สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

การควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมนั้น ต้องอาศัยพื้นฐานการควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ขณะทำการเคลื่อนที่โดยอาศัยสมการทางพลศาสตร์ และการติดตั้งโสตในการรับรู้สถานะของสิ่งแวดล้อมเพื่อป้อนกลับใช้ในการควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งการควบคุมแรงสามารถศึกษาได้เป็น 2 แนวทาง คือ การควบคุมแรงทางตรงและการควบคุมแรงทางอ้อม โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเพื่อป้อนข้อมูลแรงกลับมาควบคุมระบบ ส่วนการควบคุมตำแหน่งจะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่ง เช่น Encoder ป้อนกลับข้อมูลเพื่อนำไปใช้ควบคุมตำแหน่งโดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ อาศัยการอ้างอิงตัวแปรแบบข้อต่อและแบบเชิงเส้น รวมถึงศึกษางานวิจัยทางด้านเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 การควบคุมแรงและตำแหน่ง (Force/Position Control)

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมหุ่นยนต์อัจฉริยะ (Intelligent Robot) ให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้นั้นมีมาตั้งแต่ยุคเริ่มต้นของหุ่นยนต์ การควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่ระบบควบคุมไม่ทราบมาก่อนล่วงหน้าหรือต้องทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมนั้น หุ่นยนต์จะต้องมีโสตในการรับรู้สถานะของสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) เช่น อุปกรณ์ตรวจรู้แรง และนำข้อมูลสัญญาณแรงสัมผัสมาป้อนกลับเข้าระบบควบคุมเพื่อควบคุมแรงสัมผัส หรือที่เรียกว่า Force Servoing งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงสัมผัสชิ้นหนึ่งที่เป็นรากฐานสำคัญในการควบคุมหุ่นยนต์อัจฉริยะในยุคเริ่มต้น คืองานของ J. J. Craig และ M. H. Raibert [3] ในปี ค.ศ.1979 โดยเสนอการควบคุมแรงสัมผัสโดยการใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงติดตั้งที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ และนำเสนอวิธีการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง (Hybrid Force/Position Control) วิธีการนี้จะแบ่งวงจรควบคุมออกเป็น 2 วงจร คือ วงจรควบคุมแรงและวงจรควบคุมตำแหน่ง โดยจะใช้การควบคุมแรงในทิศทางที่การเคลื่อนที่ถูกกีดขวางและการควบคุมตำแหน่งในทิศทางที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งจะทำงานในทิศทางตั้งฉากกัน และใช้ Selection Matrix ในการแยกแกนควบคุมในขณะทำงาน การควบคุม

แรงเป็นแบบการควบคุมแรงทางตรง โดยการวัดค่าแรงผ่านอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเพื่อเปรียบเทียบความผิดพลาด ซึ่งมีข้อจำกัดอยู่ในด้านขาดความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดต่างๆ

การควบคุมความหน่วงเป็นการควบคุมสมการพลศาสตร์ระหว่างหุ่นยนต์กับสิ่งแวดล้อมให้มีความหน่วงตามที่กำหนด โดยแรงและตำแหน่งปลายแขนเป็นข้อมูลป้อนกลับไปใช้ในการควบคุม ในปี ค.ศ.1987 Neville Hogan [4] นำเสนอวิธีการควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control) แบบ Impedance Control เทคนิคการควบคุมแบบนี้จะควบคุมแรงผ่านทางระบบควบคุมตำแหน่ง โดยจะใช้ตำแหน่งและความเร็วของปลายแขนเป็นตัวแปรพื้นฐานในการหาค่าแรง และการควบคุมไม่จำเป็นต้องสลับไปมาระหว่างการควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่ง ทำให้ในการเคลื่อนที่อย่างอิสระและแบบถูกกีดขวางมีการควบคุมที่มีเสถียรภาพ ต่อมาในปี 1987 K. Youcef-Toumi และ Dong Li [5] ทำการทดลองควบคุมแรงแบบ Robust โดยใช้ค่าเกนของ Inner Velocity Loop ที่สูง เพื่อควบคุมแขนกลแบบ Direct-drive และ Decoupled บนพื้นผิวที่มีองศาอิสระเท่ากับ 1 ด้วยแรงสัมผัสและความเร็วที่กำหนดเพื่อปรับปรุงความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady State Force Error) และความสามารถในการสัมผัสพื้นผิว

