บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นำเรื่อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาได้ด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิยานิพนธ์นี้ ซึ่งจะประกอบด้วย

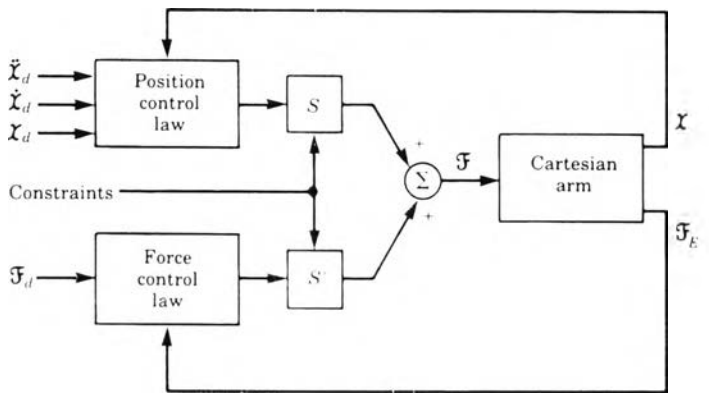
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงหุ่นยนต์
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องดิจิตัล
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบผสม

2.2 การควบคุมแรงหุ่นยนต์

การควบคุมแรงเป็นแนวคิดเริ่มต้นในการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม เมื่อศึกษาถึงงานวิจัยในเรื่องนี้ใน 20 ปีที่ผ่านมาจะเห็นถึงการพัฒนาวิธีการควบคุมแรงจากงานวิจัยต่างๆ มากมาย ในปี 1981 M. H. Raibert และ J. J. Craig [1] ได้เสนอวิธีในการควบคุมแรงแบบผสมระหว่างแรงกับตำแหน่ง (Hybrid Force/Position Control) สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสิ่งกีดขวาง แนวคิดที่นำเสนอจะแยกแกนควบคุมระหว่างทิศทางที่การเคลื่อนที่ถูกขวางกั้นกับทิศทางที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งจะใช้การควบคุมแรงกับทิศทางที่การเคลื่อนที่ถูกขวางกั้น และการควบคุมตำแหน่งในทิศทางที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และได้แนะนำเมตริกซ์เลือกแกน S เพื่อแยกแกนในการควบคุม เมตริกซ์เลือกแกน S จะเป็นเมตริกซ์ขนาด nxn ที่ตำแหน่งตามแนวทแยง (diagonal) ที่ i จะมีค่าเป็นหนึ่ง ถ้าตำแหน่งที่ i เป็นตำแหน่งที่ควบคุมแรง และ ที่ตำแหน่งอื่นตามแนวทแยงจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งจะเป็นการควบคุมแบบตำแหน่ง การควบคุมแรงที่นำเสนอเป็นการควบคุมแรงทางตรง (Explicit) ซึ่งจะวัดแรงที่เกิดขึ้นแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงที่ต้องการ และนำความผิดพลาดหรือผลต่างนี้ไปใช้ในการหาค่าสัญญาณควบคุม จุดอ่อนของวิธีการนี้คือไม่สามารถรับประกันเสถียรภาพของการควบคุมได้

การควบคุมแรงทางอ้อมเช่นการควบคุมความหน่วง (Impedance Control) ดังที่นำเสนอในงานวิจัยของ Neville Hogan ในปี 1985 [2] หรือการควบคุมความแข็ง (Stiffness Control) จะให้เสถียรภาพที่ดีขึ้น การควบคุมแรงทางอ้อมจะใช้ตำแหน่งหรือความเร็วของปลายแขนที่สัมพันธ์กับค่าแรงเป็นพื้นฐานในการคำนวณสัญญาณควบคุมและทำการควบคุมผ่านตัวควบคุมตำแหน่ง (Position Controller) เป็นผลทำให้การควบคุมไม่มีผลกับการเปลี่ยนความยืด

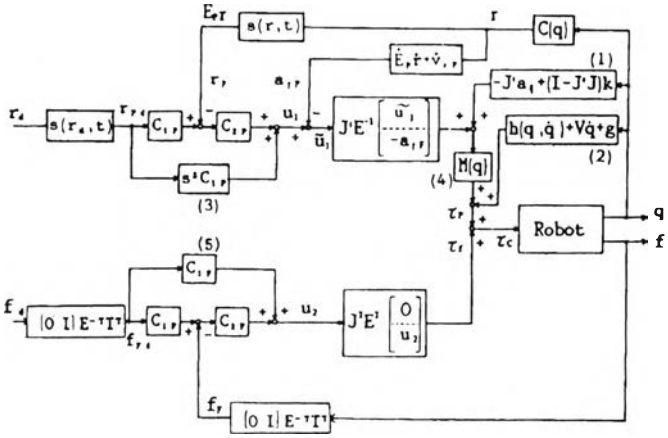
หยุ่นของผิวสัมผัสและการควบคุมจะยังมีเสถียรภาพแม้ว่าจะควบคุมแรงในทิศทางที่ไม่มีสิ่งแวดล้อมขวางกั้น ตัวควบคุมแรงจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่สูง (Low Pass Filter) และจะมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์และความไม่แน่นอนของสมการระบบ อย่างไรก็ตาม การควบคุมแบบนี้ก็จุดอ่อนก็คือการหาตำแหน่งที่สัมพันธ์กับแรงทำได้ยาก และการตอบสนองของระบบจะช้าลงเนื่องจากการควบคุมแรงกระทำผ่านตัวควบคุมตำแหน่งที่เป็นตัวกรองความถี่สูง



