



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

ปริญญา

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

Vibration Analysis of a Helicopter Using Image Processing

นามผู้วิจัย เรืออากาศเอกสวัสดิ์ โททอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( นาวาอากาศตรีประสาทพร วงษ์คำซ่าง, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ศานติ วิริยะวิทย์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

สิงสิงณี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

Vibration Analysis of a Helicopter Using Image Processing

โดย

เรืออากาศเอก วสวัตต์ดี โททอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วศวัตต์ โททอง, เรืออากาศเอก 2553: การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์  
ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและ  
อวกาศ) สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: นาวาอากาศตรีประสาทร วงษ์คำข้าง, Ph.D.  
142 หน้า

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะศึกษาหลักการประมวลผลภาพ ในการวิเคราะห์การ  
สั่นสะเทือนของโครงสร้าง โดยจะมุ่งเน้นในงานการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างของ  
อากาศยาน โดยทำการวิเคราะห์การสั่นของภาพวิดีโอที่สกัดจากกล้องคุณภาพสูงที่ติดตั้งกับอุปกรณ์  
จำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยาน และนำอัลกอริทึมที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์จากภาพที่  
ได้จากกล้องที่สามารถบันทึกภาพวิดีโอด้วยเฟรมเรตสูง ที่ติดตั้งกับอากาศยานปีกหมุนแบบ  
UH-1H ของกองทัพอากาศ

กระบวนการประมวลผลภาพจะใช้วิธีการเปรียบเทียบกรอบภาพ (Block Matching) และ  
กระบวนการค้นหา (Search Method) แบบกระบวนการค้นหาอย่างละเอียด (Exhaustive search  
(ES)) กระบวนการค้นหาแบบ ค้นหาสามขั้น (Tree Step Search(TSS)) และ กระบวนการค้นหาสี่  
ขั้นตอน (Four Step Search (4SS)) ตลอดจนทำการดัดแปลงอัลกอริทึม (Algorithm) ของ การ  
เปรียบเทียบกรอบภาพ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ที่เกิดจากอุปกรณ์จำลองการ  
สั่นสะเทือนของอากาศยานตลอดจนวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดจากอากาศยาน โดยการใช้  
ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณการเคลื่อนที่ (Motion Estimation) ด้วยวิธี Modified Block  
Matching ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์การเคลื่อนที่ (Motion Vector) ของจุดศูนย์กลางของกรอบมา  
โคร ในแต่ละเฟรมภาพว่าเคลื่อนที่มากน้อยเพียงใด ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถวิเคราะห์การ  
สั่นสะเทือนและการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยานและอากาศยานได้

จากผลการทดลอง อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ  
อุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยานได้อย่างแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดในส่วนของ  
วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของอากาศยาน โดยการนำอัลกอริทึมมาใช้งานมีข้อจำกัดในเรื่องความ  
ชัดเจนและขนาดของภาพวิดีโอที่นำมาทำการประมวลผล

---

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Wasawatt Thothong, Flight Lieutenant 2010: Vibration Analysis of a Helicopter Using Image Processing. Master of Engineering (Aerospace Engineering), Major Field: Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering. Thesis Advisor: Squadron Leader Prasatporn Wongcamchang , Ph.D. 142 pages.

The purpose of this thesis is to study theory of image processing in order to perform vibration analysis of structure which focuses aircraft structure. The analysis will perform by analyze the video image which take from high frame rate video camera attached on the vibration simulation machine. After the implemented algorithm is satisfy with the result from vibration simulation machine, apply the implemented algorithm with the video image which take from airborne test on Royal Thai Air Force helicopter model UH-1H

The image processing method used in this thesis is Block Matching and various type of Search Method and also modified Block Matching algorithm Algorithm in order to perform the vibration resulted from the vibration simulation machine and the helicopter The motion estimation of analyzed video image using implemented algorithm will give result in format of Motion Vector of Macro Block center of each video image frame. The motion vector will indicate that how far of movement between each video image frame. Those process could analyze vibration of vibration simulation machine and helicopter

Experimental result shown that the proposed algorithm could analyze the vibration of Vibration simulation machine precisely but there is some error when analyze the vibration of real helicopter. The propose algorithm has some usage limitation such as sharpness of video image and size of image to use in analisys

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงญาติๆ พี่ น้อง และเพื่อนๆ ที่ช่วยสนับสนุนทั้งกำลังทรัพย์, กำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้กระผมได้ศึกษามาตลอดตั้งแต่เรียนระดับประถมศึกษาตลอดจนถึงการศึกษาในระดับปริญญาโท รวมถึงการให้คำปรึกษาที่ดีในการใช้ชีวิตให้เป็นคนดีของสังคมและประเทศชาติ

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ช่วยอบรมและให้ความรู้ในทุกระดับการศึกษา โดยเฉพาะการศึกษาในระดับปริญญาโท ที่ท่านให้ความรู้ทางด้านการบินไม่ว่าจะเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาคืออาจารย์ น.ต.ดร.ประสาทพร วงษ์คำซ่าง ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยชิ้นนี้มาตลอด รวมทั้งอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ให้การสนับสนุนมาที่กระผมยังไม่ได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้

ขอขอบคุณน้อง ๆ ที่เรียนร่วมโครงการหลักสูตรนี้ไม่ว่าจะเป็น ชัย ภา ต่อ ต้อง กิ่ง หมู เต่า และเอ้ รวมถึงน้ำอ้อย ที่ได้ร่วมกันเรียน ร่วมกันเล่น ร่วมกันทำกิจกรรมตลอดหลักสูตร รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจทั้งที่สถาบันการศึกษาเดิมและเพื่อน ๆ พี่ ๆ ในที่ทำงานที่อนุญาตให้กระผมมาเรียน

เรืออากาศเอก วสวัตต์ โททอง

มีนาคม 2553

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	78
อุปกรณ์	78
วิธีการ	78
ผลและวิจารณ์	137
ผล	137
วิจารณ์	139
สรุปและข้อเสนอแนะ	140
สรุป	140
ข้อเสนอแนะ	140
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	141
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	142

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่า MSE สำหรับการเปรียบเทียบกรอบภาพ	10
2	ตารางที่ 2 แสดงผลการแปลงฟูเรียร์เวลาวิฤตของฟังก์ชันพื้นฐานที่มักจะพบบ่อย	19
3	ตารางที่ 3 การเลือกจุดที่จะทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนและหน่วยการวัด	30
4	ตารางที่ 4 มาตรฐานการสั่นของตัวเรือนตามเกณฑ์มาตรฐานของ ISO 2372	35
5	ตารางที่ 5 มาตรฐานการสั่นของเพลตามเกณฑ์มาตรฐาน MHI	36

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของดวงตามนุษย์	3
2	ภาพแสดงการโฟกัสของเลนส์ตาทำให้เกิดภาพบน retina	4
3	เซนเซอร์รับภาพ	4
4	กระบวนการเกิดภาพดิจิทัล	5
5	หลักการพื้นฐานการชักตัวอย่าง	6
6	การแสดงผลค่าพิกัดในการแสดงภาพดิจิทัล	7
7	แผนภาพการประมาณการเคลื่อนที่และการชดเชย	9
8	กรอบปัจจุบัน ขนาด 3x3 และบริเวณอ้างอิง	10
9	กระบวนการค้นหากรอบย่อย	11
10	Exhaustive search (ES)	12
11	Three Step Search (TSS)	12
12	TSS รูปแบบของ Diamond Search	13
13	สัญญาณวิยุต	14
14	ฟังก์ชันอิมพัลส์จากสมการ 5.4	18
15	ฟังก์ชันอิมพัลส์จากสมการ 5.5	19
16	รูปกราฟ $y(n) = [x(n - M)]_N$	22
17	แผนภาพการไหล	25
18	แผนภาพการไหลย่อย	25
19	แนวโน้มของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร	26
20	แผนการเตรียมงานบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพ	27
21	การวัดการสั่นสะเทือนกับเครื่องจักร	29
22	เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนและการแสดงผล	32
23	การดำเนินการตามแผนการบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพ	33
24	กราฟแนวโน้ม (Trend Plot) ของการสั่นสะเทือนที่ทำการวัดแต่ละครั้ง	34
25	การวิเคราะห์ความผิดปกติของเครื่องจักรจากข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าสั่นสะเทือน	37
26	ลักษณะองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน	39
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขจัด , ความเร็ว และความเร่งที่ความถี่ 60 Hz	40

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	การเคลื่อนที่แบบคาบ (Periodic Motion)	42
29	รูปแบบการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion)	43
30	การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก 2 ค่าโดยที่มีมุมเฟสระหว่างกัน	45
31	การเคลื่อนที่แบบไม่เป็นฮาร์มอนิก (Non-harmonic Motion)	46
32	Undamped Spring-Mass System	49
33	Damped Spring-Mass System	49
34	Damped Forces Vibration System	51
35	ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด	56
36	การควบคุมระดับ	57
37	สัญญาณควบคุมและสัญญาณความผิดพลาด	57
38	ฟังก์ชันถ่ายโอนที่นำมาวิเคราะห์การควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์การ	59
39	ใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมาควบคุมความเร็วของการหมุนของมอเตอร์	60
40	การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า	62
41	ต้องการควบคุมตำแหน่งของการหมุนของมอเตอร์	64
42	การควบคุมแบบอินทิกรัล	65
43	สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบอินทิกรัล	66
44	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล	66
45	การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล	67
46	การควบคุมแบบอนุพันธ์	68
47	การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล	69
48	การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลที่จัดรูปแล้ว	69
49	การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล	70
50	ควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI-control) กับระบบอันดับสอง	71
51	การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD-control) กับระบบอันดับสอง	72
52	การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์กับระบบ อันดับสอง	73

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	แผ่นภาพเมทริกซ์และอุปกรณ์การทดลอง	76
54	ชุดควบคุม DC MOTOR	76
55	DC MOTOR และการต่อชุดขับเคลื่อนแผ่นภาพเมทริกซ์	77
56	ชุดเฟืองขับและรางเลื่อนที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์	77
57	แผ่นภาพเมทริกซ์	78
58	สัญญาณที่ป้อนให้กับมอเตอร์และมุมที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์	78
59	อัลกอริทึม	79
60	การวางกรอบมาโครในเฟรมก่อนหน้าและเฟรมปัจจุบัน	80
61	รูปการเลื่อนกรอบมาโคร, เวกเตอร์การเคลื่อนที่ และ ตำแหน่งอ้างอิงของกรอบมาโคร	81
62	การวัดขนาดภาพเมทริกซ์ที่บันทึกได้เป็นหน่วยพิกเซลในการทดลองที่ 1	82
63	ขนาดจริงของกรอบสี่เหลี่ยมบนแผ่นภาพเมทริกซ์ในการทดลองที่ 1	83
64	การวัดขนาดภาพเมทริกซ์ที่บันทึกได้เป็นหน่วยพิกเซลในการทดลองที่ 3	83
65	ขนาดจริงของกรอบสี่เหลี่ยมบนแผ่นภาพเมทริกซ์ในการทดลองที่ 3	84
66	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวระดับ	85
67	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้ง	85
68	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1A	86
69	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1B	87
70	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1B	87
71	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1B	88
72	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1C	89
73	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1C	89
74	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1C	90
75	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1D	91

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
76	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1D	91
77	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1D	92
78	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1E	93
79	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1E	93
80	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1E	94
81	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1F	95
82	การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1F	95
83	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1F	96
84	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1A ถึง 1F	97
85	เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เปรียบเทียบกรอบมาโครที่วัดได้จากการทดลอง 1A ถึง 1F	98
86	การเซตอัฟการทดลองที่ 2	99
87	การติดตั้งภาพแมทริกซ์บริเวณ ด้านหน้าของอากาศยาน	100
88	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2A	100
89	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2A	101
90	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2A	101
91	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2A	102
92	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2B	103
93	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2B	103
94	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2B	104

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
95	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2B	104
96	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2C	105
97	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2C	106
98	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2C	106
99	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2C	107
100	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2D	108
101	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2D	108
102	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2D	109
103	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2D	109
104	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2E	110
105	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2E	110
106	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2E	111
107	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2E	111
108	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2F	112
109	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2F	112
110	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2F	113
111	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2F	113
112	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2A ถึง 2F	115

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
113	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2A ถึง 2F	115
114	เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เปรียบเทียบกรอบมาโครที่วัดได้จากการทดลอง 2A ถึง 2F	116
115	การเซตอัฟการทดลองที่ 3	117
116	การติดตั้งภาพแมทริกซ์บริเวณ Avionics Compartment ของอากาศยาน	118
117	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3A	118
118	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3A	119
119	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3A	119
120	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3A	120
121	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3B	121
122	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3B	121
123	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3B	122
124	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3B	122
125	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3C	123
126	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3C	123
127	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3C	124
128	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3C	124
129	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3D	125
130	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3D	125
131	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3D	126

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
132	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3D	126
133	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3E	127
134	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3E	127
135	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3E	128
136	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3E	128
137	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3F	129
138	การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3F	129
139	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3F	130
140	ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3F	130
141	ผลการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานแบบ UH-1H ของกองทัพอากาศ	131
142	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3A ถึง 3F	132
143	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3A ถึง 3F	132
144	เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เปรียบเทียบกรอบมาโครที่วัดได้จากการทดลอง 3A ถึง 3F	133

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

MB	Macro Block
MSE	Mean Square Error
ES	Exhaustive Search
TSS	Three Step Search
TDLS	Two-Dimensional Logarithmic Search
NTSS	New Three Step Search
ESE	Simple and Efficient Search
4SS	Four Step Search
DS	Diamond Search
ARPS	Adaptive Rood Pattern Search
PHODS	Parallel Hierarchical One-Dimensional Search
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform

# การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

## Vibration Analysis of a Helicopter Using Image Processing

### คำนำ

อากาศยานแบบปีกหมุนเป็นอากาศยานที่มีการสั่นสะเทือนของตัวอากาศยานค่อนข้างมาก การสั่นสะเทือนดังกล่าวเกิดจากการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองเกียร์ การสั่นสะเทือนจากชุดใบพัด และการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสภาพแวดล้อม การสั่นสะเทือนดังกล่าวหากมีมากเกินไปจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการชำรุดและอายุการใช้งานของโครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่บนอากาศยาน นอกจากนี้การสั่นสะเทือนของอากาศยานยังอาจทำให้ อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนอากาศยานทำงานได้ไม่สมบูรณ์ การวัดค่าการสั่นสะเทือนของตัวอากาศยาน จึงมีความสำคัญต่อการบำรุงรักษาอากาศยาน โดยผู้บำรุงรักษาอากาศยานนั้น ๆ ควรจะต้องรักษา ระดับการสั่นสะเทือนของลำตัวอากาศยานไม่ให้เกินกว่าที่บริษัทผู้ผลิตอากาศยานกำหนดไว้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนได้นำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของอากาศยานแบบปีกหมุน โดยใช้วิธีประมวลผลภาพ (Image Processing) เป็นทางเลือกหนึ่งในการวัดการสั่นสะเทือนของอากาศยาน โดยจะนำกระบวนการประมวลผลภาพแบบการเปรียบเทียบกรอบภาพ และกระบวนการค้นหา แบบต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของอากาศยาน

อัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของอากาศยานที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการหาค่าความสั่นสะเทือนหลายๆด้านเช่น การหาค่าการสั่นสะเทือนสะเทือนของโครงสร้างอากาศยาน การหาค่าการสั่นของ Air Foil ในอุโมงค์ลม การวิเคราะห์คุณภาพการชดเชยการสั่นสะเทือนของ Stabilized Platform เป็นต้น

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อวัดการสั่นสะเทือนของอากาศยาน โดยใช้วิธีประมวลผลภาพ (Image Processing)
  2. เพื่อพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) ของการประมาณการเคลื่อนที่ (Motion Estimation)
- เพื่อใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของภาพที่ถ่ายจากกล้องที่ใช้สำหรับติดตั้งกับอากาศยาน

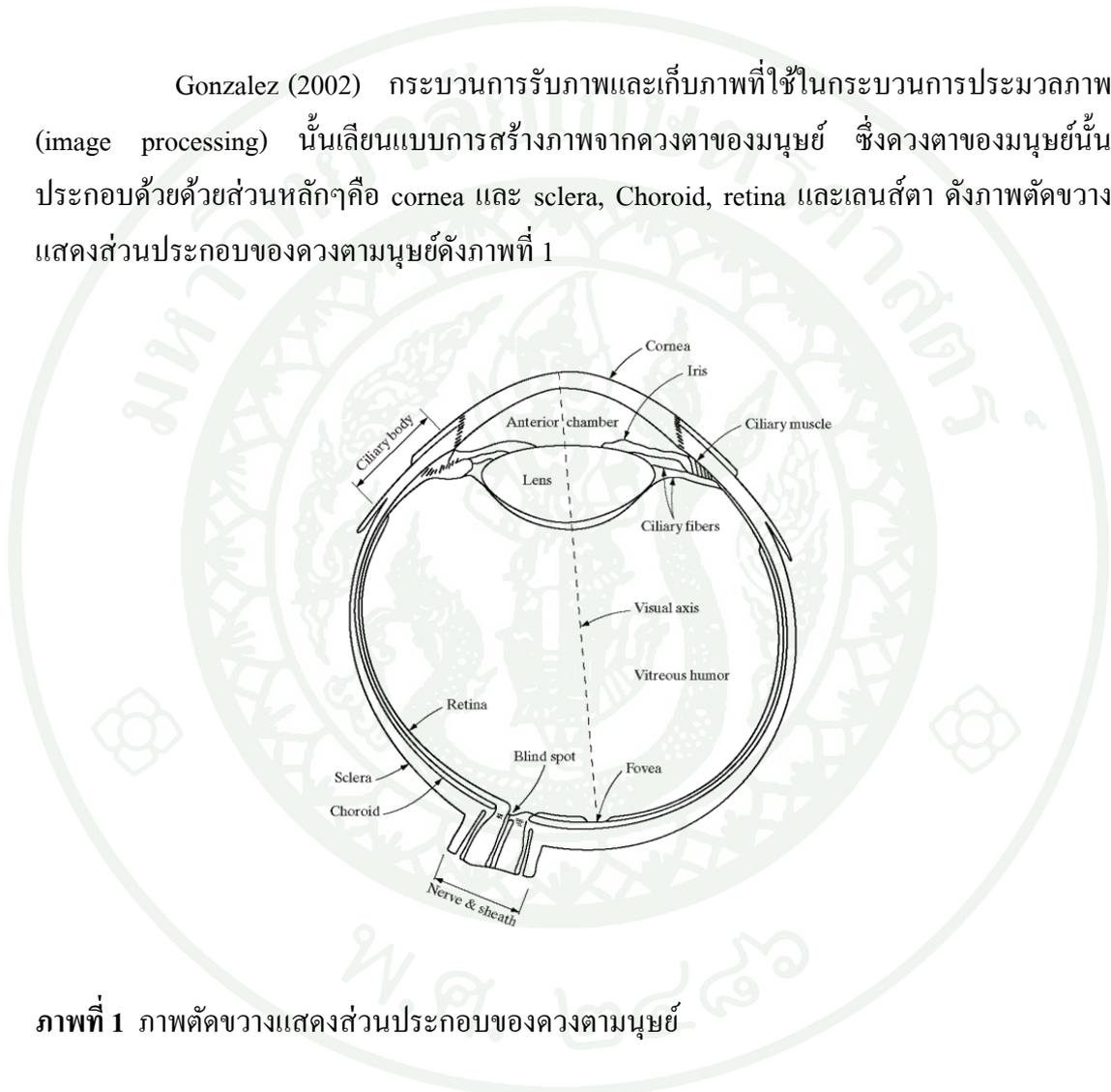


## การตรวจเอกสาร

### 1 พื้นฐานการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing)

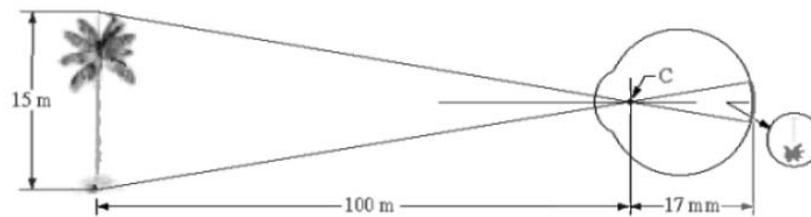
#### 1.1 การรับและเก็บภาพ (Image Sensing and Acquisition)

Gonzalez (2002) กระบวนการรับภาพและเก็บภาพที่ใช้ในกระบวนการประมวลผลภาพ (image processing) นั้นเลียนแบบการสร้างภาพจากดวงตาของมนุษย์ ซึ่งดวงตาของมนุษย์นั้นประกอบด้วยด้วยส่วนหลักๆคือ cornea และ sclera, Choroid, retina และเลนส์ตา ดังภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของดวงตามนุษย์ดังภาพที่ 1



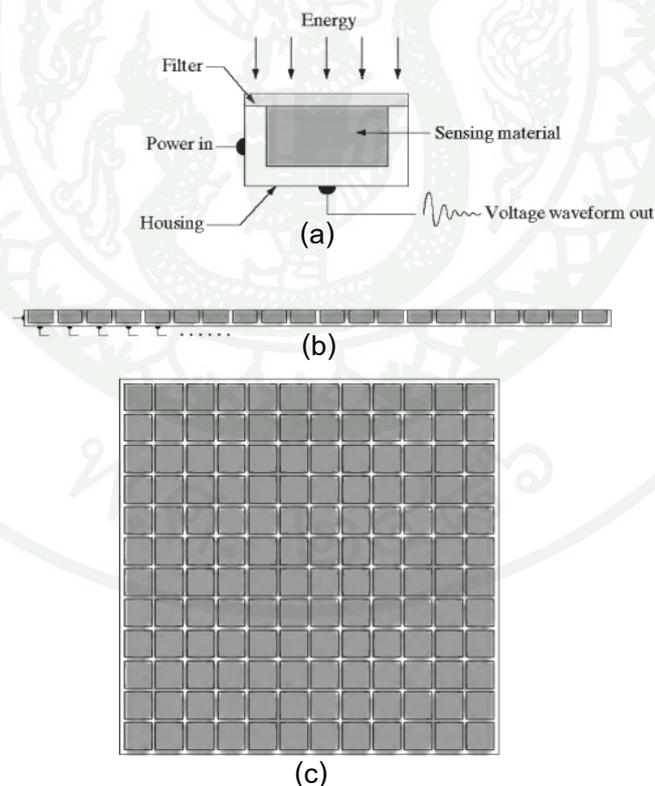
ภาพที่ 1 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของดวงตามนุษย์

cornea และ sclera จะเป็นส่วนเปลือกนอกที่ห่อหุ้มดวงตา choroid เป็นส่วนเนื้อเยื่อที่มีกลุ่มเส้นเลือดทำหน้าที่หล่อเลี้ยงดวงตา เลนส์ตาประกอบด้วย fibrous cell ที่ยึดติดกับ ciliary body โดยเลนส์ตาจะทำหน้าที่โฟกัสแสงให้ตกกระทบบน retina ทำให้เกิดภาพ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ภาพแสดงการโฟกัสของเลนส์ตาค่อให้เกิดภาพบน retina

กระบวนการประมวลผลภาพสามารถสร้างภาพด้วยการเลียนแบบการทำงานของดวงตามนุษย์โดยแปลง พลังงานจากแหล่งกำเนิดแสง (illumination source) และพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงที่สะท้อนหรือดูดซับโดยวัตถุและองค์ประกอบของวัตถุที่ทำให้เกิดเป็นภาพนั้นๆ แล้วเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวให้เป็นภาพเป็นภาพดิจิทัล ได้โดยใช้หลักการแปลงพลังงานดังกล่าว เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) โดยเราจะใช้กลุ่มของเซนเซอร์ดังภาพที่ 3 ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานเป็นระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วทำการแบ่งระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า (quantization) แล้วจึงจัดเก็บในรูปแบบของไฟล์ดิจิทัล

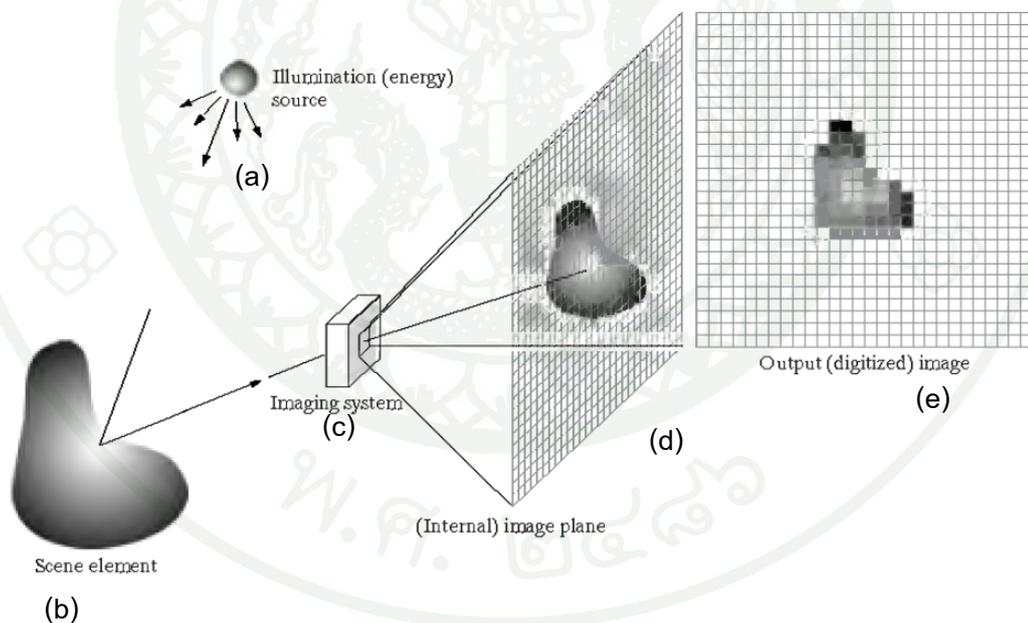


ภาพที่ 3 (a) เซนเซอร์รับภาพแบบเดี่ยว (single imaging sensor)  
 (b) เซนเซอร์รับภาพแบบแถว (line imaging sensor)  
 (c) เซนเซอร์รับภาพแบบอาร์เรย์ (array imaging sensor)

## 1.2 พื้นฐานการซ้คตัวอย่างและการแปลงค่าประมาณ (Basic Concept in Sampling and Quantization)

เมื่อเราอ่านค่าเอาต์พุตจากเซนเซอร์หนึ่งครั้ง เราจะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซนเซอร์ที่รับค่าพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงและค่าพลังงานที่สะท้อนจากวัตถุแล้ว เราต้องทำการแบ่งระดับค่าของพลังงานดังกล่าว เป็นระดับของค่าพลังงานเพื่อเก็บเป็นข้อมูลดิจิทัล ซึ่งวิธีการดังกล่าวเรียกว่าการซ้คตัวอย่างและการแปลงค่าประมาณ (Sampling and Quantization) ในการสร้างภาพดิจิทัลภาพหนึ่งเกิดจากการอ่านค่าเอาต์พุตจากเซนเซอร์หรือที่เราเรียกว่าการซ้คตัวอย่างหลายๆครั้งโดยขยับเซนเซอร์ไปจนทั่วทั้งภาพและแปลงค่าประมาณค่าที่ได้จากเซนเซอร์ในแต่ละครั้งแล้วเก็บเป็นข้อมูลดิจิทัล