หลังจากนั้นในปี 1988 Mark W. Spong และ Robert J. Anderson [6] นำเสนอวิธีการควบคุมความหน่วงแบบผสม (Hybrid Impedance Control) เป็นการควบคุมแรงและตำแหน่ง (แบบผสม) พร้อมทั้งปรับควบคุมความหน่วงของระบบโดยรวมให้มีค่าคงที่ โดยจำลองควบคุมแขนกลแบบสองข้อต่อ

ในปี 1989 Mark W. Spong [7] เสนอวิธีการแก้ปัญหาการควบคุมแรงสำหรับข้อต่อที่มีความยืดหยุ่น โดยการนำเทคนิคการควบคุมแรงของแขนกลที่มีความแข็งเกร็ง มาใช้กับกรณีข้อต่อที่มีความยืดหยุ่นอันเนื่องจากความยืดหยุ่นของฟันเฟืองและเพลา ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกับการควบคุมแรงมากกว่าการควบคุมตำแหน่งเพียงอย่างเดียว โดยแบ่งเป็น 2 วงจร คือ วงจรภายในเป็นการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้ระบบเป็นเชิงเส้นโดยการทำ Integral Manifold ใน State space และวงจรภายนอกเป็นการควบคุมแรงเชิงเส้นของแขนกลที่มีความแข็งเกร็งซึ่งเป็นอิสระจากภายใน ซึ่งเทคนิคดังกล่าวสามารถใช้ได้กับวิธีการควบคุมแบบผสม การควบคุมความหน่วง ต่อมาในปีเดียวกัน Shimoga B. K. และ Andrew A. G.[8] เสนอรายงานที่แสดงถึงปัญหาของเสถียรภาพของเครื่องควบคุมแรงของแขนหุ่นยนต์ ที่มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบการควบคุม 4 โมเดล ได้แก่

1. Hybrid Force Control
2. Resolved Acceleration Based Force Control

3. Stiffness Control

4. Impedance Control

การวิเคราะห์นี้ใช้พื้นฐานโมเดลที่เป็นเชิงเส้นและใช้เงื่อนไขของ Routh-Hurwitz โดยผลการวิเคราะห์แสดงว่าเสถียรภาพของระบบการควบคุมทั้ง 4 ระบบที่ได้ศึกษาขึ้นอยู่กับผลที่ได้รับจาก Configuration ของแขนหุ่นยนต์ เมื่อแขนกลสูญเสียการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ระบบการควบคุมที่ศึกษาตามข้อ 2-4 ยังคงมีเสถียรภาพ ยกเว้นแบบ Hybrid Force Control สาเหตุของการไม่เสถียรในการสัมผัสนั้น คือ Environment Stiffness Matrix ไปเพิ่มค่าเกนของตำแหน่งในชุดระบบควบคุม ถ้าค่าเกนของความเร็วที่ถูกเลือกขึ้นอยู่กับค่าเกนของตำแหน่ง โดยที่ไม่มีการพิจารณา Environment Stiffness จะส่งผลให้ระบบเป็น Underdamped อย่างมาก และมีโอกาสที่จะขาดเสถียรภาพ

ต่อมา Gursel Alici และ Ron W. Daniel [9] เสนอรายงานวิจัยในปี 1993 กล่าวถึงการพัฒนาและทดสอบการทดลองของโมเดลทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) สำหรับระบบควบคุมแรง (Force Control System) ซึ่งประกอบด้วย PUMA 560 Manipulator, อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและสิ่งแวดล้อม โดย Explicit Dynamic Model ของ Manipulation Systems ใช้สำหรับควบคุมแรง เทคนิคนี้จะใช้ในการจำลองระบบเช่นเดียวกับกล่องดำ โดยวัดความสัมพันธ์ของ Input/output เท่านั้น โดยละทิ้งส่วนที่บ่งชัดถึงพลศาสตร์ของ Mechanical, Hardware และ Software ของแขนหุ่นยนต์ โดยมีการปรับ Propotional Gain และ Derivative Gain Loop ในแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ก่อนที่จะทำการ Identification เพื่อกรองความไม่แน่นอนและความไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อทำให้เป็นระบบเชิงเส้น การแสดงผลที่ใกล้เคียงกันระหว่างการทดลองและการจำลอง (Simulation) ของ Bode plots ที่มีความถี่ต่ำกว่า 30 Hz. ชี้ให้เห็นว่า โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนานั้น มีความแม่นยำแน่นอนเพียงพอต่อการวิเคราะห์และการออกแบบกลยุทธ์ที่ใช้ควบคุมแรงสัมผัสพื้นผิวที่มีความแข็ง (Hard on Hard Contact Application) เช่น Robotic Drilling

