force Field, Part Manipulation

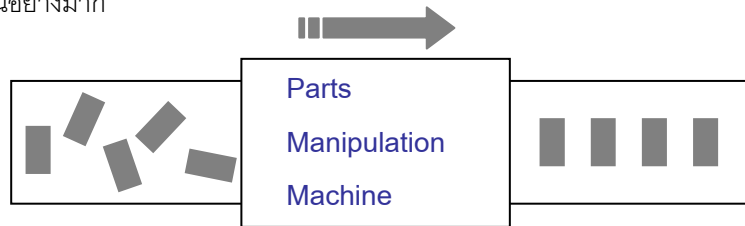
การผสมผสานสนามแรงที่โปรแกรมได้ เพื่อการจัดวัตถุบนระนาบแบบเร็ว

Combination of Programmable Force Fields for Fast Planar Part Manipulation

นายพิรพงษ์ ธนกิจ
เลขประจำตัว 4770387121

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในวงการอุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนอัตโนมัติ (Automated Assembly) ก่อนที่ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วนจะสามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกันได้ จำเป็นจะต้องจัดตำแหน่งและทิศทางการวางของชิ้นส่วนนั้นๆ ให้เหมาะสมเสียก่อน ดังตัวอย่างในรูปที่ 1 ชิ้นส่วนในสายการผลิตที่วางอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบทางซ้าย จะผ่านเข้าเครื่องจัดเรียงให้ได้ตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสมออกมาทางขวา เพื่อไปสู่กระบวนการถัดไป เป็นต้น แต่ปัญหาที่พบก็คือ เครื่องจักรที่ทำหน้าที่ในการจัดเรียงชิ้นส่วนดังกล่าวนี้ ไม่มีความยืดหยุ่น กล่าวคือ แต่ละเครื่องก็จะใช้งานได้กับชิ้นส่วนที่มีรูปแบบตามที่กำหนด หากไม่ได้ก็จะต้องเปลี่ยนเครื่องจักรใหม่ ทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมาก



รูปที่ 1 รูปจำลองเครื่องจัดเรียงตำแหน่งและทิศทางของชิ้นส่วน

จากปัญหาดังกล่าว ก่อให้เกิดแนวคิดที่ว่า น่าจะมีวิธีการในการจัดการกับการจัดเรียงชิ้นส่วนที่มีรูปร่างลักษณะใดก็ได้ เป็นต้นว่าการใช้ sensor ตรวจจับวัตถุ เพื่อเป็นข้อมูลป้อนให้กับซอฟต์แวร์หรืออุปกรณ์ควบคุมเครื่องจักร อย่างไรก็ตาม แนวคิดดังกล่าวก็มีปัญหาในเรื่องข้อจำกัดของตัว sensor และวิธีการที่จะตรวจสอบชิ้นส่วนให้ได้ตลอดเวลาว่า ณ เวลาปัจจุบัน ชิ้นส่วนอยู่ในลักษณะเช่นใด ซึ่งมีความยุ่งยาก ทำให้เกิดแนวคิดใหม่ในการจัดเรียงวัตถุโดยไม่ใช้ sensor ตรวจจับขึ้น ยกตัวอย่างเช่น Parallel Gripper [1] เป็นต้น ซึ่งต่อมา ได้มีการสร้างแบบจำลองที่เลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์เหล่านั้น แบบจำลองดังกล่าวเรียกว่า สนามแรงที่โปรแกรมได้ (Programmable Force Field) คือ พื้นระนาบที่สามารถสร้างแรงกระทำต่อวัตถุในทิศทางขนานกับระนาบนั้น ตามคุณลักษณะของแรงรูปแบบต่างๆ ที่สามารถกำหนดได้ ซึ่งแรงเหล่านั้น จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวไปยังตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการได้ โดยไม่ต้องมีเครื่องมือตรวจจับและไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของตำแหน่งเริ่มต้นของวัตถุ

K. F. Bohringer, B. Donald, และ N. MacDonald ได้เริ่มนำเสนอแนวคิดของสนามแรงนี้ใน [2, 3] โดยได้นำมาใช้ในการอธิบายถึง การสร้างและปรับเปลี่ยนสถานะของพื้นผิวที่สั่นสะเทือน (Vibrating Surface) ที่สามารถควบคุมการสั่นสะเทือนได้ เพื่อจัดเรียงวัตถุให้เป็นไปตามต้องการโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือตรวจจับ พื้นผิว

สันสะเทือนจะถูกกำหนดให้สร้างสนามแรง 2 สนาม เลียนแบบการใช้ Parallel Gripper ใน [1] และโดยการเปลี่ยนรูปแบบของสนามแรงตามลำดับอย่างต่อเนื่อง ในที่สุดวัตถุจะไปอยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ รวมทั้งยังได้เสนออัลกอริทึมที่ใช้เวลาเชิงพหุนามที่สร้างลำดับของสนามแรงเพื่อจัดเรียงวัตถุ ที่ได้ทำการพิสูจน์แล้วว่าทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ และยังได้แสดงวิธีการวางแผนการกำหนดสนามแรงสำหรับอุปกรณ์ที่สร้างสนามแรงได้อย่างจำกัดอีกด้วย อย่างไรก็ตาม แรงจากสนามแรงที่กระทำต่อวัตถุเป็นลักษณะของแรงที่ไม่ต่อเนื่อง คือจะมีแรงกระทำในส่วนที่เป็น Vibrating Surface เป็นจุดๆ ไป อีกทั้งต้องสร้างสนามแรงเป็นลำดับหลายขั้นตอนตามระยะเวลาและขึ้นกับความซับซ้อนของรูปร่างวัตถุ

ต่อมา J. Luo และ L. E. Kavraki ได้ศึกษาการใช้สนามแรงหลายๆ ชุดเพิ่มเติม โดยได้เพิ่มการศึกษาในส่วนของ Dynamic ของการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้สนามแรงจริง เช่น ผลของแรงเสียดทาน เป็นต้น และได้แนะนำเสนอเป็นการใช้สนามแรงหลายชุดที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแรงแต่ละชุดไปแต่ละช่วงเวลาใน [7] ซึ่งสนามแรงแต่ละชุดก็มีคุณสมบัติกับวัตถุเฉพาะอย่าง อาจจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ หรือเฉพาะการหมุนของวัตถุรอบจุดใดจุดหนึ่งได้ เพื่อแบ่งการจัดเรียงวัตถุเป็นขั้นไปอย่างชัดเจน

นอกจากการใช้สนามแรงหลายชุดแล้ว ในอีกแนวทางหนึ่ง L. E. Kavraki ได้เริ่มนำเสนอการจัดเรียงวัตถุด้วยสนามแรงเพียงชุดเดียว โดยใช้ Elliptic Potential Field [4] ซึ่งจะให้แรงกระทำต่อวัตถุเป็นแรงที่แปรผันตามระยะห่างของวัตถุกับจุดศูนย์กลางของสนามแรง และยังได้วิเคราะห์ถึงพฤติกรรม รวมทั้งทำนายภาวะสมดุลของวัตถุภายใต้สนามแรงดังกล่าว ซึ่งสรุปได้ว่า สำหรับวัตถุโดยส่วนใหญ่ซึ่งไม่สมมาตร วัตถุจะเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยรูปแบบการจัดเรียงตัวที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าจะเป็นรูปแบบใดที่แน่นอน