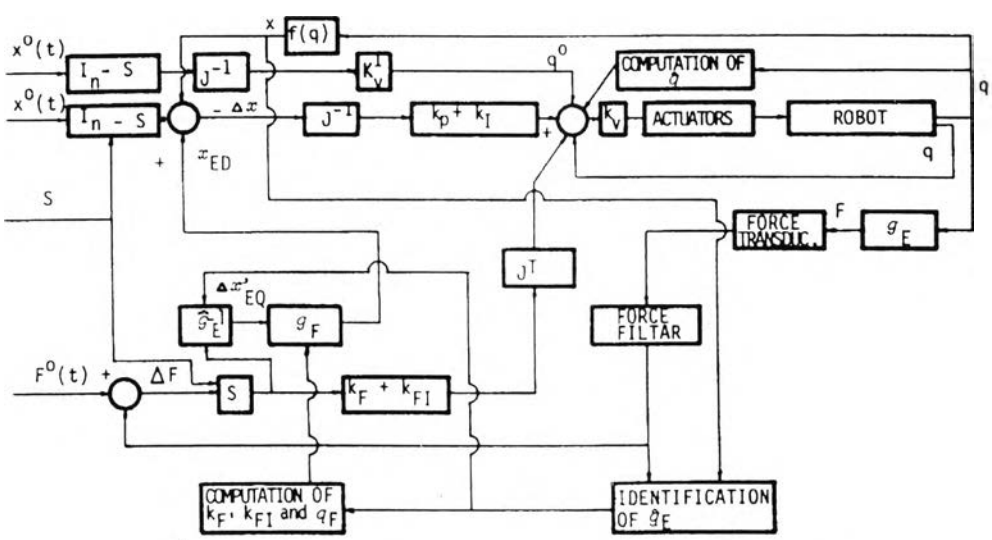
รูปที่ 2.1 วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของ M. H. Raibert และ J. J. Craig

การควบคุมความหน่วงเป็นการควบคุมสมการพลศาสตร์ระหว่างหุ่นยนต์กับสิ่งแวดล้อมให้มีความหน่วงเป็นไปตามที่กำหนด การควบคุมแบบนี้ แรงและตำแหน่งปลายแขนจะเป็นข้อมูลป้อนกลับในการควบคุม หรืออีกนัยหนึ่งก็คือระบบจะควบคุมทั้งแรงและตำแหน่งพร้อมกัน ในทางปฏิบัติมักใช้การควบคุมแรงผ่านทางตัวควบคุมตำแหน่ง จุดเด่นเมื่อเทียบกับการควบคุมแรงแบบผสม (การควบคุมแรงทางตรง) ก็คือไม่ต้องแยกแกนควบคุมระหว่างแรงกับตำแหน่ง แต่การควบคุมแบบนี้ก็ยังมีจุดอ่อนตรงที่ถ้าค่าเกนในตัวควบคุมตำแหน่งมีค่าคงที่ ก็จะทำให้ความหน่วงมีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของหุ่นยนต์ และเพื่อให้ความหน่วงมีค่าคงที่ ได้มีความพยายามที่จะใช้การควบคุมทั้งสองวิธีร่วมกัน คือการควบคุมแรงแบบผสมและการควบคุมความหน่วง เพื่อให้สามารถปรับหรือควบคุมค่าความหน่วงของระบบโดยรวมได้ ดังจะเห็นได้จากงานของ Robert J. Anderson และ Mark W. Spong ใน 1988 เรื่อง วิธีการควบคุมความหน่วงแบบผสม (Hybrid Impedance Control) [3] ซึ่งได้นำเสนอผลลัพธ์เฉพาะในการจำลองควบคุมแขนกลแบบสองข้อต่อเท่านั้น และงานของ Tsuneo Yoshikawa, Toshiharu Sugie และ Masaki Tanaka [4] ในปีเดียวกัน เรื่อง การควบคุมแรงแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง ซึ่งได้นำสมการพลศาสตร์ของระบบมาใช้อย่างเต็มรูปแบบเพื่อให้ประสิทธิภาพดีขึ้น และงานของ Dragan M. Stokic และ Miomir K. Vukobratovic ในปี 1991 เรื่อง การควบคุมแรงแบบผสมที่มีการปรับค่า (Adaptive Hybrid Position/Force Control) [5] ซึ่งใช้การควบคุมแรงทั้งทางตรงและทางอ้อมผสมกัน และยังนำความค่าผิดพลาดของแรงไปใช้ในการปรับค่าความหน่วง ในบทความได้แสดงผลลัพธ์การจำลองควบคุมหุ่น MANUTEC-R3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าที่เร็วขึ้นจากการปรับค่าและได้ทำการทดลองเพื่อแสดงถึงความเป็นไปได้ในทาง

ปฏิบัติ และงานของ D. Surdilovic และ J. Kirchhof ในปี 1996 เรื่อง การควบคุมแรงและความหน่วงบนตัวควบคุมตำแหน่ง [6] วิธีการนี้ ตัวควบคุมจะควบคุมแรงและควบคุมความหน่วงพร้อมกัน และทำการคำนวณสัญญาณควบคุมผ่านทางตัวควบคุมตำแหน่ง ซึ่งจะมีจุดเด่นคือสามารถใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ การควบคุมทั้งสี่วิธีที่กล่าวมาใช้การควบคุมแรงทางตรงและทางอ้อมผสมผสานกัน จุดต่างก็คือวิธีในการผสมการควบคุมทั้งสองวิธีและวิธีในการคำนวณสัญญาณควบคุม



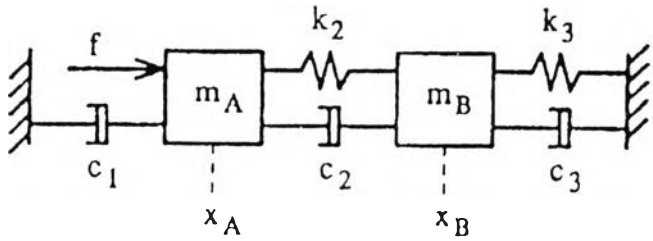
รูปที่ 2.2 วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของ Yoshikawa และคณะ



รูปที่ 2.3 วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของ Stokic และคณะ

