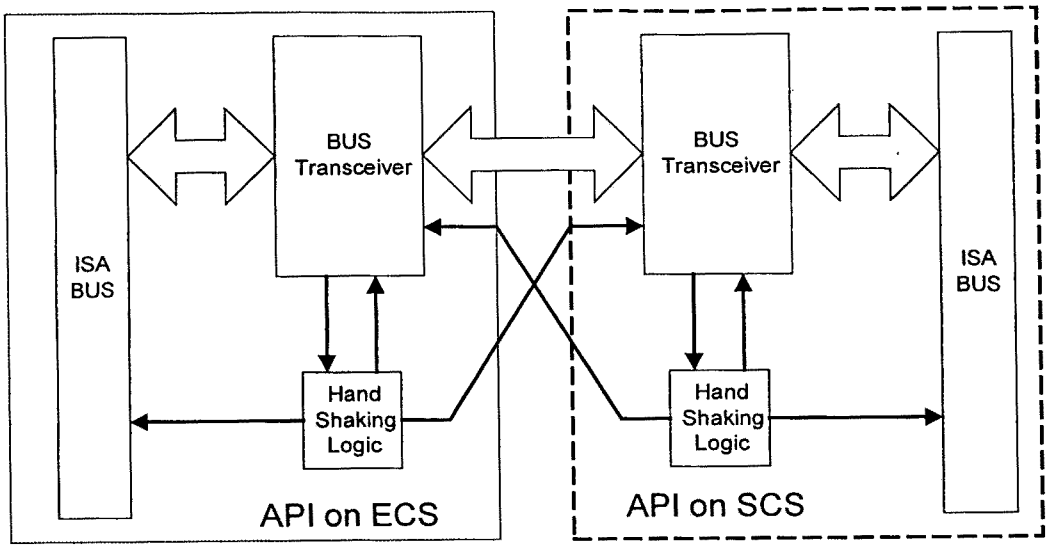


รูปที่ 4.5 เป็นรูปบล็อกไดอะแกรมแสดงฟังก์ชันการทำงานของระบบ API

5. ผลการทดลอง

การทดลองจะมีด้วยกันทั้งหมด 3 ชุด โดยใช้ระบบควบคุมแบบ PD เป็นหลัก สำหรับวิธีการควบคุมขั้นสูงที่มีความสามารถปรับได้ (Adaptive Control) จะกล่าวโดยละเอียดในเอกสารอ้างอิงที่ 1 และ 2 การทดลองนี้จะพิจารณาเสถียรภาพ (stability) และความคงเส้นคงวาเมื่อค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง (robustizability) ของระบบควบคุมแบบ PD

วิถีทางการเคลื่อนที่ที่กำหนดขึ้นนั้นจะใช้แบบเดียวกันหมดกับการทดลองทั้ง 3 ชุด โดยจะเคลื่อนที่จากจุดที่หนึ่งคือ $\theta=[0.0 \quad 0.0]$ rad ไปที่จุดหมายปลายทางที่ $\theta=[3.0 \quad 2.0]$ rad โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ที่ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยนคางหมู (trapezoidal velocity path) โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ติดตามวิถีทางการเคลื่อนที่ ค่าวิถีทางการเคลื่อนที่นี้จะถูกคำนวณล่วงหน้าและเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ซึ่งพร้อมที่จะใช้ได้ทันที การทดลองชุดที่ 3 ต้องการแสดงให้เห็นว่าถ้าแขนหุ่นยนต์จุพา 2 เคลื่อนที่เร็วขึ้น พจน์ของสมการการเคลื่อนที่ในส่วนไม่เป็นเชิงเส้นและมีขนาดขึ้นกับความเร็วนั้นจะมีค่ามากขึ้น ในขณะเดียวกันเราก็เพิ่มภาระที่เป็นน้ำหนักที่เราไม่ได้รวมอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยน้ำหนักที่เพิ่มเข้าไปนี้จะมีขนาด 20 กิโลกรัม และเพิ่มที่ตรงตำแหน่งปลายแขนที่สามที่เวลาประมาณ 1 วินาทีหลังจากเคลื่อนที่ไปแล้ว

ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี (PD-control) นั้นค่าเกนได้ถูกปรับแต่งให้มีค่าที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขของการทดลองชุดที่หนึ่ง กล่าวคืออัตราขยายของตัวควบคุมพีดีนั้นได้ถูกเลือกเพื่อให้ระบบมีการตอบสนองใกล้กับจุดหน่วงวิกฤต (critical damped) และวิถีของความเร็วรูปสี่เหลี่ยมคางหมูนั้นจะมีความเร็วเฉลี่ย 0.5 rad/sec ค่าอัตราขยายนี้จะใช้ทั้งการทดลองชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง โดยมีค่าดังนี้คือ