นอกจากนี้ F. Lamiroux และ L. E. Kavraki ยังได้นำเสนอสนามแรงรูปแบบใหม่ ที่ประกอบด้วยสนามแรงขนาดคงที่ มีทิศพุ่งเข้าจุดศูนย์กลางจุดหนึ่ง (Unit Radial Field) และสนามแรงที่สร้างแนวคงที่ (Constant Field) ใน [5] โดยสามารถจัดเรียงวัตถุที่ไม่สมมาตร หรือสมมาตรและมีคุณสมบัติเฉพาะบางอย่าง ให้เข้าสู่ภาวะสมดุลรูปแบบเดียวได้ แต่ก็ยังมีปัญหาตรงที่ไม่สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดลักษณะสนามแรงตลอดจนตำแหน่งและทิศทางที่วัตถุเข้าสู่สมดุลได้โดยตรง ทั้งนี้ ได้มีการนำเสนอรวมกันกับ Elliptic Filed พร้อมกับตัวอย่างการทดลองและแนวทางในการนำไปใช้จริง ร่วมกับ K. F. Bohringer และ B. Donald ใน [6]

ต่อมา A. Sudsang และ L. E. Kavraki ได้นำเสนอการออกแบบสนามแรงรูปแบบใหม่ใน [8] สำหรับการจัดเรียงวัตถุเกือบทุกชนิด ให้เปลี่ยนการวางตัวไปเป็นดังที่ต้องการ โดยใช้เพียงสนามแรงเชิงรัศมี (Radial Field) และสนามแรงที่สร้างแนวคงที่ (Constant Field) ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแรงตลอดการจัดเรียง ไม่ใช่เครื่องมือตรวจจับและไม่มีเสื่อนไขเรื่องตำแหน่งเริ่มต้นของวัตถุ และโดยการพิสูจน์ทางเรขาคณิต ทำให้สามารถหาวิธีการกำหนดค่าตัวแปรควบคุมในการสร้างสนามแรง เพื่อให้สามารถจัดเรียงวัตถุให้ไปหยุดนิ่ง ณ ตำแหน่งและทิศทางใดๆ ที่ต้องการได้ นอกจากนี้ใน [9] A. Sudsang และ L. E. Kavraki ยังได้พิสูจน์ถึงวิธีการใช้สนามแรงชุดนี้ชุดเดียว ในการจัดเรียงวัตถุที่มีหลายรูปแบบได้ และ A. Sudsang ยังได้นำผลที่ได้จากงานวิจัยเดิมนี มาพัฒนาเพิ่มเติมเป็นการจัดเรียงวัตถุ 2 ชั้น [10] โดยมีหลักการ คือ ทำการดึงวัตถุทั้ง 2 ชั้นด้วยกันด้วยแรงที่แปรผันตามระยะทาง จากนั้นใช้สนามแรงอีกแบบ “ดึง” วัตถุทั้ง 2 ชั้นแยกออกจากกันไปยังพื้นที่ 2 ผังของสนามแรง แล้วจึงจัดเรียงวัตถุแต่ละชั้นในแต่ละผังของสนามแรงให้ได้ตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการได้

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น เป็นที่น่าสังเกตว่า สนามแรงรูปแบบต่างๆ ที่ได้มีการนำเสนอมานั้น ผู้นำเสนอนั้นประเด็นความเป็นไปได้ในการทำให้วัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุลเท่านั้น แต่ไม่ได้กล่าวถึงคุณสมบัติ

อื่นๆ ถ้าหากมีการนำสนามแรงไปใช้งาน เช่น ระยะเวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ภาวะสมดุล เป็นต้น เพราะเป็นไปได้อีกว่า สนามแรงที่มีประสิทธิภาพในแง่ของรูปแบบการเข้าสู่ภาวะสมดุลดี อาจมีข้อด้อยในเรื่องของเวลาที่ใช้จัดเรียงวัตถุที่นานเกินไป จนไม่สามารถนำสนามแรงเหล่านั้นไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายที่จะที่จะศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจัดเรียงวัตถุของสนามแรงรูปแบบต่างๆ ในแง่ของเวลาที่ใช้ในการจัดเรียงวัตถุซึ่งไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน และหาวิธีการผสมผสานสนามแรงรูปแบบใหม่ ที่มีประสิทธิภาพในการจัดเรียงวัตถุได้ดีกว่าสนามแรงที่มีอยู่เดิม ทั้งในเรื่องของรูปแบบการเข้าสู่ภาวะสมดุลและเวลาที่ใช้จัดเรียงวัตถุ เพื่อให้เป็นทางเลือกใหม่ในการนำสนามแรงไปใช้งานจริงได้ดีกว่าสนามแรงที่เคยมีการนำเสนอมา

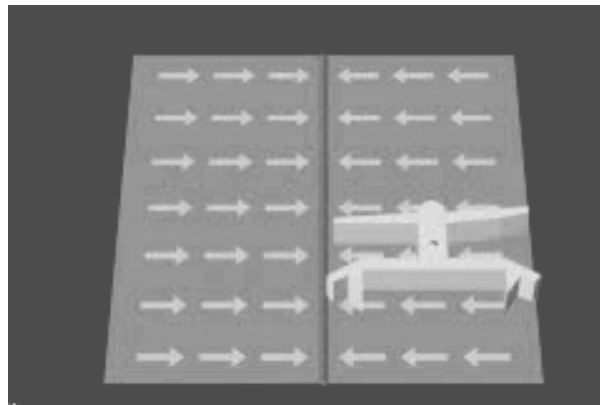
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้สนามแรงรูปแบบต่างๆ ในเชิงของการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ภาวะสมดุลที่มีเสถียรภาพ และใช้ผลการศึกษาในการออกแบบวิธีการผสมผสานสนามแรงรูปแบบใหม่ ที่ทำให้สามารถจัดเรียงวัตถุเข้าสู่ตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการได้เร็วขึ้น โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือตรวจจับใดๆ ระหว่างที่จัดเรียงวัตถุ

3. แนวคิดของการวิจัย

3.1 นิยามของสนามแรงและการทำงาน

สนามแรงที่กำหนดได้ตามที่กล่าวถึงใน [2, 3] เป็นแบบจำลองที่อธิบายอุปกรณ์จัดเรียงวัตถุในรูปของระนาบ 2 มิติ ที่สามารถให้กำเนิดแรงในแนวขนานกับระนาบนั้น กระทำต่อผิวสัมผัสของวัตถุที่วางอยู่บนระนาบนั้นได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 ทั้งนี้ รูปแบบและลักษณะของแรงที่เกิดขึ้น สามารถกำหนดและปรับเปลี่ยนได้



รูปที่ 2 รูปจำลองแนวคิดของสนามแรง

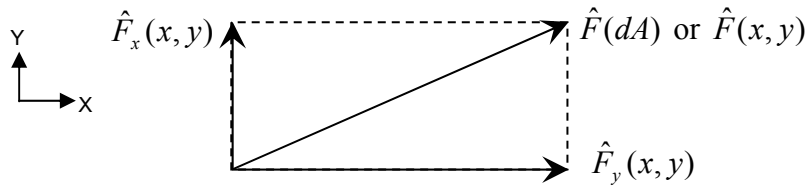
สำหรับวัตถุใดๆ แรงที่กระทำต่อวัตถุในระนาบ 2 มิติเนื่องจากสนามแรง จะส่งผลต่อการเคลื่อนที่และการหมุนของวัตถุไปพร้อมๆ กัน ในกรณีวัตถุเป็นวัตถุเกร็ง (Rigid Body) เราสามารถหาแรงลัพธ์และทอร์กลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุทั้งก้อนเนื่องจากสนามแรงได้ โดยแทนอยู่ในรูปของแรงและทอร์กที่กระทำ ณ ศูนย์กลางมวลของวัตถุ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$F_{FF} = \int_A \hat{F}(dA)dA$$

$$T_{FF} = \int_A [r \times \hat{F}(dA)]dA$$

เมื่อ $\hat{F}(dA)$ หรืออาจเขียนในรูป $\hat{F}(x, y)$ คือ แรงจากสนามแรง ที่กระทำต่อพื้นที่ dA บนวัตถุ ที่อยู่เหนือจุด dA ซึ่งมีพิกัด (x, y) บนระนาบของสนามแรง และ r คือระยะห่างจากจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ กับพื้นที่ย่อย dA บนสนามแรงนั้น