เราสามารถแสดงตัวอย่างกระบวนการกำเนิดภาพดิจิทัล (digital image acquisition process) ได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 (a) แหล่งกำเนิดแสง (Illumination (energy) source)

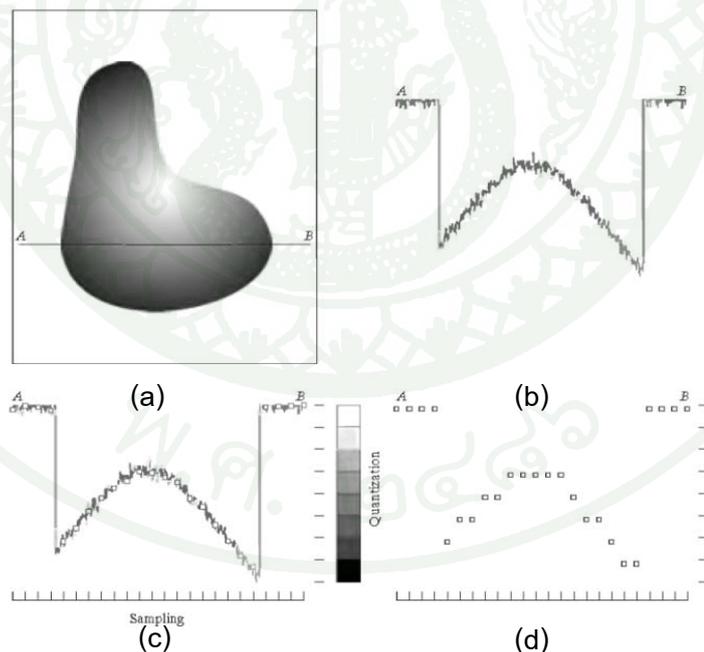
(b) วัตถุหรือภาพ (Scene element)

(c) อุปกรณ์และระบบที่ใช้ในการรับภาพ (Imaging system)

(d) ค่าดิจิทัลที่ได้รับจากอุปกรณ์รับภาพ ((Internal) image plane)

(e) รูปภาพแบบดิจิทัลที่ได้รับการแบ่งระดับแล้ว (output(digitize) image)

ภาพที่ 5 แสดงถึง หลักการพื้นฐานของการชักตัวอย่าง และการประมาณค่า (sampling and quantization) ภาพที่ 5 a เป็นภาพที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous image) ที่ต้องการแปลงให้อยู่ในรูปฟังก์ชันดิจิทัล  $f(x,y)$  ภาพที่มีค่าต่อเนื่องจะอ้างอิง พิกัด  $x,y$  และ ขนาด (amplitude) ดังนั้นในการแปลงให้อยู่ในรูป ดิจิตอล จะต้องทำการชักตัวอย่าง (sampling) ทั้งพิกัด และขนาด ภาพที่ 5 b เป็นฟังก์ชัน 1 มิติแสดงขนาดของระดับสีเทา(grey level) ตลอดเส้นแสกน (scan line) AB ดังภาพที่ 5 a การชักตัวอย่างฟังก์ชันในภาพที่ 5 b ทำได้โดยการชักตัวอย่างที่ระยะห่างเท่าๆกันตลอดเส้นแสกน AB ดังภาพที่ 5 c กรอบสี่เหลี่ยมเล็กในภาพที่ 5 c จะแสดงตำแหน่งของค่าที่ชักตัวอย่างจากฟังก์ชันในภาพที่ 5 b อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากการชักตัวอย่างดังกล่าว ยังเป็นค่าระดับสีเทาต่อเนื่อง ในการแปลงค่าที่สุ่มได้เหล่านี้ให้อยู่ในรูปดิจิทัลฟังก์ชันนั้นเราจะต้องทำการแปลงประมาณค่าระดับสีเทาที่สุ่มได้ให้อยู่ในรูปค่าไม่ต่อเนื่อง (discrete quantities) เสียก่อน จากนั้นใช้หลักการประมาณการจุดค่าที่ทำการสุ่มได้แต่ละค่าให้อยู่ในระดับของสีเทา 8 ระดับจากสีขาวไปสีดำ ดังแสดงในแถบตารางการแปลงประมาณค่า ทางด้านขวาของภาพที่ 5 c ผลลัพธ์ที่ได้จากการชักตัวอย่าง และการแปลงประมาณค่า ดังแสดงในภาพที่ 5 d เมื่อเราทำการสุ่มและแปลงค่าตามวิธีที่กล่าวมาแล้วตลอดทั้งรูปจาก บนสุดถึงล่างสุด เราจะได้ภาพดิจิทัล 2 มิติ (two-dimensional digital image)

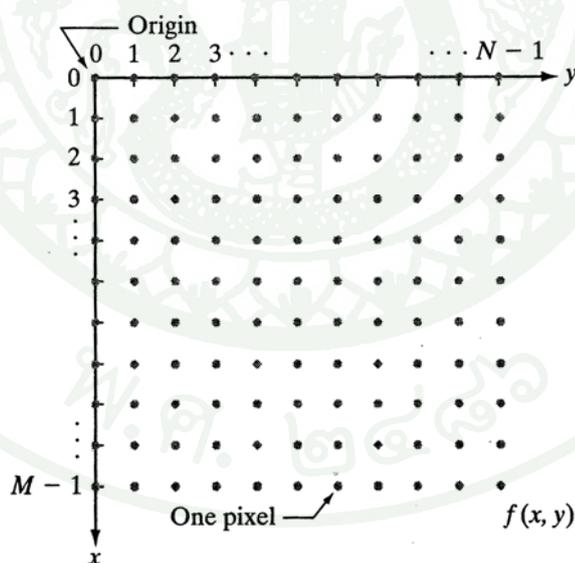


- ภาพที่ 5 (a) ภาพที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous)  
 (b) แนวเส้นแสกน (scan line) AB ในภาพที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous image)  
 (c) การชักตัวอย่าง (sampling) และการแปลงค่าประมาณ (quantization)  
 (d) ค่าที่ดิจิทัลในเส้นแสกน (Digital scan line)

ในทางปฏิบัติ การชักตัวอย่างจะทำโดยการขยับเซนเซอร์ ไปตลอดรูปภาพที่ต้องการแสดง และจะทำการชักตัวอย่าง (sampling) และแปลงประมาณค่า(quantization) เช่นเดียวกับวิธีที่กล่าวในข้างต้น เนื่องจากเราสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ได้อย่างแม่นยำเราจึงสามารถแสดงภาพให้มีความละเอียดได้มาก-น้อยได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามก็ยังคงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดด้านคุณภาพของเซนเซอร์ ซึ่งอาจส่งผลให้คุณภาพที่แสดงออกมาไม่ดีได้แม้จะมีการควบคุมการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์อย่างดีที่สุดก็ตาม

### 1.3 การแสดงภาพดิจิทัล (Representing Digital Image)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการชักตัวอย่างและการแปลงประมาณค่า พิกัด  $x, y$  ของภาพที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous image) จะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยจำนวนจริง ที่มีขนาด  $M$  แถว และ  $N$  หลัก และค่าในพิกัด  $x, y$  ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจเราจะกำหนดให้ค่าพิกัดเป็นเลขจำนวนเต็ม มีจุดเริ่มต้น (origin) ที่  $(x, y) = (0, 0)$  ค่าพิกัดถัดไปในแถวแรกคือ  $(x, y) = (0, 1)$  ดังตัวอย่างในภาพที่ 6 ควรจำไว้ว่าค่า  $(0, 1)$  นั้นเป็นค่าพิกัดของการชักตัวอย่าง ไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ได้จากการชักตัวอย่าง และแปลงค่าประมาณ



ภาพที่ 6 การแสดงค่าพิกัดในการแสดงภาพดิจิทัล

เราสามารถแสดงภาพดิจิทัลในรูปของแมทริกซ์  $M \times N$  ได้ดังนี้

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \text{ หรือ}$$

$$A = \begin{bmatrix} a(0,0) & a(0,1) & \cdots & a(0, N-1) \\ a(1,0) & a(1,1) & \cdots & a(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a(M-1,0) & a(M-1,1) & \cdots & a(M-1, N-1) \end{bmatrix}$$

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ระดับสีเทา (grey scale level) จะเป็นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$L = 2^k$$

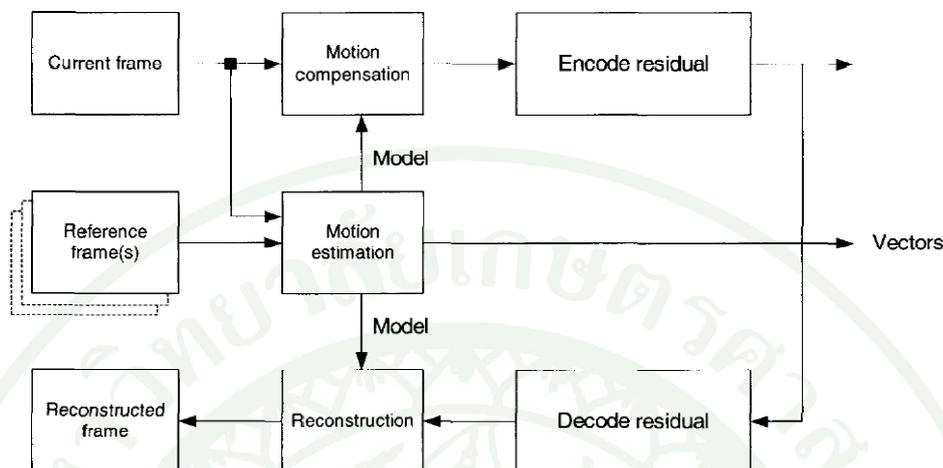
ระดับสีเทาจะอยู่ในช่วง  $[0, L-1]$  โดยเราสามารถคำนวณหาจำนวนบิต (bit) ,  $b$  ที่ใช้ในการจัดเก็บรูปดิจิทัลได้จาก

$$b = M \times N \times k$$

## 2. การประมาณการเคลื่อนที่และการชดเชยการเคลื่อนที่ (Motion Estimation and Compensation)

Barjatya (2004) เราสามารถทำการประมาณการเคลื่อนที่โดยสร้างโมเดลของเฟรมปัจจุบัน (current frame) ซึ่งอ้างอิงกับข้อมูลจากเฟรมก่อนหน้า (reference frame) หนึ่งเฟรมหรือมากกว่า จุดมุ่งหมายของการออกแบบอัลกอริทึมการประมาณการเคลื่อนที่ คือสร้างโมเดลของเฟรมปัจจุบัน ให้มีความแม่นยำมากที่สุด พร้อมทั้งสามารถบีบอัดข้อมูลได้มากที่สุดและการคำนวณไม่ซับซ้อนมากเกินไป ในภาพที่ 7 โมเดลการประมาณการเคลื่อนที่ สร้างโมเดลโดยการปรับปรุงเฟรมก่อนหน้า หนึ่งเฟรมหรือมากกว่า ให้เหมือนกับเฟรมปัจจุบันให้มากที่สุด เฟรมปัจจุบันเกิดจากการชดเชยการเคลื่อนที่ (motion compensated) โดยการลบโมเดลออกจากเฟรมปัจจุบันเพื่อสร้างส่วนที่เหลือของเฟรมจากการชดเชยการเคลื่อนที่ (motion-compensated residual frame) ส่วนที่เหลือจะถูกเข้ารหัสและส่งไปยังปลายทางพร้อมกับเวกเตอร์การเคลื่อนที่ เพื่อใช้ทั้งสองส่วนนี้ในการสร้างโมเดลขึ้นใหม่อีกครั้ง ในขณะที่เดียวกันที่ส่วนที่เหลือของเฟรม จากการชดเชยการเคลื่อนที่

(encoded residual) จะถูกถอดรหัสและบวกกับโมเดล เพื่อสร้างเฟรมปัจจุบันขึ้นเพื่อใช้เป็นเฟรมอ้างอิงในการคำนวณต่อไป

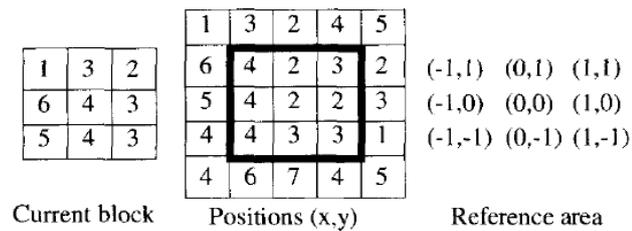


ภาพที่ 7 แผนภาพการประมาณการเคลื่อนที่และการชดเชย

### 3. การเปรียบเทียบกรอบภาพ (Block Matching)

Richardson (2002) มาตรฐานการเข้ารหัสภาพวีดิทัศน์เช่น H.261, H.263, MPEG-1, MPEG-2 และ MPEG-4 จะใช้กระบวนการประมาณการเคลื่อนที่และการชดเชยการเคลื่อนที่ โดยการแบ่งเฟรมปัจจุบันเป็น กรอบมาโคร ขนาด 8x8 หรือ 16x16 การประมาณการเคลื่อนที่ของ กรอบมาโคร ดังกล่าวเรียกว่า บล็อกแมตชิ่ง การประมาณการเคลื่อนที่เริ่มต้นด้วย แบ่งเฟรมปัจจุบันเป็นกรอบมาโคร ขนาด 16x16 ซึ่งแต่ละกล่องเก็บค่าปริมาณแสงสว่าง (luminance sample) แล้วทำการเปรียบเทียบกับกรอบมาโครตำแหน่งเดียวกันในเฟรมอ้างอิง และค้นหาในบริเวณโดยรอบกรอบมาโครในเฟรมอ้างอิงดังกล่าวเพื่อหากรอบมาโครหรือบริเวณรอบกรอบมาโครที่มีความแตกต่างของปริมาณแสงที่น้อยที่สุดในเฟรมอ้างอิง จะได้เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ของกรอบมาโครเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า

ตัวอย่างในภาพที่ 8 แสดงการทำเปรียบเทียบกรอบภาพที่มีขนาดกรอบมาโคร 3x3 ดังรูปด้านซ้าย กรอบมาโครดังกล่าว จะถูกเทียบกับกรอบมาโครที่ตำแหน่งเดียวกันในเฟรมอ้างอิงดังแสดงในกรอบสี่เหลี่ยม และทำการค้นหาบริเวณ  $\pm 1$  พิกเซล (pixel) โดยรอบ



ภาพที่ 8 กรอบปัจจุบัน (current block) ขนาด 3x3 และบริเวณอ้างอิง (reference area)

ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (mean square error ; MSE) ระหว่างกรอบมาโครปัจจุบัน (current block) และกรอบมาโครตำแหน่งเดียวกันของเฟรมอ้างอิง (ตำแหน่ง (0,0)) สามารถหาได้โดย

$$\{(1-4)^2 + (3-2)^2 + (2-3)^2 + (6-4)^2 + (4-2)^2 + (3-2)^2 + (5-4)^2 + (4-3)^2 + (3-3)^2\} / 9 = 2.44$$

ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย สำหรับทุกตำแหน่งที่ทำการค้นหา แสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง (-1,1) มีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย น้อยที่สุดซึ่งจะถือว่าตำแหน่ง (-1,1) เป็นตำแหน่งที่ให้ค่าเดียวกันมากที่สุด (best match)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่า MSE สำหรับการเปรียบเทียบกรอบภาพ

ตำแหน่ง (x,y)	(-1,-1)	(0,-1)	(1,-1)	(-1,0)	(0,0)	(1,0)	(-1,1)	(0,1)	(1,1)
ค่า MSE	4.67	2.89	2.78	3.22	2.44	3.33	0.22	2.56	5.33

ที่มา: Richardson (2002)

ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ใช้ในการหาค่าพลังงานคงเหลือของผลต่างของกรอบมาโครสองกรอบ ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยสำหรับกล่องขนาด  $N \times N$  สามารถหาได้โดย

$$MSE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (C_{ij} - R_{ij})^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $C_{ij}$  เป็นค่าในกรอบปัจจุบัน  $R_{ij}$  เป็นค่าในพื้นที่อ้างอิงและ  $C_{00}, R_{00}$  คือตำแหน่งบนสุดและซ้ายสุดของทั้งกรอบปัจจุบันและพื้นที่อ้างอิง

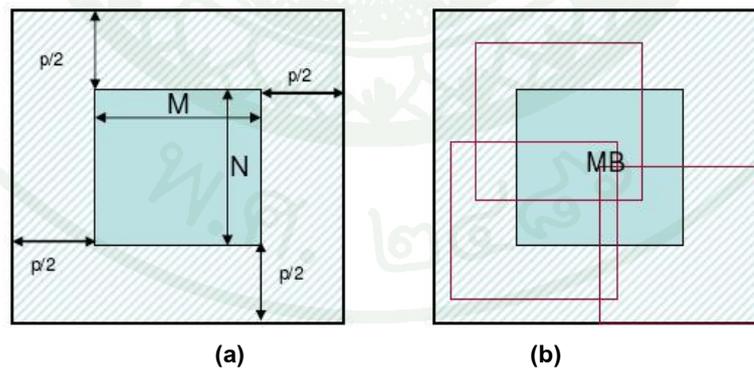
$$MAE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |C_{ij} - R_{ij}| \quad (3.2)$$

สามารถทำให้การเปรียบเทียบนั้นอยู่ในรูปอย่างง่ายได้โดยไม่สนใจ  $1/N^2$  และหาค่าผลต่างสัมบูรณ์ (sum of absolute error(SAE) หรือ sum of absolute difference(SAD))

$$SAE = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |C_{ij} - R_{ij}| \quad (3.3)$$

#### 4. กระบวนการค้นหา (Search Method)

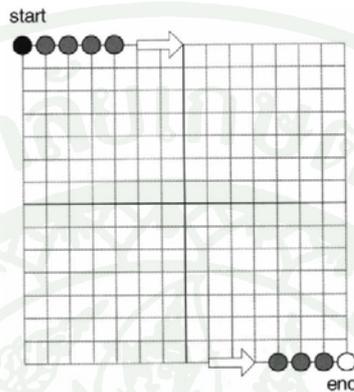
Richardson (2002) กระบวนการค้นหา (Search Method) จะทำงานร่วมกับการเปรียบเทียบกรอบภาพ (Block Matching) เพื่อหากรอบย่อยที่ตรงกันกับกรอบย่อยที่ต้องการ ในที่นี้คือกรอบย่อยที่ได้จากภาพในเฟรมก่อนหน้า (reference frame) ในการค้นหาที่ได้นั้นจะต้องค้นหากรอบมาโคร ในภาพทั้งภาพแต่จะใช้การคำนวณมากซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง เราจึงค้นหาเฉพาะบริเวณโดยรอบของจุดเริ่มต้นเท่านั้น โดยเราจะต้องกำหนดขนาดของกรอบย่อยและขอบเขตที่จะทำการการค้นหากรอบย่อย ขนาดของกรอบย่อยและขอบเขตการค้นหาจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการคำนวณและความแม่นยำในการหากรอบย่อยที่เหมือนกัน



ภาพที่ 9 (a) แสดงบริเวณการค้นหา

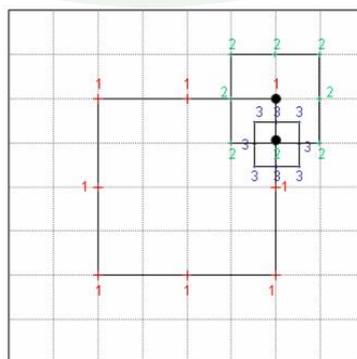
(b) และการวิเคราะห์และเทียบแต่ละ MB

4.1 กระบวนการค้นหาอย่างละเอียด (Exhaustive search (ES)) หรือ กระบวนการค้นหาทั้งหมด ( Full search ) เป็นการค้นหาอย่างละเอียดหรือค้นหาทั้งหมด กระบวนการค้นหาแบบนี้ เป็นอัลกอริทึมในการเทียบ ได้ดีที่สุดในอดีต แต่จะใช้เวลาคำนวณสูง ซึ่งอาจไม่เหมาะกับการนำไปใช้งาน ในแบบ real time



ภาพที่ 10 Exhaustive search (ES)

4.2 กระบวนการค้นหาเลขฐานสอง ( Two-Dimensional Logarithmic Search (TDLS) ) และกระบวนการค้นหาแบบ ค้นหาสามขั้น (Tree Step Search (TSS)) เป็นการค้นหาโดยใช้เลขฐานสองและการค้นหาสามขั้น ซึ่ง TDLS จะทำการแบ่งพื้นที่สี่เหลี่ยมที่เป็นสองพื้นที่คือ พื้นที่ภายในและพื้นที่ภายนอก จากนั้นใช้ ฟังก์ชันประเมินค่า ในการคำนวณพื้นที่ทั้งหมด  $[-p/2, p/2]$  นั่นคือตำแหน่ง (0,0) และทิศโดยรอบทั้งแปด (จะแทนค่า S เป็นระยะทางจากตำแหน่งหลักที่ถูกวิเคราะห์ในพื้นที่สี่เหลี่ยม) ซึ่งความซับซ้อนของอัลกอริทึมนี้จะเท่ากับ 3.3% เมื่อเทียบกับแบบแรก ส่วน TSS นั้นเป็นการค้นหาเฉพาะ TDLS ที่ p เท่ากับ 7 (ในการประมวลผลจะมี 3 ขั้นตอนก่อนจะถึงพื้นที่ระยะทาง 1 จุด) ซึ่งเพียงพอสำหรับการทำวิดีโอคอนเฟอเรนซ์ (Video Conference) และการเคลื่อนที่สูญหายไปน้อย โดยจะแทน ตัวเลขเป็นการค้นหา โดยให้จุดค่าเป็นภาพที่ต้องการค้นหา



### ภาพที่ 11 Three Step Search (TSS)

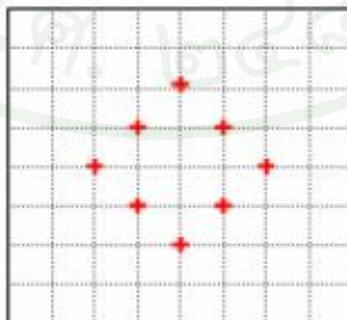
4.3 กระบวนการค้นหาหนึ่งทิศทางแบบลำดับชั้นคู่ขนาน (Parallel Hierarchical One-Dimensional Search (PHODS)) เป็นการค้นหาหนึ่งทิศทางแบบลำดับชั้นคู่ขนาน จะมีลักษณะคล้าย กับ TDLS แต่การค้นหาจะไม่ขึ้นอยู่กับสองทิศทางตามกัน นั่นคือการคำนวณฟังก์ชันประเมินค่า จะถูกทำให้คู่ขนานตามการไหลของข้อมูลในพื้นที่

4.4 กระบวนการค้นหาสามขั้นตอนแบบใหม่ (New Three Step Search (NTSS)) การค้นหาสามขั้นตอนแบบใหม่ จะมีลักษณะคล้าย ๆ กับ TSS โดยจะทำการเปลี่ยนจุดเริ่มต้นการค้นหาใหม่ทุก ๆ ครั้งที่มีการค้นหาเจอ

4.5 กระบวนการค้นหาแบบง่าย ๆ และมีประสิทธิภาพ (Simple and Efficient Search (ESE)) การค้นหาแบบง่าย ๆ และมีประสิทธิภาพ จะทำบนสมมติฐานที่มีสองทิศทางที่ต่างกันน้อยสุด โดยมีหลักการคล้าย ๆ กับ TSS แต่ในแต่ละขั้นตอนจะเป็นสองระยะ การค้นหาจะแบ่งออกเป็นสี่ส่วน แต่ละส่วนจะทำงานเหมือนๆ กัน คือ จะถูกเลือกสามจุด และจะขึ้นอยู่กับการแบ่งส่วน

4.6 กระบวนการค้นหาสี่ขั้นตอน (Four Step Search (4SS)) ค้นหาสี่ขั้นตอน คล้ายๆกับ TSS โดยกำหนดเป็น 2 ฟังก์ชันประเมินค่า ทำการคำนวณ 9 พื้นที่ ในมิติ 5 ต่อ 5 หน้าต่าง จะมีการย้ายจุดกึ่งกลางเหมือน NTSS และในขั้นตอนสุดท้ายจะมีขนาดมิติ 3 ต่อ 3 หน้าต่าง

4.7 กระบวนการค้นหาข้าวหลามตัด (Diamond Search (DS)) ขั้นตอนจะเหมือนกับ FSS แต่จะไม่ใช้รูปแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยจะใช้ภาพที่ข้าวหลามตัดแทน



ภาพที่ 12 TSS รูปแบบของ Diamond Search

## 5. ผลการเปลี่ยนแปลงฟูรีเยร์แบบวิฤต

### 5.1 ผลการแปลงฟูรีเยร์ของสัญญาณเวลาวิฤตแบบไม่เป็นคาบ

มงคลเดช (2549) สัญญาณเวลาวิฤต (discrete-time signal) อาจเป็นฟังก์ชันของเวลาที่เกิดมีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น จำนวนของทารกที่เกิดในแต่ละวัน และรายได้ของบริษัทแห่งหนึ่งในแต่ละเดือน นอกจากนี้สัญญาณเวลาวิฤต ยังอาจได้มาจากการชักตัวอย่าง สัญญาณเวลาต่อเนื่อง (continuous-time signal) ด้วยคาบเวลาที่คงตัว อีกด้วย

เราอาจแสดงนิพจน์ของสัญญาณเวลาวิฤตในรูปของฟังก์ชันของจำนวนเต็ม  $n$  (ซึ่งก็เป็นตัวแปรวิฤตแบบหนึ่ง) ยกตัวอย่างเช่น

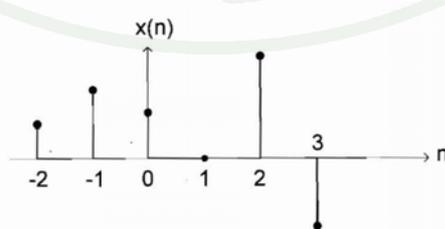
$$x(n) = 2 \cos(5n) \quad (5.1)$$

และในบางครั้ง เราก็อาจแสดงสัญญาณวิฤตในรูปของลำดับ (sequence) อย่างเช่น

$$x(n) = \{1.5, 3, 2^*, 0, 4.5, -3\} \quad (5.2)$$

โดยที่เครื่องหมายดอกจัน (\*) หมายถึง ค่าสัญญาณเมื่อ  $n = 0$  (ในที่นี้ เราได้ละไว้ในฐานที่เข้าใจกันว่า  $x(n) = 0$  เมื่อ  $n < -2$  และเมื่อ  $n > 3$ )

สัญญาณวิฤตตามสมการ (5.2) อาจแสดงด้วยเส้นคิ่งขนาดความสูงต่าง ๆ กัน ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 สัญญาณวิฤต

**หมายเหตุ 1.** ถ้า  $x(n)$  เป็นลำดับเหตุการณ์ (casual sequence) คือ  $x(n) = 0$  เมื่อ  $n < 0$  เราจะละไว้ในฐานที่เข้าใจว่า ลำดับแบบนี้เริ่มต้นที่  $n = 0$  และจะไม่ใส่เครื่องหมายคอกจันเพื่อแสดงจุดกำเนิดของเวลา

ในการหาสูตรสำหรับผลการแปลงฟูเรียร์เวลาวิฤต เราจะเริ่มด้วยการใช้ปริพันธ์ผลการแปลงฟูเรียร์สำหรับสัญญาณเวลาต่อเนื่อง คือ

$$F(\omega) = \tau [ f(t) ] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt$$