K_{p1} = 1,000 N.m/rad $\quad$ K_{p2} = 200 N.m/rad

K_{d1} = 10 N.m.sec/rad K_{d2} = 50 N.m.sec/rad

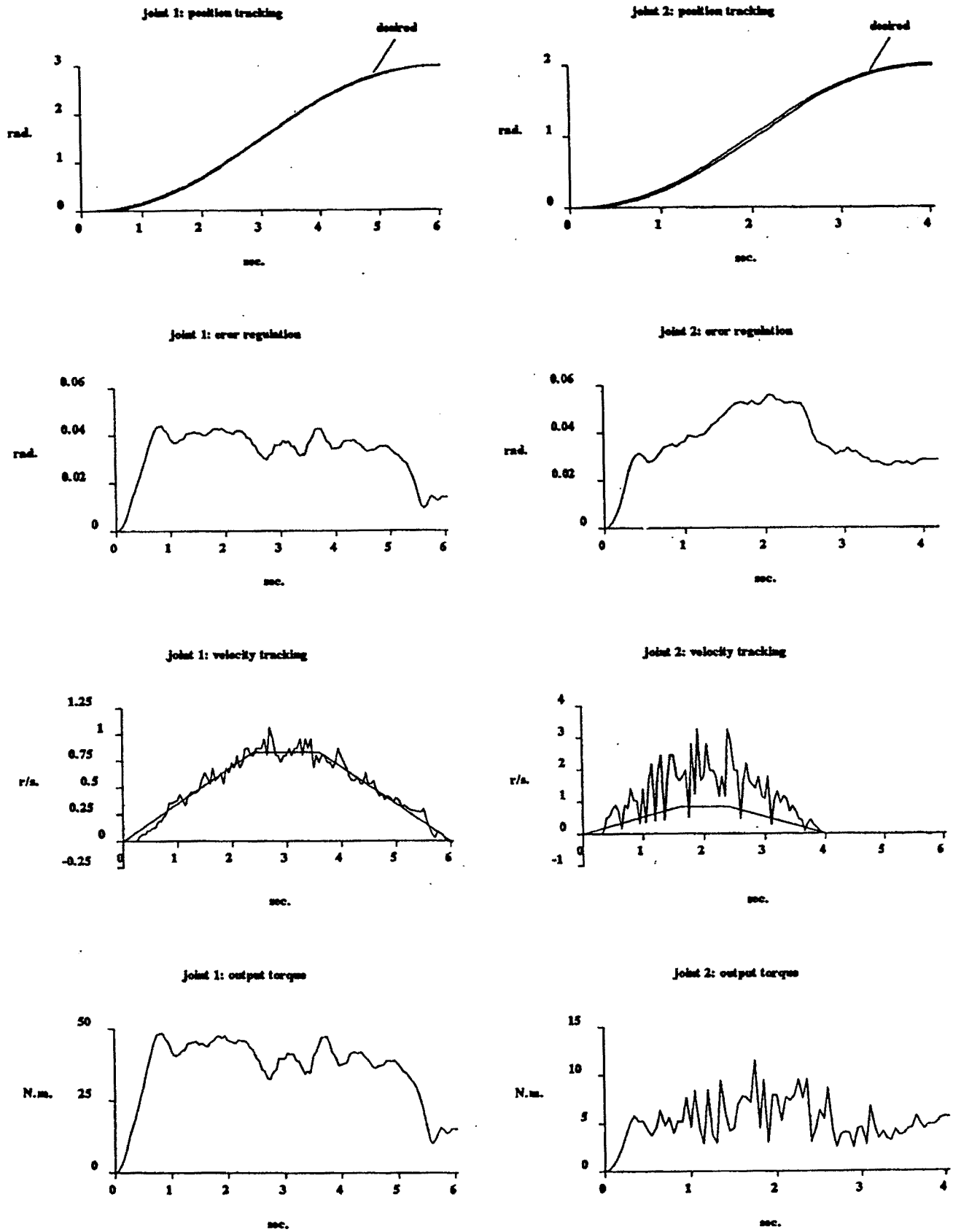
ค่าอัตราขยายขั้นต้นนั้นได้มาจากการประมาณโดยทำการคำนวณหาเบื้องต้นและนำค่ามาปรับโดยการทำการทดลองแบบลองผิดลองถูก ซึ่งเป็นค่าที่เราคิดว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายนี้ไปบางเล็กน้อยจะไม่เห็นผลเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองมากนัก แต่จากผลของการทดลองหาค่าอัตราขยายนี้เราจะพบว่าแขนที่หนึ่งนั้นมีการหน่วงมากกว่าแขนที่สองทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากว่าในแขนที่หนึ่งนั้นเราใช้เกียร์ทดแบบฮาร์มอนิก (Harmonic drive) ชนิดถ้วยซึ่งจะมีการส่วนสไปลน์ที่มีการหยุ่นตัว (flexible spline) มากกว่าแขนที่สองซึ่งการใช้ฮาร์มอนิกแบบแพนเค็ก (pankage) ซึ่งจะมีการยืดหยุ่นน้อยกว่า ส่วนค่าอัตราขยายของแขนที่หนึ่งนั้นจะมีค่าค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับแขนที่สองทั้งนี้ก็เนื่องมาจากค่าความเฉื่อยของแขนที่หนึ่งนั้นมีค่าค่อนข้างมากแรงบิดที่ต้องทำให้ความเฉื่อยนี้เคลื่อนที่ตามที่ต้องการจึงต้องมีค่ามากขึ้นด้วย