ในปี 1996 Peilin Song และ Andrew Goldenberg [10] เสนอหลักการของ Hybrid Control ในการควบคุมตำแหน่งและแรง การออกแบบตัวควบคุมกระทำโดยการแยกโมเดลงานออกเป็น 2 งานย่อยคือ การบิดอย่างอิสระและการบิดแบบบังคับ เพื่อให้การทำงานมีความเสถียรและเข้าด้วยกันได้ โดยการจำแนกนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของ Constraint(C) กล่าวคือการเคลื่อนที่อย่างอิสระ (F) จะไม่มีผลกระทบกับการบิดของ Constraint(C) และการเคลื่อนที่ของ Constraint(C) จะไม่มีผลกระทบกับการบิดแบบอิสระ(F) ต่อมาได้สร้างเวคเตอร์ความเร็วของข้อต่อโดยการแทนความสัมพันธ์ของจาโคเบียน ในเทอมของการบิดแบบอิสระและแบบบังคับแล้ว

นำไปคำนวณหาแรงบิดของข้อต่อต่างๆ เพื่อสามารถหา Force Exert บน Constraint สำหรับสมการทางพลศาสตร์ (Dynamic Equation) จากนั้นกำจัด Dynamic Effect โดยการใช้เทคนิค Computed Torque เพื่อหาตัวควบคุมตำแหน่งและแรงสำหรับโมเดลที่ทำให้เป็นเชิงเส้น โดยตัวควบคุมความไม่เสถียรทางจลน์ศาสตร์ (Kinematics) และสมมุติให้แรงสัมผัสเป็นศูนย์เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่เสถียรภาพทางพลศาสตร์ (ไม่พิจารณา Force Controller) ส่วนตัวควบคุมแรงจะถูกออกแบบให้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ หลังจากนั้นเสนอวิธีการลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนด้วยวิธี Consistent Position/Force Controller และเพื่อชดเชยผลกระทบทางพลศาสตร์ของ Inertia Matrix

ในปี 1999 R. Maase, V. Zahn และคณะ [11] เสนอการควบคุมแรงและตำแหน่งแบบผสม (Hybrid force/position Control) Position Based Neural Force Control (NFC-P) ได้รวบรวมข้อดีของการเรียนรู้โครงสร้างและทฤษฎี Advantage Robot Cntrol เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ ของ Hard Contact Control รวมถึง Polishing Deburring และ Disassembly สิ่งซึ่งต้องการประเมินผลของแรงสัมผัสอย่างต่อเนื่อง จากผลการทดลองแบบเวลาจริง (Real-time) แสดงว่าการควบคุมแรงและตำแหน่งมีความแม่นยำเมื่อใช้ Neural Network ในการประมาณแนววิถีและ Inverse Dynamic Mapping

หลักการควบคุม Sensor NFC-P Renders เป็นแนวทางที่เป็นไปได้ที่ให้ Manipulator Control กับ Force/torque Sensor หรือ Distance Sensor โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Force Estimation Function Sensor-less Force Control อุปกรณ์ PC ในชุดควบคุมนี้ได้แก้ปัญหาของระยะห่างของ Interaction Task of Multi Joint Manipulator กับสิ่งแวดล้อม โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อที่มีราคาแพง

Torsten Kroger, Bernd Finkemeyer และคณะ [12] เสนอผลการทดลองการควบคุมแบบผสมในปี 2004 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเชื่อมโยงผลการวิจัยของ Current Robot Force Control กับ Scientific Approaches in Compliant Motion (กฎการเคลื่อนไหว) ซึ่งมีพื้นฐานจาก Mason's Task Frame Formalism โดยหลักการนี้ประกอบด้วยส่วนเป็นทฤษฎีและส่วนที่ปฏิบัติเท่าๆ กัน โดยผลการทดลองกับเครื่องควบคุมในอุตสาหกรรม (Industrial Manipulator) ภายใต้การควบคุมแรงที่มีการปรับค่าได้ (Adaptive Force Control) 3 DOF ซึ่งจะสร้างเงื่อนไขในการควบคุมแรงเพื่อป้องกันการทำงานเกินภาระและหยุดทำงานเมื่อเคลื่อนที่อย่างอิสระ