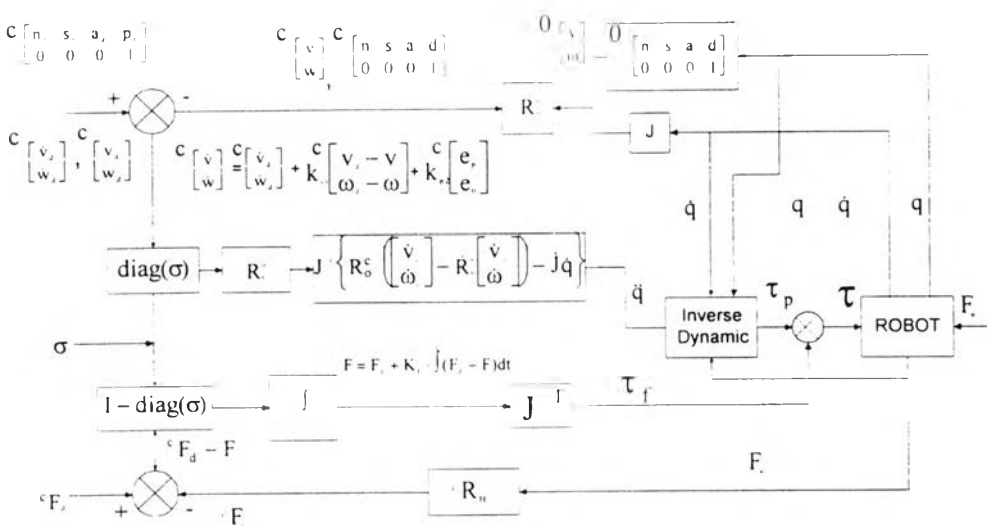
ในปี 1990 Richard Volpe และ Pradeep Khosla ได้นำเสนอแบบจำลองของ หุ่นยนต์/อุปกรณ์ตรวจรู้/สิ่งแวดล้อม [7] ที่ทำงานร่วมกัน แบบจำลองมีอันดับสี่ (4th order Model) การหาแบบจำลองก็เพื่อที่จะทำให้เข้าใจการควบคุมความหน่วงได้อย่างลึกซึ้ง จากนั้น ในปี 1991 ก็ได้นำเสนอการควบคุมแรงกระแทก (Impact Control) [8] ซึ่งจะเกิดขึ้นในขณะที่ปลายแขนเริ่มเข้าสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้ได้เปรียบเทียบการควบคุมระหว่างการควบคุมแรงทางตรง

แบบอินทิกรัล การควบคุมแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย และการควบคุมความหน่วง และนำเสนอการควบคุมแรงกระแทกโดยใช้การควบคุมแรงทางตรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชยที่มีค่าเกนเป็นลบ ผลลัพธ์ที่ได้จะเทียบเท่ากับการควบคุมความหน่วงอันดับสองที่มีมวลสูงมาก และต่อมา ในปี 1992 ก็ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการควบคุมแรงทางตรงด้วยวิธีการต่างๆ [9]



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของ หุ่นยนต์/อุปกรณ์ตรวจรู้/สิ่งแวดล้อม ของ Volpe และคณะ

ในปี 1995 Z. Lu, Sadao Kawamura, และ A. A. Goldenberg [10] และ C. M. Kwan [11] ได้นำเทคนิคการควบคุมแบบ Sliding Control และ Adaptive Control มาใช้กับการควบคุมความหน่วงเพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพต่อสิ่งรบกวนมากขึ้น เทคนิคการควบคุมแบบ Sliding Control [11] เป็นวิธีการควบคุมที่มีความทนทาน (Robust) ที่สามารถรับมือกับการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์และสิ่งรบกวนภายนอกได้ดี อย่างไรก็ตาม วิธีการควบคุมแบบนี้ก็มีจุดอ่อนตรงที่การควบคุมจะมีการสั่น (Chattering) วิธีการควบคุมแบบ Adaptive Control [12] เป็นอีกวิธีการในการจัดการกับพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนค่า ซึ่งจะมีตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ฝังอยู่ในตัวควบคุม การประมาณค่าจะเป็นแบบต่อเนื่อง (Online) และประสิทธิภาพการควบคุมจะดีขึ้นเมื่อเวลาในการควบคุมมากขึ้น



รูปที่ 2.5 วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของนายไพรัช ตั้งพรประเสริฐ

ช่วงต้นทศวรรษที่ 90 เริ่มมีการนำเอาวิธีการควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Control) และโครงสมองประดิษฐ์ (Artificial Neural Network) มาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ซึ่งรวมถึงการควบคุมแรงของหุ่นยนต์ ดังจะเห็นได้จากงานของ Feng-Yih Hsu และ Li-Chen Fu ในปี 1995 [13] และปี 1996 [14] วิธีการควบคุมแบบฟัซซีและโครงสมองประดิษฐ์เป็นวิธีการควบคุมที่มีความฉลาดมากขึ้น การควบคุมที่มีพื้นฐานเป็นแบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Based Controller) จะทำให้ไม่ต้องกังวลกับการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความแม่นยำ การควบคุมแบบปัญญาประดิษฐ์จะสามารถรับมือกับระบบที่มีความสลับซับซ้อนมากได้ดี

งานวิจัยในเรื่องการควบคุมแรงของหุ่นยนต์ยังมีอีกมากและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง แต่ส่วนมากยังมีพื้นฐานอยู่บนการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง หรือการควบคุมความหน่วง โดยพัฒนาวิธีการเพื่อให้มีเสถียรภาพมากขึ้น สามารถใช้ได้กับหุ่นยนต์ที่มีความอิสระมากขึ้น มีสมรรถนะการควบคุมดีขึ้น และอื่นๆ อีกมาก ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ตระหนักถึงความสำคัญของการควบคุมแรงของหุ่นยนต์ และได้ทำการวิจัยในด้านนี้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถก้าวทันเทคโนโลยีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากงานวิทยานิพนธ์ของ นายไพรัช ตั้งพรประเสริฐ [15] ในปี 1996 เรื่อง การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง ซึ่งได้สร้างตัวควบคุมแบบผสมสำหรับหุ่นยนต์จุฬาฯ 2 และงานวิทยานิพนธ์ของ นายบวร ปัญญาวรวัจน์ [16] ซึ่งสร้างตัวควบคุมแรงของหุ่นยนต์จุฬาฯ 2 แบบทางอ้อมที่มีการปรับค่า