รูปที่ 5.1 แสดงสมรรถนะของระบบในการติดตามวิถีทางที่กำหนดขึ้น โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี และวิถีทางการเคลื่อนที่ที่กำหนดเป็นวิถีของความเร็วที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีความเร็วเฉลี่ย 0.5 rad/sec จากค่าที่กำหนดในรูปของความเร็วนี้เรานำมาคำนวณหาวิถีทางที่เป็นวิถีทางตำแหน่งที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์จุพา 2 เคลื่อนที่ติดตาม ความเร็ว 0.5 rad/sec นี้เป็นความเร็วที่ค่อนข้างต่ำ ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีจะเห็นว่าการติดตามวิถีทางที่กำหนดให้นั้นค่อนข้างเรียบ จากรูปจะเห็นว่าตำแหน่งผิดพลาดที่ใช้ป้อนกลับในระบบควบคุมแบบปิดนั้นจะอยู่ค่าไม่เกิน 0.05 rad สำหรับแกนที่ 1 และค่าไม่เกิน 0.06 rad สำหรับแกนที่ 2. และถ้าเราพิจารณาค่าผิดพลาดที่ตรงตำแหน่งปลายทางที่ต้องการให้แขนเคลื่อนที่ไปถึงนั้น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ เราจะเห็นว่าค่าผิดพลาดจะมีค่า 0.015 rad สำหรับแกนที่ 1 และ 0.024 rad สำหรับแกนที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าการติดตามวิถีทางที่กำหนดให้นี้ค่อนข้างดีมาก ซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้อาจจะเกิดเนื่องจากบริเวณหยุดนิ่ง (dead zone) ของระบบทางไฟฟ้าในการควบคุมมอเตอร์ มาจากแรงเสียดทานที่ไม่จำลองไว้ และอาจจะมาจาก backlash ของระบบเกียร์ทดซึ่งจะเห็นว่าที่แกนที่สองนั้นจะมีค่ามากกว่าแกนที่หนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากว่าชุดเกียร์ทดของแกนที่สองนั้นเป็นฮาร์มอนิกแบบแพนเค็ก (pankage type) ซึ่งมีค่า backlash อยู่บ้าง ส่วนแกนที่หนึ่งนั้นเป็นแบบถ้วย (Cup type) ซึ่งมี backlash อยู่น้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์