อนึ่ง ตามหลักกลศาสตร์ เราสามารถแตกแรง $\hat{F}(x, y)$ ดังกล่าวนี้ออกเป็นแรงในแนวแกน X แทนด้วย $\hat{F}_x(x, y)$ และแรงในแนวแกน Y แทนด้วย $\hat{F}_y(x, y)$ ได้ (ดังรูปที่ 3) ทั้งนี้ เพื่อความสะดวกเวลาทำการคำนวณจริง และสำหรับการอธิบายแรงจากสนามแรงในงานวิจัยอื่นๆ จากนั้นไปก็จะขออธิบายในรูปของแรงในแนวแกน XY นี้เพื่อให้เป็นรูปแบบเดียวกันและง่ายต่อการทำความเข้าใจ



รูปที่ 3 การแตกแรงจากสนามแรงตามแนวแกนของระนาบของสนามแรง ซึ่งไม่มีผลต่อการคำนวณแรงและทอร์กลัพธ์

นอกจากแรงเนื่องจากสนามแรงแล้ว ยังมีแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของวัตถุกับสนามแรง ซึ่งคอยต้านการเคลื่อนที่และการหมุนของวัตถุบนสนามแรงนั้นอยู่อีกด้วย ซึ่งแรงดังกล่าวนี้ จะเป็นปัจจัยสำคัญที่จะ “ลดทอน” พลังงานจลน์ของวัตถุเพื่อให้เข้าสู่ภาวะสมดุลสถิต (หยุดนิ่ง) โดยได้เลือกใช้ Viscous Friction Model ซึ่งเหมาะสมในการคำนวณเกี่ยวกับสนามแรงมากกว่า Coulomb Friction Model ที่เป็นแบบ Threshold ประกอบในการคำนวณ เหมือนกับที่ใช้ใน [7] โดยมีกานิยาม Friction Model ของแรงเสียดทานเป็น

$$f_d = -kv$$

เมื่อ k เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดทั้งสนามแรง

v เป็นความเร็วของวัตถุ

โดยในการคำนวณแรงและทอร์กเนื่องมาจากความเสียดทานของวัตถุทั้งก้อนนั้น สามารถคำนวณได้ด้วยแบบจำลองนี้ในระดับ Macro Scale (คือ ในระดับของวัตถุทั้งก้อน) ตามสมการ:

$$F_d = \int_A (-kv) dA = -kAv_c \quad T_d = \int_A (-k)(r \times v) dA = -\frac{k\omega I_z}{\rho}$$

เมื่อ v_c คือความเร็วของวัตถุที่จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ

ω คือ ความเร็วเชิงมุมรอบจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ

I_z คือ Moment of Inertia รอบจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ

ρ คือความหนาแน่นต่อพื้นที่ของวัตถุ

ซึ่งแรงและทอร์กเนื่องจากความเสียดทาน เมื่อนำไปรวมกับแรงและทอร์กเนื่องจากสนามแรง ก็ สามารถคำนวณหาความเร่งและความเร่งเชิงมุมของวัตถุ เพื่อนำไปใช้การคำนวณการเคลื่อนที่ได้จากสมการ

$$F_{FF} + F_d = \sum F = Ma = (\rho A)a \quad \text{และ} \quad T_{FF} + T_d = \sum T = I_z \alpha$$

เมื่อ a คือความเร่ง และ α คือความเร่งเชิงมุมของวัตถุ

ทั้งนี้ เงื่อนไขในการพิจารณาว่าวัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุลของวัตถุ จะพิจารณาได้จาก

$$\sum F = 0 \quad \text{และ} \quad \sum T = 0$$

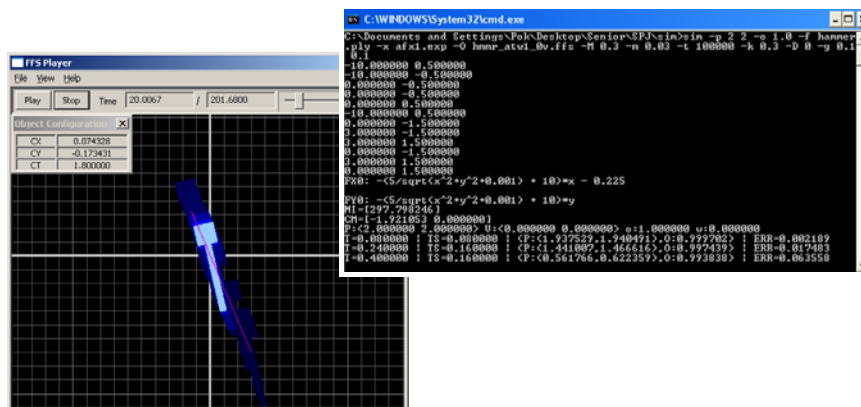
3.2 การนำสนามแรงมาใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

แม้ว่าจะได้มีการออกแบบสนามแรงที่มีประสิทธิภาพในการจัดเรียงวัตถุออกมาหลายรูปแบบ แต่ปัญหาที่ยังคงมีอยู่ก็คือ การสร้างเครื่องมือที่สามารถสร้างสนามแรงได้ตามทฤษฎี แม้ว่าใน [6] จะได้กล่าวถึงแนวคิดในการสร้างเครื่องมือดังกล่าวก็ตาม แต่ด้วยเครื่องมือที่มีอยู่ ไม่ว่าจะเป็น Vibrating Plate, MEMS Actuator Array, etc. ต่างก็มีข้อจำกัดตรงที่แรงที่อุปกรณ์เหล่านี้สร้างขึ้น มีลักษณะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่สนามแรงตามทฤษฎีส่วนใหญ่เป็นแบบที่แรงมีลักษณะต่อเนื่องทั่วพื้นผิวระนาบ ทำให้แทบไม่มีผลจากการทดลองจริงถึงความสำเร็จในการใช้สนามแรงที่คิดค้นขึ้นจัดเรียงวัตถุจริงเลย

จนกระทั่งไม่นานนี้ K. Varsos, H. Moon และ J. Luntz ได้นำเสนอเครื่องมือที่สามารถสร้างสนามแรงแบบ Elliptic Field ใน [11] โดยเครื่องมือดังกล่าวอาศัยหลักการของการไหลของอากาศ ซึ่งสามารถแปลงเป็นสนามแรงแบบ Elliptic Field หรือสนามแรงแบบอื่นๆ บางรูปแบบ เช่น Constant Field เป็นต้น โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนเครื่องมือเล็กน้อย ทั้งยังได้ทดสอบจัดเรียงวัตถุจริงภายใต้ Elliptic Field ที่สร้างขึ้นและให้ผลเป็นที่น่าพอใจระดับหนึ่งอีกด้วย นับเป็นครั้งแรกที่มีการสร้างสนามแรงแบบต่อเนื่องเพื่อการจัดเรียงวัตถุได้จริง