2.3 การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องดิจิตัล

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมโดยใช้วิธีป้อนกลับจากภาพ เริ่มมีการเผยแพร่ครั้งแรกในปี 1979 โดย J. Hill และ W. T. Park ในงานวิจัยเรื่อง "Real time control of a robot with a mobile camera" [17] โดยในการศึกษานี้ ได้แนะนำคำศัพท์ "Visual Servoing" (การขับเคลื่อนด้วยรูปภาพ) ขึ้น ซึ่งเป็นการป้อนกลับตำแหน่งเพื่อใช้ในการควบคุม POSE ของปลายแขนกลสัมพัทธ์กับวัตถุเป้าหมาย ในปี 1981 Clifford Geschke [18] ได้นำการป้อนกลับด้วยรูปภาพมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อสวมนอต (Bolt) เข้ารู บทความนี้แนะนำการควบคุมแบบปิดโดยใช้ระบบกล้องดิจิตัลในการวัดตำแหน่งในสามมิติแล้วนำข้อมูลนี้มาใช้ป้อนกลับเข้าระบบควบคุม กล้องจะยึดที่ปลายแขนและอาศัยการจัดวางกระจกในตำแหน่งที่เหมาะสม ในปี 1985 W. F. Clocksin และคณะ ได้นำการป้อนกลับด้วยภาพมาใช้จริงในการควบคุมการเชื่อมเหล็กแผ่นบาง [19] และในปี 1988 M. Kabuka, E. McVey และ P. Shironoshita ได้แนะนำการใช้กล้องดิจิตัลเคลื่อนที่ในการติดตามวัตถุ [20] กล้องจะเลื่อนและปรับสเกลโดยการใช้ข้อมูลจุดศูนย์กลางของวัตถุและพื้นที่ การควบคุมติดตามใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Adaptive Control

และในปีเดียวกัน Xinhua Zhuang, Thomas S. Huang และ Robert M. Haralick [21] ได้ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่จากภาพออร์โธกราฟิคสามมุมมองและพิจารณา 4 จุดของวัตถุ

งานวิจัยที่มีบทบาทในยุคต้นของ Visual servoing เกิดขึ้นในต้นทศวรรษ 1980 โดย Sanderson A. C. และ Weiss L. E. ที่ CMU โดยนำเสนอผลงาน [22], [23], [24] โดยที่ โดย Sanderson และ Weiss ได้แบ่งพฤติกรรมการป้อนกลับด้วยภาพเป็น 4 ประเภท คือ

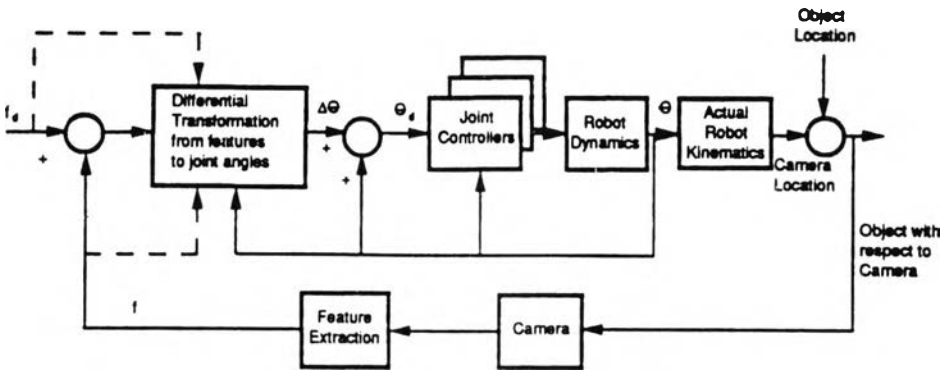
1. Static Look and Move (การมองแล้วเคลื่อนที่)
2. Dynamic Look and Move (การมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต)
3. Position Based Visual Servoing (การขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยใช้ตำแหน่ง)
4. Image Based Visual Servoing (การขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ)

Look and Move หรือ "การมองแล้วเคลื่อนที่" จะมีการทำงานแบบเป็นลำดับ กล่าวคือ ใช้กล้องดิจิตัลในการมองเพื่อหาตำแหน่งวัตถุ จากนั้นใช้ตัวควบคุมของแขนกลเพื่อขับเคลื่อนแขนให้ไปสู่เป้าหมาย และอาจทำขบวนการนี้ซ้ำได้เพื่อให้การควบคุมมีความแม่นยำมากขึ้น (ซึ่งจะเป็นการควบคุมแบบที่เรียกว่า Dynamic Look and Move) ส่วนลักษณะพฤติกรรมของ Visual Servoing จะใช้ระบบกล้องดิจิตัลทำการขับข้อต่อแขนกลโดยตรง นั่นก็คือมันจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมด้วย Position Based จะหมายถึงการใช้ตำแหน่งในแกนอ้างอิงในการอธิบายการเคลื่อนที่ ส่วน Image Based นั้นจะใช้ตำแหน่งในรูปภาพแทน และมักจะนิยามความคลาดเคลื่อนในรูปของพารามิเตอร์ในรูปภาพ (Image parameter)

งานที่น่าสนใจของ Sanderson และ Weiss ก็คือการแนะนำว่าสามารถที่จะขับแขนกลโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวัตถุในรูปภาพโดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องแปลงออกมาเป็นตำแหน่งของวัตถุ อย่างไรก็ตาม Sanderson และ Weiss ทำการทดสอบเพียงการจำลองเท่านั้น และระบุว่า หลักการนี้สามารถใช้ได้กับระบบที่มีความอิสระ (Degree of Freedom) เท่ากับ 2-3 แต่มีปัญหาเกิดขึ้นในระบบที่มีความอิสระเท่ากับ 5 หลังจากนั้น ได้มีหลายกลุ่มวิจัยที่ทำการทดลองโดยใช้หลักการของ Sanderson และ Weiss