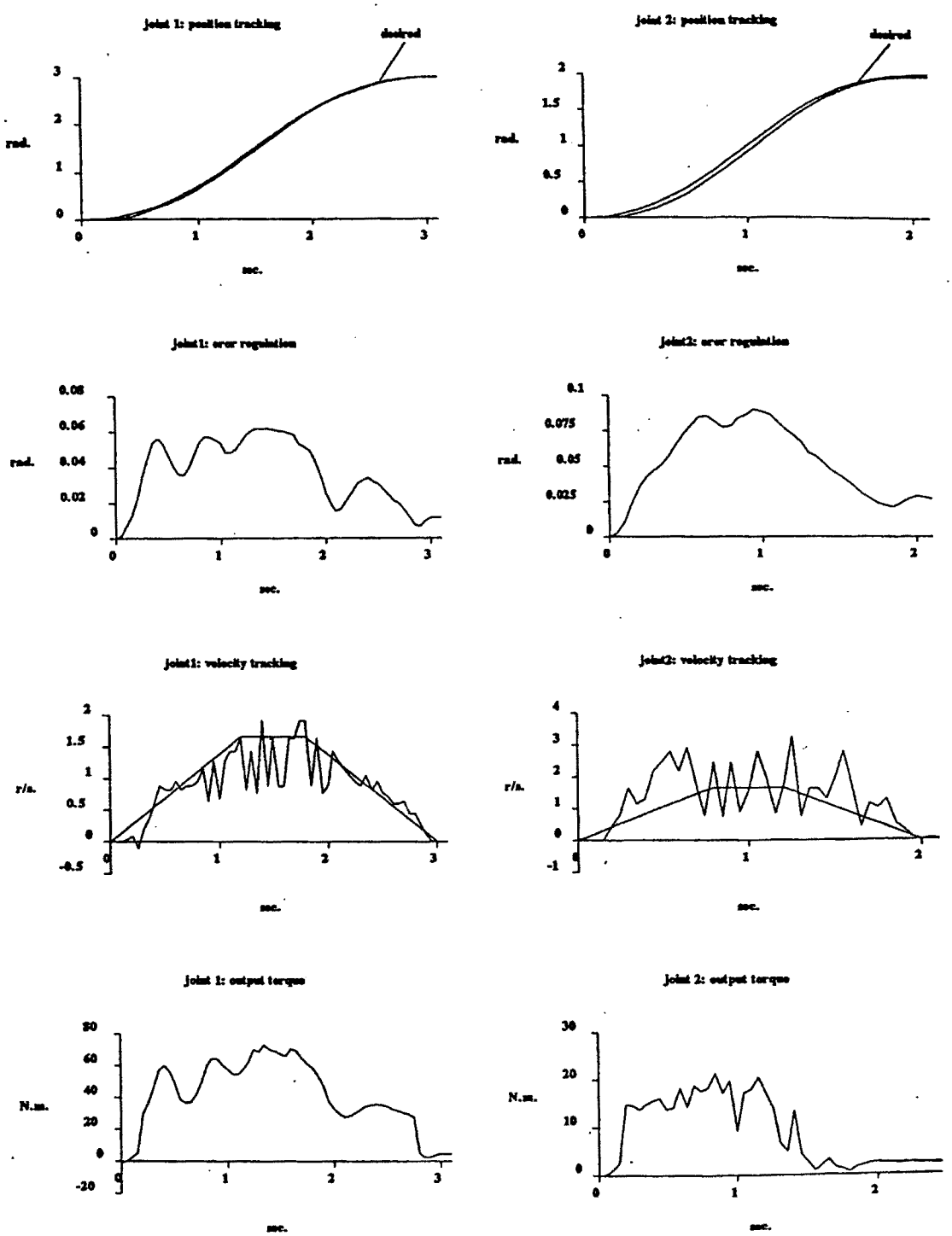
การวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จากตัวทาโคมิเตอร์ (tachometer) นั้นมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นเหตุหนึ่งที่เราจำเป็นต้องจำกัดค่าอัตราขยายของตัวควบคุมในส่วนที่เป็นตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ให้มีค่าไม่มากนัก เพื่อให้ผลลัพธ์ของการติดตามวิถีทางที่กำหนดนั้นมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนนี้น้อย

ถ้าเรากำหนดความเร็วเฉลี่ยของการติดตามวิถีการเคลื่อนที่ให้มีค่าสูงขึ้นเป็น 1 rad/sec จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.2 เราจะพบว่าการควบคุมแบบพีดีนั้นจะแย่ลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าค่าอัตราขยายที่ใช้ในตัวควบคุมนั้นมีค่าคงตัว ในขณะเดียวกันพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีขนาดขึ้นอยู่กับความเร็วเริ่มมีค่ามากขึ้นจึงทำให้การควบคุมแบบพีดีนั้นไม่สามารถชดเชยส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ได้ทั้งหมด ในกรณีนี้การควบคุมแบบปรับได้จะช่วยให้ผลของการควบคุมน่าพอใจขึ้นดังเอกสารอ้างอิงที่ 2