3.3 เครื่องมือทดสอบสนามแรง : โปรแกรมจำลองสถานการณ์

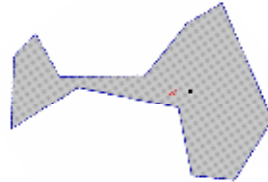
ดังที่กล่าวมาแล้วว่า งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษาโดยต้องทำการทดสอบผลของสนามแรงรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลที่มีเสถียรภาพ เพื่อการนั้น จึงได้ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์สำหรับทดสอบสนามแรงที่โปรแกรมได้แบบต่างๆ ที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรมใน [12] เป็นเครื่องมือช่วยในการทดสอบ (ดูรูปที่ 4) ทั้งนี้ ได้กำหนดค่าปัจจัยควบคุมต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของวัตถุ, สัมประสิทธิ์ความเสียดทานใน Viscous Friction Model ซึ่งเป็นโมเดลแรงเสียดทานที่ใช้อยู่ใน [7, 12], ระดับความคลาดเคลื่อนในการประมวลผล, รูปร่างวัตถุ ตลอดจนคุณสมบัติตอนเริ่มต้นของวัตถุ (ตำแหน่ง, ทิศทาง, ความเร็ว, ความเร็วเชิงมุม) ในการทดสอบกับสนามแรงรูปแบบต่างๆ ให้มีค่าเหมือนๆ กัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้ชัดเจน



รูปที่ 4 ภาพตัวอย่างของโปรแกรมจำลองที่จะใช้ในการทดสอบสนามแรงที่ออกแบบ

3.4 การทดสอบคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้สนามแรง

ในการทดสอบเบื้องต้น เราได้เลือกเอาสนามแรงที่มีรูปแบบของภาวะสมมูลที่มีเสถียรภาพเป็นจำนวนคงที่ไม่ขึ้นกับวัตถุ ซึ่งมีอยู่ 3 รูปแบบ ทดสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุรูปร่างเดียวกัน (ดูรูปที่ 5) โดยมีค่าความหนาแน่นของวัตถุต่อพื้นที่เป็น 0.05 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานใน Viscous Model เป็น 0.01 ทุกการทดสอบภายใต้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 5 ภาพรูปร่างวัตถุที่จะใช้ในการทดสอบเบื้องต้น

ทั้งนี้ ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ภายใต้สนามแรงแต่ละรูปแบบ เป็นดังนี้

3.4.1 Elliptic Field [4, 6]

สนามแรงแบบ Elliptic Field จะประกอบไปด้วยแรงที่มีทิศทางพุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางจุดหนึ่ง (ซึ่งเราจะเรียกเป็นจุดศูนย์กลางสนามแรง) และมีขนาดของแรงแปรผันตามระยะทาง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแยกเป็นแรงในแนวแกนระนาบ XY ของสนามแรงได้เป็น:

$$\hat{F}_x(x, y) = -\alpha x \qquad \hat{F}_y(x, y) = -\beta y$$

โดยที่ $\alpha, \beta > 0$ และ $\alpha \neq \beta$

อนึ่ง Radial Field ที่ใช้ใน [7] ก็จัดเป็น Elliptic Field เช่นกัน เพียงแต่ในกรณีดังกล่าว $\alpha = \beta$

เราได้ทำการทดสอบจำลองสถานการณ์โดยกำหนดค่าให้ $\alpha = 2$ และ $\beta = 1$ โดยให้วัตถุมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางสนามแรง และมุมที่แกนวัตถุทำกับแกนของสนามแรง มีค่าต่างๆ กันไป

ผลการทดสอบ พบว่า วัตถุสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ภาวะสมมูลได้ โดยตำแหน่งศูนย์กลางมวลของวัตถุจะอยู่ที่ศูนย์กลางของสนามแรง นอกจากนี้ จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่า α, β ไปเล็กน้อย ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการเข้าสู่ภาวะสมมูลของวัตถุแต่อย่างใด หาก α, β ยังคงคุณสมบัติที่กล่าวไว้ข้างต้นได้

อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบยังพบว่า ที่ภาวะสมมูลของวัตถุ วัตถุมีการจัดเรียงตัวได้ 2 รูปแบบ (ดูรูปที่ 6) ซึ่งไม่อาจทำนายได้ว่าวัตถุจะเข้าสู่ภาวะสมมูลแบบใด ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของวัตถุ ตรงตามที่ได้มีการนำเสนอไว้ใน [4]

3.4.2 Unit Radial & Constant Field [5, 6]

สนามแรงรูปแบบนี้ประกอบขึ้นจาก 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นสนามแรงเชิงรัศมีที่มีทิศทางพุ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางสนามแรงเช่นเดียวกับ Elliptic Field เพียงแต่ขนาดของแรงจะเป็นค่าคงที่ ไม่แปรผันตามระยะทาง อีกส่วนหนึ่งจะเป็นสนามแรงคงที่ที่มีทิศทางพุ่งไปทางใดทางหนึ่ง ดังนั้น แรงเนื่องจาก Field นี้ที่กระทำต่อวัตถุ จึงสามารถเขียนเป็นสมการแยกตามแกนระนาบ XY สนามแรงได้เป็น:

$$\hat{F}_x(x, y) = -\frac{a(x)}{\sqrt{x^2 + y^2}} - g \qquad \hat{F}_y(x, y) = -\frac{a(y)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

ทั้งนี้ $a > 0$ และ $0 < g < k$ ค่าหนึ่ง สำหรับเฉพาะแต่ละวัตถุ

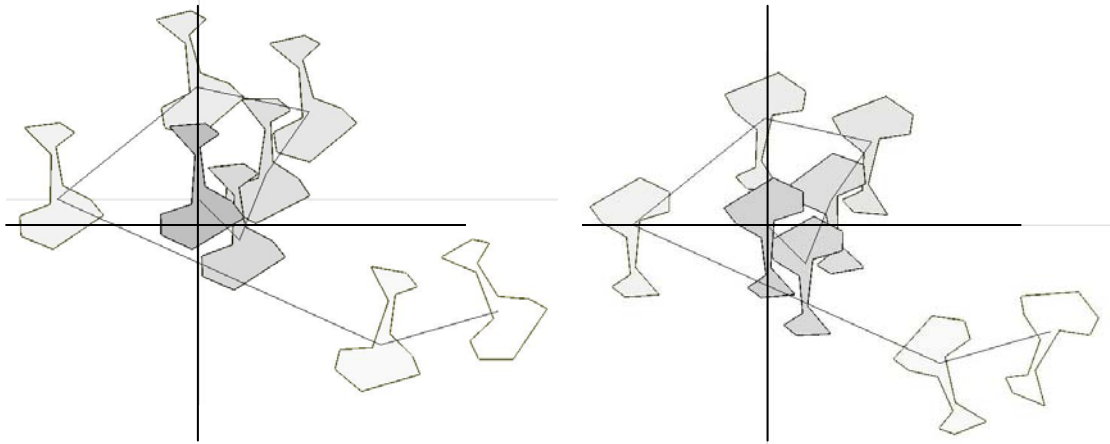


Figure 6 ตัวอย่างการจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้ Elliptic Field ($\alpha = 2, \beta = 1$)

โดยจากสมการนี้ แรงเชิงรัศมีจะมีขนาดคงที่ a และสนามแรงคงที่จะมีขนาดคงที่ g ทิศทางขนานแกน X พุ่งจากขวาไปซ้าย

เราได้ทำการทดสอบจำลองสถานการณ์โดยกำหนดค่าให้ $a = 1$ และ $g = 0.4$ โดยให้วัตถุมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางสนามแรง และมุมที่วัตถุทำกับแกนของสนามแรง มีค่าต่างๆ กันไป เช่นเดียวกับกรณี Elliptic Field :ซึ่งผลการทดสอบพบว่า วัตถุสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ภาวะสมดุลได้ โดยทิศทางของวัตถุเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลมีเพียงรูปแบบเดียว ต่างจากกรณี Elliptic Field ที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ

อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งที่วัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้นไม่คงที่ และเปลี่ยนไปตามค่าพารามิเตอร์ของสนามแรงโดยที่ไม่สามารถทำนายตำแหน่งที่แน่ชัดได้ (ดูรูปที่ 7) นอกจากนี้ จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่า g เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่ง ซึ่งในการทดลองนี้อยู่ที่ $g = 0.6$ ทิศทางของวัตถุเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลก็เริ่มมีมากกว่า 1 รูปแบบ และไม่สามารถทำนายได้ว่าจะเป็นรูปแบบใด ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของวัตถุ ดังที่มีกล่าวเอาไว้ใน [5]

3.4.3 Radial & Constant Field [8, 9]

สนามแรงรูปแบบนี้ประกอบขึ้นจาก สนามแรงเชิงรัศมีกับสนามแรงคงที่ทิศทางตรงในลักษณะเดียวกันกับ Unit Radial & Constant Field เพียงแต่สนามแรงเชิงรัศมีนั้น ขนาดของแรงจะแปรผันตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแรงตามสมการ

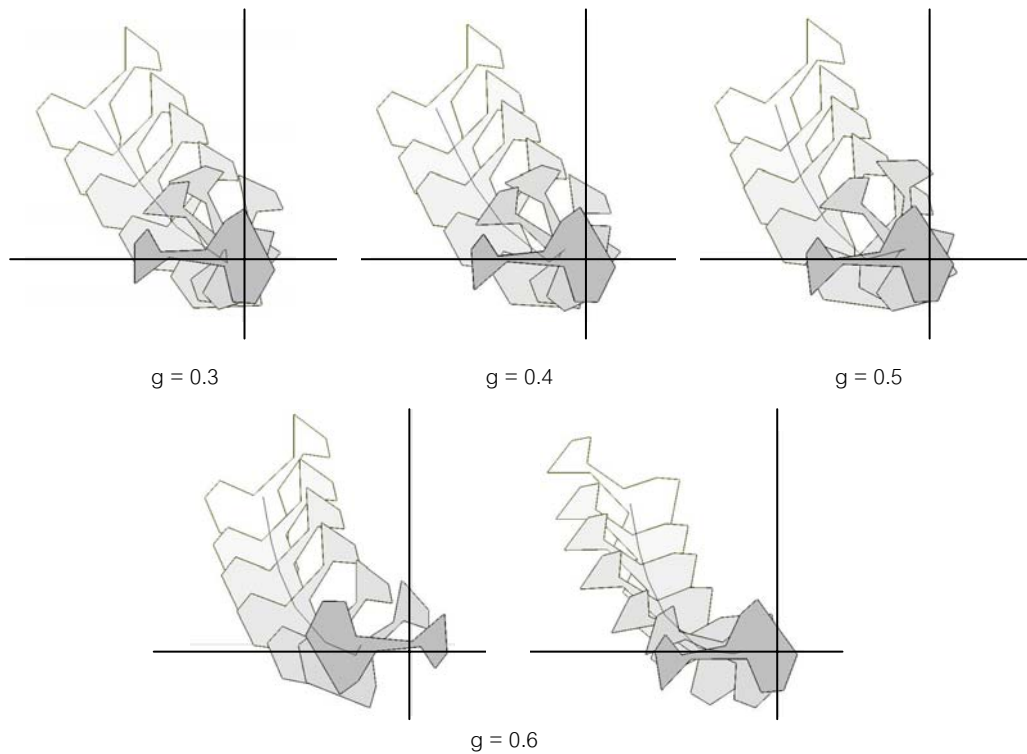
$$\hat{F}(\lambda) = -(h + (2k + c)\lambda)$$

เมื่อ λ เป็นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางสนามแรงดังกล่าว ดังนั้น แรงเนื่องจาก Field นี้ที่กระทำต่อวัตถุ จึงสามารถเขียนเป็นสมการแยกตามแกนระนาบ XY สนามแรงได้เป็น:

$$\hat{F}_x(x, y) = -\left(\frac{h}{\sqrt{x^2 + y^2}} + (2k + c)\right)x - (k)(d)$$

$$\hat{F}_y(x, y) = -\left(\frac{h}{\sqrt{x^2 + y^2}} + (2k + c)\right)y$$

โดยที่ $h, k, c > 0$ และ $d > 0$ ค่าหนึ่ง ซึ่งคำนวณได้เฉพาะแต่ละวัตถุ



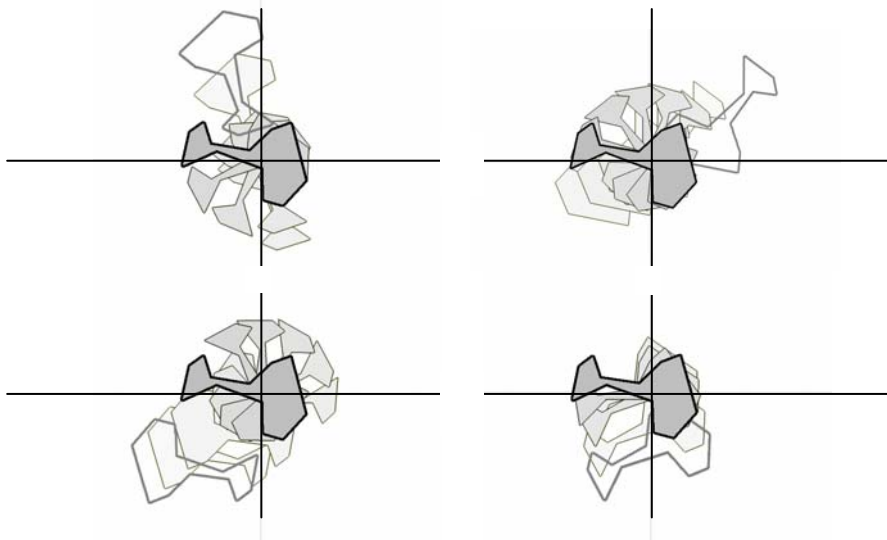
รูปที่ 7 ตัวอย่างการจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้ Unit Radial & Constant Field ($a = 1, g = 0.4 \pm k$ โดยที่ k มีค่าน้อยๆ)

เราได้ทำการทดสอบจำลองสถานการณ์โดยกำหนดค่าให้ $h = 5, k = 5, c = 0.01$ และ $d = 0.1799$ โดยให้วัตถุมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางสนามแรง และมุมที่แกนวัตถุทำกับแกนของสนามแรง มีค่าต่างๆ กันไป เช่นเดียวกับ 2 รูปแบบก่อนหน้านี้

ผลการทดสอบ พบว่า วัตถุสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ภาวะสมดุลได้ โดยตำแหน่งและทิศทางของวัตถุเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลเพียงรูปแบบเดียวเสมอ ไม่ว่าตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของวัตถุจะเป็นเช่นไร (ดูรูปที่ 8) นอกจากนี้ เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ h, k, c ไปเรื่อยๆ เมื่อคำนวณค่า d ใหม่ซึ่งสามารถคำนวณต่างหากได้อย่างรวดเร็วและทำการทดสอบ วัตถุก็ยังคงเข้าสู่ภาวะสมดุลในตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการเสมอ ตรงตามที่พิสูจน์ไว้ใน [8]

3.5 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ภาวะสมดุลของแต่ละสนามแรง