เมื่อแทนสัญญาณเวลาต่อเนื่อง  $f(t)$  ด้วยสัญญาณเวลาวิฤต  $x(n)$ , แทน  $t$  ด้วย  $nT$  โดยที่  $T$  เป็นระยะเวลาระหว่างค่าสัญญาณ  $x(n)$  กับ  $x(n + 1)$ , ให้  $\omega = \Omega / T$ , แทน  $F(\omega)$  ด้วย  $X(\Omega)$  อีกทั้งให้ DTFT แทน การแปลงฟูเรียร์เวลาวิฤต (discrete-time Fourier transformation) แล้ว ผลการแปลงฟูเรียร์ที่ได้ใหม่จะอยู่ในรูปของ  $\sum$  คือ

$$X(\Omega) \triangleq DTFT[X(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \exp(-j\Omega n) \quad (5.3)$$

โดยที่เงื่อนไขสำหรับการมีจริงของ  $X(\Omega)$  จะคล้ายกับของ  $F(\omega)$  คือ

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)| < \infty \quad \text{หรือ} \quad \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 < \infty \quad (5.4)$$

ข้อสังเกต 1. เนื่องจาก  $\exp(-j\Omega n)$  ในสมการ (5.3) เป็นฟังก์ชันเป็นคาบของตัวแปร  $\Omega$  โดยที่คาบ (period) เท่ากับ  $2\pi$  คือ  $\exp(-j\Omega n) = \exp[-j(\Omega + 2\pi)n]$  เราจะสามารถพิสูจน์ได้ว่า  $X(\Omega) = X(\Omega + 2\pi)$  นั่นคือ  $X(\Omega)$  ก็เป็นฟังก์ชันเป็นคาบที่มีคาบเท่ากับ  $2\pi$  ด้วยเช่นกัน

ในการหาสูตรการแปลงผกผันจาก  $X(\Omega)$  เป็น  $x(n)$  เราจะเปลี่ยนตัวแปรในสมการ (5.3) จาก  $n$  เป็น  $k$ , คูณทั้ง 2 ข้างของสมการนี้ด้วย  $\exp(j\Omega n)$  แล้วหาปริพันธ์ของสมการเทียบกับ  $\Omega$  ในช่วง  $0$  ถึง  $2\pi$  ทำให้ได้

$$\int_{\Omega=0}^{2\pi} X(\Omega) \exp(j\Omega n) d\Omega = \int_{\Omega=0}^{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \exp[j\Omega(n - k)] d\Omega$$

ซึ่งเมื่อนำ  $\sum x(k)$  ทางขวาของสมการออกไว้ข้างหน้าเครื่องหมายปริพันธ์ จะให้ผลเป็น

$$\int_{\Omega=0}^{2\pi} X(\Omega) \exp(j\Omega n) d\Omega = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \left( \int_{\Omega=0}^{2\pi} \exp[j\Omega(n-k)] d\Omega \right) \quad (5.5)$$

เนื่องจากปริพันธ์จำกัด เขตทางด้านขวาสุดของสมการ (5.5) มีค่าดังนี้ คือ

$$\int_{\Omega=0}^{2\pi} \exp[j\Omega(n-k)] d\Omega = \begin{cases} 2\pi & \dots & n = k \\ 0 & \dots & n \neq k \end{cases}$$

สมการ (5.5) จึงให้ผลสุดท้ายเป็น

$$x(n) \triangleq DTFT^{-1}X(\Omega) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \int_{\Omega=0}^{2\pi} X(\Omega) \exp(j\Omega n) d\Omega \quad (5.6)$$

สมการ (5.3) และ (5.6) ประกอบกันเป็น คู่สมการแปลงฟูเรียร์เวลาวิยุต ตามที่เราต้องการ

ตัวอย่าง 5.1 ถ้า  $x(n) = \alpha^{|n|}$  โดยที่  $|\alpha| < 1$  จงหาานิพจน์ของ  $x(\Omega)$

วิธีทำ โดยการใส่สมการ (5.3) เราได้

$$\begin{aligned} x(\Omega) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha^{|n|} \exp(-j\Omega n) = \sum_{n=-\infty}^{-1} \alpha^{-n} \exp(-j\Omega n) + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \exp(-j\Omega n) \\ &= \frac{-1}{1-\alpha^{-1}\exp(-j\Omega)} + \frac{1}{1-\alpha\exp(-j\Omega)} + \frac{1-\alpha^2}{1-2\alpha\cos(\Omega)+\alpha^2} \end{aligned}$$

ในทางทฤษฎี ถ้าเราจะมีสัญญาณเวลาต่อเนื่อง  $g(t)$  แล้ว เราจะสามารถหาสัญญาณเวลาวิยุต  $g_{st}$  ได้จากการคูณ  $g(t)$  ด้วยขบวนพัลส์  $\delta_T$  ซึ่งมีคาบเวลา  $T$  ผลลัพธ์ที่ได้ เป็นสัญญาณจำกัดแถบ ความถี่ที่มีความกว้างแถบผลรวมของแถบความถี่บนกับแถบความถี่ล่างเป็น  $2f_m$  ทฤษฎีการซัด ตัวอย่างสัญญาณได้แนะนำไว้ว่า เราจะต้องใช้ความถี่ของการซัดตัวอย่าง คือ  $f_0 = \frac{1}{T} > 2f_m$  เพื่อ ป้องกันมิให้ส่วนเป็นคาบแต่ละส่วนในสเปกตรัมเหลื่อมซ้อนกัน ซึ่งจะเกิดความเพี้ยนขึ้นใน สัญญาณที่สร้างขึ้นใหม่จากพวกตัวอย่างสัญญาณที่เก็บมา

เมื่อสัญญาณเวลาวิยุต  $g_s(t)$  และสเปกตรัมหรือผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณนี้เป็น

$$g_s(t) = g(t)\delta_T(t) = g(t)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty}g(nT)\delta(t-nT) \quad (5.7)$$

และ  $G_s(f) = \tau[g_s(t)] = G(f) * \tau[\delta_T(t)]$

$$= f_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(f) * \delta(f-nf_0) = \left(\frac{1}{T}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(f-nf_0) \quad (5.8)$$

โดยที่  $G(f) = \tau[g(t)]$  เป็นสเปกตรัมของ  $g(t)$  และ  $T = 1/f_0$

ข้อสังเกต 2. สมการ (5.8) แสดงให้เห็นว่า สัญญาณเวลาวิยุต  $g_s(t)$  นั้นมีผลการแปลงฟูเรียร์  $G_s(f)$  ในรูปแบบฟังก์ชันรายคาบ ลักษณะนี้เป็นทวิภาวะ (duality) ของอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งแสดงว่า ฟังก์ชันเวลาต่อเนื่องรายคาบ  $f(t)$  สเปกตรัมที่ประกอบด้วยส่วนประกอบความถี่ย่อยส่วนต่างๆ แบบวิยุต ในหัวข้อหลังจากนี้เราจะสร้างสัญญาณวิยุตจากสัญญาณเวลาต่อเนื่องรายคาบ เราจึงพอจะคาดเดาได้ว่าสเปกตรัม หรือผลการแปลงฟูเรียร์ ของสัญญาณที่ได้ใหม่จะเป็นฟังก์ชันความถี่วิยุตเป็นคาบ (periodic discrete – frequency function) แบบหนึ่ง

ถ้าปรับสัญญาณของตัวแปรและฟังก์ชันต่างๆ ในสมการ (5.8) ให้รับตัวแปรและฟังก์ชันในสมการ (5.3) คือเปลี่ยนตัวแปร  $f$  เป็น  $\Omega$ , เปลี่ยนฟังก์ชัน  $G_s(f)$  เป็น  $X(\Omega)$  และเปลี่ยน  $G(f-nf_0)$  เป็น  $X_c(\Omega/T - 2\pi n/T)$  โดยที่ครรชนีล่าง  $c$  หมายถึงเวลาต่อเนื่อง เราจะเขียนสมการ (5.8) ได้ใหม่เป็น

$$X(\Omega) = \left(\frac{1}{T}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_c(\Omega/T - 2\pi n/T) \quad (5.9)$$

โดยที่

$$x(\Omega) = \text{DTFT}[x(n)] = \tau[g_s(t)]|_{f=\Omega/2\pi T} \quad (5.10)$$

และ

$$X_c(\omega) = \tau[g(t)]|_{f=\omega/2\pi} \quad (5.11)$$

### 5.1.1 ภาวะเป็นคาบ (periodicity)

$X(\Omega)$  เป็นฟังก์ชันเป็นคาบของ  $\Omega$  โดยที่คาบเท่ากับ  $2\pi$  นั่นคือ

$$X(\Omega) = X(\Omega + 4\pi) = \dots = X(\Omega + 2k\pi), k = \text{จำนวนเต็ม}$$

## 5.1.2 ภาวะเชิงเส้น (linearty)

ถ้า  $x_1(n) \leftrightarrow X_1(\Omega)$  และ  $x_2(n) \leftrightarrow X_2(\Omega)$  แล้ว

$ax_1(n) + bx_2(n) \leftrightarrow aX_1(\Omega) + bX_2(\Omega)$  สำหรับค่าคงตัว  $a$  และ  $b$  ใดๆ

## 5.1.3 การเลื่อนเวลา (time shifting)

ถ้า  $x(n) \leftrightarrow X(\Omega)$  แล้ว  $x(n - n_0) \leftrightarrow \exp(-j\Omega n_0) X(\Omega)$

## 5.1.4 การเลื่อนความถี่ (frequency shifting)

ถ้า  $x(n) \leftrightarrow X(\Omega)$  แล้ว  $\exp(j\Omega_0 n) x(n) \leftrightarrow X(\Omega - \Omega_0)$

## 5.1.5 การหาอนุพันธ์เชิงความถี่ (frequency differentiation)

ถ้า  $x(n) \leftrightarrow X(\Omega)$  แล้ว  $nx(n) \leftrightarrow j dX(\Omega)/d\Omega$  และในกรณีทั่วไป

$n^k x(n) \leftrightarrow j^k d^k X(\Omega)/d\Omega^k$

## 5.1.6 ฟังก์ชันสังยุค (conjugate function)

ถ้า  $x(n) \leftrightarrow X(\Omega)$  แล้ว  $x^*(n) \leftrightarrow X^*(-\Omega)$

และ  $x^*(-n) \leftrightarrow X^*(\Omega)$

## 5.1.7 สัมวัตนาการ (convolution)

ถ้า  $x_1(n) \leftrightarrow X_1(\Omega)$  และ  $x_2(n) \leftrightarrow X_2(\Omega)$  แล้ว  $x_1(n) * x_2(n) \leftrightarrow X_1(\Omega)X_2(\Omega)$

และ

$$x_1(n)x_2(n) \leftrightarrow \left(\frac{1}{2\pi}\right) \int_D^{D+2\pi} X_1(p)X_2(\Omega - p)dp$$

หมายเหตุ 2. สัจวัตนาการของ  $x_1(n)$  กับ  $x_2(n)$  มีนิยามดังนี้

$$x_1(n) * x_2(n) \equiv \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_1(k)x_2(n-k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_1(n-k)x_2(k) \quad (5.12)$$

### 5.1.8 ทฤษฎีบทของเรย์ลีหรือปาร์เซอวาล (Rayleigh's or Parseval's theorem)

ถ้า  $x(n) \leftrightarrow x(\Omega)$  แล้ว

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 = \int_{-\pi}^{\pi} |x(\Omega)|^2 d\Omega \quad (5.13)$$

หมายเหตุ 3. ตารางที่ 2 แสดงผลการแปลงฟูเรียร์เวลาวิฤตของฟังก์ชันพื้นฐานที่มักจะพบบ่อยในงานทางวิศวกรรมไฟฟ้า ในตารางนี้ ฟังก์ชัน  $\delta(n)$  หมายถึง ฟังก์ชันอิมพัลส์ซึ่งมีนิยามดังนี้

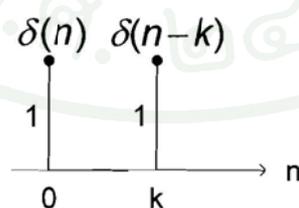
$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & \dots n = 0 \\ 0 & \dots n \neq 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

$$\delta(n-k) = \begin{cases} 1 & \dots n = k \\ 0 & \dots n \neq k \end{cases} \quad (5.15)$$

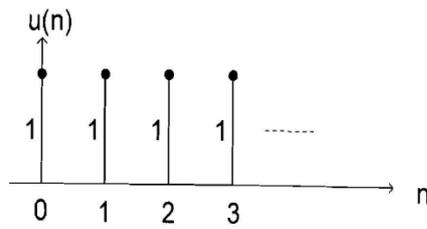
และมีรูปร่างลักษณะตามภาพที่ 14 ส่วน  $u(n)$  หมายถึง ลำดับขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step sequence) ซึ่งมีนิยามเป็น

$$u(n) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(n-k) \quad (5.16)$$

และมีรูปร่างลักษณะตามภาพที่ 15



ภาพที่ 14 ฟังก์ชันอิมพัลส์จากสมการ 5.4



ภาพที่ 15 พังก์ชันอิมพัลส์จากสมการ 5.5

ตารางที่ 2 แสดงผลการแปลงฟูรีเยร์เวลาวิฤตของฟังก์ชันพื้นฐานที่มักจะพบบ่อย

$x(n)$	$X(\Omega) = \mathbf{DFDT}[x(n)]$
$\delta(n)$	$1 \dots -\infty < \Omega < \infty$
$\delta(n - k)$	$\exp(-j\Omega k)$
$u(n)$	$(1 - e^{-j\Omega})^{-1} + \pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - 2\pi k)$
$a^n u(n) \dots  a  < 1$	$(1 - ae^{-j\Omega})^{-1}$
$u(n) - u(n - M)$	$[\sin(\Omega M/2) / \sin(\Omega/2)] e^{-j(M-1)\Omega/2}$
$\exp(j\Omega_0 n)$	$(2\pi) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - \Omega_0 + 2\pi k)$
$\sin(\Omega_0 n)$	$(-j\pi) \sum_{k=-\infty}^{\infty} [\delta(\Omega - \Omega_0 + 2\pi k) - \delta(\Omega + \Omega_0 + 2\pi k)]$
$\cos(\Omega_0 n)$	$(\pi) \sum_{k=-\infty}^{\infty} [\delta(\Omega - \Omega_0 + 2\pi k) - \delta(\Omega + \Omega_0 + 2\pi k)]$

ที่มา: มงคลเดช (2549)

## 5.2 คู่ผลการแปลงฟูรีร์วียุต (Discrete Fourier Transform Pair)

ถ้ากำหนดให้  $x(n)$  เป็นลำดับเวลาวิยุต (discrete-time sequence) โดยที่  $n$  เป็นตัวแปรวิยุตที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $N-1$  ลำดับ  $x(n)$  นี้อาจได้มาจากสัญญาณเวลาต่อเนื่อง  $x_c(t)$  โดยการชักตัวอย่าง ทำให้ได้เป็นสัญญาณเวลาวิยุต  $x_s(n)$  แล้วจึงตัดตอนสัญญาณอย่างหลังนี้ด้วยฟังก์ชันช่องหน้าต่าง (window function)  $w(n)$  ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$w(n) = \begin{cases} 1 & \dots 0 \leq n \leq N - 1 \\ 0 & \dots n < 0, n \geq N \end{cases}$$

ดังนั้นในที่นี้  $x(n) = x(n)w(n)$  จะเป็นสัญญาณเวลาวิยุตที่เหมาะสมแก่การคำนวณด้วยเครื่องจักร อย่างเช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเราหาผลการแปลงฟูรีร์วียุตของสัญญาณ  $x(n)$  ตามสมการ (5.3) เราจะได้  $x(\Omega)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรต่อเนื่อง คือ  $\Omega$  และไม่สะดวกแก่การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

ข้อขัดข้องในประเด็นนี้สามารถแก้ไขได้ ด้วยการชักตัวอย่าง  $x(\Omega)$  ที่ค่า  $\Omega = \Omega_k = 2\pi k/N$  รวม  $N$  ค่าโดยให้  $k = 0, 1, \dots, N-1$  เมื่อทำเช่นนี้แล้ว สมการ (5.3) จะให้

$$x(\Omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j\Omega_k n)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า  $\Omega_k = 2\pi k/N$  และใช้  $k$  เป็นตัวแปรแทน  $\Omega_k$  ต่อไป เราจะได้ผลการแปลงฟูรีร์วียุต (discrete Fourier Transform, DFT) คือ

$$x(k) \triangleq \text{DFT}[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (5.17)$$

$$(k = 0, 1, \dots, N - 1)$$

ข้อสังเกต 3. ผลการแปลงฟูรีร์วียุต (DFT) นั้นต่างกับผลการแปลงเวลาวิยุต (DTFT) ในประเด็นที่สำคัญคือ ผลการแปลงอย่างแรกเป็นฟังก์ชันของตัวแปรวิยุตทั้งในอาณาจักรเวลา ( $n$ ) และในอาณาจักรความถี่ ( $k$ ) ส่วนผลการแปลงอย่างหลังเป็นฟังก์ชันของตัวแปรวิยุตเฉพาะในอาณาจักรเวลา ( $n$ ) เท่านั้น แต่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรต่อเนื่อง ( $\Omega$ ) ในอาณาจักรความถี่

ในการหาสูตรผลการแปลงผกผันฟูรีเยร์วิญุต (inverse discrete Fourier transform, IDFT) เราจะแทนตัวแปรหุ่น  $n$  ในสมการ (5.17) ด้วย  $m$ , คูณสมการนี้ด้วย  $\exp(j2\pi kn/N)$  แล้วรวมยอด ทั้ง 2 ข้างของสมการเทียบกับ  $k$  จาก 0 ถึง  $N-1$  ทำให้ได้

$$\sum_{k=0}^{N-1} X \exp(j2\pi kn/N) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \sum_{k=0}^{N-1} \exp[j2\pi k(n-m)/N]$$

เนื่องจาก

$$\sum_{k=0}^{N-1} \exp[j2\pi k(n-m)/N] = \begin{cases} N & \dots n = m \\ 0 & \dots n \neq m \end{cases}$$

ดังนั้น ด้านขวาของสมการ (5.18) จะกลายเป็น  $x(n)N$  และเมื่อหารตลอดสมการที่ได้ใหม่ ด้วย  $N$  เราจะได้

$$x(n) \triangleq \text{IDFT}[X(k)] = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j2\pi kn/N) \\ (n = 0, 1, \dots, N-1)$$

ข้อสังเกต 4. จากสมการ (5.17) และ (5.19) เราจะพิสูจน์ได้ว่า  $X(k) = X(k+N)$  และ  $x(n) = x(n+N)$  ซึ่งแสดงว่าฟังก์ชันทั้งสองนี้ต่างก็เป็นแบบรายคาบ โดยที่ คาบ =  $N$  นั่นคือ  $x(n)$  ที่เดิมมีอยู่เพียงคาบเดียวได้ถูกแผ่ขยายออกไปเป็นคาบต่าง ๆ ทั้งสองข้างของคาบเดิม

ผลการเปลี่ยนฟูรีเยร์วิญุต (DTFT) มีสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ ซึ่งก็มีทั้งที่คล้ายและต่างกับของผลการแปลง ฟูรีเยร์เวลาวิญุต (DTFT)

### 5.2.1 ภาวะเชิงเส้น

$$\text{ถ้า } x_1(n) \leftrightarrow X_1(k) \text{ และ } x_2(n) \leftrightarrow X_2(k) \text{ แล้ว} \\ ax_1(n) + bx_2(n) \leftrightarrow aX_1(k) + bX_2(k)$$

### 5.2.2 ฟังก์ชันสังยุค (conjugate function)

ถ้า  $x(n) \leftrightarrow X(k)$  แล้ว  $x^*(n) \leftrightarrow [X^*(-k)]_n$  และ  $[x^*(-n)]_n \leftrightarrow X^*(k)$

### 5.2.3 การเปลี่ยนเชิงวงกลม (circular shifting)

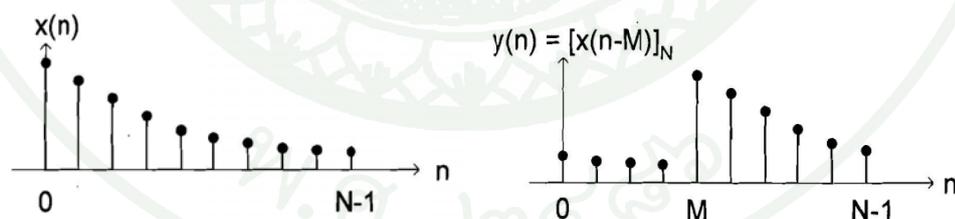
ถ้า  $x(n) \leftrightarrow X(k)$  โดยที่  $x(n)$  เป็นสัญญาณลำดับเชิงวงกลม (เป็นคาบ) ที่ประกอบด้วยค่าชักตัวอย่าง  $N$  ค่า แล้ว การเลื่อนเชิงวงกลมของ  $x(n)$  ไปทางด้านขวาเป็นระยะ  $M$  จะมีสัญลักษณ์และความสัมพันธ์กับการแปลงฟูเรียร์วิยุต ดังนี้

$$[x(n - M)]_n \leftrightarrow \exp(-j2\pi kM/N)X(k)$$

ถ้าให้  $y(n) = [x(n - M)]_N$  เราจะได้ค่าต่างๆ ของ  $y(n)$  เป็น

$$\begin{array}{l|l} y(0) = x(-M) = x(N - M) & y(M) = x(0) \\ y(1) = x[-(M - 1)] = x(N - M + 1) & y(M + 1) = x(1) \\ \dots & \dots \\ y(M - 1) = x(-1) = x(N - 1) & y(N - 1) = x(N - M - 1) \\ \text{(เมื่อ } n = 0, 1, \dots, M-1) & \text{(เมื่อ } n = M, M+1, \dots, N-1) \end{array}$$

ดังที่แสดงเป็นตัวอย่างในภาพที่ 16 ข้างล่างนี้ ซึ่งใช้ค่า  $N = 10$  และ  $M = 4$



ภาพที่ 16 รูปกราฟ  $y(n) = [x(n - M)]_N$

### 5.2.4 สัมวัตนาการเชิงวงกลม (circular convolution)

ถ้า  $x_1(n) \leftrightarrow X_1(k)$  และ  $x_2(n) \leftrightarrow X_2(k)$  โดยที่  $x_1(n)$  และ  $x_2(n)$  เป็นลำดับที่ประกอบด้วยสมาชิก  $N$  คู่แล้ว สัมวัตนาการเชิงวงกลมของลำดับทั้งสองนี้จะมีสัญลักษณ์นิยามและความสัมพันธ์กับการแปลงฟูเรียร์วิยุต ดังนี้

$$[x_1(n) * x_2(n)]_N \triangleq \sum_{m=0}^{N-1} x_1(m)[x_2(n-m)]_N = \sum_{m=0}^{N-1} [x_1(n-m)]_N x_2(m)$$

$$[x_1(n) * x_2(n)]_N \leftrightarrow X_1(k)X_2(k)$$

โดยที่สัญลักษณ์  $[x_i(n-m)]_N$  หมายถึงผลการเลื่อนเชิงวงกลมของ  $x_i(n)$  ไปทางขวาเป็นระยะ  $m$  หน่วย

ข้อสังเกต 5. สังวัตนาการเชิงวงกลม ต่างกับ สังวัตนาการเชิงเส้น (หรือสังวัตนาการธรรมดา) คืออย่างแรกให้ผลเป็นลำดับใหม่ที่ประกอบด้วย สมาชิกเป็นจำนวนเท่ากับช่องลำดับเดิมแต่ละลำดับ ส่วนอย่างหลังให้ผลเป็นลำดับใหม่ที่ประกอบด้วยสมาชิกจำนวนเท่ากับของลำดับเดิมทั้ง 2 ลำดับรวมกัน

### 5.3 ผลการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform)

คำว่า “การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว” (fast Fourier Transform) เป็นชื่อเรียกของบรรดาขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่ใช้หาค่าผลการแปลงฟูรีเยร์วิฤต (DFT) ของลำดับชุดใดชุดหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว ขั้นตอนวิธีเหล่านี้อาศัยหลักการแยกจำนวนจุดหรือจำนวนค่าในลำดับชุดที่เกี่ยวข้อง ออกเป็นตัวประกอบหลาย ๆ ตัวคูณกัน ซึ่งก็ทำให้ลำดับชุดเดิมสามารถแยกออกเป็นลำดับย่อยหลายชุด แต่ละชุดสามารถหาค่าผลการแปลงฟูรีเยร์วิฤตโดยใช้การคำนวณที่น้อยครั้งกว่า และเมื่อนำมารวมกันเป็นผลการแปลงฟูรีเยร์วิฤตของลำดับชุดเดิมแล้ว ก็ทำให้ประหยัดจำนวนครั้งของการคำนวณได้ ทั้งนี้เมื่อคิดเปรียบเทียบกับการหาผลการแปลงฟูรีเยร์วิฤตของลำดับชุดเดิมโดยตรงคือโดยไม่แยกเป็นลำดับย่อยหลายชุด

เพื่อให้เห็นหลักการนี้ เราจะเริ่มต้นจากการพิจารณาผลการแปลงวิฤตตามสมการ (5.17) ที่แสดงในรูปแบบใหม่ คือ

$$x_k \triangleq \text{DFT}[x_n] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n w_N^{kn} \quad (5.18)$$

โดยที่  $X_k = X(k)$ ,  $x_n = x(n)$  และ

$$W_N = \exp(-j2\pi/N) \quad (5.19)$$

สมมติให้  $N$  เป็นเลขคู่ที่มีค่าเท่ากับ  $2^n$  โดยที่  $m$  เป็นเลขจำนวนเต็มค่าบวก เราจะสามารถแสดงสมการ (5.18) ในรูปของนิพจน์ใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$x_k = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_{2n} W_N^{2nk} + \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_{2n+1} W_N^{(2n+1)k} \quad (5.20)$$

เนื่องจาก  $[\exp(-j2\pi/N)]^2 = \exp[j2\pi/(N/2)] \implies W_N^2 = W_{(N/2)}$  ดังนั้นสมการ (5.20) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} X_k &= \sum_{n=0}^{(N/2)-1} X_{2n} W_{(N/2)}^{nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} X_{2n+1} W_{(N/2)}^{nk} \\ &= G_k + W_N^k H_k \end{aligned} \quad (5.21)$$

โดยที่

$$G_k = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_{2n} W_{(N/2)}^{nk} \quad (5.22)$$

และ

$$H_k = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_{2n+1} W_{(N/2)}^{nk} \quad (5.23)$$

จากนี้ เราจะพิสูจน์ได้ว่า  $G_k = G_{k+(N/2)}$  และ  $H_k = H_{k+(N/2)}$  ซึ่งหมายถึงว่าทั้ง  $G_k$  และ  $H_k$  เป็นฟังก์ชันรายคาบของตัวแปร  $k$  โดยมีคาบเท่ากับ  $N/2$  และจากความจริงที่ว่า  $W_N^{k+(N/2)} = -W_N^k$  [พิสูจน์ได้โดยใช้สมการ (5.19)] เราจะสามารถแยกนิพจน์ของสมการ (5.20) ออกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้ คือ

$$x_k = G_k + W_N^k H_k \quad [k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1] \quad (5.24)$$

และ

$$X_{k+(N/2)} = G_k - W_N^k H_k \quad [k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1] \quad (5.25)$$

สรุปผลจากสมการ (5.24) และ (5.25) ข้างบนนี้ได้ว่า ในการคำนวณหาค่า  $X_k$  จากข้อมูล  $x_n$  ทั้งหมด  $N$  ค่า นั้น เราสามารถลดจำนวนครั้งของการคูณลงได้ จาก  $N$  ครั้งเหลือเพียง  $N/2$  ครั้ง เพราะผลคูณ  $W_N^k H_k$  ที่ปรากฏในสมการทั้งสองดังกล่าว จะหาได้ด้วยการคูณเพียงครั้งเดียว แต่นำไปใช้ได้ 2 ครั้ง ส่วนการบวกพจน์ต่าง ๆ จะเป็น  $N$  ครั้ง