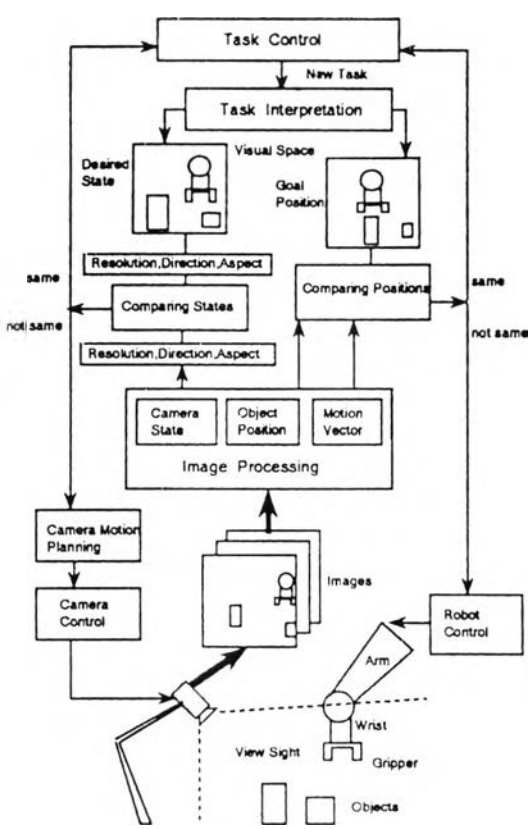
การทดลองเชิงปฏิบัติในการป้อนกลับพารามิเตอร์ของวัตถุจากรูปภาพที่มีลักษณะไม่เป็นอิสระจากกัน เริ่มมีการเผยแพร่ในปี 1990 โดย Chongstitvatana และ Conkie, [25], [26], [27] ที่มหาวิทยาลัย Edinburgh ซึ่งทำการควบคุม แขนกลที่มีความอิสระเท่ากับ 3 โดยใช้กล้องสองตัวเพื่อวัดตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุกับเป้าหมาย และใช้ตัวอย่างการทดลองจับชิ้นงานวางซ้อนทับกัน Chongstitvatana และ Conkie ใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบเต็มเพื่อควบคุมระบบที่ไม่เป็นอิสระจากกัน

ในช่วงเดียวกัน Feddema, Lee และ Mitchell ได้นำเสนองานวิจัยที่มีบทบาทมากที่แสดงถึงการทดลองปฏิบัติกับระบบที่มีความซับซ้อนมากใน [28] วิธีการควบคุมจะเลือกใช้ลักษณะของวัตถุ (Image Feature) อย่างอัตโนมัติเพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชิ้นงานกับปลายแขน กล้องดิจิตัลจะยึดติดที่ปลายแขน การเลือกใช้ลักษณะของวัตถุ ก็เพื่อให้รูปภาพที่ได้มีความสมบูรณ์ ตีความวัตถุได้ง่าย และมีลักษณะที่พิจารณามีความเป็นเอกลักษณ์ และรวมถึงการควบคุมที่มี Controllability และ Observability และมีความไวที่ดี



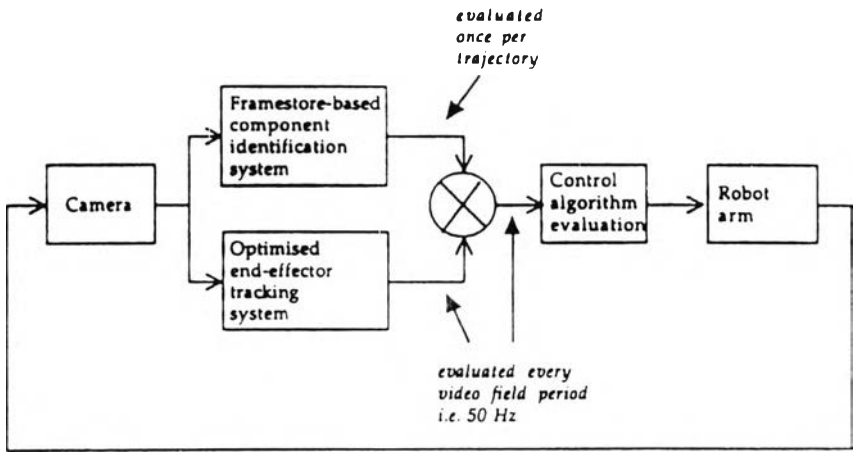
รูปที่ 2.6 โครงสร้างการควบคุมของ Feddema และคณะ

Jiang Yu Zheng, Qian Chen และ Saburo Tsuji (1991) ได้แนะนำการใช้กล้องดิจิตัลแบบเคลื่อนที่ในการควบคุมแขนกล [29] โดยการวางกล้องในตำแหน่งที่ต้องการซึ่งมีระยะห่างและมุมมองที่เหมาะสม ข้อมูลของวัตถุก็จะสมบูรณ์ขึ้น



รูปที่ 2.7 ผังระบบควบคุมของ Zheng และคณะ

ในปี 1993 S. W. Wijesoma, D. F. H. Wolfe และ R. J. Richards ได้เสนอวิธีในการใช้กล้องดิจิตัลนำร่องการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ [30] การควบคุมใช้แบบ Dynamic Look and Move และแนะนำจุดเด่นจุดด้อยของการยึดกล้องระหว่างแบบที่ยึดกล้องติดที่ปลายแขนและแบบที่ยึดกล้องอยู่กับที่ การศึกษาจะเปรียบเทียบการควบคุมแบบมองแล้วเคลื่อนที่กับการควบคุมแบบควบคุมที่ข้อต่อและควบคุมตำแหน่งในสามมิติ เทคนิคการควบคุมเป็นแบบ Dynamic Look and Move ทำให้ไม่จำเป็นต้องปรับเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างแม่นตรง