นอกเหนือจากการทดสอบคุณสมบัติของรูปแบบตำแหน่งของวัตถุเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใต้สนามแรงรูปแบบต่างๆ แล้วนั้น อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องให้ความสนใจ ก็คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้วัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใต้สนามแรงแต่ละรูปแบบ ทั้งนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่า ในงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แทบจะไม่มีงานวิจัยใดเลยที่จะกล่าวถึงในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ภาวะสมดุลของวัตถุ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะในปัจจุบันยังไม่สามารถสร้างหรือพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถสร้างแรงได้ตามสนามแรงที่ออกแบบไว้ได้ แม้กระนั้นก็ตาม ในการศึกษาหรือการทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์ที่ปรากฏอยู่ในแต่ละงานวิจัยเหล่านั้น ก็กล่าวเฉพาะในเรื่องของรูปแบบการเข้าสู่ภาวะสมดุลของวัตถุเท่านั้น เช่นเดียวกับที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 8 ตัวอย่างการจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้ Radial & Constant Field
 $(h = 5, k = 5, c = 0.01, d = 0.1799)$

เพื่อการนี้ จึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงเวลาดังกล่าวนี้ในเบื้องต้น สำหรับสนามแรงทั้ง 3 รูปแบบ คือ Elliptic Field, Unit Radial & Constant Field และ Radial & Constant Field ภายใต้การควบคุมเงื่อนไข ภาวะแวดล้อม เช่น ใช้วัตถุรูปแบบเดียวกัน และควบคุมตัวแปรสภาวะแวดล้อมต่างๆ ให้เหมือนกัน เพื่อให้ได้ผลเปรียบเทียบที่ชัดเจนโดยไม่มีผลข้างเคียงจากปัจจัยอื่นๆ โดยค่าตัวแปรต่างๆ ของสนามแรงนั้น เป็นดังนี้ คือ

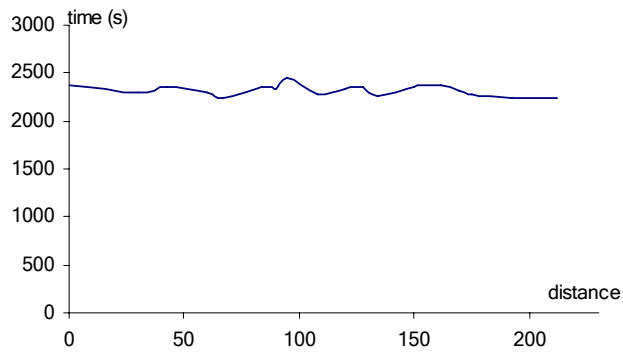
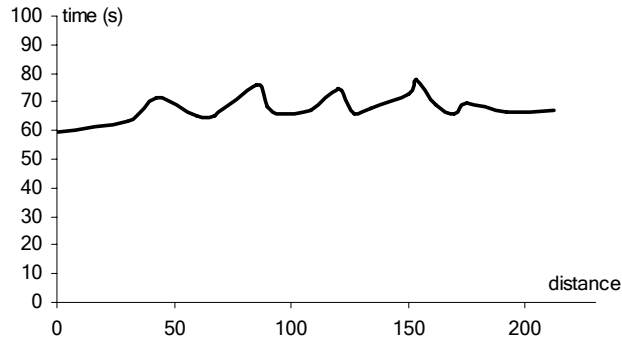
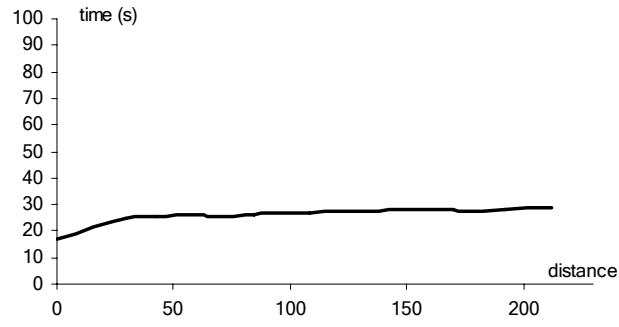
- Elliptic Field: เลือกใช้ $\alpha = 2$ และ $\beta = 1$
- Unit Radial & Constant Field: เลือกใช้ $g = 0.4$
- Radial & Constant Field: เลือกใช้ $h = 1, k = 1, c = 1$ และได้ค่า $d = 0.09298$

ผลจากการทดสอบ ที่ปรากฏในรูปที่ 9 นั้น ได้ผลที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง โดยพบว่า การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้ Elliptic Field กับ Unit Radial & Constant Field นั้น ใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลไม่นานนัก แต่ในกรณีของ Radial & Constant Field กลับใช้เวลานานกว่ามากหลายเท่า โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้ว จะพบว่า เวลาเกือบทั้งหมดเป็นส่วนของการปรับทิศทางให้เข้าสู่ทิศทาง ณ ภาวะสมดุล ด้วยความเร็วเชิงมุมที่มีค่าน้อยกว่าสนามแรงอีก 2 รูปแบบมาก ดังปรากฏในรูปที่ 10

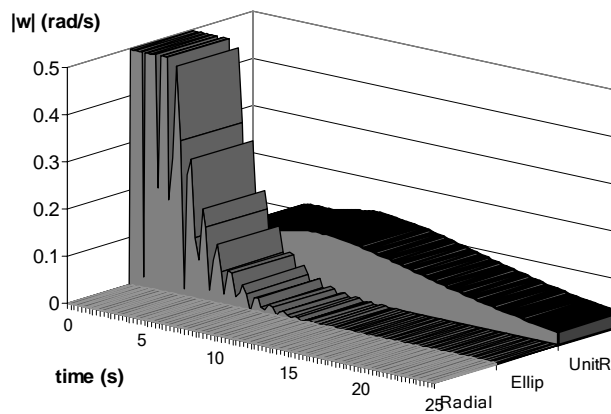
3.6 การจัดเรียงวัตถุโดยใช้สนามแรงหลายชุด

นอกเหนือจากรูปแบบของการใช้สนามแรงชุดเดียวในการจัดเรียงวัตถุแล้ว ยังมีรูปแบบของการใช้สนามแรงหลายๆ ชุด ทำหน้าที่ในแต่ละช่วงเวลา โดยที่แต่ละชุดก็จะส่งผลต่อการเคลื่อนที่หรือการหมุนของวัตถุเป็นขั้นตอนย่อยๆ แยกจากกัน

K. Y. Goldberg ได้นำเสนอวิธีการใช้ Parallel Gripper เพื่อการจัดเรียงทิศทางของวัตถุไว้ใน [1] โดยการเปลี่ยนมุมที่ตัว Gripper จะทำการบีบตัวเพื่อจับวัตถุเป็นขั้นๆ ตามที่กำหนด ซึ่งการเปลี่ยนมุมดังกล่าวเปรียบเสมือนการสร้างสนามแรงที่ “บีบ” วัตถุ (Squeeze Field) หลายๆ ชุด ผลัดกันหมุนวัตถุแต่ละขั้นไปจนกระทั่งวัตถุเข้าสู่ทิศทางที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม จำนวนขั้นของการเปลี่ยนมุม (หรือก็คือจำนวนชุดของ Squeeze Field ที่ต้องใช้) แปรผันไปตามความซับซ้อนของวัตถุ ทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนขั้นตอนที่ต้องใช้หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เวลาที่ต้องใช้ในการจัดเรียงวัตถุที่แน่นอนได้



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของวัตถุจากระยะทางเริ่มต้นต่างๆ ภายใต้สนามแรงทั้ง 3 รูปแบบ (บน: Elliptic, กลาง: Unit Radial & Const, ล่าง: Radial & Const)