ในขั้นตอนต่อจากนี้ เราจะลดจำนวนครั้งการคำนวณสำหรับ  $G_k$  และ  $H_k$  ลงได้ เช่นเดียวกับที่เราได้ทำแก่  $X_k$  ยกตัวอย่างกรณีของ  $G_k$  เราสามารถเขียนสมการ (5.24) และ (5.25) เพื่อแสดงนิพจน์ของมันได้เป็น

$$G_k = D_k + W_{(N/2)}^k E_k \quad [k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1] \quad (5.26)$$

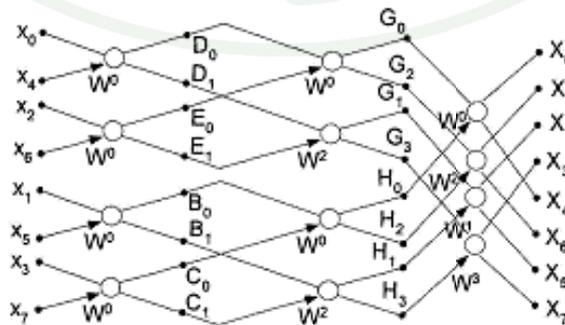
และ

$$G_{k+(N/4)} = D_k - W_{(N/2)}^k E_k \quad [k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1] \quad (5.27)$$

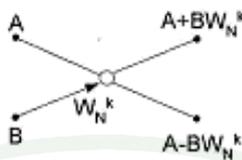
ซึ่งหมายถึงว่า  $G_k$  สามารถหาได้จาก  $D_k$  และ  $E_k$  โดยการคูณเพียง  $N/4$  ครั้ง และการบวกรวม  $N/2$  ครั้ง

กระบวนการนี้สามารถทำต่อไปได้เรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงผลการแปลงที่หาจากข้อมูลค่าเดียวในท้ายที่สุด ถ้า  $N = 2^n$  เราจะไปถึงผลการแปลงข้อมูลค่าเดียวภายในจำนวนขั้นตอนทั้งหมด  $m = \log_2 N$  ชั้น ในขั้นตอนแต่ละชั้นนี้ จำนวนค่าผลการแปลงที่ต้องหาจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของจำนวนค่าในขั้นตอนที่เพิ่งผ่านไป แต่จำนวนครั้งของการคูณจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง ซึ่งหมายความว่าในขั้นตอนแต่ละชั้นนั้น เราต้องใช้ในการบวก  $N$  ครั้ง และใช้ในการคูณ  $N/2$  ครั้ง สรุปโดยรวมแล้ว การหาผลการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วของข้อมูลจำนวน  $N$  ค่า จะใช้ในการบวกรวม  $N \log_2 N$  ครั้ง และใช้ในการคูณรวม  $(N/2) \log_2 N$  ครั้ง เทียบกับการบวกรวม  $N(N-1)$  ครั้ง และการคูณรวม  $(N-1)^2$  ครั้ง เมื่อใช้ขั้นตอนวิธีหาผลการแปลงฟูรีเยร์วิชุดแบบตรงไปตรงมา

ข้อสังเกต 6. ผลจากตัวอย่างทำให้สามารถเขียนแผนภาพการไหล (flow diagram) ของสัญญาณที่แทนฟังก์ชันวิชุดค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาผลการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว ได้ดังในภาพที่ 17 ข้างล่างนี้ โดยที่แผนภาพย่อยที่ได้จากเส้นตรง 2 เส้นตัดกัน ในภาพที่ 17 มีคำอธิบายตามภาพที่ 18



ภาพที่ 17 แผนภาพการไหล

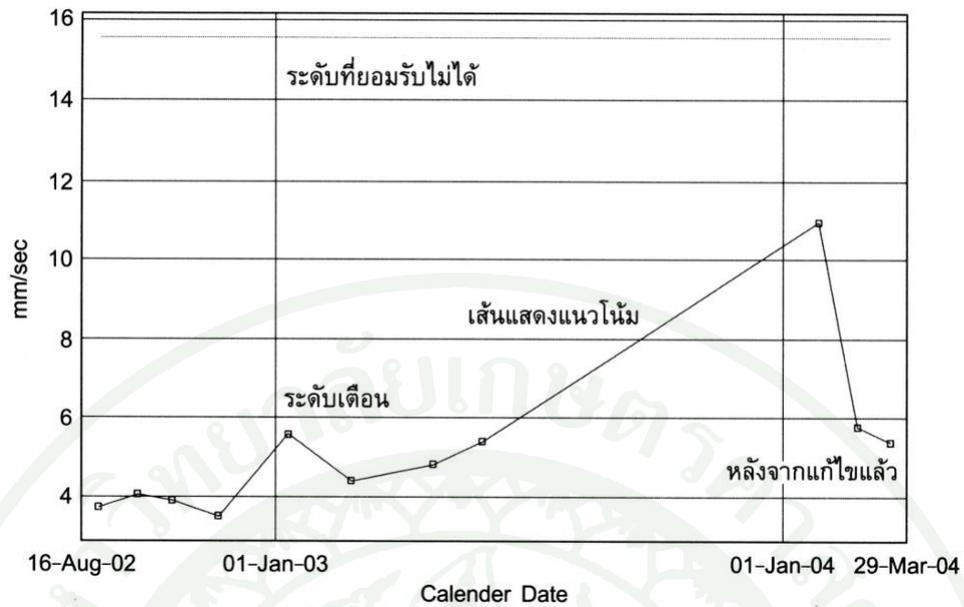


ภาพที่ 18 แผนภาพการไหลย่อย

## 6. ความสัมพันธ์ของการบำรุงรักษากับการวิเคราะห์การสั้นสะเทือน

ประดิษฐ์ (2550) โดยทั่วไปแล้วนั้น หน่วยงานบำรุงรักษา ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีเป้าหมายที่ตรงกันคือ เพื่อลดปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักร เพื่อนำไปสู่การลดระยะเวลาการหยุดเครื่องจักรและกระบวนการผลิตโดยไม่จำเป็น และปัจจุบันจะมีการแข่งขันกันในเชิงธุรกิจค่อนข้างสูง ดังนั้นทางหน่วยงานบำรุงรักษาเครื่องจักรและอุปกรณ์ภายในโรงงานจำเป็นต้องเพิ่มศักยภาพของตนเองโดยการพัฒนากระบวนการบำรุงรักษาให้มีความทันสมัยยิ่งขึ้น เพื่อจะทำให้เครื่องจักรและอุปกรณ์นั้นมีความพร้อมใช้งานและลดปัญหาการขัดข้องให้น้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลทำให้กระบวนการผลิตดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง

ก่อนที่จะดำเนินการในการวัดและวิเคราะห์การสั้นสะเทือนควรที่จะศึกษาถึงความสามารถและประโยชน์ของการวิเคราะห์การสั้นสะเทือนเสียก่อน ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความมั่นใจว่าการใช้เทคนิคนี้จะเอื้อประโยชน์ได้อย่างแท้จริง การสั้นสะเทือนนั้นจะอยู่รูปของพลังงานที่สูญเสียไป ซึ่งการสั้นสะเทือนนั้นเกิดจากปัญหาของเครื่องจักรที่แสดงผลออกมาให้เห็นทางกล ซึ่งจะส่งผลทำให้เครื่องจักรสูญเสียพลังงานและสมรรถนะการทำงาน เราสามารถวัดค่าของพลังงานที่สูญเสียไปของเครื่องจักรได้ในรูปแบบของการสั้นสะเทือน เครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องสูบลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ฯลฯ เมื่อมีการสั้นสะเทือนสูงมากกว่าปกติ นั้นแสดงว่ามีปัญหาบางอย่างใดอย่างหนึ่งเกิดขึ้นกับเครื่องจักรกลนั้น ๆ ซึ่งจะต้องหาแนวทางแก้ไขเพื่อลดการสูญเสียพลังงานและเป็นการรักษาสภาพการทำงานของเครื่องจักรนั้นให้อยู่ในระดับปกติ



ภาพที่ 19 แนวโน้มของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

การบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพโดยเทคนิคการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนนี้ ได้ผ่านการพิสูจน์จากหน่วยงานบำรุงรักษามาแล้ว ในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องจักรกลและการคาดการณ์ล่วงหน้า (Predictive Maintenance : PdM) โดยใช้เทคนิคของการสั่นสะเทือน (Vibration Technique) เป็นแนวทางการบำรุงที่ดีอีกแนวทางหนึ่ง เพราะหากการตรวจสอบได้ทำอย่างสม่ำเสมอตามกำหนดเวลาที่กำหนดไว้ โอกาสที่ความเสียหายเนื่องจากการที่ต้องหยุดกระบวนการผลิตโดยไม่คาดหมายจะเกิดขึ้นได้ยากและน้อยที่สุด

#### 6.1 ขั้นตอนการดำเนินการวัดการสั่นสะเทือน

เมื่อตกลงใจแน่นอนแล้วว่าจะใช้การบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพโดยวิธีการวัดการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกล ก็จะมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



ภาพที่ 20 แผนการเตรียมงานบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพ

## 6.2 การวางแผนงานและจัดแบ่งเครื่องจักร

เมื่อตกลงใช้วิธีการบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพในโรงงาน วิธีที่ดีที่สุด คือ การจัดให้มีหน่วยงานที่รับผิดชอบโดยตรง ซึ่งพร้อมที่จะทุ่มเทความรู้ความสามารถให้กับการวางแผนงาน ตรวจสอบ วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างเต็มที่

เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบประวัติการบำรุงรักษาเครื่องจักร ความถี่ของการเกิดขัดข้องของเครื่องจักร ประสิทธิภาพการทำงาน ความสำคัญต่อกระบวนการผลิต และจำนวนเครื่องจักรทั้งหมดที่มีอยู่ เมื่อตรวจสอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการแบ่งกลุ่มเครื่องจักรออกตามหลักการดังนี้

กลุ่มที่ 1 ต้องการความถี่ในการตรวจสอบมาก เครื่องจักรกลประเภทนี้ต้อง

- มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตมากที่สุด ขาดเสียมิได้ (Critical Machine)
- ถ้าเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง อาจเกิดอันตรายกับบุคคลหรืออุปกรณ์รอบข้างได้
- ไม่มีเครื่องจักรอื่นที่จะทำงานทดแทนได้ เมื่อเกิดการเสียหาย จะทำให้ทั้งระบบหยุดตาม

เครื่องจักรในกลุ่มนี้ต้องให้ความสำคัญและดูแลเป็นพิเศษ เพราะถ้าหากเกิดการขัดข้องหรือเสียหายจนเครื่องจักรไม่สามารถทำงานต่อไปได้ จะเป็นผลทำให้ทั้งระบบการผลิตต้องหยุดทำงานไปด้วย ดังนั้นจะต้องมีการตรวจสอบและดูแลอย่างใกล้ชิดและต่อเนื่อง

กลุ่มที่ 2 ต้องการความถี่ในการตรวจสอบปานกลาง เครื่องจักรประเภทนี้ประกอบไปด้วย

- มีความสำคัญในระบบการผลิต แต่มีเครื่องสำรองสำหรับการทำหน้าที่เดียวกันได้
- ถ้าเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง อาจเกิดอันตรายกับบุคคลหรืออุปกรณ์รอบข้างได้

กลุ่มที่ 3 ต้องการความถี่ในการตรวจสอบน้อย เครื่องจักรประเภทนี้ประกอบไปด้วย

- มีความสำคัญต่อระบบการผลิตค่อนข้างน้อย
- มีเครื่องสำรองเพื่อที่จะทำหน้าที่เดียวกันได้

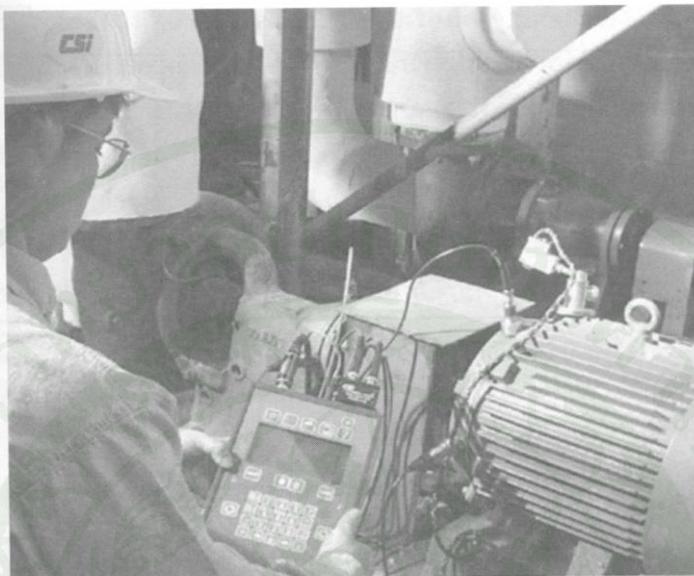
จากการแบ่งกลุ่มเครื่องจักรตามรูปแบบข้างต้น เราจะสามารถกำหนดได้เลยว่า แต่ละกลุ่มจะมีระยะเวลาระหว่างการตรวจสอบมากน้อยแค่ไหน เช่น กลุ่มที่ 1 ซึ่งต้องการความถี่ในการตรวจสอบสูง เนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตมาก (Critical Machine) ซึ่งจะขาดเสียมิได้ และไม่มีเครื่องจักรอื่นใดที่จะทดแทนได้เมื่อเกิดความเสียหายขึ้น ดังนั้นจึงไม่ควรจะปล่อยให้เกิดความเสียหายขึ้นกับเครื่องจักรในกลุ่มนี้ โดยทั่วไปจะกำหนดระยะเวลาในการตรวจสอบประมาณ 30 วัน/ครั้ง หรือทำการติดตั้งระบบการตรวจวัดแบบ Online ไว้ก็จะเป็นสิ่งที่ดี

การกำหนดระยะเวลาระหว่างการตรวจสอบแต่ละครั้งอาจจะใช้รูปแบบนี้เพื่อเป็นแนวทาง ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมของแต่ละหน่วยงาน หรือขึ้นอยู่กับอัตรากำลังและความสามารถของบุคลากรของหน่วยงานนั้น ๆ

กลุ่มที่ 1 ต้องการความถี่ในการตรวจสอบมาก จะใช้ระยะเวลาระหว่างการตรวจสอบประมาณ 30 วัน/ครั้ง หรือเพิ่มความถี่ในการตรวจสอบถ้ามีบุคลากรเพียงพอ หรือถ้ามีความสำคัญต่อระบบมากจริง ๆ ก็ควรทำการติดตั้งระบบการตรวจวัดแบบต่อเนื่องตลอดเวลา ที่นิยมเรียกว่า Online Monitoring

กลุ่มที่ 2 ต้องการความถี่ในการตรวจสอบปานกลาง ใช้ระยะเวลาระหว่างการตรวจสอบประมาณ 45-60 วัน/ครั้ง หรือเพิ่มความถี่ในการตรวจสอบถ้ามีบุคลากรเพียงพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละหน่วยงานบำรุงรักษา

กลุ่มที่ 3 ต้องการความถี่ในการตรวจสอบค่อนข้างน้อย อาจจะใช้ระยะเวลาระหว่างการตรวจสอบประมาณ 45-60 วัน/ครั้ง หรือมากกว่าหรือน้อยกว่า ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม



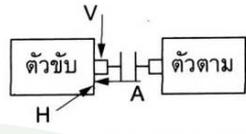
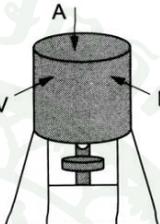
ภาพที่ 21 การวัดการสั่นสะเทือนกับเครื่องจักร

ระยะเวลาที่กำหนดนี้เป็นเพียงระยะเวลาที่นิยมใช้กันทั่วไปเท่านั้น ซึ่งเครื่องจักรแต่ละเครื่องมีสภาพการทำงานที่ไม่เหมือนกัน บางเครื่องอาจมีความจำเป็นต้องใช้ระยะเวลานี้น้อยกว่านี้ เหตุผลที่กำหนดไว้เช่นนี้ เพราะเป็นเวลาที่เหมาะสมที่เคยใช้กับโปรแกรมการบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพที่หลากหลาย แต่ละกลุ่มเครื่องจักรสามารถกำหนดระยะเวลาได้ตามความเหมาะสม โดยในที่นี้ระยะเวลาที่กำหนดจะไม่มากเกินไปจนไม่สามารถตรวจพบความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับเครื่องจักรนั้น และระยะเวลาการตรวจวัดก็สามารถปรับเปลี่ยนได้ตลอดเวลาตามความเหมาะสม ทั้งอัตรากำลังและต้นทุนของหน่วยงานนั้น

### 6.3 การกำหนดวิธีการและตำแหน่งการวัด

เครื่องจักรกลแต่ละประเภทที่มีรูปร่างหน้าตาไม่เหมือนกัน แต่จุดที่จะทำการตรวจวัดจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเลือกจุดที่จะทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนและหน่วยการวัด

ลักษณะการติดตั้ง	ความเร็วรอบ	ตำแหน่งการวัด	หน่วยวัด*
-แนวนระดับ (Horizontal) เช่น กังหันไอน้ำ พัดลม เครื่องสูบลม ฯลฯ	ส่วนมากจะมากกว่า 600 rpm		ความเร็วรอบ (Velocity) - mm/s <sub>pk</sub> - mm/s <sub>rms</sub>
- แนวตั้ง (Vertical) เช่น กังหันพลังน้ำ เครื่องสูบลม ฯลฯ	ส่วนมากจะน้อยกว่า 600 rpm		ระยะทาง (Displacement) - $\mu\text{m}_{p-p}$

**หมายเหตุ** เครื่องมือวัดแต่ละยี่ห้ออาจมีหน่วยของการวัดแตกต่างกันออกไป เช่น ความเร็ว อาจอ่านแตกต่างกันได้ เช่น mm/s<sub>pk</sub>, mm/s<sub>rms</sub>, in/s<sub>pk</sub> หรือระยะทางอาจอ่านแตกต่างกันเช่น mils<sub>p-p</sub> หรือ  $\mu\text{m}_{p-p}$

**ที่มา:** ประดิษฐ์ (2550)

#### 6.4 การจัดหาเครื่องมือและจัดเตรียมบุคลากร

การเริ่มต้นสำหรับระบบงานวัดการสั่นสะเทือนนั้น หากมีงบประมาณสำหรับเครื่องมือค่อนข้างจำกัด เพียงแค่จัดหาเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบธรรมดาไปก่อน (Vibration Meter) โดยเป็นการวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยรวม เพื่อทำการตรวจสอบเครื่องจักรโดยการวัดการสั่นสะเทือนได้เบื้องต้น แล้วนำค่าที่ตรวจวัดได้นั้นมาจัดทำเป็นกราฟแนวโน้มของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร อาจจะมีเครื่องอื่น ๆ ประกอบด้วย เช่น เครื่องช่วยสำหรับการฟังเสียง เพื่อที่จะช่วยในการประเมินสภาพการทำงานของเครื่องจักรและตรวจหาความผิดปกติ เมื่อเริ่มดำเนินการในการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดอย่างง่ายไปได้ช่วงเวลาหนึ่งแล้ว ก็ควรดำเนินการจัดหาเครื่องมือวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่มีความสามารถหลากหลายตามกำลังงบประมาณที่พอจะหาได้อย่างน้อยที่สุดควรเป็นเครื่องมือที่วัดและวิเคราะห์แบบสเปกตรัมได้ (Spectrum Analysis) เนื่องจากค่าการสั่นสะเทือนโดยรวมจะทราบแต่เพียงแนวโน้มของความผิดปกติเท่านั้น ไม่สามารถหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาได้ ทำให้ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญมาช่วยในการตรวจสอบสาเหตุที่เกิดขึ้น

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบสเปกตรัมนั้น เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบของสัญญาณความถี่ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนภายในเครื่องจักรทั้งหมด โดยอาศัยกราฟสเปกตรัมวิเคราะห์ ตรวจสอบสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้น ว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนกับเครื่องจักรกลนั้นมีสาเหตุมาจากชิ้นส่วนไหนของเครื่องจักรที่เกิดความบกพร่องขึ้น เพื่อที่จะได้ทำการแก้ไขตรงจุดต่อไป

ในทางปฏิบัตินั้น เพื่อให้การทำงานในการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนมีประสิทธิภาพสูงสุด ควรจัดให้มีการฝึกอบรมพื้นฐานให้ผู้ที่ทำงานในด้านนี้ ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติเกี่ยวกับการวัดการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน และจัดอบรมเรื่องอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น หลักการทำงานและการใช้งานของเครื่องมือวัดและวิเคราะห์รูปแบบการเสื่อมสภาพโดยทั่วไปของเครื่องจักรกล เป็นต้น เพื่อเป็นการเสริมทักษะและความเข้าใจแก่บุคลากรที่จะทำงานในด้านนี้ นอกจากการอบรมแล้ว ควรจะมีการจัดสัมมนาเฉพาะกลุ่มเพื่อที่จะให้บุคลากรของกลุ่มงานด้านนี้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ ความคิดเห็น และร่วมกันแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่พบเจอในระหว่างการทำงานในดำเนิน เพื่อที่จะเป็นการส่งเสริมให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับปรุงการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และควรมีการส่งผู้ปฏิบัติงานในด้านนี้เข้ารับการอบรมทั้งภายในและภายนอกอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเป็นการเสริมทักษะและเพิ่มแรงจูงใจให้เกิดความกระตือรือร้นในการทำงานของบุคลากร อันจะส่งผลให้การดำเนินงานด้านการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนนี้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพตามเป้าหมายได้

สรุปแล้วการเตรียมการมี 2 ด้าน คือ ด้านเครื่องมือและด้านบุคลากร

เครื่องมือ เครื่องมือวัดค่าการสั่นสะเทือนควรมีความสามารถอย่างน้อยดังนี้

วัดความถี่ของสัญญาณได้ในช่วง 10 – 10,000 Hz

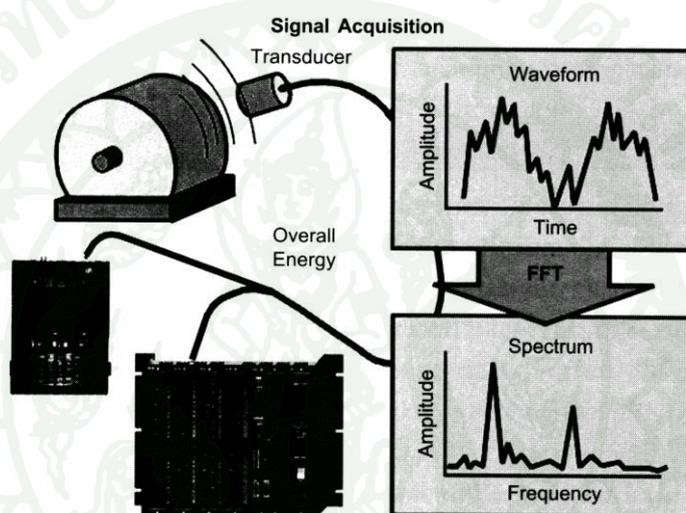
อ่านค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นหน่วยความเร็ว (in/s, mm/s) และระยะทาง

( $\mu\text{m}_{p-p}$ )

เป็นชนิดพกพาสะดวก (Portable) น้ำหนักเบา นำติดตัวไปไปได้

## บุคลากร

บุคลากร	ลักษณะงาน	ความรู้ความสามารถ
1. วิศวกร หรือ ปวส.	- วิเคราะห์ข้อมูลและตัดสินใจ	- การสันสะเทือนเบื้องต้นและการใช้เครื่องมือวัด
2. ปวส. หรือ ปวช.	- ตรวจวัดข้อมูลและทำกราฟแนวโน้ม (Trend Plot)	- การใช้เครื่องมือวัด วิธีการวัดและตำแหน่งการตรวจวัด



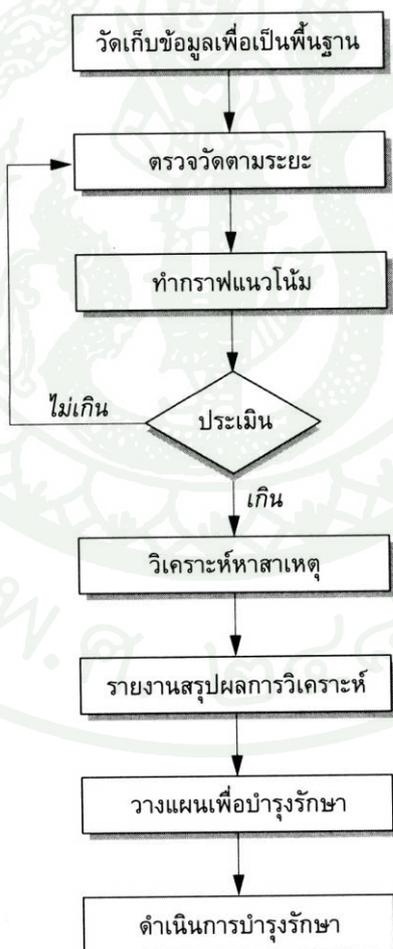
ภาพที่ 22 เครื่องมือวัดการสันสะเทือนและการแสดงผล

### 6.5 จัดระบบการออกตรวจวัดและการจัดเก็บข้อมูล

ปัจจุบันนี้มีเครื่องมือวัดและวิเคราะห์การสันสะเทือนที่ทันสมัยออกมามากมาย โดยแต่ละยี่ห้อจะมีซอฟต์แวร์สำหรับต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการส่ง-ถ่ายข้อมูลระหว่างกันของเครื่องมือวัดและระบบคอมพิวเตอร์ในการจัดเก็บระบบข้อมูลที่ทำกรวัดค่ามานั้น จะต้องอาศัยซอฟต์แวร์ช่วย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลในส่วนของเครื่องจักรด้วย และควรมีการจัดการบันทึกข้อมูลที่จำเป็นต่าง ๆ ของเครื่องจักรไว้ พร้อมทั้งทำการสเก็ซภาพของเครื่องจักรคร่าว ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกสำหรับการ วิเคราะห์สภาพของเครื่องจักรนั้น กำหนดเส้นทางในการตรวจวัดตามที่กำหนดไว้ แล้วจัดทำตารางสำหรับทำการบันทึกข้อมูลที่จำเป็นของเครื่องจักรแต่ละชนิดไว้เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการทำงานต่อไป

เมื่อมีซอฟต์แวร์อำนวยความสะดวกสำหรับการจัดเก็บข้อมูลแล้ว ก็ควรมีระบบการจัดเก็บข้อมูล โดยจัดเก็บไว้เป็นแฟ้มเอกสารแยกกันสำหรับเครื่องจักรกลแต่ละชนิดด้วย เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์อาจมีความบกพร่องหรือเกิดปัญหาขึ้น ทำให้ข้อมูลทั้งหมดที่ได้ทำการบันทึกไว้สูญหายไปด้วย ในการตรวจสอบค่าที่ทำการวัดมาโดยดูจากกราฟแนวโน้มของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลนั้น เป็นการประเมินในเบื้องต้นของสภาพเครื่องจักรกล เพื่อดำเนินการวิเคราะห์ผลต่อไป และหลังจากวิเคราะห์ผลแล้ว ควรเก็บสำเนาผลสรุปของการวิเคราะห์เอาไว้ในแฟ้มเอกสาร เพื่อความสะดวกในการเรียกใช้ข้อมูลเมื่อต้องการตรวจสอบผลอีกครั้ง