งานวิจัยในเรื่องการควบคุมแรงของหุ่นยนต์ในปีต่อๆ มา ส่วนมากอ้างอิงพื้นฐานการควบคุมแรงและตำแหน่ง โดยใช้เทคนิคการควบคุมเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพ สมรรถนะการควบคุมให้ดีขึ้น โดยห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยและพัฒนา ดังเช่น งานวิทยานิพนธ์ในปี 1996 นายไพรัช ตั้งพรประเสริฐ [13] เสนอวิธีการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งสำหรับหุ่นยนต์จุฬาฯ2 ที่กำหนดเงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมจาก Natural Constraint และ Artificial Constraint ถูกสร้างเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวคเตอร์เลือก ส่วนการควบคุมแรงสามารถคำนวณหาแรงบิดที่เหมาะสมเพื่อใช้ขับข้อต่อแขนกลจากวิธีควบคุมแบบ Resolved Acceleration และจากสมการพลศาสตร์ของแขนกล และงานวิทยานิพนธ์ในปี 2000 ของนายบวร ปัญญาวรวัจน์ [14] เรื่องการควบคุมแบบผสมด้วยแรง Implicit สำหรับแขนกลจุฬาฯ 2 ที่ได้ทำการปรับปรุงใหม่ โดยการหาค่าพารามิเตอร์ ความแข็งตึง (Stiffness) แบบออนไลน์ เพื่อนำมาคำนวณหาคำสั่งตำแหน่งที่ให้แขนกลกดแบบออนไลน์โดยการกำหนดค่าความแข็งตึงเริ่มแรกของผิววัตถุให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อคำนวณหาค่าระยะกดเริ่มต้นก่อน โดยแบ่งวงด้านบนจะควบคุมแรง ส่วนวงด้านล่างจะควบคุมแรงผ่านตัวควบคุมตำแหน่ง โดยใช้วิธี Resolved Acceleration ในการคำนวณหาความเร่งของแต่ละข้อต่อออกมาก่อน หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับให้แขนกลเคลื่อนที่ ซึ่งแม้ว่าจะไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่แม่นยำ ก็สามารถควบคุมแรงที่แขนกลสัมผัสวัตถุลู่เข้าหาค่าที่ต้องการได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 2.2.2 การควบคุมหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Obstacle Avoidance)

การควบคุมหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่ผ่านมากว่า 20 ปี สามารถแบ่งการพิจารณาการควบคุมออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ Global และ Local Method [15] โดยที่การควบคุมแบบ Global Method เป็นวิธีที่ทำใน C-space (Configuration-space) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ทีละจุดของการแปลงอุปสรรคสิ่งกีดขวางใน Cartesian Space เป็น C-space โดยเส้นทางเดินที่เกิดขึ้นจะถูกแก้ไขอย่างต่อเนื่องเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ซึ่งมีข้อจำกัดคือ การควบคุมแบบ Global Method เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมที่เป็นโครงสร้างที่ทราบแน่ชัดและอยู่นิ่ง ไม่เคลื่อนที่ จึงทำให้เรียกอีกอย่างว่า Off-line Path Planning Tool

ส่วนการควบคุมแบบ Local Method เป็นวิธีที่ใช้เวลาการคำนวณน้อยกว่า สามารถควบคุมหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้ โดยการติดตั้งเซนเซอร์แบบ Real-time หรือ Sensor-based เพื่อจัดการเส้นทางเดิน หรือเรียกว่า On-line หรือ Real-time Collision Avoidance

ต่อมา Homayoun Seraji และ Bruce Bon [15] ได้เสนอวิธีการใหม่ของ Real-time Collision Avoidance ในปี 1999 เป็นการควบคุมตำแหน่งของแขนกลที่มีระบบความอิสระเท่ากับ 6 และ 7 เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบ Real-time โดยการควบคุมแรงเสมือนจริงที่ยื่นเข้าไปในเขต Safety Zone ของสิ่งกีดขวาง เป็นการตรวจจับระยะของแขนกลไปยังสิ่งกีดขวาง และควบคุมแรงนั้นให้ลดลงเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถคำนวณแรงแทนด้วยโมเดลสปริง-แดมเปอร์แบบ Real-time