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของวัตถุภายใต้สนามแรงทั้ง 3 รูปแบบ

ต่อมา J. Luo และ L. E. Kavraki ได้นำเสนอการจัดเรียงวัตถุที่ใช้สนามแรงหลายรูปแบบใน [7] โดยในงานดังกล่าวได้แบ่งการจัดเรียงวัตถุเป็น 3 ขั้นตอนย่อยๆ เสมอสำหรับทุกวัตถุ อันประกอบไปด้วย

- ดึงวัตถุให้ศูนย์กลางมวลไปหยุดที่จุดๆ หนึ่งด้วย Radial Field ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้วัตถุเคลื่อนที่โดยไม่ทำให้วัตถุหมุน (Radial Field ก็คือ Elliptic Field ที่ $\alpha = \beta$ ซึ่งจะให้ทอร์กลัพธ์เป็น 0)
- หมุนวัตถุให้ได้ทิศทางที่ต้องการด้วย Dynamic Curl Fields
- ดันวัตถุไปยังตำแหน่งที่ต้องการ (เพื่อประกอบ) ด้วย Dynamic Push Fields

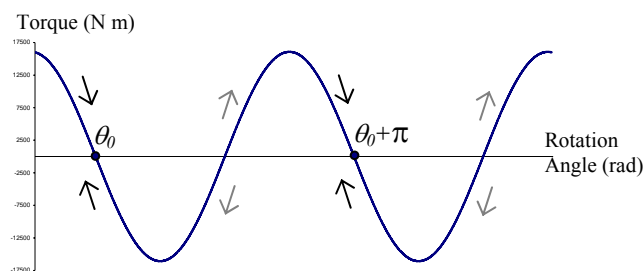
อย่างไรก็ตาม สนามแรงใน 2 ขั้นตอนหลัง คือ Dynamic Curl Fields และ Dynamic Push Fields เป็นสนามแรงที่ต้องปรับเปลี่ยนตามเวลาตลอดเวลา ทำให้ใช้งานได้ยาก

3.7 การผสมผสานสนามแรงหลายชุดที่เปลี่ยนตามเวลา

จากผลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดข้างต้น จะเห็นว่า สนามแรงแต่ละรูปแบบข้างต้น ต่างก็มีจุดเด่นและจุดด้อยในการจัดเรียงวัตถุแตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของผลลัพธ์การจัดเรียงที่ได้ ความยากง่ายในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสนามแรง ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเรียงจนวัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุล เป็นต้น ทำให้เกิดความคิดขึ้นว่า ถ้าเราผสมผสานการใช้สนามแรงรูปแบบต่างๆ เหล่านี้เข้าด้วยกัน แล้วดึงจุดเด่นของสนามแรงแต่ละรูปแบบออกมาในลักษณะที่เหมาะสม ก็น่าจะเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเรียงวัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุลให้ดีขึ้นกว่าเดิมได้

แนวคิดหนึ่งที่น่าสนใจ คือ คุณสมบัติของ Elliptic Field ที่ได้จากการทดสอบเวลาในการจัดเรียงวัตถุ โดยเมื่อดูจากกราฟของ elliptic Field ในรูปที่ 9 แล้วจะเห็นว่า เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลมีแนวโน้มคงที่ แม้ว่าระยะทางเริ่มต้นจากศูนย์กลางสนามแรงจะเพิ่มขึ้น ดังนั้น ถ้าสามารถพิสูจน์ได้ว่าคุณสมบัติดังกล่าวนี้เป็นจริง และสามารถหาค่าเวลาที่เหมาะสมดังกล่าวจากวัตถุแต่ละรูปแบบได้ ก็น่าจะมีประโยชน์ที่จะนำมาใช้งาน

ปัญหาที่เหลืออยู่คือความไม่แน่นอนของรูปแบบที่ภาวะสมดุลของวัตถุที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติม พบว่า จากทิศทางเข้าสู่สมดุลที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบนั้น ถ้าเรารู้ทิศทางเริ่มต้นของวัตถุว่า ไม่อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางเมื่อเข้าสู่สมดุลทั้ง 2 แบบแล้วละก็ เราจะสามารถทำนายทิศทางที่วัตถุจะเข้าสู่สมดุล 1 ในสองรูปแบบได้ เหตุผลก็เนื่องมาจากเมื่อทำการทดสอบวัดค่าทอร์กลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุเมื่อแกนของวัตถุทำมุมกับแกนของสนามแรงมีค่าต่างๆ ไป ดังในรูปที่ 11 จะพบว่า ในทิศทางรอบๆ θ_0 และ $\theta_0 + \pi$ ซึ่งเป็นทิศทางที่เข้าสู่ภาวะสมดุลที่มีเสถียรภาพ 2 รูปแบบ (ตามที่อธิบายไว้ใน [4, 6]) ถ้าทิศทางของวัตถุต่างจากทิศทางใดน้อยกว่า $\pi/2$ แล้ว ทอร์กที่ได้จะมีทิศทางหมุนเข้าหาทิศทางนั้นเสมอ (ทอร์กเป็นลบ = หมุนตามเข็มนาฬิกา, ทอร์กเป็นบวก = หมุนทวนเข็มนาฬิกา) ยกเว้นที่ทิศทางทำมุม $\pi/2$ พอดี ซึ่งตำแหน่งสมดุลที่ไม่เสถียร ตามที่อธิบายไว้ใน [4, 6] เช่นเดียวกัน



รูปที่ 11 กราฟค่าทอร์กที่ Elliptic Field ($a=1, b=2$) ทำกับวัตถุตัวอย่างเมื่อทิศทางเริ่มต้นมีค่าต่างๆ (ทิศทาง θ_0 และ $\theta_0 + \pi$ เป็นทิศทางที่วัตถุเข้าสู่สมดุลที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ)

ดังนั้น ถ้าเราใช้สนามแรงอื่นช่วยในการลดความไม่แน่นอนในเรื่องของทิศทางเริ่มต้นของวัตถุ เป็นต้น ถ้าปล่อยให้วัตถุเคลื่อนตัวภายใต้ Elliptic Field จนถึงเวลาหนึ่ง ที่เชื่อได้ว่า วัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุล 1 ใน 2 รูปแบบที่เป็นไปได้แล้ว (โดยที่เราไม่รู้รูปร่างใด) จากนั้นก็เปลี่ยนสนามแรงเป็น Radial & Constant ซึ่งมีจุดเด่นที่การรับประกันว่าวัตถุเข้าสู่สมดุลทิศทางเดียว เพื่อ “ขยับ” วัตถุให้ออกจากแนวทิศทางจาก Elliptic Field ชุดแรก ให้เปลี่ยนในทางด้านใดด้านหนึ่ง แล้วจึงเปลี่ยนเป็น Elliptic Field อีกชุด โดยให้พารามิเตอร์ที่กำหนดค่าแรงจะสลับกับ Elliptic ชุดแรก ทำให้ทิศทางวัตถุที่ภาวะสมดุลจะตั้งฉากกับชุดแรกด้วยเช่นกัน และผลจาก Radial & Constant Field ทำให้วัตถุมีทิศทาง “โน้ม” เข้าหาทิศในทิศหนึ่งใน 2 ทิศทางแล้ว ดังนั้น วัตถุก็เข้าสู่ภาวะสมดุลในทิศทางที่ Radial & Constant หมุนวัตถุไปทิศทางเดียว อันเป็นการรับประกันว่าวัตถุจะเข้าสู่ภาวะสมดุลทิศทางเดียวนั่นเองนั่นเอง นอกจากนั้น เวลาที่ใช้โดยรวมก็น่าจะน้อยกว่าการใช้ Radial & Constant อย่างเดียวอีกด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม ยังมีสิ่งที่จะต้องศึกษาและพิสูจน์ต่อไปสำหรับอัลกอริทึมข้างต้นนี้อีกมากมาย อันได้แก่