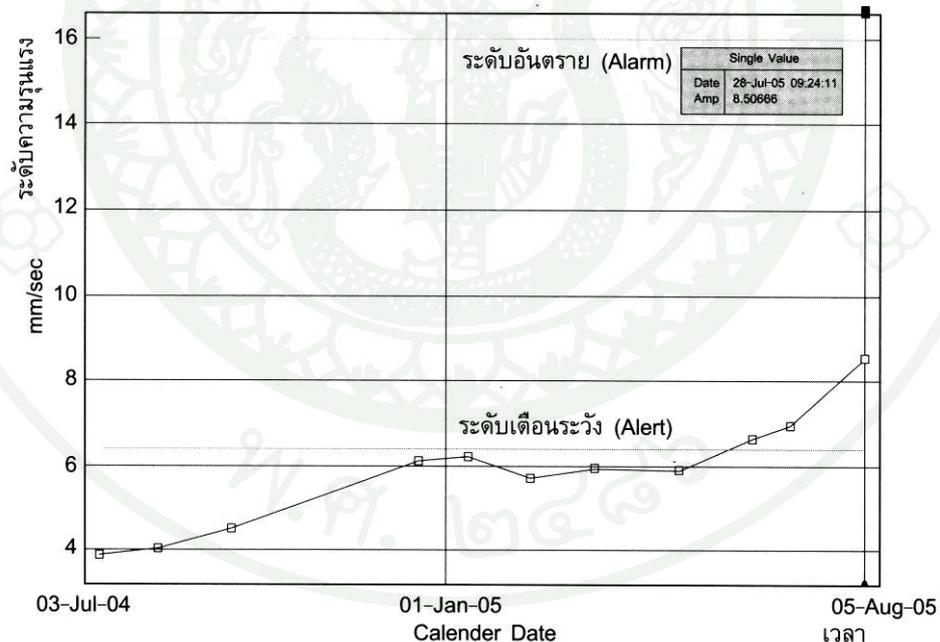
หลังจากดำเนินการเตรียมการทุกอย่างตามขั้นตอนเสร็จ ก็เริ่มดำเนินการตามแผนการบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพ โดยใช้เทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งมีขั้นตอนดำเนินงานดังนี้



ภาพที่ 23 การดำเนินการตามแผนการบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพ

## 6.6 การตรวจสอบและการบันทึกข้อมูล

การตรวจสอบและบันทึกข้อมูลตามที่ได้วางแผนไว้แล้ว เป็นการตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรภาคสนาม โดยการตรวจวัดตามที่ได้กำหนดจุดและตำแหน่งการวัดไว้ในการตรวจวัดค่านั้น ผู้ที่ทำการตรวจวัดและผู้ที่ทำการวิเคราะห์ควรมีความเข้าใจตรงกัน และควรทำเป็นลำดับขั้นตอนที่ได้วางไว้แล้ว เพื่อไม่เป็นการสับสนในการดำเนินงาน ถ้าข้อมูลที่ได้มามีการสับสน ก็จะส่งผลให้การวิเคราะห์นั้นเกิดความคลาดเคลื่อนได้ และจะส่งผลทำให้ผลของการวิเคราะห์นั้นไม่ตรงกับความเป็นจริง หรือขาดความเชื่อถือจากผู้ขอรับบริการได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดความล้มเหลวต่อทั้งระบบ ในปัจจุบันจะมีการเขียนซอฟต์แวร์ช่วยสำหรับการวิเคราะห์ความบกพร่องในเครื่องจักร โดยให้ผู้ปฏิบัติงานนั้นใส่ข้อมูลเครื่องจักรเข้าไปตามที่โปรแกรมต้องการข้อมูล แล้วโปรแกรมนั้นก็จะดำเนินการวิเคราะห์ผลออกมาให้ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วก็ต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้ดำเนินการวิเคราะห์ผลเองจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่าด้วย



ภาพที่ 24 กราฟแนวโน้ม (Trend Plot) ของการสั่นสะเทือนที่ทำการวัดแต่ละครั้ง

## 6.7 การจัดทำกราฟแนวโน้ม (Trend Plot)

การจัดทำกราฟแนวโน้มการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร จะทำได้เมื่อมีข้อมูลที่วัดและบันทึกค่าจากจุดเดียวกันหลาย ๆ ครั้งตามที่ได้จัดตารางการตรวจวัดไว้ การจัดทำกราฟแนวโน้มการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรควรจัดทำกับทุก ๆ ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด เนื่องจากข้อมูลแต่ละตำแหน่งของการตรวจวัดจะช่วยเอื้อประโยชน์ในการวิเคราะห์หาความบกพร่องของเครื่องจักรได้เช่นกัน

## 6.8 การเปรียบเทียบกราฟที่ได้ว่าเกินระดับที่กำหนดได้หรือไม่

มาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ มาตรฐานการสั่นของตัวเรือน (Casing Vibration) ใช้เกณฑ์มาตรฐานของ ISO 2372

ตารางที่ 4 มาตรฐานการสั่นของตัวเรือนตามเกณฑ์มาตรฐานของ ISO 2372

กลุ่มเครื่องจักร	ระดับที่เริ่มสงสัย (ผู้ การวิเคราะห์) mm/s <sub>rms</sub>	ระดับที่ต้องหยุดเครื่อง mm/s <sub>rms</sub>
- กลุ่ม 1 เครื่องจักรที่มีขนาด < 15 kW	1.8	4.5
- กลุ่ม 2 เครื่องจักรที่มีขนาด 15 - 75 kW	2.8	7.1
- กลุ่ม 3 เครื่องจักรที่มีขนาด > 75 kW และ ติดตั้งบนฐานที่แข็งแรง	4.5	11.0
- กลุ่ม 4 เครื่องจักรที่มีขนาด > 75 KkW และ ติดตั้งบนฐานที่อ่อนตัวได้ รวมทั้ง เครื่องจักรประเภทอัดลมด้วย	7.1	18.0

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางสามารถปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสมของแต่ละอุปกรณ์

ที่มา: ประดิษฐ์ (2550)

มาตรฐานการสั่นของเพลลา (Shaft Vibration) ปัจจุบันใช้เกณฑ์มาตรฐาน MHI ที่ใช้กับ Turbine-Generator ของโรงไฟฟ้า ดังนี้

ตารางที่ 5 มาตรฐานการสั่นของเพลลาตามเกณฑ์มาตรฐาน MHI

กลุ่มเครื่องจักร	ระดับที่เริ่มสงสัย (ผู้การวิเคราะห์)	ระดับที่ต้องหยุดเครื่อง
- กังหันไอน้ำ (Steam Turbine)	90 $\mu\text{m}_{p-p}$	135 $\mu\text{m}_{p-p}$
- กังหันพลังน้ำ (Hydro Turbine)	90 $\mu\text{m}_{p-p}$	135 $\mu\text{m}_{p-p}$
- เครื่องสูบหรือพัดลมขนาดใหญ่	90 $\mu\text{m}_{p-p}$	135 $\mu\text{m}_{p-p}$

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางสามารถปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสมของแต่ละอุปกรณ์

ที่มา: ประดิษฐ์ (2550)

#### 6.9 การวิเคราะห์สถานะปัจจุบันของเครื่องจักร

การเปลี่ยนแปลงระดับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลนั้น จะแสดงถึงความบกพร่องอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลาย ๆ อย่างภายในเครื่องจักร ซึ่งจำเป็นต้องหาข้อบกพร่องเพื่อที่จะดำเนินการแก้ไขต่อไป หากผลจากการวิเคราะห์กราฟแนวโน้มการสั่นสะเทือนไม่แสดงอาการที่ผิดปกติใด ๆ ก็ทำการเก็บข้อมูลเข้าแฟ้มไว้สำหรับอ้างอิงและก็ดำเนินการตรวจวัดต่อไปตามตารางการออกตรวจวัด



ภาพที่ 25 การวิเคราะห์ความผิดปกติของเครื่องจักรจากข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าสั่นสะเทือน  
6.10 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนกับงานบำรุงรักษา

เมื่อผลการวิเคราะห์สภาพการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรนั้นพบว่าน่าจะมี ความผิดปกติเกิดขึ้นกับเครื่องจักร ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจะต้องทำการวิเคราะห์เพื่อค้นหาต้นตอของความ บกพร่องนั้น โดยการใช้การวิเคราะห์แบบกราฟสเปกตรัม (FFT) เพื่ออำนวยความสะดวกในการ ตรวจสอบหาสาเหตุที่แท้จริงภายในเครื่องจักร พร้อมทั้งเสนอแนะวิธีการแก้ไขให้หน่วยซ่อมและ ประเมินสภาพของเครื่องจักรชุดนั้นว่าจะสามารถทำงานได้อีกนานเท่าใด เพื่อทางหน่วยซ่อมจะได้ กำหนดช่วงเวลาที่จะทำการซ่อมบำรุงและต้องส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตน้อยที่สุด

เมื่อหน่วยซ่อมดำเนินการซ่อมบำรุงเครื่องจักรนั้นแล้วเสร็จ ควรดำเนินการตรวจวัด ค่าอีกครั้งหนึ่ง (Test Run) เพื่อเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรนั้นว่าค่าการ สั่นสะเทือนก่อนการซ่อมและหลังจากการซ่อมเสร็จแล้วจะมีผลต่างกันมากน้อยแค่ไหน และเพื่อ เป็นข้อมูลของค่าการสั่นสะเทือนสำหรับอ้างอิงในการซ่อมบำรุงครั้งต่อไปด้วย

สำหรับการดำเนินการบำรุงรักษาแบบพยากรณ์ตามสภาพ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกล ถ้ามีการดำเนินการอย่างถูกวิธีและสม่ำเสมอตามที่ได้ทำโปรแกรม ไว้ จะทำให้ผลการดำเนินการนั้นบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งใจเอาไว้ และทำให้ระบบการบำรุงรักษา ขององค์กรนั้นมี ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วย

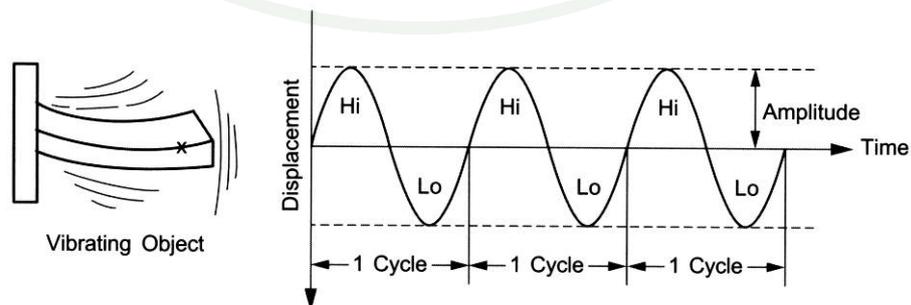
## 7. ทฤษฎีการสั่นสะเทือนเบื้องต้น

### 7.1 พื้นฐานทฤษฎีการสั่นสะเทือนเบื้องต้น

ประดิษฐ์ (2550) การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ไม่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เฉพาะในงานบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์เท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาใช้ได้ดีสำหรับการวินิจฉัยหาสาเหตุของความผิดปกติของเครื่องจักรอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรอุปกรณ์เชิงกลในงานอุตสาหกรรมทั่วไป เมื่อมีการนำเทคนิคนี้มาใช้ที่เหมาะสมและถูกต้อง ความหมายที่แปรผลได้จากข้อมูลการสั่นสะเทือนนั้นจะส่งผลให้การรักษาระดับเงื่อนไขการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบที่สำคัญของโรงงานนั้นเป็นไปได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน เช่น การประเมินคุณภาพและลักษณะของการไหลของของไหลภายในท่อหรือภาชนะ ความดันผนัง การตรวจสอบการรั่ว รวมถึงการทดสอบแบบไม่ทำลายอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงความเชื่อมั่นและสมรรถนะของระบบที่สำคัญของโรงงานต่าง ๆ ซึ่งการจะประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ให้เกิดประโยชน์ ดังที่กล่าวมานั้นจะต้องทำความเข้าใจถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเสียก่อน ดังจะได้มีการอธิบายในเนื้อหาของบทนี้

การสั่นสะเทือน (Vibration) คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบ ๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะเคลื่อนที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมา หรือจะเป็นการแกว่ง (Oscillation) รอบจุดสมดุลก็ตาม ตัวอย่างเช่น การแกว่งตัวของลูกตุ้มนาฬิกา หรือการเคลื่อนที่ของมวลที่อยู่ติดกับสปริง เป็นต้น

ถ้าเราสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะที่ช้าลงมาก ๆ ได้ เราจะพบรูปแบบของการเคลื่อนที่ในทิศทางที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความห่างไกลหรือความเร็วในการเคลื่อนที่แบบสั่นได้ ดังแสดงในภาพที่ 26 องค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่นนี้ได้แก่ ความถี่ (Frequency) แอมพลิจูด (Amplitude) และความเร่ง (Acceleration)



ภาพที่ 26 ลักษณะองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน

### 7.1.1 ความถี่ (Frequency)

วัตถุที่มีการสั่นจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านตำแหน่งคงที่หนึ่ง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งสูงสุดค่าหนึ่งและกลับมาผ่านตำแหน่งสูงสุดอีกค่าหนึ่ง และย้อนกลับมายังตำแหน่งคงที่เดิม ถือว่ามีการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ (1 Cycle) ดังแสดงในภาพที่ 26 จำนวนรอบของการสั่นของวัตถุในช่วงเวลา 1 วินาที จะเรียกว่า ความถี่ ซึ่งจะมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz; Hz) หรือ 1 เฮิรตซ์ จะเท่ากับการเคลื่อนที่ไปกลับ 1 รอบในเวลา 1 วินาที

### 7.1.2 แอมพลิจูด (Amplitude)

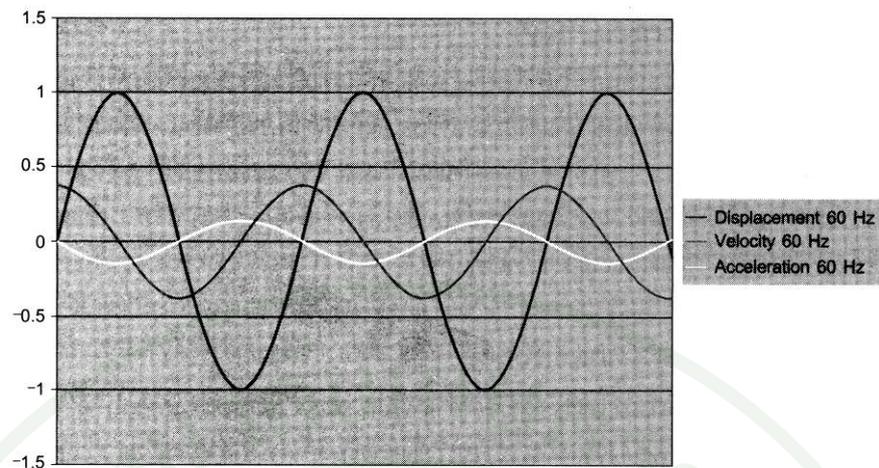
วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบสั่นจะมีค่าระยะทางหรือการขจัด (Displacement) มากที่สุดในแต่ละข้างของตำแหน่งคงที่หนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งค่าระยะทางดังกล่าวจะเรียกว่า แอมพลิจูด และมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (Millimeter) หรือนิ้ว (Inches) ความรุนแรงของการสั่นจะขึ้นกับค่าแอมพลิจูดนี้

### 7.1.3 ความเร็ว (Velocity)

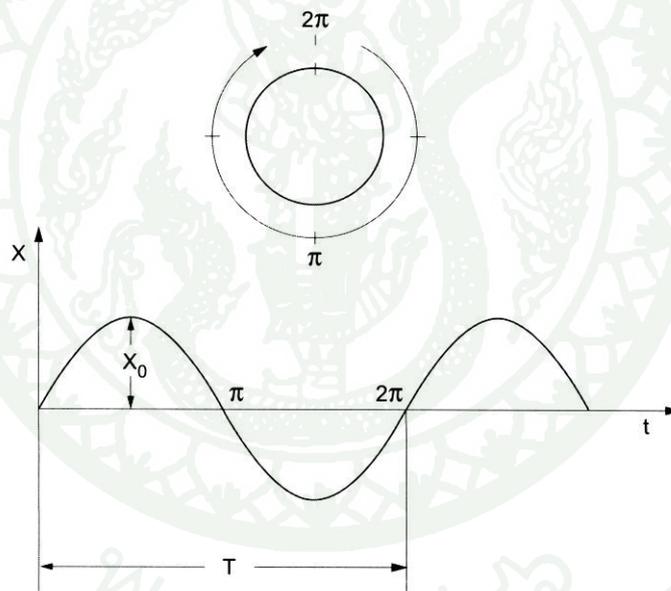
วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบสั่นจะมีการขจัด (Displacement) ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาในระหว่างการเคลื่อนที่ จะเรียกว่า ความเร็ว ซึ่งจะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/sec) หรือนิ้วต่อวินาที (in/sec)

### 7.1.4 ความเร่ง (Acceleration)

ความเร็วของการสั่นของวัตถุจากค่า 0 ถึงค่าสูงสุดระหว่างการสั่นแต่ละรอบ ค่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเทียบกับเวลาจะเรียกว่า ความเร่ง ซึ่งจะถูกวัดเพื่อให้ทราบถึงความเร็วของการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับเวลา ดังนั้นหน่วยของความเร่งจึงแสดงได้ด้วยค่ามิลลิเมตรหรือนิ้วต่อวินาทียกกำลังสอง ( $\text{mm/sec}^2$ ) ค่าของความเร่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึงค่าสูงสุดระหว่างการสั่นแต่ละรอบ โดยจะมีค่าสูงสุด ในตำแหน่งแอมพลิจูดสูงและต่ำสุดที่ตำแหน่งสมดุลดังแสดงในภาพที่ 27 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขจัด (Displacement) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง ที่ความถี่เท่ากัน



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขจัด (Displacement), ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ที่ความถี่ 60 Hz



ภาพที่ 28 การเคลื่อนที่แบบคาบ (Periodic Motion)

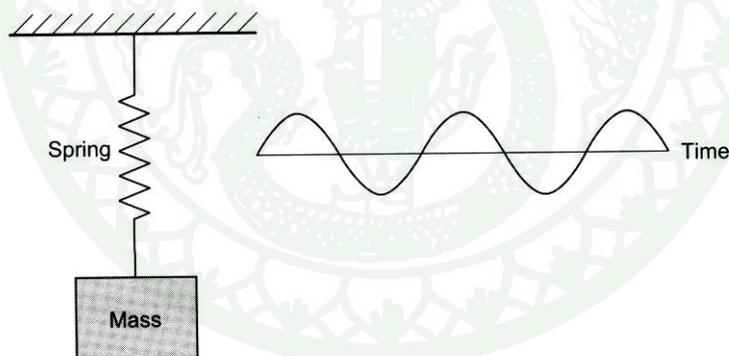
## 7.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน

รูปแบบการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบคาบเวลา (Periodic Motion) หรือมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบซ้ำ ๆ ในช่วงคาบเวลาคงที่ค่าหนึ่ง ( $T$ ) หรือ 1 รอบ ( $2\pi$ ) ดังแสดงในภาพที่ 28 โดยที่ในแกนตั้งจะแทนด้วยการขจัด (Displacement;  $x$ ) และ

แกนนอนแทนด้วยเวลา (t) ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (Harmonic Motion) และการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นฮาร์มอนิก (Non-harmonic Motion)

### 7.2.1 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (Harmonic Motion)

การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกเป็นการเคลื่อนที่แบบคาบเวลาที่มีความซับซ้อนน้อยและง่ายแก่การทำความเข้าใจมากที่สุด การเคลื่อนที่แบบนี้จะมีลักษณะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาที่เหมือนกันทุกคาบ ตัวอย่างเช่น การแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกาที่มีการเคลื่อนที่ที่บรอยเดิมทุกครั้งโดยมีคาบเวลาและความถี่คงที่ ดังตัวอย่างตามภาพที่ 29 เป็นการแขวนของวัตถุมวล  $m$  ไว้กับสปริง เมื่อมีการดึงวัตถุมวล  $m$  ลงมาด้านล่างแล้วปล่อย ก้อนวัตถุมวล  $m$  ก็จะเคลื่อนที่ขึ้น-ลง เมื่อเรานำแผ่นฟิล์มที่สามารถบันทึกตำแหน่งที่ติดไว้กับก้อนวัตถุที่เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และแผ่นฟิล์มวิ่งผ่านด้วยความเร็วคงที่ ลักษณะของตำแหน่งที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มจะมีลักษณะดังภาพที่ 29 ซึ่งแสดงถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ของมวล  $m$  ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยภาพที่ 28 เช่นกัน



ภาพที่ 29 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion)

การเคลื่อนที่ของการสั่นแบบฮาร์มอนิกสามารถแสดงในรูปของฟังก์ชันทางตรีโกณมิติ แทนความสัมพันธ์ระหว่างการขจัด (Displacement;  $x$ ) และเวลา (t) ได้ดังนี้

$$X = X_0 \sin(\omega t) \quad (7.1)$$

เมื่อ  $X_0$  คือ ค่าการขจัดสูงสุด หรือค่าแอมพลิจูด (Amplitude)

$x$  คือ ค่าการขจัดที่เวลา  $t$  ใด ๆ

$$f = \frac{1}{T} \quad (7.2)$$

เมื่อ  $T$  คือ คาบเวลา มีหน่วยเป็นวินาทีต่อรอบ หรือเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ 1 รอบ ซึ่งส่วนกลับคือ ความถี่ ( $f$ ) มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Cycle per Second; cps) หรือเฮิร์ตซ์ (Hertz; Hz)

นอกจากนั้นยังสามารถวัดความถี่ของการสั่นได้อีกวิธีหนึ่ง คือ การวัดความถี่เชิงมุม (Circular Frequency;  $\omega$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (Radians per Second) จากภาพที่ 28 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบของการสั่น ( $\omega t$ ) จะเกิดขึ้นเมื่อมีมุมรวมเท่ากับ 360 องศา หรือ 2 เรเดียน ที่จุดดังกล่าวจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (7.3)$$

สำหรับเครื่องจักรแบบหมุน ความถี่ส่วนใหญ่จะแสดงด้วยค่าการสั่นสะเทือนต่อนาที (Vibrations per Minute; vpm) หรือ

$$\text{vpm} = \frac{\omega}{\pi} \quad (7.4)$$

โดยความหมายแล้ว ความเร็วเป็นอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของการขจัดเทียบกับเวลา ซึ่งสำหรับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกแล้ว สมการของการขจัดจะแสดงได้ดังสมการที่ (7.1) ซึ่งเมื่อหาอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของสมการนี้เทียบกับเวลา จะได้ผลดังนี้

$$v = \frac{dx}{dt} = x = \omega x_0 \cos(\omega t) \quad (7.5)$$

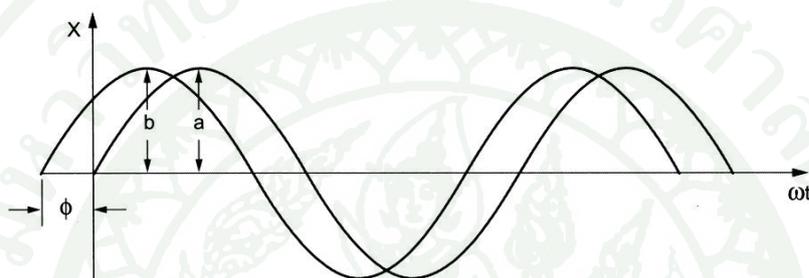
จากสมการที่ (7.5) จะพบว่าความเร็วมีลักษณะความสัมพันธ์แบบฮาร์มอนิกด้วย ทั้งนี้การขจัดต้องมีลักษณะเป็นฮาร์มอนิก และมีค่าสูงสุดหรือค่าแอมพลิจูดเท่ากับ  $-\omega x_0$

ในทำนองเดียวกัน ความเร่งเป็นอนุพันธ์ลำดับที่ 2 ของการขจัดเมื่อเทียบกับเวลา แสดงได้ดังนี้

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = -\omega^2 x_0 \sin(\omega t) \quad (7.6)$$

สมการที่ (7.6) มีลักษณะเป็นฮาร์มอนิกเช่นกัน โดยมีค่าการขจัดสูงสุดหรือค่าแอมพลิจูดเท่ากับ  $\omega^2 x_0$

หากพิจารณาความถี่ 2 ค่าโดยให้มีสมการของความถี่ค่าแรกเป็น  $x_1 = a \sin(\omega t)$  และสมการของความถี่ค่าที่ 2 เป็น  $x_2 = b \sin(\omega t + \phi)$  ดังแสดงในภาพที่ 30 ซึ่งแกนอนจะแทนด้วยค่า  $\omega t$  และ ค่า  $\phi$  ในสมการของ  $x_2$  คือ ค่ามุมเฟส (Phase Angle) ค่าเฟสที่แตกต่างกันของการสั่นทั้งสองค่านี้ และด้วยค่ามุมเฟสนี้เอง ทำให้การสั่นทั้งสองค่าดังแสดงในรูปไม่สามารถมีค่าแอมพลิจูดที่เวลาเดียวกันได้ โดยที่การสั่นค่าหนึ่งจะอยู่ห่างจากการสั่นอีกค่าหนึ่งเท่ากับ  $\phi/\omega$  วินาที ทั้งนี้การสั่นทั้งสองค่านี้ต้องมีค่าความถี่เท่ากัน ( $\omega$ ) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ามุมเฟสจะมีความหมายเพียงกรณีของการสั่นสองค่าที่มีความถี่เดียวกันเท่านั้น



ภาพที่ 30 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก 2 ค่าโดยที่มีมุมเฟสระหว่างกัน

### 7.2.2 การเคลื่อนที่แบบไม่เป็นฮาร์มอนิก (Non-harmonic Motion)

สำหรับเครื่องจักรอุปกรณ์ส่วนใหญ่ปกติแล้วจะมีแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนหลายแหล่ง ดังนั้นรูปแบบของการสั่นเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดและเวลาส่วนใหญ่จึงมีลักษณะแบบที่ไม่เป็นฮาร์มอนิก ดังแสดงในภาพที่ 31