รูปที่ 2.8 โครงสร้างการควบคุมแบบรูปภาพของ ของ Wijesoma และคณะ

ในการศึกษาของ Takashi Kubota และ Hideki Hashimoto [31] ที่เผยแพร่ในปี 1989 ได้นำเสนอการใช้โครงสมองประดิษฐ์ (Artificial Neural Network) เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์รูปภาพกับตำแหน่งของข้อต่อแขนกล Kubota และ Hashimoto ใช้จุดมุมบนกล่องสี่เหลี่ยมเป็นจุดควบคุม (ทั้งหมด 4 จุด) ซึ่งจะทำให้สามารถหาความคลาดเคลื่อนของปลายแขน (ตำแหน่งและทิศทาง) ได้ อย่างไรก็ตาม Kubota และ Hashimoto ใช้โครงสมองประดิษฐ์เข้ามาใช้แทนการหาความสัมพันธ์ที่ยุ่งยากซับซ้อน ข้อเสียของวิธีการนี้คือโครงสมองประดิษฐ์ที่ใช้มีขนาดใหญ่ และใช้เวลาในการเรียนรู้ความสัมพันธ์นานมาก

แนวทางหนึ่งในการขับแขนกลโดยใช้ระบบกล้องดิจิตัลก็คือการใช้ Geometric Invariants ดังจะเห็นได้จากงานของ Gregory D. Hager (1994) [32], และ H. T. Tsui, Z. Y. Zhang, S. H. Kong (1996) [33] วิธีการนี้จะใช้การพิจารณาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นใน Image Space เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกล กล่าวคือกล้องจะมองเห็นทั้งปลายแขนและวัตถุ และเห็นความผิดพลาดหรือตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างปลายแขนกับวัตถุ วิธีการนี้ ทำให้ไม่จำเป็นในการปรับเทียบกล้องให้ละเอียดมากนัก แต่วิธีการนี้ก็มีข้อเสียอยู่ที่ไม่สามารถรับประกันเสถียรภาพของการควบคุมได้

Peter I. Corke และ Malcolm C. Good (1996) [34] ได้ทดลองศึกษาผลทางพลศาสตร์ที่มีต่อการควบคุมป้อนกลับด้วยรูปภาพ บทความนี้แยกความแตกต่างระหว่างการควบคุมด้วยรูปภาพแบบจลนศาสตร์ (Kinematic) กับแบบพลศาสตร์ (Dynamic) การทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยรูปภาพที่ผ่านมาจะพิจารณาเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ปรากฏบนรูปภาพกับตำแหน่งของวัตถุ แต่จากการทำงานของระบบกล้องดิจิตัลที่มีความล่าช้า (Latency) เนื่องจากต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการประมวลรูปภาพเพื่อให้ได้ข้อมูลตามที่ต้องการ การพิจารณาถึงพลศาสตร์ของระบบทำให้การควบคุมมีสมรรถนะดีขึ้น

ในปีเดียวกัน William J. Wilson, Carol C. Williams Hull, และ Graham S. Bell (1996) [35] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมปลายแขนหุ่นยนต์โดยใช้การป้อนกลับด้วยรูปภาพแบบ Position Based บทความนี้แสดงวิธีการควบคุมแบบครบวงจร ตั้งแต่การคำนวณตำแหน่งวัตถุเทียบกับตัวกล้อง ไปจนถึงการทดลองควบคุม

Koichi Hashimoto, Takumi Ebine และ Hidenori Kimura (1996) [36] ได้นำเทคนิคการควบคุมแบบได้ผลดีที่สุด (Optimal Control) มาใช้ในการควบคุมป้อนกลับด้วยรูปภาพ การควบคุมจะพิจารณาจำนวนลักษณะของวัตถุมากกว่าความอิสระของเป้าหมาย แล้วใช้เทคนิคการควบคุมแบบได้ผลดีที่สุดจัดการกับลักษณะของวัตถุที่เกินมา และทดลองบนหุ่นยนต์ PUMA 560 โดยยึดกล้องไว้ที่ปลายแขน

D. Khadraoui, และคณะ (1996) [37] ได้ใช้เลเซอร์สองตัวยิงแสงในแนวระนาบเพื่อให้กล้องดิจิตัลสามารถมองหาลักษณะของวัตถุในรูปภาพได้มีประสิทธิภาพขึ้น การใช้เลเซอร์จะทำให้หมดปัญหากับแสงภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ แสงภายนอกจะทำให้รูปภาพที่บันทึกมีข้อมูลมากกว่าที่ต้องการ และทำให้ต้องใช้ความพยายามสูงในการประมวลรูปภาพเนื่องจากรูปภาพมีความซับซ้อนมาก เลเซอร์แก้ปัญหานี้โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นเฉพาะข้อมูลวัตถุตามแนวภาพฉายของเลเซอร์เท่านั้น

Rafael Kelly (1996) [38] ได้พิสูจน์เสถียรภาพของการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยรูปภาพกับหุ่นยนต์แนวราบสองแขน (Planar Robots) โดยยึดกล้องอยู่กับที่และกล้องสามารถมองเห็นปลายแขนและวัตถุเป้าหมาย และแสดงความทนทานของการควบคุมต่อความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์เช่นความยาวโฟกัสหรือมุมในการวางกล้อง

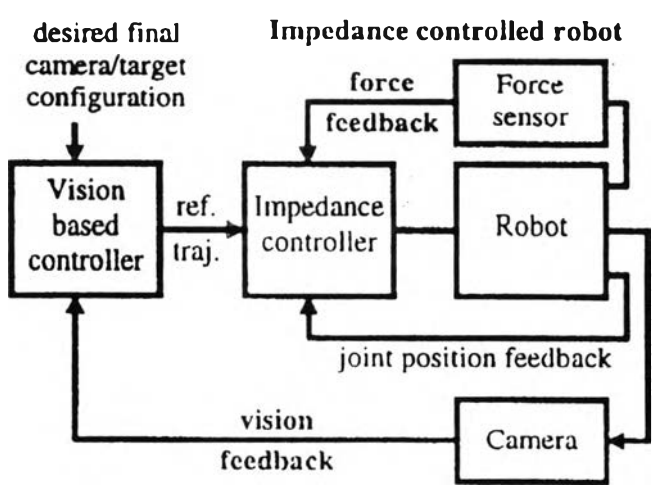
Herry Sutanto, Rajeev Sharma และ Venugopal (1997) [39] ได้ใช้การประมาณหาจาโคเบียนจากการเคลื่อนที่ วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องมีสมการจาโคเบียนในตอนต้น แต่จะใช้การประมาณขึ้นจากข้อมูลการเคลื่อนที่โดยการพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งข้อต่อว่ามีความไวต่อ