- Elliptic Field สามารถจัดเรียงวัตถุให้เข้าสู่ภาวะสมดุลในเวลาจำกัดค่าหนึ่งได้จริง ไม่ว่าวัตถุจะมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ใดและอยู่ในมุมใดก็ตาม
- Radial & Constant Field ในระยะใกล้ จะส่งผลให้วัตถุ “หมุน” ไปในทิศทางที่เข้าสู่ภาวะสมดุลที่มีเสถียรภาพของวัตถุเพียงรูปแบบเดียวตามคุณสมบัติของ Field ตลอดเวลา โดยไม่มีการ “หมุน” ไปในทิศทางตรงกันข้าม
- Elliptic Field สามารถจัดเรียงวัตถุ ที่มุมเริ่มต้นของวัตถุ “โน้มเอียง” ไปในทิศทางที่เข้าสู่ภาวะสมดุลที่มีเสถียรภาพด้านใดด้านหนึ่งใน 2 ด้านแล้วนั้น ให้เข้าสู่ภาวะสมดุลในทิศทางดังกล่าวได้ โดยที่รับประกันว่า วัตถุจะไม่เข้าสู่ภาวะสมดุลในด้านตรงข้าม
- การคำนวณหาเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนจาก Elliptic Field ชุดแรก ไปเป็น Radial & Constant Field แล้วเวลาในการเปลี่ยนจาก Radial & Constant Field ไปเป็น Elliptic Field ชุดที่ 2 ในการใช้งานจริง สำหรับวัตถุใดๆ

๑๗๙

4. ขอบเขตของงานวิจัย

- วัตถุในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นวัตถุรูปทรง Polygon แข็งเกร็ง (rigid body) เพียงวัตถุเดียว โดยที่ความหนาแน่นของวัตถุมีค่าคงที่และกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ของวัตถุนั้น
- พื้นที่สนามแรงเป็นพื้นราบ ไม่มีขอบเขตจำกัดและไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของวัตถุ และดังนั้น การเคลื่อนที่ของวัตถุในโครงการนี้ จึงไม่คำนึงถึงการเกิดการชนกัน (collision) ของวัตถุ
- การศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ จะศึกษาเฉพาะ ผลของแรงต่อวัตถุในระนาบ 2 มิติ โดยไม่คำนึงถึงแรงในทิศทางที่เป็น Orthogonal อื่นๆ (เช่น แรงโน้มถ่วงในแนวตั้ง เป็นต้น) นอกเหนือจากแรงเนื่องมาจากสนามแรง และแรงเสียดทานระหว่างผิววัตถุกับพื้นสนามแรง เท่านั้น
- การทดสอบผลทั้งหมด จะกระทำโดยทดสอบภายใต้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer-based Simulation)

5. ขั้นตอนการวิจัย

- ศึกษาเกี่ยวกับ Programmable Force Field รูปแบบต่างๆ
- พัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อใช้ในการทดสอบผลของสนามแรงที่มีต่อการจัดเรียงวัตถุ โดยพัฒนาต่อเนื่องมาจากที่เคยสร้างไว้ [12]
- ศึกษาและทดสอบผลของสนามแรงรูปแบบต่างๆ นั้น ที่มีต่อรูปแบบและเวลาที่ใช้ในการจัดเรียงวัตถุให้เข้าสู่ภาวะสมดุลอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ที่พัฒนาขึ้น
- คิดและออกแบบการผสมผสานของสนามแรงรูปแบบใหม่ เพื่อให้วัตถุเข้าสู่ภาวะสมดุลอย่างมีประสิทธิภาพ ณ ตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการในเวลาที่ดีกว่าเดิม โดยใช้ประโยชน์จากจุดเด่นของสนามแรงที่ได้ศึกษามาแล้ว
- พิสูจน์ว่าการผสมผสานสนามแรงที่ออกแบบขึ้นนั้น สามารถให้ผลตามที่ต้องการได้จริง พร้อมทั้งหาวิธีการกำหนดค่าต่างๆ ของสนามแรงในการใช้งาน
- ทดสอบผลของการผสมผสานสนามแรงที่ออกแบบต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุต่างๆ โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เปรียบเทียบผลที่ได้กับสนามแรงรูปแบบอื่นๆ ที่เคยทดสอบมาแล้ว
- สรุปผลการศึกษาค้นคว้าและพิสูจน์

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบออกแบบวิธีการผสมผสานสนามแรงที่โปรแกรมได้รูปแบบใหม่ ที่สามารถจัดเรียงวัตถุบนระนาบ 2 มิติ ให้เข้าสู่ตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการรูปแบบเดียวได้ และใช้เวลาในการจัดเรียงน้อยกว่าสนามแรงที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือตรวจจับใดๆ ระหว่างที่จัดเรียงวัตถุ

7. เอกสารอ้างอิง

- [2] K. F. Bohringer, B. R. Donald, and N. MacDonald. What programmable vector fields can (and cannot) do: Force field algorithms for MEMS and vibratory parts feeders. in IEEE ICRA, pp.822-830, 1996
- [3] K. F. Bohringer, B. R. Donald, and N. MacDonald. Upper and lower bounds for programmable vector fields with applications to MEMS and vibratory plate parts feeders. In *Jean-Paul Laumond and Mark Overmars, editors, Algorithms for Robotic Motion and Manipulation*, pp. 255–276. A. K. Peters, Ltd, Wellesley, 1997.
- [4] L. E. Kavraki. Part orientation with programmable vector fields: Two stable equilibria for most parts. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2446–2451, 1997.
- [5] F. Lamiroux., and L. E. Kavraki. Positioning and Orienting a Class of Symmetric Parts Using a Combination of a Unit-Radial and a Constant Force Fields. In *Proceedings of The 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2000)* (San Francisco, CA, April 2000). pp. 177-183.

- [6] K.-F. Bohringer, B. R. Donald, L. E. Kavraki, and F. Lamiroux. Part orientation with one or two stable equilibria using programmable vector fields. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(2), 2000, pp. 157-170.
- [8] A. Sudsang, and L. E. Kavraki. A Geometric Approach to Designing a Programmable Force Field with a Unique Stable Equilibrium for Parts in the Plane. In *Proceedings of The 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001)* (IEEE Press, Seoul, Korea, May 2001), pp. 1079–1085.
- [9] A. Sudsang, and L. E. Kavraki. Part Orientation with a Force Field: Orienting Multiple Shapes Using a Single Field. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp 208-213, 2001.
- [10] A. Sudsang. Sensorless Sorting of Two Parts in the Plane Using Programmable Force Fields. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp 1784-1789, 2002.
- [1] K. Y. Goldberg. Orienting polygonal parts without sensors. *Algorithmica*, 10:201–225, 1993.
- [7] J. Luo and L. E. Kavraki. Part Assembly Using Static and Dynamic Force Fields. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp 1468-1473, 2000
- [11] K. Varsos, H. Moon, and J. Luntz. Generation of Quadratic Force Fields from Potential Flow Fields for Distributed Manipulation. In *Proceedings of The 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005)* (Barcelona, Spain, April 2005)
- [12] พีม พิพัฒน์สมพร, และ พีรพงษ์ ธนกิจ. โปรแกรมจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการจัดเรียงวัตถุบนระนาบภายใต้สนามแรงที่โปรแกรมได้แบบไม่เชิงเส้น. *โครงการวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2546, 44 หน้า