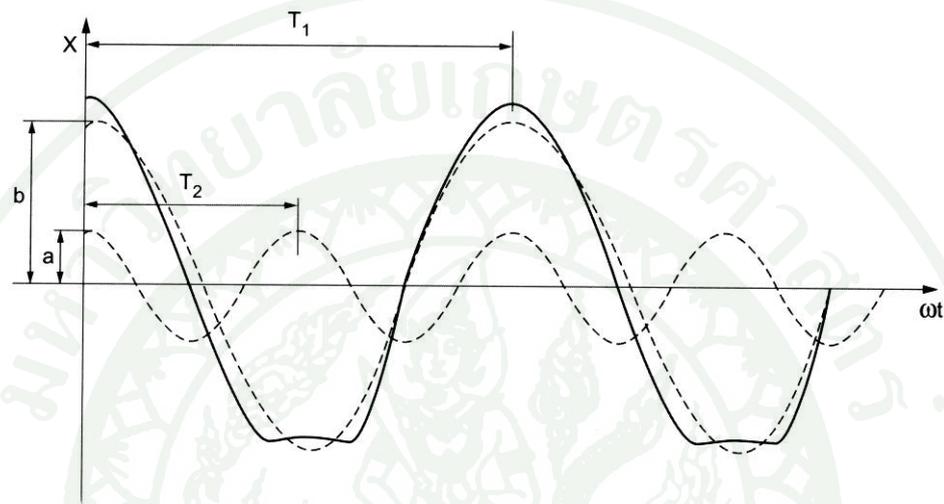
ในขณะที่ทุก ๆ การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกจะมีลักษณะเป็นคาบเวลา แต่ไม่ใช่ทุก ๆ การเคลื่อนที่ที่มีลักษณะเป็นคาบเวลาจะเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกเสมอไป ดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นฮาร์มอนิก ที่เกิดจากการรวมกันของการเคลื่อนที่ในลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) สองคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน โดยที่คลื่นแรก คือ เส้นประที่มีค่าแอมพลิจูด  $a$  และคลื่นที่ 2 คือ เส้นประที่มีค่าแอมพลิจูด  $b$  ซึ่งเส้นโค้งดังกล่าวจะสามารถแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$x_1 = a \sin(\omega_1 t) \quad (7.7)$$

$$x_2 = b \sin(\omega_2 t) \quad (7.8)$$

การเคลื่อนที่แบบสั่นรวมจะแทนได้ด้วยเส้นทึบที่เกิดจากการรวมกันของเส้นประทั้งสอง ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$x = x_1 + x_2 = a \sin(\omega_1 t) + b \sin(\omega_2 t) \quad (7.9)$$



ภาพที่ 31 การเคลื่อนที่แบบไม่เป็นฮาร์มอนิก (Non-harmonic Motion)

สำหรับฟังก์ชันแบบคาบเวลาใด ๆ สามารถเขียนแทนได้ด้วยฟังก์ชันไซน์ในลักษณะอนุกรมกัน โดยมีความถี่ที่ค่า  $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$  ตามลำดับ ดังแสดงได้ดังนี้

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \phi_3) \quad (7.10)$$

สมการที่ (7.10) รู้จักกันในชื่อของอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ( $f(t)$ ) โดยที่ค่าแอมพลิจูด ( $A_1, A_2, A_3, \dots$ ) และมุมเฟส ( $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$ ) ของทุก ๆ การเคลื่อนที่แบบสั่นอย่างต่อเนื่อง สามารถคำนวณหาค่าได้จากวิธีการทางคณิตศาสตร์เมื่อทราบค่าของฟังก์ชัน โดยทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ค่าการสั่นสะเทือนทั่วไป

ค่า  $2\omega, 3\omega, 4\omega \dots$  จะเป็นการอ้างอิงถึง ค่าลำดับที่ฮาร์มอนิกของความถี่หลัก (Primary Frequency;  $\omega$ ) ในรูปแบบเฉพาะของการสั่นส่วนใหญ่ ค่าความถี่หลักของวัตถุจะมีค่าเป็นหนึ่งในห้าของค่าความเร็วใช้งาน (Running Speed) ของขบวนเครื่องจักร (Machine-train) ซึ่งจะแทนด้วย  $1X$

หรือ  $1\omega$  นอกจากนั้นรูปแบบลักษณะเฉพาะดังกล่าวอาจมีค่าปรากฏที่ตำแหน่งฮาร์โมนิกอื่น ๆ เช่น ที่สองเท่า (2X) สามเท่า (3X) หรือที่ตำแหน่งอื่น ๆ ของค่าความเร็วใช้งานหลัก (Primary Running Speed) ซึ่งการประยุกต์ดังกล่าวเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนต่อไป

### 7.3 พลศาสตร์ของเครื่องจักร

เหตุผลสำคัญที่ทำให้รูปแบบการสั่นของเครื่องจักรมีความหลากหลายแตกต่างกันนั้นมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ของเครื่องจักร (Machine Dynamics) นั่นเอง โดยการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นอยู่กับมวล (Mass) ความมั่นคงแข็งแรง (Stiffness) ความหน่วง (Damping) และองศาอิสระของการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom) แต่อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องมีความระมัดระวังในการวิเคราะห์ห้อยู่ เพราะรูปแบบของการสั่นสะเทือนและระดับพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยเครื่องจักรนั้นอาจจะแปรผันไปตามปัจจัยของตำแหน่งหรือปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ในการวัดได้อีกด้วย นอกเหนือจากปัจจัยด้านพลศาสตร์ของเครื่องจักรดังกล่าวมาแล้ว

#### 7.3.1 มวล ความมั่นคงแข็งแรง และความหน่วง

ทั้ง 3 ปัจจัยหลักนี้จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานของการสั่นโดยปกติทั่วไป และผลของรูปแบบลักษณะการสั่นอธิบายในหัวข้อที่ 7.2 จะขึ้นอยู่กับมวล ความมั่นคงแข็งแรง และความหน่วง ดังนั้นจะพบว่าเครื่องจักรส่วนใหญ่ได้ถูกออกแบบให้มีระบบรองรับการเคลื่อนไหวแบบพลศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับมวลของชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว ความมั่นคงแข็งแรงของระบบรองรับการเคลื่อนไหวที่กำหนดไว้ และจำนวนความหน่วงที่กำหนดไว้

มวล (Mass) มวลเป็นคุณสมบัติของวัตถุในการอธิบายว่ามีปริมาณเนื้อวัสดุมากเพียงใด ณ เวลานั้น แต่สำหรับหลักการทางพลศาสตร์แล้ว มวลจะอธิบายถึงความสามารถของวัตถุในการต้านแรงภายนอกที่มากกระทำได้มากน้อยเพียงใด หรืออาจกล่าวได้ว่า ยิ่งวัตถุมีมวลมากก็ต้องใช้แรงปริมาณมากในการทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งระดับหนึ่ง ในเรื่องของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนก็เช่นกัน คือ ถ้าเครื่องจักรมีมวลมากและสูญเสียภาวะสมดุลแล้ว ปริมาณการสั่นก็จะมากตามไปด้วย

ความมั่นคงแข็งแรง (Stiffness) ความมั่นคงแข็งแรงนี้เป็นคุณสมบัติของวัตถุที่คล้ายคุณสมบัติของสปริง คือ จะบอกถึงระดับความสามารถของวัตถุในการต้านแรงที่มากกระทำ ซึ่งจะ

ส่งผลให้ตัววัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงระยะทางหรือมิติรูปร่าง หน่วยของความมั่นคงแข็งแรงมักจะกำหนดเป็นน้ำหนักต่อระยะทาง (lbf/in) เครื่องจักรส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติความมั่นคงแข็งแรงที่ต้องพิจารณาสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนมากกว่า 1 แบบ ได้แก่ ความมั่นคงแข็งแรงในแกนของเพลา (Shaft Stiffness or Longitudinal Stiffness) ความมั่นคงแข็งแรงในแนวแกนตั้ง (Vertical Stiffness) ความมั่นคงแข็งแรงในแนวแกนนอน (Horizontal Stiffness) ด้วยหลักการดังกล่าว จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการกำหนดตำแหน่งของจุดที่ต้องการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรต่าง ๆ นั้นเอง ซึ่งจะพบว่ายิ่งค่าความมั่นคงแข็งแรงมีค่าน้อยลงเพียงใด ค่าการสั่นสะเทือนจะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น

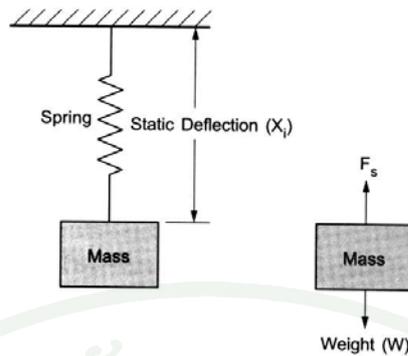
ความหน่วง (Damping) ความหน่วงเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงสภาพการด้านการเคลื่อนที่ที่มีผลทำให้ความเร็วของการสั่นลดลง โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึงแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการกระทำของของเหลวหรือแก๊ส และการเสียดสีสัมผัสกับวัตถุอื่น หน่วยของความหน่วงโดยมากจะกำหนดเป็นน้ำหนักต่อระยะทางต่อเวลา (lbf/in/sec or lbf-sec/in)

#### 7.4 ชนิดของการสั่นสะเทือน

จากหลักพลศาสตร์ของเครื่องจักรที่พิจารณาปัจจัยด้านมวล (Mass) ความมั่นคงแข็งแรง (Stiffness) และความหน่วง (Damping) ร่วมกับหลักการของการสั่นสะเทือน พบว่าสามารถแบ่งประเภทของการสั่นได้เป็น 4 แบบหลัก ๆ ดังนี้

##### 7.4.1 การสั่นแบบอิสระโดยไม่มี ความหน่วง (Free Vibration-Undamped)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในลักษณะของการสั่นแบบนี้ ให้พิจารณาตัวอย่างของการสั่นของมวล (M) ที่ผูกติดกับสปริงที่มีค่าความมั่นคงแข็งแรงค่าหนึ่ง (K เป็นค่าเดียวกันกับค่าคงที่ของสปริง) และปล่อยให้มีการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแนวแกนตั้ง ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 Undamped Spring-Mass System

แรง ( $F_s$ ) ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวแกนตั้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักของมวล  $M(W)$  ดังแสดงในภาพที่ 32 นั้น จะพบว่ามีแรงอยู่ 2 แรงที่กระทำต่อมวล  $M$  คือ แรงจากน้ำหนักแทนด้วย  $W$  และแรงจากสปริงแทนด้วย  $F_s$  ซึ่งจะมีค่าเท่ากัน แต่อยู่ในทิศตรงกันข้าม ตามหลักของความสัมพันธ์ของระบบ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก  $W$  มวล  $M$  และค่าการยืดที่ตำแหน่งสมดุลของสปริง  $X_i$  (Static Deflection) สามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$W = KX_i \quad (7.11)$$

ถ้าสปริงถูกยืดออกมาเป็นระยะ  $X$  จากตำแหน่งเดิมที่  $X_i$  และปล่อยให้เคลื่อนที่โดยอิสระ จะทำให้มวลเกิดการสั่นขึ้นลงด้วยความเร่ง  $a$  และแรงดึงดูด  $g_c$  ( $32.17 \text{ lbf-ft/lbf-sec}^2$ ) ดังนั้นแรงที่เกิดจากสปริงจะสามารถเขียนแทนด้วยสมการได้ดังนี้

$$F_s = -KX = \frac{Ma}{g_c} \quad (7.12)$$

หากแทนค่าความเร่ง  $a$  ด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของการขจัดเทียบกับเวลา และแทนค่าการขจัด  $X$  ด้วยสมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก ( $X = X_0 \cos(\omega t)$ ) จะสามารถเขียนสมการที่ (7.12) ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{M}{g_c} \frac{d^2X}{dt^2} + KX = 0 \quad (7.13)$$

$$-\frac{M}{g_c} \omega^2 X_0 \cos(\omega t) + KX = 0 \quad (7.14)$$

$$-\frac{M}{g_c} \omega^2 X + KX = -\frac{M}{g_c} \omega^2 + K = 0 \quad (7.15)$$

ทำการแก้สมการที่ (7.15) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\omega = \sqrt{\frac{Kg_c}{M}} \quad (7.16)$$

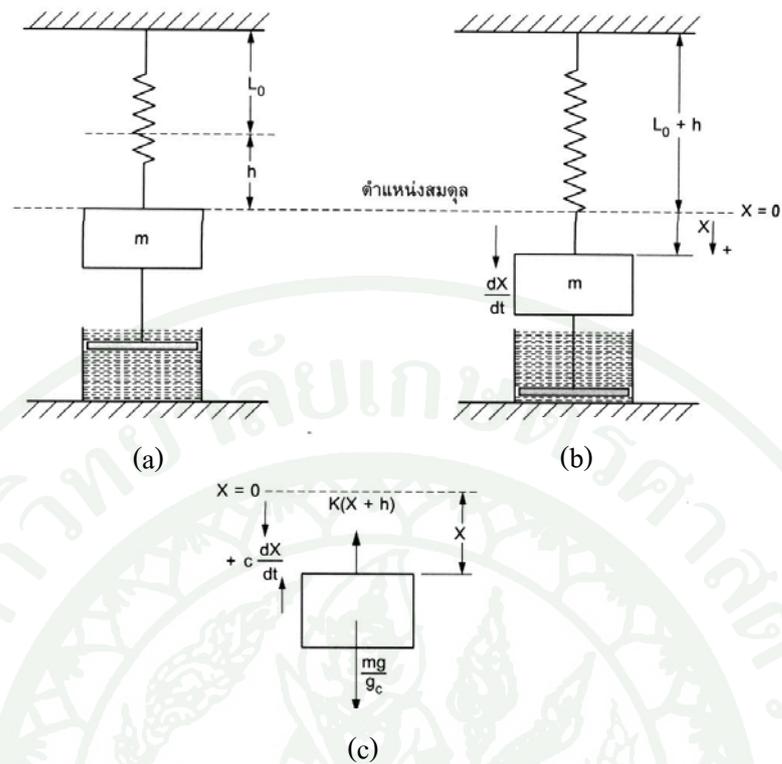
เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่ธรรมชาติของมวล (Natural Frequency of Mass)

$K$  คือ ค่าคงที่ของสปริง (Spring Constants)

$M$  คือ มวล (Mass)

#### 7.4.2 การสั่นแบบอิสระโดยมีความหน่วง (Free Vibration-Damped)

ความซับซ้อนของระบบที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้วัตถุทั่ว ๆ ไป มักจะเกิดความหน่วงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 33 โดยที่ลักษณะความหน่วงนี้จะเรียกว่า การหน่วงจากความหนืด (Viscous Damping) ซึ่งลักษณะจะคล้ายกับภาพที่ 32 แต่ในกรณีนี้จะมี ความหน่วงจากการเคลื่อนที่ของมวลผ่านของไหลที่มีแรงต้านการเคลื่อน เช่น น้ำมันหรืออากาศ เป็นต้น ความหน่วงจะทำให้ความเร็วของมวลและส่งผลเกิดพลังงานจากการสั่นขึ้น



ภาพที่ 33 Damped Spring-Mass System

จากภาพที่ 33 ระยะสมดุลเดิมของสปริง คือ  $L_0$  และระยะยืดของสปริงที่ถูกน้ำหนัก  $W$  ของมวล  $m$  ดึงลง คือ  $h$  ดังนั้นจะเห็นได้ว่าน้ำหนักของมวล  $m$  มีค่าเท่ากับ  $Kh$  ภาพที่ 33 (a) แสดงตำแหน่งสมดุลของมวล  $m$  ที่ถูกดึงลงมาเป็นระยะทางเท่ากับ  $X$  จากตำแหน่งสมดุล ทั้งนี้จะพิจารณาให้ค่า  $X$  เป็นบวกในทิศทางดึงลงดังภาพที่ 33 (c) เป็นแผนภาพอย่างง่ายของมวลและแรงที่กระทำในระบบ ซึ่งจากรูปนี้จะเห็นได้ว่าแรงจากความหน่วงมีค่าเท่ากับ  $c(dX/dt)$  เมื่อ  $c$  คือ ค่าคงที่ของความหน่วง ซึ่งจากรูปนี้สามารถนำมาเขียนอธิบายด้วยสมการได้ดังนี้ คือ

$$\frac{M}{g_c} \frac{d^2X}{dt^2} = \frac{Mg}{g_c} - c \frac{dX}{dt} - K(X + h) \quad (7.17)$$

$$\frac{M}{g_c} \frac{d^2X}{dt^2} = Kh - c \frac{dX}{dt} - KX - Kh \quad (7.18)$$

$$\frac{M}{g_c} \frac{d^2X}{dt^2} = -c \frac{dX}{dt} - KX \quad (7.19)$$

หารสมการที่ (7.19) ด้วย  $M/g_c$  จะจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{d^2X}{dt^2} = -\frac{cg_c}{M} \frac{dX}{dt} - \frac{Kg_cX}{M} \quad (7.20)$$

เมื่อแทนค่า  $cg_c/M = 2\mu$  และ  $Kg_c/M = \omega^2$  ในสมการที่ (8.20) จะได้

$$\frac{d^2X}{dt^2} = -2\mu \frac{dX}{dt} - \omega^2 X \quad (7.21)$$

$$\frac{d^2X}{dt^2} + 2\mu \frac{dX}{dt} + \omega^2 X \quad (7.22)$$

ซึ่งหากทำการแก้สมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 นี้จะได้คำตอบ คือ

$$X = Ae^{d_1 t} + Be^{d_2 t} \quad (7.23)$$

เมื่อ

$$d_1 = -\mu + \sqrt{\mu^2 - \omega^2} \quad (7.24)$$

$$d_2 = -\mu - \sqrt{\mu^2 - \omega^2} \quad (7.25)$$

จะพบว่ามีหลายเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาเกี่ยวกับความหน่วง เช่น ความหน่วงวิกฤต (Critical Damping) ความหน่วงมากเกินไป (Overdamping) และความหน่วงต่ำกว่าปกติ (Underdamping) โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- ความหน่วงวิกฤต (Critical Damping) จะเกิดเมื่อ  $\mu = \omega$
- ความหน่วงมากเกินไป (Overdamping) จะเกิดเมื่อ  $\mu > \omega$
- ความหน่วงต่ำกว่าปกติ (Underdamping) จะเกิดเมื่อ  $\mu < \omega$

สำหรับความหน่วงที่ต่ำกว่าค่าวิกฤต ( $\mu < \omega$ ) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$x = \frac{X_0}{\alpha_1} e^{-\mu t} (\alpha_1 \cos \alpha_1 t + \mu \sin \alpha_1 t) \quad (7.26)$$

เมื่อ

$$\alpha_1 = \sqrt{\omega^2 - \mu^2} \quad (7.27)$$

### 7.4.3 การสั่นแบบมีแรงกระทำโดยไม่มี ความหน่วง (Forces Vibration-Undamped)

สำหรับระบบการสั่นอย่างง่ายที่อธิบายก่อนหน้านั้น เป็นลักษณะการสั่นแบบอิสระ ที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำทำให้เกิดการสั่นขึ้น ซึ่งจากหลักการของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจะให้ความสำคัญกับความถี่ธรรมชาติหรือความถี่สั่นพ้อง (Natural or Resonance Frequency) ที่เป็นผลมาจากลักษณะเฉพาะของมวล (Mass) ความมั่นคงแข็งแรง (Stiffness) และความหน่วง (Damping) ของวัตถุที่พิจารณาเป็นหลัก

ยิ่งไปกว่านั้นการสั่นอันเนื่องมาจากปัจจัยเฉพาะทั้งสามนั้นยังสามารถถูกรบกวนทำให้รูปแบบการสั่นของวัตถุผิดแปลกไปได้อีกมากจากการกระทำจากภายนอกกับมวล (Mass) ขนาดเท่ากับ  $F_0$  ในทิศทางตั้งลง และแทนค่า  $F_0 \sin(\omega t)$  ในสมการที่ (7.13) จะได้

$$\frac{M}{g_c} \frac{d^2X}{dt^2} + KX = F_0 \sin(\omega t) \quad (7.28)$$

เนื่องจากสปริงจะเคลื่อนที่ตามแรง  $F_0 \sin(\omega t)$  ดังนั้นค่า  $X$  จะเท่ากับ  $X_0 \sin(\omega t)$  และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (7.28) และแก้สมการจะได้

$$X = C_1 \sin(\omega_n t) + C_2 \sin(\omega_n t) + \frac{X_{st}}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \sin(\omega t) \quad (7.29)$$

เมื่อ  $X$  = การขจัดของสปริงที่เวลา  $t$

$X_{st}$  = การขจัดคงที่ของสปริงเมื่อรับแรงคงที่  $F_0$

$\omega$  = ความถี่ที่เกิดจากแรงภายนอก

$\omega_n$  = ความถี่ธรรมชาติของการสั่น

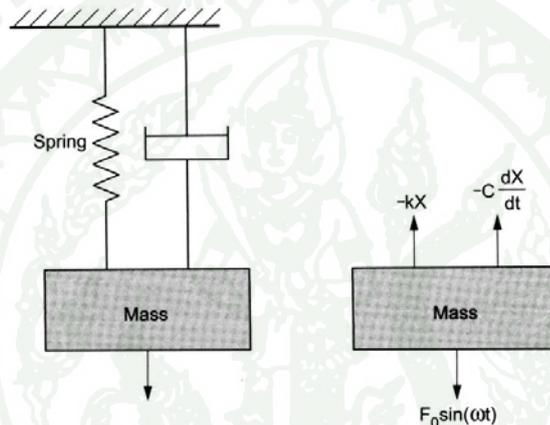
$t$  = เวลา

$C_1, C_2$  = ค่าคงที่

จากสมการที่ (7.29) เทอมที่ 1 และ 2 จะแสดงถึงการสั่นแบบอิสระโดยไม่มี ความหน่วง และในเทอมที่ 3 จะแสดงถึงการสั่นที่มีแรงกระทำจากภายนอกโดยไม่มี ความหน่วง คำตอบจะเป็นการรวมกันของคลื่นรูปไซน์ 2 คลื่นที่มีความถี่ต่างกัน จึงอาจสรุปได้ว่าการสั่นแบบนี้จะเป็นการเคลื่อนที่แบบคาบเวลา แต่จะไม่ใช่การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก

#### 7.4.4 การสั่นแบบมีแรงกระทำโดยมีความหน่วง (Forces Vibration-Damped)

สำหรับระบบการสั่นที่มีแรงกระทำจากภายนอกพร้อมกับมีความหน่วงด้วยนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 34 การเคลื่อนที่ของมวล  $M$  (Mass) ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ (1) การสั่นแบบอิสระที่มีการหน่วงที่ความถี่ธรรมชาติ (2) การเคลื่อนที่แบบคงตัวในรูปแบบของฮาร์โมนิกที่ความถี่ตามการกระทำของแรง ความถี่ธรรมชาติของวัตถุที่เกิดจากการหน่วงจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับกรณีความถี่แบบฮาร์โมนิกคงตัว (Steady-state Harmonic) ที่เกิดจากแรงกระทำจากภายนอกจะดำเนินการต่อไปตราบเท่าที่ยังคงมีพลังงานจากแรงที่กระทำอยู่



ภาพที่ 34 Damped Forces Vibration System

สำหรับสมการของการสั่นแบบที่มีแรงกระทำจากภายนอกและมีความหน่วงด้วยนั้น ให้พิจารณาจากสมการของการสั่นแบบอิสระที่มีความหน่วงได้เลย โดยเปลี่ยนเทอมด้านขวามือจากค่า 0 เป็นฟังก์ชันของแรง คือ  $F_0 \sin(\omega t)$  ของสมการที่ (7.13) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{M}{g_c} \frac{d^2 X}{dt^2} + C \frac{dX}{dt} + KX = F_0 \sin(\omega t) \quad (7.30)$$

ด้วยภาวะการสั่นที่มีความหน่วง ดังนั้นจึงทำให้ค่าคงที่ของความหน่วง  $c$  มีค่าไม่เท่ากับ 0 ซึ่งส่งผลให้คำตอบของสมการมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

สมมติให้  $X = X_0 \sin(\omega t - \phi)$  โดยที่  $\phi$  คือ ค่ามุมเฟส (Phase Angle) หรือเป็นค่ามุมที่แรงกระทำจากภายนอก  $F_0 \sin(\omega t)$  กระทำกับการขจัด  $X_0 \sin(\omega t - \phi)$  โดยใช้หลักการของเวกเตอร์เพื่อหาคำตอบของสมการสามารถแสดงได้ดังนี้

เวกเตอร์ของแรงในแนวแกนตั้ง :

$$KX_0 - \frac{M}{g_c} \omega^2 X_0 - F_0 \cos \phi = 0 \quad (7.31)$$

เวกเตอร์ของแรงในแนวแกนนอน :

$$c\omega X_0 - F_0 \sin \phi = 0 \quad (7.32)$$

เมื่อแก้สมการโดยการแทนค่าสมการเวกเตอร์ทั้งสองด้านบนเพื่อหาค่า  $X_0$  และ  $\phi$  จะได้คำตอบดังนี้

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{F_0}{\sqrt{(c\omega)^2 + \left(K - \frac{M}{g_c} \omega^2\right)^2}} \\ &= \frac{F_0/K}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2 \frac{c}{c_c} \times \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \end{aligned} \quad (7.33)$$

$$\tan \phi = \frac{c\omega}{K - \frac{M}{g_c} \omega^2} = \frac{2 \frac{c}{c_c} \times \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)} \quad (7.34)$$

เมื่อ  $c$  = ค่าคงที่ของการหน่วง (Damping Constant)

$c_c$  = การหน่วงวิกฤต (Critical Damping) =  $2(M/g_c)\omega_n$

$c/c_c$  = อัตราส่วนการหน่วง (Damping Ratio)

$F_0$  = แรงกระทำจากภายนอก (External Force)

$F_0/K$  = การเสียรูปของสปริงภายใต้ภาระ  $F_0$  หรือค่าการเสียรูปคงที่ (Static Deflection;  $X_{st}$ )

$\omega$  = ความถี่จากแรงภายนอก (Forced Frequency)

$\omega_n$  = ความถี่ธรรมชาติของการสั่น (Natural Frequency)

$\omega/\omega_n$  = อัตราส่วนความถี่ (Frequency Ratio)

สำหรับการสั่นแบบมีแรงกระทำจากภายนอกนั้น พบว่า มีความถี่ที่แตกต่างกันแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบที่สำคัญดังนี้คือ

ความถี่ธรรมชาติโดยไม่มีคามหน่วง (Undamped Natural Frequency)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{Kg_c}{M}} \quad (7.35)$$

ความถี่ธรรมชาติโดยมีความหน่วง (Damped Natural Frequency)

$$q = \sqrt{\frac{Kg_c}{M} - \left(\frac{cg_c}{2M}\right)^2} \quad (7.36)$$

ความถี่สั่นพ้อง (Resonant Frequency)

7.5 องศาอิสระของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Degrees of Freedom of Vibration Analysis)

ในระบบทางกล พบว่า องศาอิสระจะเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าเครื่องจักรกลดังกล่าวมีทิศทางการเคลื่อนที่ได้มากน้อยเพียงใด ยิ่งมีค่ามากยิ่งสามารถเคลื่อนที่ได้หลายทิศทาง ยิ่งไปกว่านั้นจะพบว่าคุณสมบัติของมวล ความมั่นคงแข็งแรง และความหน่วงจะมีความสัมพันธ์แตกต่างกันสำหรับแต่ละทิศทางของการเคลื่อนที่ ดังนั้นยิ่งชิ้นส่วนภายในเครื่องจักรกลมีองศาอิสระมากขึ้นเท่าใด ความซับซ้อนในการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นสะเทือน ยิ่งมีความซับซ้อนมากขึ้นเท่านั้น เพื่อทำความเข้าใจถึงอิทธิพลขององศาอิสระในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน จึงต้องทำการศึกษาตัวอย่างรูปแบบของการสั่นสะเทือนและจำนวนองศาอิสระแบ่งเป็นแต่ละแบบดังนี้

#### 7.5.1 ระบบหนึ่งองศาอิสระ (One Degree of Freedom System)

ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลแบบหนึ่งองศาอิสระ ได้แก่ การเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของกระบอกสูบ แต่ระบบที่มีหนึ่งองศาอิสระไม่จำเป็นต้องเป็นระบบที่เรียบง่ายดังที่ยกตัวอย่างเท่านั้น อาจเป็นระบบที่ซับซ้อนก็ได้ถ้าสามารถกำหนดปัจจัยที่เป็นตัวแทนของทิศทางการเคลื่อนที่ได้เพียงหนึ่งค่า เช่น ชุดกระบอกสูบของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ประกอบไปด้วยเพลลา ข้อเหวี่ยง กระบอกสูบ ลูกสูบ เป็นต้น ทุกตำแหน่งของการเคลื่อนที่นี้สามารถแทนได้ด้วยค่ามุมค่าหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเป็นค่ามุมของเพลลาข้อเหวี่ยงก็จะสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของทั้งหมดได้ จึงถือได้ว่าเป็นระบบที่มีเพียงหนึ่งองศาอิสระถึงแม้จะมีความซับซ้อนมากก็ตาม