ในปี 1991 Y. Inoue, S. Kitamura และ Y. Kidawara [16] เสนอผลงานวิจัยด้านการควบคุมแรงแบบป้อนกลับเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางของแขนกลแบบ Redundant ที่มีระบบองศาอิสระเท่ากับ 6 การควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ใช้การควบคุมแรงแบบ Virtual Impedance แบบ On-line โดยการสร้างโมเดลของมวล ตัวหน่วง และสปริงที่ข้อต่อต่างๆ เพื่อป้อนกลับข้อมูลแรง (Force Feedback Control) ส่วนการควบคุมตำแหน่งเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบ Off-line ได้ทำการแปลงโมเดล Impedance ให้อยู่ในรูป Joint Compliance (Stiffness) และคำนวณหา Pseudo Inverse of Matrix เพื่อหาค่า Stiffness ของข้อต่อ ซึ่งการควบคุมแรงและตำแหน่งทั้ง 2 ส่วน อาศัยความสัมพันธ์ของ Jacobian และ Inverse Kinematics เพื่อคำนวณหาค่าที่น้อยที่สุดของการเปลี่ยนแปลงมุมของข้อต่อเมื่อเทียบกับค่ามุมข้อต่อที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการทดลองเปรียบเทียบค่า Stiffness ของสิ่งกีดขวางแบบต่างๆ เพื่อหาค่า Delay Time ของอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ทำให้การควบคุมระบบยังคงมีเสถียรภาพ

และในปี 1993 Homayoun Seraji และ Richard C.[17] นำเสนอบทความเกี่ยวกับการควบคุมแรงโดยแบ่งแผนการควบคุมเป็น 2 แบบ ซึ่งเป็นการคำนวณที่มีประสิทธิภาพและง่ายสำหรับ Force Tracking เมื่อใช้ Impedance Control โดยแผนการควบคุมนี้จะสร้างวิถีตำแหน่งอ้างอิงที่จะทำการรสร้าง Contact Force ที่ต้องการควบคุมโดยไม่ทราบตำแหน่งและคุณสมบัติ Stiffness ของสิ่งแวดล้อม แผนการควบคุมแรกใช้วิธีการควบคุมแบบ Direct Adaptive Control เพื่อสร้างตำแหน่งอ้างอิงแบบ On-line เช่นเดียวกับการทำงานของ Force Tracking-error แผนการควบคุมที่2 ใช้วิธี Indirect Adaptive Strategy โดยประมาณการ Environment Parameter แบบ On-line และ Reference Position ที่ต้องการถูกคำนวณจากการประมาณการนี้ ซึ่งหลักการของ Adaptive Control System ทั้ง 2 หลักการ ทำขึ้นเพื่อสร้างวิถี Reference Position ในระบบ Impedance Control Systems Schemes ที่ใช้ Force Feedback ทำให้ Robot มี Force Contact ที่ต้องการ ถึงแม้ว่าจะขาดข้อมูล Environment Stiffness และ Location ทั้ง 2 หลักการนี้ง่ายและมีประสิทธิภาพแม่นยำ และสามารถนำไปใช้งานแบบ Real-time Control ความง่ายและมีประสิทธิภาพดีของ 2 Schemes นี้เป็นส่วนสำคัญของการปฏิบัติงานแบบ Real-time เพราะ Impedance Control Loop จะมี Environment Stiffness

ขนาดใหญ่ซึ่งทำให้ Closed-loop System ไม่เสถียรเมื่อ ค่า Sampling Rate ต่ำ ส่วนในการศึกษา Simulation ที่นำเสนอนี้เป็นหุ่นยนต์ที่มี 7 DOF โดยใช้ Full Arm Dynamics และแสดงให้เห็นว่า แผนการควบคุมแบบ Adaptive สามารถทดแทนกับความไม่แน่นอนของ Environment Stiffness และตำแหน่งได้ ดังนั้นปลายแขนของหุ่นยนต์สามารถถูกควบคุมให้เกิดแรงสัมผัสที่ต้องการใน ขณะที่กำสังทำการระบุ Impedance Dynamics