การเปลี่ยนพารามิเตอร์รูปภาพอย่างไร และได้จำลองและทดลองควบคุมกับหุ่นยนต์ที่มีความอิสระเท่ากับ 6

การตีความรูปภาพก็เป็นอีกเรื่องหนึ่งที่สนับสนุนการทำงานของการควบคุมด้วยรูปภาพ ได้มีการศึกษามากมายที่เกี่ยวข้องกับการตีความรูปภาพ ดังจะเห็นได้จากงานของ Shunjia Yu และ Rueywen Liu (1993) [40], E.R. Davies และ D. Celano (1993) [41], Suyi Shao, John Staudhammer, และ Ralph R. Grams (1993) [42], Paul S. WU และ Ming LI (1996) [43] การศึกษาจะรวมถึงการตีความที่มีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และได้ข้อมูลที่ถูกต้อง

Set Hutchinson, Gregory D. Hager, และ Peter I. Corke (1996) [44] ได้สรุปแนวคิดที่ผ่านมาทั้งหมดเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยรูปภาพ และรวมถึงพื้นฐานศาสตร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม รวมถึงการแปลงแกนระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งในรูปภาพและวิธีในการขับควบคุม ปัจจุบันยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมด้วยรูปภาพเกิดขึ้นอีกเป็นจำนวนมาก ทั้งในเรื่องของกรรมวิธีในการหาลักษณะวัตถุจากภาพที่บันทึก ทั้งในเรื่องของความเร็วและความละเอียด การหาจาโคเบียนที่มีประสิทธิภาพขึ้น การนำเอาระบบฟัซซี (Fuzzy Inference System) หรือโครงสมองประดิษฐ์ เข้ามาช่วยในกรรมวิธีต่างๆ การควบคุมติดตามวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง การควบคุมร่วมกับวิธีการควบคุมแบบอื่น และอื่นๆ อีกมาก

2.4 การควบคุมแบบผสม

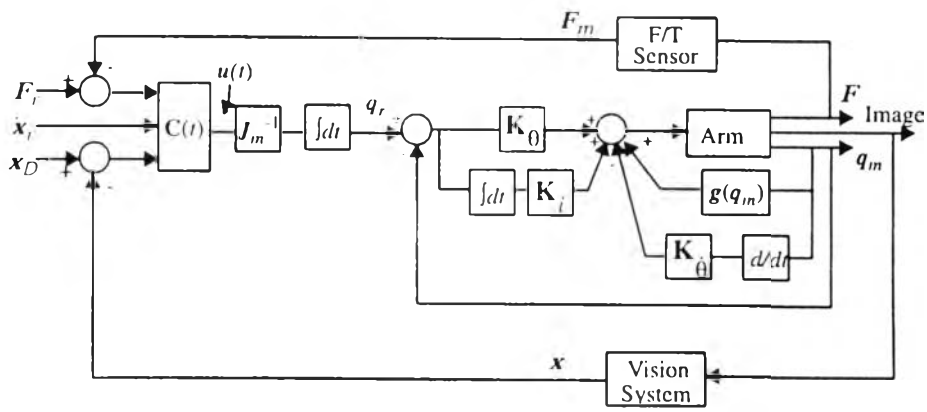


รูปที่ 2.9 โครงสร้างการควบคุมของ Andres Castano และคณะ

การควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่ในงานวิจัย แนวคิดในการควบคุมแบบผสมเริ่มจากงานของ M. H. Raibert และ J. J. Craig (1981) [1] ซึ่งได้ควบคุมแรงของหุ่นยนต์แบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง การควบคุมใช้วิธีแยกแกนควบคุมทำให้การควบ

คุมแรงและการควบคุมตำแหน่งเป็นอิสระจากกัน Andres Castano และ Seth Hutchinson (1992) [45] ได้ใช้แนวคิดนี้กับการควบคุมรูปภาพและตำแหน่งพร้อมกัน กล่าวคือจะควบคุมด้วยรูปภาพในสองทิศทางที่ขนานกับผิวสัมผัสและควบคุมตำแหน่งในทิศทางที่เหลือ วิธีการที่นำเสนอมีพื้นฐานอยู่บนสมการทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ

ในปี 1995 Bradley J. Nelson, Daniel Morrow, และ Pradeep K. Khosla [46] ได้แนะนำสามวิธีในการควบคุมแรงและรูปภาพ ประกอบด้วย การควบคุมแบบสลับ การควบคุมแบบผสม และ การควบคุมร่วมกัน ในการควบคุมแบบสลับจะควบคุมแรงและรูปภาพไม่พร้อมกัน โดยอาจเริ่มจากการควบคุมรูปภาพเพื่อนำหุ่นยนต์เข้าไปใกล้วัตถุ จากนั้นก็สลับเป็นการควบคุมแรง การควบคุมแบบผสมและการควบคุมร่วมกันจะควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกัน จุดต่างก็คือการควบคุมแบบผสมจะแยกแกนในการควบคุม ทำให้แรงและรูปภาพเป็นอิสระจากกัน ส่วนการควบคุมแบบร่วมกันจะควบคุมแรงและรูปภาพในแกนเดียวกัน การทดลองกระทำบนหุ่นยนต์ PUMA 560 และระบบประมวลผลที่ซับซ้อนและมีสมรรถนะสูงเนื่องจากการควบคุมแรงและรูปภาพต่างก็มีความยุ่งยากในตัวเอง