สำหรับระบบเชิงกล การคำนวณค่าแรงบิด (Torque) ถือเป็นตัวอย่างหลักของระบบที่มีหนึ่งองศาอิสระ ซึ่งมีลักษณะเป็นงาน มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) เท่ากับ  $I$  เชื่อมต่อกับผนังด้วยเพลลากลมที่มีค่าความมั่นคงแข็งแรงของการบิด (Torsional Stiffness)

เท่ากับ  $k$  ความหมายของ  $k$  คือ ค่าของแรงบิด  $T$  (Inch-Ponds) ที่ทำให้จานเกิดการหมุนไป 1 เรเดียน (57.3 องศา) ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการของแรงบิดได้ดังนี้

$$\Sigma T = I \frac{d^2\theta}{dt^2} = I\ddot{\theta} \quad (7.37)$$

ถ้าสมมติให้จานหมุนมีการหน่วงเกิดขึ้นจากแรงต้านของอากาศ และมีแรงบิดจากภายนอกเท่ากับ  $T_0 \sin(\omega t)$  แรงบิดที่เกิดจากสปริงเท่ากับ  $(- )k\theta$  และแรงบิดที่เกิดจากการหน่วงเท่ากับ  $(- )c\dot{\theta}$  เมื่อ  $c$  คือ ค่าคงที่การหน่วง จะทำให้ได้สมการของการเคลื่อนที่ดังนี้

$$I\ddot{\theta} = -c\dot{\theta} - k\theta + T_0 \sin(\omega t) \quad (7.38)$$

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = T_0 \sin(\omega t) \quad (7.39)$$

#### 7.5.2 ระบบหลายองศาอิสระ (Many Degrees of Freedom System)

ตามหลักทฤษฎีแล้ว ระบบหนึ่งองศาอิสระจะมีประโยชน์สำหรับการหาค่าความถี่ของการสั่นพ้องและความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรกลที่ทำการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม มีเครื่องจักรกลจำนวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เป็นระบบหนึ่งองศาอิสระ ส่วนใหญ่จะเป็นระบบหลายองศาอิสระ แต่วิธีการในการวิเคราะห์ก็สามารถทำความเข้าใจได้เช่นกัน โดยยึดหลักการและแนวทางเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ในระบบหนึ่งองศาอิสระ แต่ในระบบนี้สมการของการสั่นจะมีความถี่ธรรมชาติและรูปแบบของการเคลื่อนที่หลายค่าขึ้นอยู่กับจำนวนองศาอิสระที่พบของเครื่องจักรกลนั้น

## 8. ชนิดของระบบควบคุมพื้นฐาน (Type of Basic Feedback)

วิบูลย์ (2548) อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อให้สร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมระบบเมื่อมีสัญญาณผิดพลาด (error signal) เกิดขึ้น หลักการหรือวิธีการควบคุมนั้นเรียกว่า กฎของการควบคุม หรือกฎการควบคุม (control law) หรือกิริยาควบคุม (control action) เมื่อสัญญาณผิดพลาด (error signal) มีค่าไม่เป็นศูนย์ซึ่งอาจจะเป็นผลอันเนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงที่คำสั่งหรือเกิดสัญญาณรบกวนก็ได้ หน้าที่ของตัวควบคุมคือพยายามควบคุมตัวแปรของระบบ (system variable) ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ (desired value) ซึ่งอาจจะสรุปหน้าที่ของตัวควบคุมพอสังเขปได้ดังนี้

- ลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (minimize the steady state error)
- ลดค่าเวลาเข้าที่ (minimize the setting time)
- เพื่อให้การตอบสนองในช่วงต้น (transient response) มีลักษณะตามที่กำหนดไว้ เช่น ต้องการทำให้ค่าโอเวอร์ชูตมีค่าน้อยที่สุด กำหนดค่าเวลาอยู่ตัว กำหนดค่าอัตราส่วนการหน่วง  $\zeta$  (damping ratio) และค่าความถี่ธรรมชาติ  $\omega_n$  (natural frequency) เป็นต้น

ในทางปฏิบัติแล้ว การกำหนดลักษณะเฉพาะ สำหรับการออกแบบระบบควบคุมมีรายละเอียด มากกว่านี้ เช่น การออกแบบอาจจะต้องกำหนดความกว้างแถบ (bandwidth) ที่ทำให้ระบบมีความปลอดภัย ความปลอดภัยในที่นี้หมายถึง ระบบปลอดภัยจากการที่ระบบจะไม่มีเสถียรภาพหรือไม่มีความสมดุล เราไม่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการจะควบคุมได้แน่ชัดเลยหรือไม่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์ได้ถูกต้องแม่นยำ แต่ถ้าเราสามารถหาขอบเขตของความผิดพลาดหรือค่าเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการจะควบคุม เราสามารถเลือกออกแบบระบบควบคุมหรือตัวควบคุม (controller) ชนิดต่างๆ หรือตัวควบคุมที่มีรูปแบบแตกต่างกัน เช่น ตัวควบคุมแบบ P, PI, PID เป็นต้น โดยตัวควบคุมที่ออกแบบนี้จะมีควมไว (sensitivity) มากน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงหรือเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการออกแบบบางครั้งอาจจะต้องครอบคลุมถึงความไวของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของระบบด้วย เพื่อให้ระบบควบคุมโดยรวมมีความปลอดภัยต่อการใช้งานเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ระบบกำลังทำงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบควบคุมที่ใช้มากในอุตสาหกรรมซึ่งพอจะแบ่งได้ดังนี้คือ

1. ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (two-position หรือ on-off controllers)

2. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional controllers, P-control)

3. ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controllers, I-control)

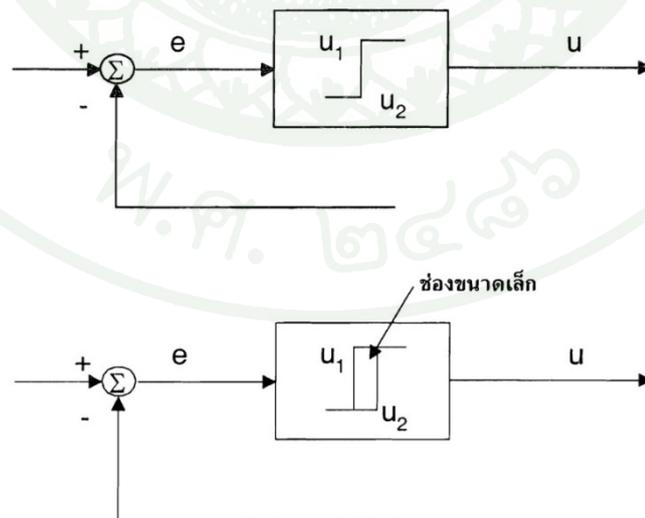
4. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอินทิกรัล (Proportional-plus-Integral controllers, PI-control)

5. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์ (Proportional-plus-Derivative controllers, PD-control)

6. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์บวกอินทิกรัล (Proportional-plus-Integral-plus-Derivative controllers, PID-control)

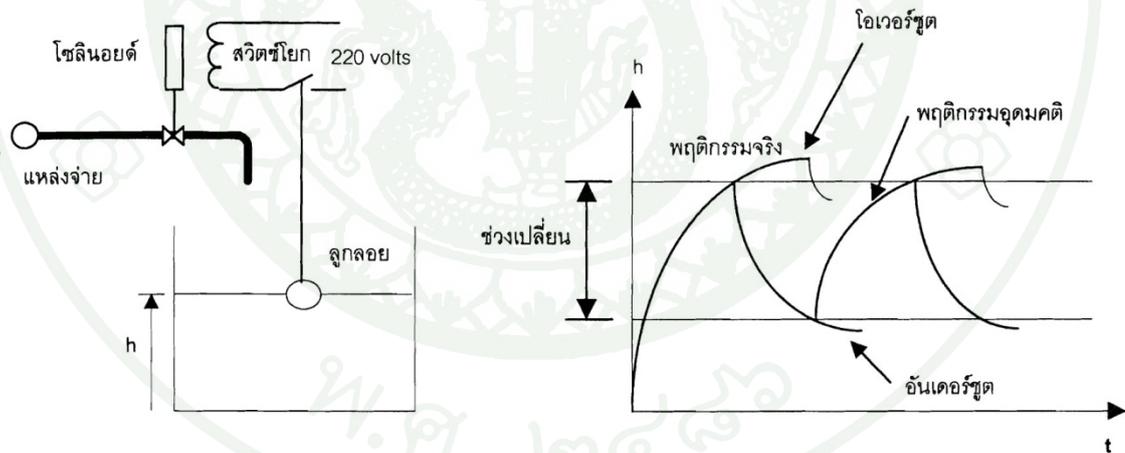
8.1 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (Two-Position Control หรือ On-Off Control)

ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งคือเปิด-ปิด นี้จะพบเห็นค่อนข้างมากในอุปกรณ์ที่ใช้ภายในบ้าน เช่น กาน้ำร้อน หรือการควบคุมระดับน้ำในแทงก์น้ำ เป็นต้น บางครั้งอาจจะเรียกว่าการควบคุมแบบแวง-แวง (bang-bang control) ลักษณะของระบบควบคุมดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด

จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม  $u$  จะมีค่าอยู่สองค่า  $u_1$  และ  $u_2$  ขึ้นอยู่กับค่าสัญญาณผิดพลาด ( $e$ ) ระบบควบคุมแบบนี้บางครั้งอาจจะไม่จัดอยู่ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ การควบคุมแบบนี้ เช่น การควบคุมระดับน้ำในถังน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 36 จะเห็นว่าในการใช้งานจริงนั้นจะมีเวลาประวิง (time delay) ซึ่งน้ำที่ค้างอยู่ในท่อจะยังคงไหลเข้าไปในถังต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่งหรือเรียกว่า โอเวอร์ชูต (overshoot) ในรูปจะแสดงเป็นเส้นที่ลากเลยออกไปข้างนอกช่วงเปิดปิด (switch gap) และในทางกลับกันในระหว่างที่วาล์วเปิดนั้นก็จะใช้เวลาหน่วงเล็กน้อยน้ำถึงจะเริ่มไหลเข้าถังหรือ อันเดอร์ชูต (undershoot) การเกิดช่วงโอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตนี้จะยอมรับได้ก็ต่อเมื่อค่าคงตัวเวลา (time constant) ของระบบนั้นมีค่ามากเมื่อเทียบกับเวลาตาม (time lag) ของการทำงานของตัวควบคุม เวลาหน่วงนี้อาจจะเกิดจากเวลาที่น้ำไหลจากวาล์วผ่านท่อยาวมาถึงถัง ในกรณีของการควบคุมความร้อนในหม้อน้ำร้อนเวลาตาม (time lag) นี้จะเกิดจากความสามารถในการเก็บความร้อน (heater capacitance) ถ้ามีความร้อนเก็บอยู่มาก ถึงแม้ว่าเมื่อเวลาปิดตัวทำความร้อนแล้วก็ตาม ความร้อนยังคงถ่ายเทจากตัวทำความร้อนลงสู่น้ำ และ ในทำนองเดียวกันเมื่อเริ่มเปิดตัวทำความร้อนใหม่ๆ ก็ต้องใช้เวลาซักพักหนึ่งเพื่อให้ตัวทำความร้อนร้อนขึ้นและเริ่มถ่ายเทความร้อนออกมาตามปริมาณที่ต้องการ



ภาพที่ 36 การควบคุมระดับ

## 8.2 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional control, P-control)

การควบคุมระบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุม ( $u$ ) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด ( $e$ ) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ทำการควบคุมนั้นดังแสดงในแผนภาพบล็อกข้างล่างนี้



ภาพที่ 37 สัญญาณควบคุมและสัญญาณความผิดพลาด

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณความผิดพลาดที่ส่งเข้าไปในระบบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) \quad (8.1)$$

ถ้าเขียนอยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (8.2)$$

เมื่อค่าเกน  $K_p$  จะเป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือจะเรียกว่าเกนสัดส่วน

การใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (proportional control) กับการควบคุมตำแหน่งของการเปิดปิดวาล์วอาจจะทำได้ดังนี้

$$y(t) = K_p e(t) + x \quad (8.3)$$

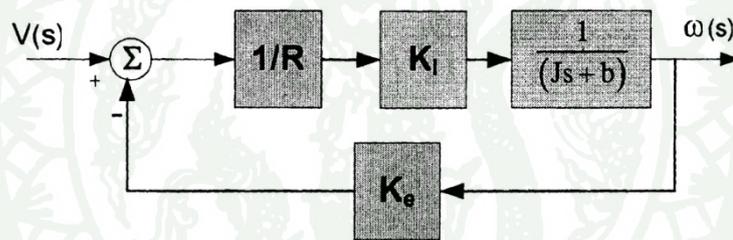
โดยที่  $y(t)$  คือ ตำแหน่งที่ต้องการเปิดปิดวาล์ว และค่า  $x$  เป็นตำแหน่งที่กำหนดการเปิดปิดวาล์วให้อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ต้องการ หรือตรงตำแหน่งที่ต้องการ หรือพยายามทำให้ค่าสัญญาณผิดพลาดเป็นศูนย์ ซึ่งตรงตำแหน่งนี้จะเรียกว่าการปรับตั้งใหม่ด้วยมือ (manual reset) เพราะฉะนั้นถ้าตำแหน่งเปลี่ยนไปเป็นระยะ  $e(t)$  แล้ว ตัวควบคุมก็จะทำหน้าที่ปรับเพื่อให้  $y(t)$  มีค่าเท่ากับ  $x(t)$  การควบคุมแบบนี้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาดที่ใช้ในการปรับตำแหน่งของวาล์วให้เต็มสเกลจะเรียกว่าแถบเชิงสัดส่วน (proportional band) ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับเกนได้ดังนี้

$$K_p = \frac{100}{\text{band\%}} \quad (8.4)$$

8.2.1 การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional) กับระบบอันดับที่หนึ่ง  
 ในหัวข้อนี้จะมาศึกษาถึงพฤติกรรมของการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน  
 กับระบบที่มีอันดับของสมการเท่ากับหนึ่ง จากที่ได้ทำการศึกษาระบบพลศาสตร์ของการควบคุม  
 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงที่จะนำมาใช้ในที่นี้ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่นำมาวิเคราะห์การ  
 ควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ คือ

$$\frac{\omega(s)}{V(s) - K_e \omega(s)} = \frac{\frac{K_i}{R}}{Js + b} \quad (8.5)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังนี้



ภาพที่ 38 ฟังก์ชันถ่ายโอนที่นำมาวิเคราะห์การควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์

จากแผนภาพบล็อกนี้ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบมอเตอร์สามารถได้ดังนี้

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_i}{R}}{Js + b + \frac{K_i K_e}{R}} \quad (8.6)$$

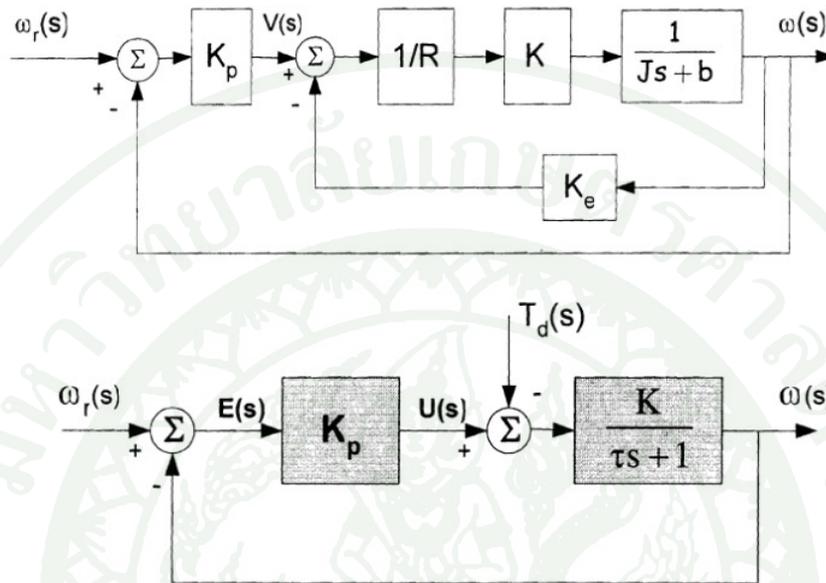
หรือ

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (8.7)$$

โดยที่

$$K = \frac{K_i}{bR + K_i K_e} \text{ และ } \tau = \frac{JR}{bR + K_i K_e} \quad (8.8)$$

ดังนั้นถ้าใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมาควบคุมความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมที่ตัวควบคุมคือตัวควบคุมสัดส่วนสามารถเขียนได้ดังนี้



ภาพที่ 39 การใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมาควบคุมความเร็วของการหมุนของมอเตอร์

และสมการฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับการควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\omega(s)}{\omega_r(s)} = \frac{KK_p}{\tau s + 1 + KK_p} \quad (8.9)$$

$$\frac{\omega(s)}{T_d(s)} = -\frac{K}{\tau s + 1 + KK_p} \quad (8.10)$$

เราสามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ต้องการได้โดยการกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย หรือ  $\omega_r(s) = \frac{1}{s}$  ดังนั้น จะได้ว่า

$$\omega(s) = \frac{KK_p}{\tau s + 1 + KK_p} \times \frac{1}{s} \quad (8.11)$$

ความเร็วในสถานะอยู่ตัวสามารถหาได้ดังนี้ คือ

$$\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{KK_p}{\tau s + 1 + KK_p} \times \frac{1}{s} = \frac{KK_p}{1 + KK_p} < 1 \quad (8.12)$$

ดังนั้น จะเห็นว่าค่าความเร็วที่สถานะอยู่ตัวจะน้อยกว่าหนึ่ง แต่ถ้าเลือกค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน,  $K_p$  ให้มีค่ามาก ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ก็จะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น สำหรับระบบควบคุมแบบป้อนกลับในตัวอย่างนี้ค่าคงตัวเวลา (time constant) จะมีค่าเท่ากับ

$$\tau_{cl} = \frac{\tau}{1 + KK_p} \quad (8.13)$$

ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างกะทันหัน ซึ่งอาจจะจำลองการเปลี่ยนแปลงนี้ด้วยฟังก์ชัน อินพุตที่เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย ค่าความเร็วที่สถานะอยู่ตัวอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภาระแบบกะทันหันนี้สามารถหาได้ดังนี้คือ

$$\omega(s) = -\frac{K}{\tau s + 1 + KK_p} \times \frac{1}{s} \quad (8.14)$$

และ

$$\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} -s \frac{K}{\tau s + 1 + KK_p} \times \frac{1}{s} = -\frac{K}{1 + KK_p} \quad (8.15)$$

จากสมการ 8.15 จะเห็นว่าเราสามารถลดผลกระทบต่อความเร็วที่ต้องการที่สถานะอยู่ตัว ( $\omega_{ss}$ ) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภาระหรือมีสัญญาณรบกวนเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยได้โดยการเลือกค่าอัตราขยาย ( $K_p$ ) ของตัวควบคุมเชิงสัดส่วนที่มีค่าสูง

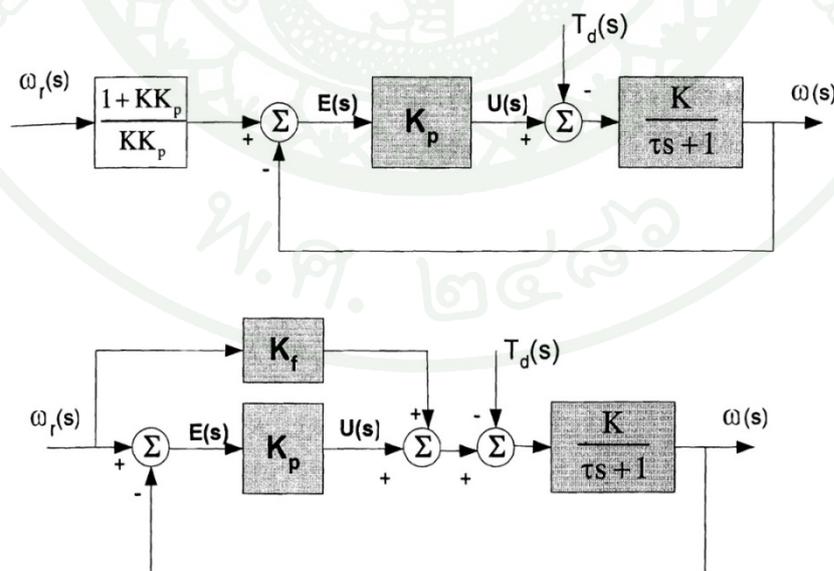
ดังนั้น จะเห็นว่าการใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนนี้จะมีข้อเสียก็ตรงที่ว่า ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนั้นจะต้องมีค่าสูง การควบคุมแบบนี้จึงเหมาะสำหรับระบบที่สามารถตั้งค่าอัตราขยายได้สูง ข้อดีของการควบคุมเชิงสัดส่วนนั้นก็คือ ค่าสัญญาณควบคุมจะตอบสนองกับค่าสัญญาณผิดพลาดได้ทันทีทันใดเลย ซึ่งจะมีประโยชน์ในกรณีที่เรากำลังต้องการการตอบสนองอย่างรวดเร็ว เป็นต้น ในบางกรณีจะพบว่าที่ค่าคงตัวเวลาของระบบ (time constant) มีขนาดเล็กเกินไปกว่าที่จะใช้การควบคุมแบบเปิด/ปิด (on/off) นั้น ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนนี้สามารถนำมาใช้เพื่อให้บรรลุเป้าหมายของการควบคุมได้

### 8.2.2 การชดเชยแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Compensation)

จากสมการที่ 8.9 และ 8.12 ค่าความผิดพลาดของความเร็วในสถานะอยู่ตัวสามารถหาได้ดังนี้

$$e_{ss} = \omega_r - \omega_{ss} = \frac{1}{1+KK_p} \quad (8.16)$$

การออกแบบระบบควบคุมแบบนี้สามารถออกแบบเพื่อให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ได้โดยการเพิ่มส่วนที่เป็นการควบคุมที่ป้อนสัญญาณไปข้างหน้า (feedforward) เข้าไปในระบบควบคุมแบบปิด หรือในทำนองหนึ่งก็คือ เราจะทำการหอลอกระบบที่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวโดยการเพิ่มค่าความถี่อ้างอิงให้สูงขึ้นกว่าความถี่ที่ต้องการ โดยจะให้หมีค่าสูงกว่าเป็น  $\frac{1+KK_p}{KK_p}$  เท่าของความถี่ที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 40 วิธีการนี้เป็นพื้นฐานของหลักการที่เรียกว่าการชดเชยอินพุต (input compensation) ซึ่งจะใช้ในการออกแบบระบบควบคุมที่มีการปรับอัตโนมัติ เพื่อให้สัญญาณผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ แต่วิธีการนี้มีข้อสงสัย คือว่า เราจำเป็นต้องรู้ก่อนที่จะทำการป้อนสัญญาณไปข้างหน้า ว่าขนาดของสัญญาณหรือค่าอัตราขยายในส่วนที่ป้อนไปข้างหน้ามีค่าเท่าไร นั่นก็คือจำเป็นต้องรู้ขนาดของสัญญาณผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวก่อนเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราขยายในส่วนที่ป้อนไปข้างหน้า (feedforward gain)



ภาพที่ 40 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\frac{\omega(s)}{\omega_r(s)} = \frac{K(K_p+K_f)}{\tau s+1+KK_p} \quad (8.17)$$

เพราะฉะนั้นถ้าเลือกค่าอัตราขยายของส่วนที่ป้อนไปข้างหน้ามีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{K}$  เราสามารถแสดงได้ว่าค่าความเร็วผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวจะมีค่าเป็นศูนย์ตามต้องการ ซึ่งจะเห็นว่าค่าคงตัว  $K$  นี้จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์ด้วย ซึ่งส่วนมากแล้วการจะหาค่าเกน  $K$  ให้ถูกต้องแม่นยำนั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการควบคุมที่มีส่วนป้อนไปข้างหน้า ในทางปฏิบัติแล้วยังคงไม่สามารถทำให้ค่าความเร็วผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ได้อย่างสมบูรณ์

### 8.2.3 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันแรมป์

การใช้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณฟังก์ชันแรมป์  $\left(\frac{A}{s^2}\right)$  นี้จะช่วยในการตรวจสอบระบบว่าระบบควบคุมที่ออกแบบนั้นมีความสามารถในการติดตามสัญญาณคำสั่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบคงที่ได้อย่างไร ถึงแม้ว่าสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันแรมป์นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาก็ตาม แต่ในการวิเคราะห์ผลนั้นจะสนใจเฉพาะช่วงเวลาที่การตอบสนองของระบบขึ้นอยู่กับเวลาหรือในช่วงภาวะชั่วคราว (transient response) เท่านั้น จากแผนภาพบล็อกข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า

$$\frac{E(s)}{\omega_r(s)} = \frac{\tau s+1-KK_f}{\tau s+1+KK_p} \quad (8.18)$$

ดังนั้น ถ้า  $\omega_r(s) = \frac{A}{s^2}$  ความเร็วผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวสามารถหาได้ดังนี้ คือ

$$e_{ss} = \begin{cases} \infty & K_f \neq \frac{1}{K} \\ \frac{A\tau}{1+KK_p} & K_f = \frac{1}{K} \end{cases} \quad (8.19)$$

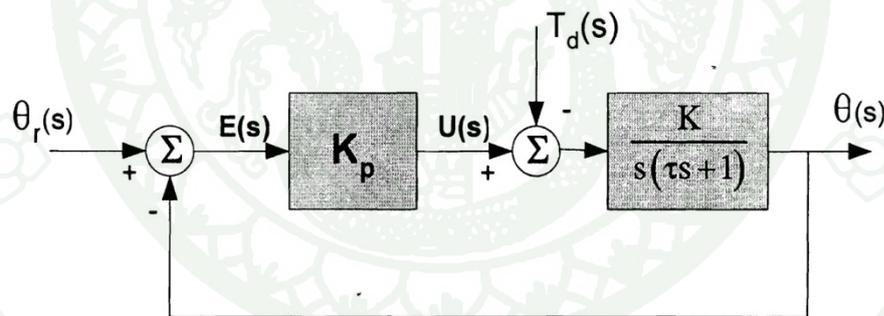
จากข้างต้นถึงแม้ว่าค่าความเร็วผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวจะมีค่าเป็นอนันต์เมื่อเลือกค่า  $K_f \neq \frac{1}{K}$  แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้นจะมีด้วยกันสามช่วงคือ ช่วงความเร่งคงที่ , ช่วงความเร็วคงที่ และช่วงความหน่วงคงที่ จะเห็นว่าในช่วงความเร่งนั้นเราจะเร่งด้วยความเร่งคงที่ ในขณะที่เดียวกันความเร็วของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นแบบสัญญาณฟังก์ชันแรมป์ ซึ่งจะเพิ่มขึ้น