ต่อมา Bojan N. และ Leon Z. [18] เสนองานวิจัยในปี 1998 เรื่องการทดลองควบคุมแรง ของแขนกลแบบระนาบมีความอิสระเท่ากับ 4 เป็นแบบ Redundant Robot โดยนำการควบคุม แรงแบบ Impedance มาใช้ในการควบคุมแรงและทางเดิน การทำ Redundance ด้วยเทคนิค แบบ Gradient Optimization โดยใช้ Dynamically Pseudo-Inverse Matrix การคำนวณด้วยวิธี Kinematic Redundancy มีหลากหลายวิธี แต่สามารถสรุปเป็นพื้นฐานได้ 2 แบบคือวิธี Local และวิธี Global Optimization แม้ว่าวิธี Global จะให้ผลการลู่เข้าที่ดีมาก เนื่องจากทำการ ประมาณจากช่วงการทำงานทั้งหมด ซึ่งไม่เหมาะกับการควบคุมแบบ Real-time ส่วนวิธี Local Optimization ใช้เวลาในการคำนวณสั้นกว่า แต่ผลที่ได้รับแย่กว่า ถึงอย่างไรวิธี Local ยังคงเป็น ทางเลือกเดียวสำหรับการควบคุมผ่านเซนเซอร์ ซึ่งไม่สามารถคาดเดาเส้นทางเดินล่วงหน้าได้

การใช้เทคนิค Gradient Projection สามารถใช้กับข้อกำหนดที่หลากหลายเช่น Collision Avoidance, Torque Optimization, Singularity Avoidance และ Manipulability Optimization ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับการควบคุมแรงของแขนกลแบบ Redundant ในการทดลองจะ ใช้ Globally Stable Impedance Control Law โดยปัญหาการควบคุมจะถูกแบ่งเป็น 2 งานย่อย คือ การควบคุมการเคลื่อนที่เป็นงานแรกและการควบคุมการเคลื่อนที่ใน Null Space เป็นงานที่ 2 โดยงานแรกเป็นการควบคุมแรงและตำแหน่งแบบ Tracking ส่วนงานการควบคุมการเคลื่อนที่ใน Null Space เป็น Collision Avoidance และการหา Minimum Joint Torque แล้วก็ทำ Redundancy เพื่อแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิค Gradient Projection

## 2.3 แนวทางในการทำวิจัย

ศึกษาการจำลองควบคุมหุ่นยนต์พื้นฐานแบบ 2-Link Planar Arm ให้เคลื่อนที่ไปตาม เส้นทางที่กำหนดได้พัฒนาและใช้เทคนิคการจำลองระบบของหุ่นยนต์โดยวัดความสัมพันธ์เฉพาะ Input/Output ซึ่งกรองความไม่แน่นอนและความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งตรงกับแนวคิดของ Gursel Alici และ Ron W. Daniel [9] และจำลองควบคุมหุ่นยนต์ Articulated Robot ด้วยในทำนอง เดียวกัน ในส่วนของการใช้เทคนิคประมาณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อ ต่อแทนโดยอาศัยความสัมพันธ์ของจาโคเบียนในขณะทำงานเพื่อนำไปคำนวณแรงบิดข้อต่อต่างๆ

ตามแนวทางของ Peilin Song และ Andrew Goldenberg [10] ได้กล่าวไว้ แล้วทำการปรับแก้เส้นทางเดินใหม่ ส่วนการควบคุมเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางจะทำการจำลองควบคุมการเคลื่อนที่บนเส้นทางวงกลมและสี่เหลี่ยมด้วยการควบคุม 2 วิธี คือ Local และ Global Collision Avoidance ตาม Homayoun Seraji และ Bruce Bon [15] ซึ่งใช้เป็นแนวทางร่วมกับการใช้ระเบียบวิธี Gradient Projection ในการปรับแก้ไปทางเดินเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง หลังจากที่ได้ทำการจำลองควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคนิคดังกล่าวข้างต้น ก็จะทำการทดลองขับหุ่นยนต์ CRS Robot โดยควบคุมเคลื่อนที่บนเส้นทางวงกลมพร้อมทั้งหลบหลีกสิ่งกีดขวาง โดยการควบคุมแรงและตำแหน่งทั้ง 2 ส่วน อาศัยความสัมพันธ์ของ Jacobian และ Inverse Kinematics เพื่อคำนวณหาค่าที่น้อยที่สุดของการเปลี่ยนแปลงมุมของข้อต่อเมื่อเทียบกับค่ามุมข้อต่อที่ต้องการ ตามแนวคิดของ Y. Inoue, S. Kitamura และ Y. Kidawara [16] ได้กล่าวไว้ โดยควบคุมแรงสัมผัสให้คงที่ขณะทำการเคลื่อนที่