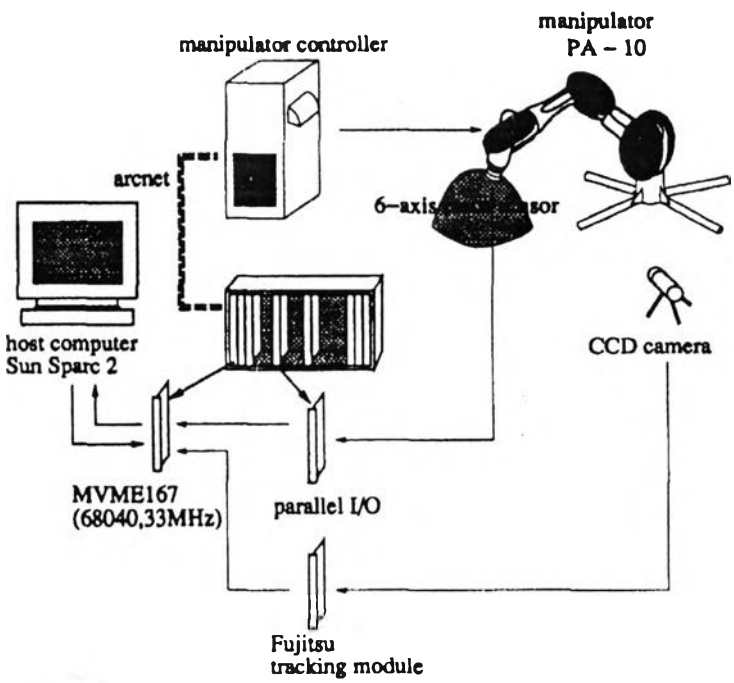


รูปที่ 2.10 โครงสร้างการควบคุมทั่วไปที่เสนอโดย Nelson และคณะ

ในปีต่อมา Bradley J. Nelson และ Pradeep K. Khosla (1996) ก็ได้สานต่อแนวคิดที่ข้อมูลแรงและรูปภาพจะเหมาะสมกับการทำงานที่ต่างกัน กล่าวคือรูปภาพจะนำหุ่นยนต์เข้ามาใกล้กับวัตถุ ในขั้นตอนนี้ ข้อมูลแรงไม่มีความหมาย จากนั้น ข้อมูลแรงจะทำให้สามารถควบคุมแรงสัมผัสชิ้นงาน และข้อมูลรูปภาพมีความสำคัญน้อยมากในขั้นตอนนี้ Bradley J. Nelson เสนอวิธีในการเปรียบเทียบความสำคัญของข้อมูลทั้งสองเพื่อจะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [47] และโดยการเปรียบเทียบความสำคัญ ก็จะสามารถนำข้อมูลทั้งสองมาใช้งานได้อย่างไร้รอยต่อ Bradley J. Nelson ได้ใช้วิธีการควบคุมแรงและรูปภาพแบบไม่เชิงเส้นกับช่วงรอยต่อการเปลี่ยนโหมดควบคุมระหว่างแรงกับรูปภาพ Bradley J. Nelson และ Pradeep K. Khosla (1997) ยังได้นำเทคนิคการเปรียบเทียบความสำคัญนี้ไปใช้กับการควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกล

[48] ซึ่งโดยทั่วไปจะมีการป้อนข้อมูลกลับมาที่ผู้ใช้ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เช่นแรง รูปภาพ และ/หรือเสียง

Koh Hosoda, Katsuji Igarashi และ Minoru Asada (1996) [49] ได้เสนอวิธีการควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันบนพื้นผิวที่ไม่ทราบทิศทาง เทคนิคการควบคุมเป็นแบบผสม และอาศัยการปรับค่าตามทิศทางของผิวสัมผัส บทความนี้เสนอสองวิธีในการควบคุมที่มีข้อมูลจากเซนเซอร์หลายชนิด วิธีแรกจะใช้การหลอมหรือรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆ ให้เป็นข้อมูลแบบเดียว (Sensor Fusion) แล้วจึงนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการควบคุม อีกวิธีก็คือจะแยกแกนในการควบคุมแบบเดียวกันกับการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง วิธีนี้จะใช้การควบคุมแต่ละชนิดกับแต่ละข้อมูลจากเซนเซอร์ แล้วแยกควบคุมกันอย่างอิสระ การทดลองกระทำบนหุ่นยนต์ PA-10 ของบริษัทมิตซูบิชิ



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ทดลองของ Hosoda และคณะ

ต่อมา Guilaume Moral, Ezio Malis และ Sylvie Boudet (1998) [50] ได้เสนอวิธีการควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันโดยใช้การควบคุมความหน่วง โครงสร้างการควบคุมมีลักษณะที่ง่ายขึ้นและมีเสถียรภาพมากขึ้น และการควบคุมความหน่วงและการควบคุมรูปภาพสามารถแยกคิดได้อย่างอิสระ และได้ทำการทดลองกับหุ่นยนต์ PA-10 ของบริษัทมิตซูบิชิ

แม้ว่าการควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันจะทำให้หุ่นยนต์มีขีดความสามารถเพิ่มขึ้นมาก และจะทำให้หุ่นยนต์ทำงานได้ใกล้เคียงกับมนุษย์มากขึ้น แต่งานวิจัยในด้านนี้ยังมีไม่มากนัก ประกอบกับวิธีการที่ผ่านมาจะอยู่บนพื้นฐานของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และต้องการการปรับเทียบพารามิเตอร์อย่างละเอียด ทำให้วิธีการที่ผ่านมาใช้ได้เฉพาะหุ่นยนต์ที่

ออกแบบไว้เท่านั้น ยังมีอีกหลายประเด็นที่จะต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อให้สามารถนำการควบคุมแรงและรูปภาพไปใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกัน พื้นฐานของการควบคุมเป็นแบบปัญญาประดิษฐ์ (AI Based) ซึ่งทำให้โครงสร้างของการควบคุมง่ายขึ้น และไม่ต้องทำการปรับเทียบพารามิเตอร์และไม่ต้องมีสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบทั้งหมด