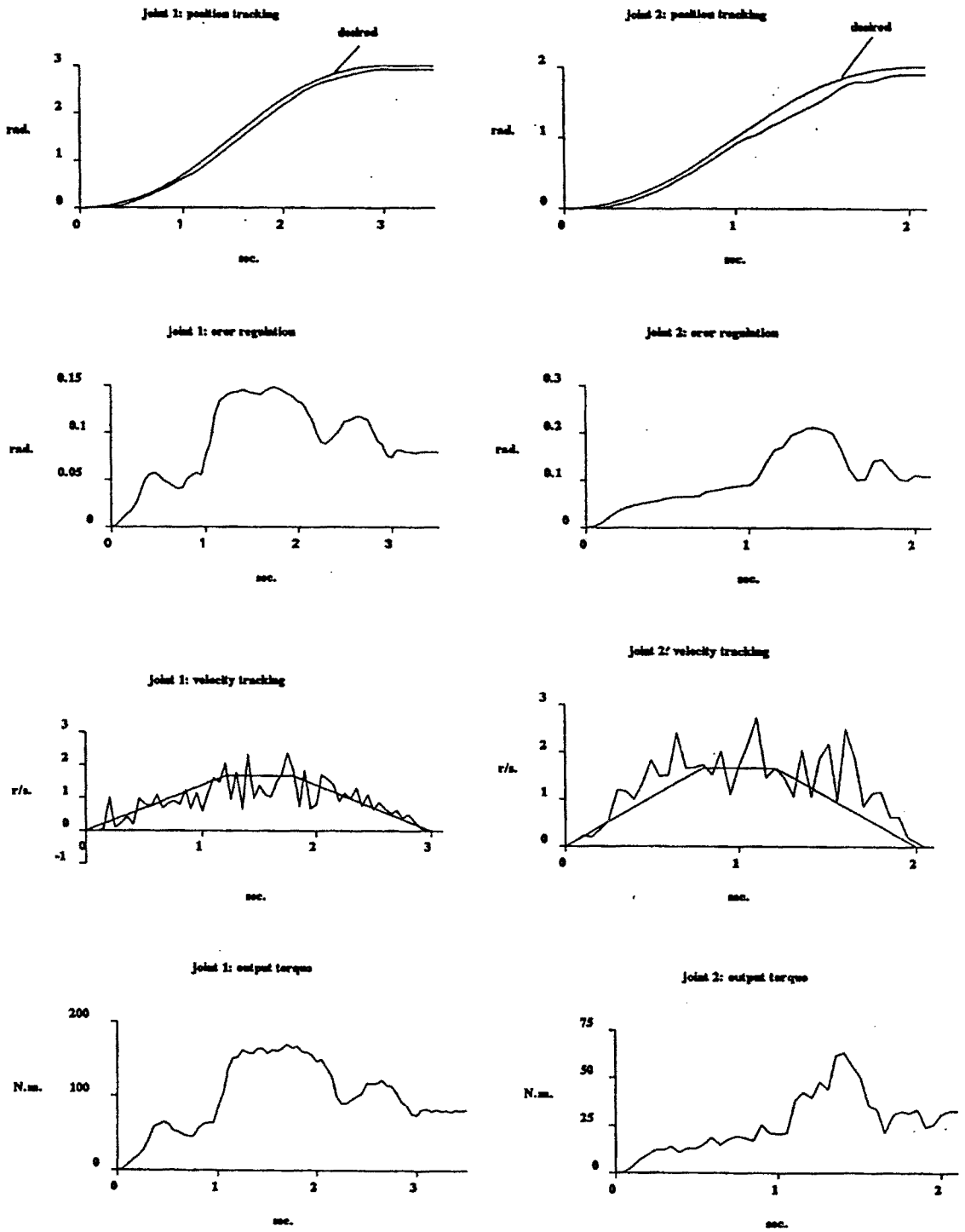
การทดลองที่ 3 จะทำการทดลองซ้ำกับที่กล่าวมาแล้ว แต่คราวนี้จะมีการเพิ่มมวลขนาด 10 กิโลกรัม (หรือประมาณ 25% ของแขนที่สาม) เข้าที่ปลายแขนที่สาม การเพิ่มเข้าไปนี้จะเพิ่มหลังจากที่เคลื่อนที่ไปแล้วประมาณ 1 วินาที เพื่อเราจะได้พิจารณาผลการตอบสนองอันเนื่องมาจากการรบกวนจากภาระภายนอก รูปที่ 5.3 แสดงผลการตอบสนองของการทดลองนี้ จากรูปจะเห็นว่าการควบคุมแบบพีดีนั้น ค่าผิดพลาดสุดท้ายของแกนที่ 1 นั้นเพิ่มขึ้นเป็น 0.075 rad และแกนที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็น 0.013 rad ซึ่งถ้าเราใช้ตัวควบคุมแบบปรับได้จะช่วยให้ค่าผิดพลาดนี้ลดลงได้ดังแสดงในเอกสารที่ 2



รูปที่ 5.1 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีดีเมื่อไม่มีภาระ เมื่อความเร็วเฉลี่ย 0.5 rad/sec



รูปที่ 5.2 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีดีเมื่อไม่มีภาระ เมื่อความเร็วเฉลี่ย 1.0 rad/sec



รูปที่ 5.3 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีดีเมื่อมีภาระภายนอก 10 กก. และความเร็วเฉลี่ย 1.0 rad/sec