จนถึงเวลาหนึ่งสมมติว่าเป็นเวลา  $t_1$  จากเวลาเริ่มต้นเคลื่อนที่ ดังนั้น เมื่อเวลา  $t > t_1$  แล้วความเร็วจะคงที่หรือความเร่งเป็นศูนย์นั่นเอง ฉะนั้นเราสามารถหาสัญญาณผิดพลาด ณ เวลา  $t_1$  นี้ได้ สมมติว่ามีขนาด  $|e_{ss}(t_1)| < a$  ได้โดยการใช้การป้อนสัญญาณไปข้างหน้า และเลือกค่าอัตราขยาย  $K_p$  ที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จำเป็นต้องมีการทดลองหาแบบลองผิดลองถูก (trial-and-error) คือทำโดยทดลองเปลี่ยนค่าไปเรื่อย ๆ หรือบางครั้งอาจจะสามารถคำนวณหาโดยวิธีการพีชคณิต ถ้ารู้ค่าอัตราขยาย  $K$  ของระบบแม่นยำแล้ว วิธีที่สะดวกที่สุดก็คือเลือกค่า  $K_f = \frac{1}{K}$  แล้วเลือกค่า  $K_p$  ได้จากสมการ

$$e_{ss} = \frac{A\tau}{1+KK_p} = a \quad (8.20)$$

#### 8.2.4 การควบคุมเชิงสัดส่วนกับระบบอันดับสอง

ถ้าต้องการควบคุมตำแหน่งของการหมุนของมอเตอร์ ระบบพลศาสตร์ของมอเตอร์จะกลายเป็นระบบอันดับสองดังแสดงในแผนภาพบล็อกข้างล่างนี้



ภาพที่ 41 ต้องการควบคุมตำแหน่งของการหมุนของมอเตอร์

สมการฟังก์ชันถ่ายโอน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{KK_p}{\tau s^2 + s + KK_p} \quad (8.21)$$

และ

$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = -\frac{K}{\tau s^2 + s + KK_p} \quad (8.22)$$

ถ้า  $\theta_r(s) = \frac{1}{s}$  ค่าตำแหน่งที่สถานะอยู่ตัวสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\theta_{ss} = \frac{KK_p}{KK_p} = 1 \quad (8.23)$$

และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันกล่าวคือ  $T_d = \frac{1}{s}$  ตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ที่สถานะอยู่ตัวจะมีค่าเท่ากับ

$$\theta_{ss|T_d} = \frac{1}{K_p} \quad (8.24)$$

ในตัวอย่างนี้จะเห็นว่าค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวนั้น (โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลจากภาระเปลี่ยนแปลง) จะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับระบบ  $G(s) = \frac{K}{s(\tau s+1)}$  ซึ่งเป็นระบบชนิด type I แต่ถ้าระบบ  $G(s) = \frac{1}{Js^2+cs+K}$  ซึ่งเป็นระบบชนิด type 0 แล้วค่าผิดพลาดหรือค่าออฟเซต (offset) นั้นจะไม่มีทางเป็นศูนย์

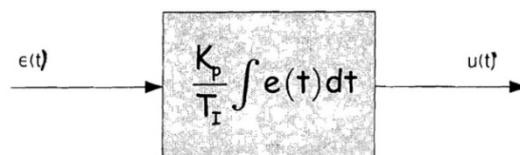
จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบป้อนกลับในตัวอย่างนี้สามารถใช้หาค่าอัตราส่วนการหน่วง ( $\delta$ ) ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้ดังนี้

$$\delta = \frac{1}{2\sqrt{\tau KK_p}} \quad (8.25)$$

ซึ่งสามารถออกแบบให้การตอบสนองในช่วงชั่วคราว (transient) ของระบบควบคุมมีค่าอัตราส่วนการหน่วงตามต้องการโดยการเลือกค่าเกน  $K_p$  ที่เหมาะสม

### 8.3 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

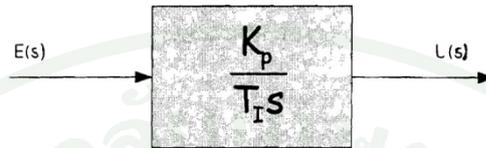
การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control) นั้นมีรูปแบบของสมการดังนี้ คือ



ภาพที่ 42 การควบคุมแบบอินทิกรัล

$$u(t) = \frac{K_p}{T_I} \int e(t) dt \quad (8.26)$$

หรือในรูปแบบของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้ว่า



ภาพที่ 43 สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบอินทิกรัล

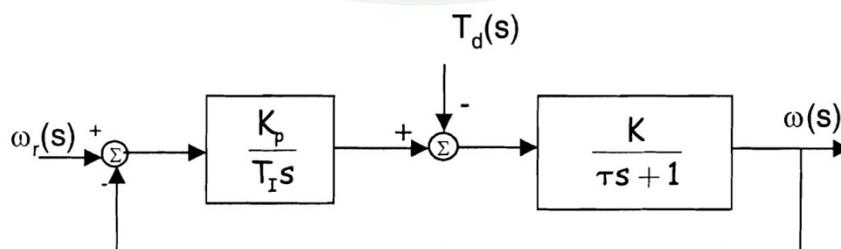
$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{T_I s} \quad (8.27)$$

โดยที่  $T_I =$  integral time or reset time

$$\frac{1}{T_I} = \text{reset rate}$$

จากรูปแบบของการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control) นี้ จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม  $u(t)$  อาจจะมีค่าค่อนข้างมากก็ได้โดยไม่ลดลง ใดๆ ที่สัญญาณผิดพลาด  $e(t)$  มีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังหรือเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณควบคุมในกรณีของการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control) ขึ้นอยู่กับค่าในอดีต (past value) ไม่เหมือนกับตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน

ประโยชน์ของการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control) เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว โยขณะเดียวกันค่าความมีเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วย ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์พร้อมตัวควบคุมแบบอินทิกรัลแสดงไว้ในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

ซึ่งสามารถเขียนสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ได้ดังนี้คือ

$$\frac{\omega(s)}{\omega_r(s)} = \frac{KK_p}{\tau T_I s^2 + T_I s + KK_p} \quad (8.28)$$

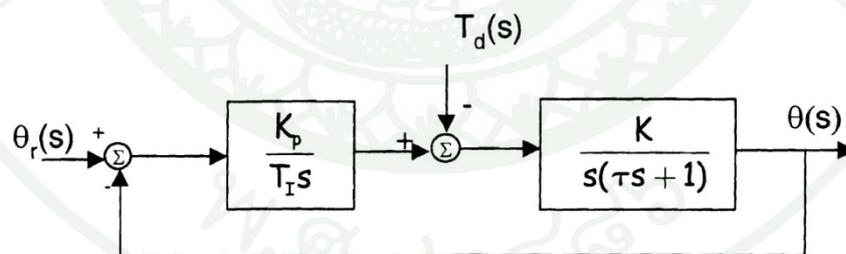
และ

$$\frac{\omega(s)}{T_d(s)} = -\frac{T_I K s}{\tau T_I s^2 + T_I s + KK_p} \quad (8.29)$$

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ เราสามารถแสดงว่า  $\omega_{ss}$  จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ  $\omega_r = \frac{1}{s}$  และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทันทีหรือ  $T_d = \frac{1}{s}$  ค่าความเร็วผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวหรือค่าที่เบี่ยงเบนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการรบกวนนี้ก็สามารถถูกปรับให้กลับมาเป็นศูนย์ได้ ข้อสังเกตข้อหนึ่งของระบบควบคุมแบบนี้ก็คือจะเห็นว่าการควบคุมแบบอินทิกรัลนี่จะเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบของเรา เช่น ในกรณีนี้ระบบเป็นอันดับที่หนึ่ง และเมื่อใช้การควบคุมแบบอินทิกรัลแล้วระบบป้อนกลับจะมีอันดับเป็นสอง

### 8.3.1 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control) กับระบบอันดับที่สอง

ภาพที่ 45 แสดงการควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว แต่ในที่นี้จะใช้การควบคุมแบบอินทิกรัล



ภาพที่ 45 การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมข้างต้นสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

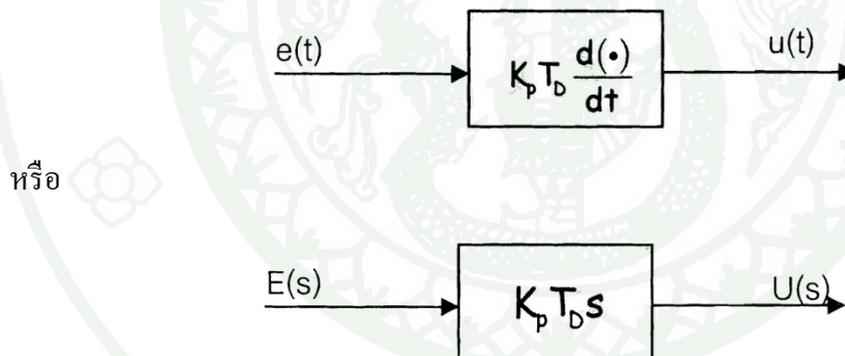
$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{KK_p}{T_I\tau s^2 + T_I s^2 + KK_p} \quad (8.30)$$

และ

$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = \frac{T_I K_s}{T_I\tau s^2 + T_I s^2 + KK_p} \quad (8.31)$$

จะเห็นว่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ กระแสตรงนี้ไม่สมดุล ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการใช้เกณฑ์เสถียรภาพของเราที่ดังได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น จะเห็นว่าถึงแม้การควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะช่วยให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวให้เป็นศูนย์ก็ตาม แต่ตัวอินทิกรัลนี้จะทำให้เสถียรภาพของระบบของเราลดลง ดังนั้น จึงไม่นิยมใช้เดี่ยวๆ แต่จะใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบอื่นดังจะกล่าวต่อไป

#### 8.4 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)



ภาพที่ 46 การควบคุมแบบอนุพันธ์

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p T_D s \quad (8.32)$$

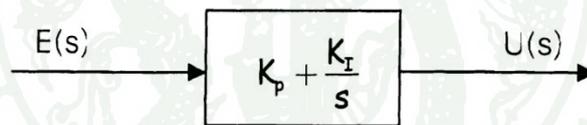
โดยที่ค่า  $T_D$  = ช่วงเวลาอนุพันธ์

การควบคุมเชิงอนุพันธ์ (derivative control) นี้ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น เช่น ใช้ร่วมกับการควบคุมเชิงสัดส่วน ซึ่งจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์

หรือพีดี (PD-control) ถ้าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลหรือพีไอ (PI-control) และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์รวมกันกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบอินทิกรัล เราจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบนี้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-control)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยในการเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นก็คือทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้จะไม่ทำให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้ ในขณะที่เดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณผิดพลาด  $\frac{d(e(t))}{dt}$  ดังนั้น ถ้าสัญญาณผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (fluctuate) ค่อนข้างมาก (เนื่องจากค่าความชัน (slope) ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก) ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพได้

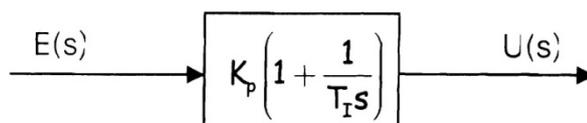
#### 8.5 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล (PI-control)



ภาพที่ 47 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (8.33)$$

และ

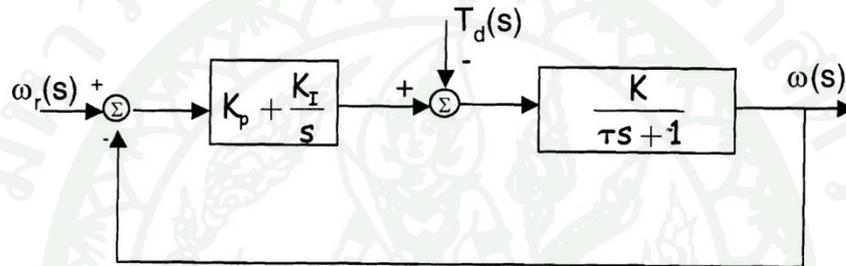


ภาพที่ 48 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลที่จัดรูปแล้ว

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (8.34)$$

### 8.5.1 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลกับระบบอันดับหนึ่ง

ในที่นี้จะมาพิจารณาระบบควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล (PI-control) กับ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ดังแสดงไว้ในแผนภาพบล็อกข้างล่างนี้



ภาพที่ 49 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล

จากแผนภาพบล็อก สมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\omega(s)}{\omega_r(s)} = \frac{K(K_p s + K_I)}{\tau s^2 + (1 + K K_p) s + K K_I} \quad (8.35)$$

และ

$$\frac{\omega(s)}{T_d(s)} = - \frac{K_s}{\tau s^2 + (1 + K K_p) s + K K_I} \quad (8.36)$$

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ สามารถแสดงได้ว่าความเร็วที่สถานะอยู่ตัว  $\omega_{ss}$  จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อความเร็วอ้างอิง  $\omega_r = \frac{1}{s}$  และมีภาระเปลี่ยนแปลงแบบกะทันหันหรือ  $T_d = 1/s$  ค่าความเร็วผิดพลาดหรือที่เบี่ยงเบนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงภาระนี้สามารถถูกปรับให้กลับมามีค่าเป็นศูนย์ได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากตัวอินทิกรัล และดังที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบของเรา เช่น ในกรณีนี้ระบบเป็นอันดับที่หนึ่งและเมื่อ

ใช้การควบคุมแบบอินทิกรัลแล้วระบบป้อนกลับจะมีอันดับเป็นสอง ค่าสัดส่วนการหน่วง (damping ratio) ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถเขียนได้ดังนี้

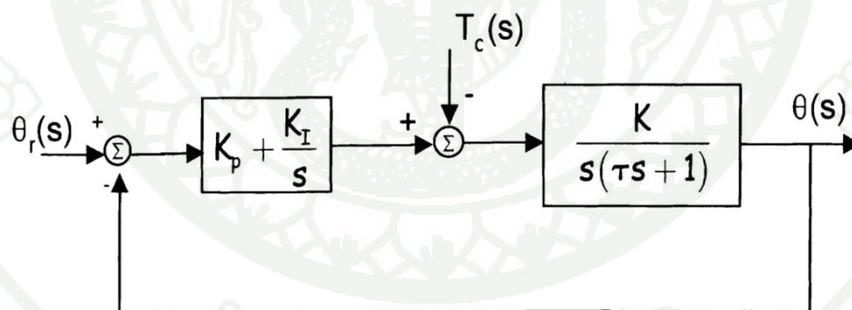
$$\delta = \frac{1+KK_p}{2\sqrt{KK_I\tau}} \quad (8.37)$$

และค่าเวลาคงที่ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับนี้เป็นกรณีหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (underdamped) สามารถหาได้ดังนี้

$$\tau_{cl} = \frac{2\tau}{1+KK_p} \quad (8.38)$$

### 8.5.2 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI-control) กับระบบอันดับสอง

การควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI-control) นั้นจะทำให้ระบบควบคุมของเรามีอันดับเป็นสาม ดังแสดงในแผนภาพบล็อกข้างล่างนี้



ภาพที่ 50 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI-control) กับระบบอันดับสอง

จากแผนภาพบล็อกข้างต้นนี้ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K(K_p s + K_I)}{\tau s^3 + s^2 + KK_p s + KK_I} \quad (8.39)$$

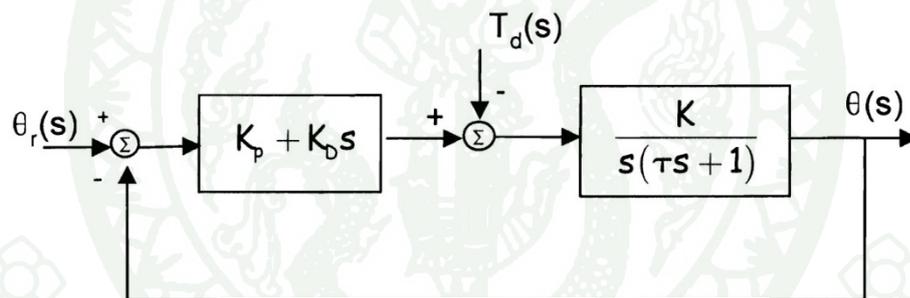
และ

$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = \frac{Ks}{\tau s^3 + s^2 + KK_p s + KK_I} \quad (8.40)$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวจะมีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกัน เนื่องจากตัวอินทิกรัลและรวมถึงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการหมุนที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากภาระมีการเปลี่ยนแปลงก็สามารถปรับเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้เช่นกัน ถ้าทำการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของระบบโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของเราที่นั่น จะเห็นว่าการออกแบบหรือการหาค่าเกนของตัวควบคุมนั้นจะต้องทำให้ค่า  $KK_p - \tau KK_I > 0$  ระบบควบคุมดังกล่าวจึงจะมีเสถียรภาพ ซึ่งทำได้โดยให้ค่าอัตราขยายของส่วนที่เป็นตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ( $K_p$ ) มีค่ามากไว้ก่อน

#### 8.6 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD-control) กับระบบอันดับสอง

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD-control) นี้จะไม่นิยมใช้ควบคุมระบบที่มีอันดับหนึ่ง การควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์นั้นแสดงไว้ในบล็อกข้างล่างดังนี้คือ



ภาพที่ 51 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD-control) กับระบบอันดับสอง

จากแผนภาพบล็อกข้างต้น สมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{KK_p}{\tau s^2 + (1 + KK_D)s + KK_p} \quad (8.41)$$

และ

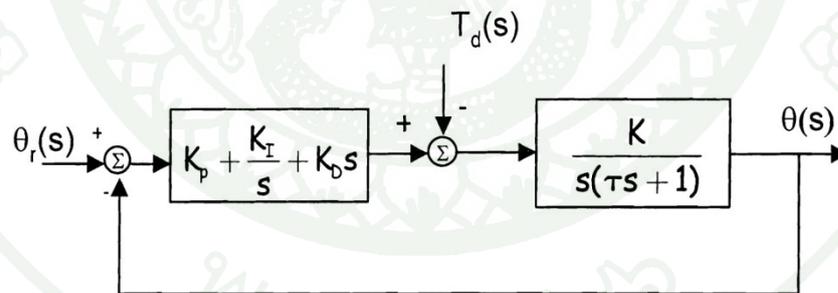
$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = \frac{K}{\tau s^2 + (1 + KK_D)s + KK_p} \quad (8.42)$$

ค่าความเร็วในสถานะอยู่ตัวเนื่องมาจากสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยนั้นจะมีค่าเป็น 1 ซึ่งก็หมายความว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งการหมุนในสถานะอยู่ตัว (steady state position error) มีค่าเป็นศูนย์ ส่วนค่าผิดพลาดของตำแหน่งในสถานะอยู่ตัว เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงกะทันหัน นั้นจะมีค่าน้อยลง เมื่อค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมีค่ามาก ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนอย่างเดียว และจะพบว่าระบบจะมีเสถียรภาพถ้าอัตราขยาย  $K_p$  และ  $K_D$  มีค่าเป็นบวก ค่าอัตราส่วนการหน่วงสามารถหาได้ดังนี้คือ

$$\delta = \frac{1+KK_D}{2\sqrt{\tau KK_p}} \quad (8.43)$$

8.6.1 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์ (PID-control) กับระบบอันดับสอง

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI-control) กับระบบอันดับสอง ข้างต้นจะเห็นว่ายังไม่สามารถบรรลุการออกแบบที่สมบูรณ์ เนื่องจากว่าค่าคงตัวเวลา ( $\tau$ ) ของระบบมีค่ามาก ระบบอาจจะไม่มีเสถียรภาพก็ได้ ในหัวข้อนี้ตัวควบคุมที่เลือกจะมีการเพิ่มตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์เข้าไปในการควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ ตัวควบคุมดังกล่าวคือตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งแสดงไว้ในแผนภาพบล็อกข้างล่างนี้



ภาพที่ 52 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์กับระบบอันดับสอง

จากแผนภาพบล็อกข้างต้น สมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K(K_D s^2 + K_p s + K_I)}{\tau s^3 + (1 + KK_D)s^2 + KK_p s + KK_I} \quad (8.44)$$

และ

$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = - \frac{Ks}{\tau s^3 + (1 + KK_D)s^2 + KK_p s + KK_I} \quad (8.45)$$

ซึ่งค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error) อันเนื่องมาจากสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยจะเป็นศูนย์เนื่องมาจากมีตัวควบคุมแบบอินทิกรัลรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้ก็สามารถแสดงว่าระบบนี้จะมีเสถียรภาพได้ก็ต่อเมื่อค่าอัตราขยาย  $K_p$ ,  $K_I$  และ  $K_D$  มีค่าเป็นบวกและ

$$(1 + KK_D)KK_p - \tau KK_I > 0 \quad (8.46)$$

ซึ่งค่าอัตราขยาย  $K_D$  ที่อยู่ในระบบควบคุมนี้จะช่วยทำให้สมการ 8.46 ข้างต้นเป็นไปได้ไม่ยากนัก

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ Intel Pentium Core 2 Duo (1.5 GHz)
2. กล้องที่สามารถบันทึกภาพวิดีโอที่ชัดด้วยเฟรมเรตสูง
3. อุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยาน ที่สร้างจาก DC Motor และชุดขับเคลื่อน
4. โปรแกรม MATLAB
5. เครื่องพิมพ์ชนิดใช้แสงเลเซอร์ (Laser Printer) และเครื่องพิมพ์ชนิดใช้หมึกพ่น (Inkjet Printer)

### วิธีการ

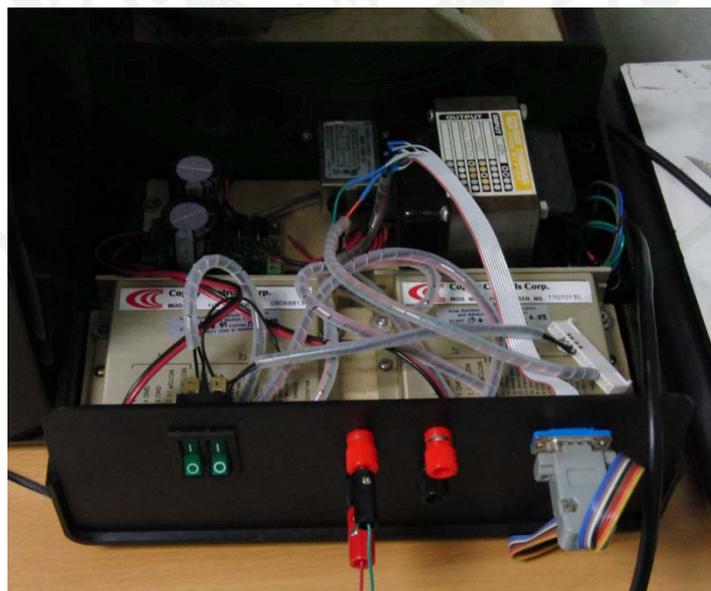
การทดลองจะแบ่งเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 ทำการทดลองกับภาพวิดีโอที่บันทึกด้วยกล้องที่สามารถบันทึกภาพวิดีโอที่ชัดด้วยเฟรมเรตสูง ที่ติดตั้งบนอุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยานที่สร้างขึ้น เพื่อทดลองและทดสอบอัลกอริทึมที่สร้างขึ้น เมื่อทดสอบอัลกอริทึมจนเป็นที่พอใจแล้ว จึงทำการทดลองอากาศยานจริงต่อไป การทดลองที่ 2 ติดตั้งกล้องกับอากาศยานและตั้งภาพแมทริกซ์ไว้ด้านหน้าอากาศยาน การทดลองที่ 3 ติดตั้งภาพแมทริกซ์กับอากาศยาน แล้วถ่ายภาพวิดีโอที่ชัดด้วยกล้องที่สามารถบันทึกภาพวิดีโอที่ชัดด้วยเฟรมเรตสูง โดยอากาศยานที่ใช้จะเป็นอากาศยานแบบ UH-1H ของ กองทัพอากาศ

### การทดลองที่ 1 ทดลองกับอุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยาน

การทดลองทำโดยติดตั้ง แผ่นภาพแมทริกซ์ดังภาพที่ 53 และ 57 บนรางที่ติดตั้งในแนวระนาบซึ่งต่อกับชุดขับเคลื่อนที่ควบคุมด้วย DC Motor ดังภาพที่ 55 และ 56 แผ่นภาพแมทริกซ์ถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนวระนาบตามความต้องการโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการกำหนดสัญญาณอินพุตให้กับชุดควบคุม DC MOTOR



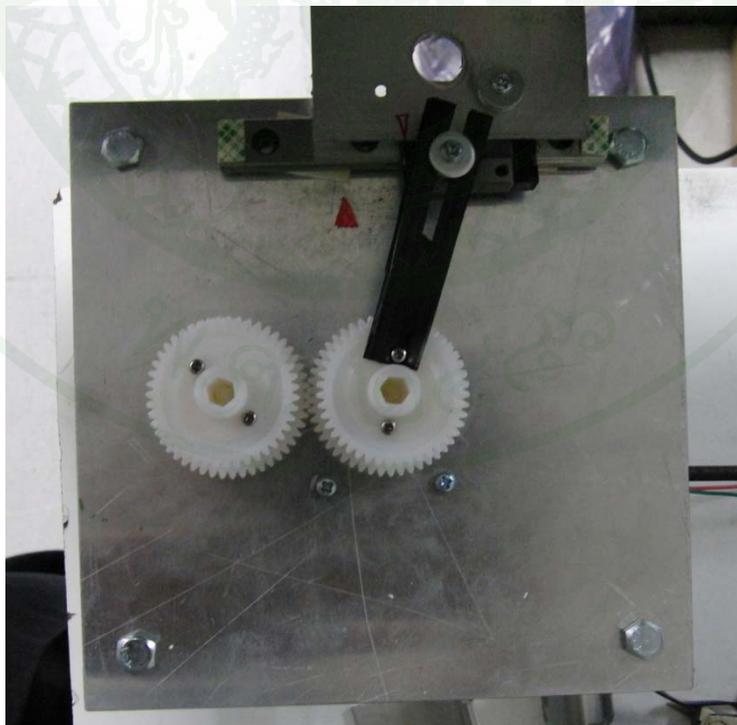
ภาพที่ 53 แผ่นภาพแมทริกซ์และอุปกรณ์การทดลอง



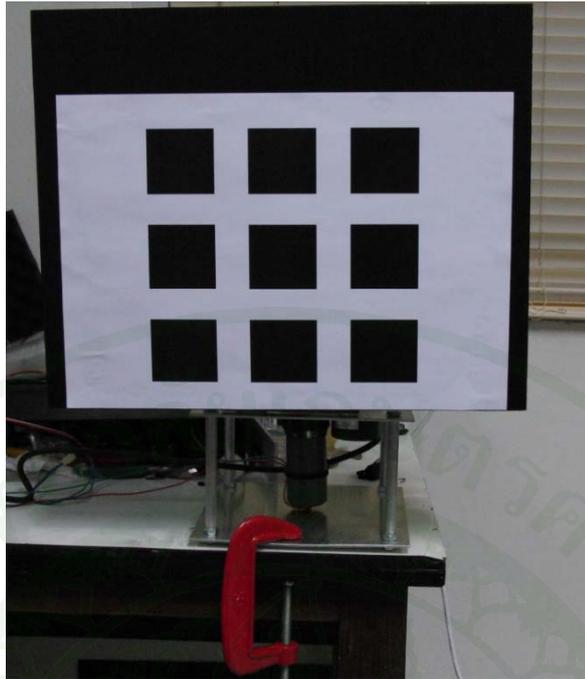
ภาพที่ 54 ชุดควบคุม DC MOTOR



ภาพที่ 55 DC MOTOR และการต่อชุดขับเคลื่อนแผ่นภาพแมทริกซ์

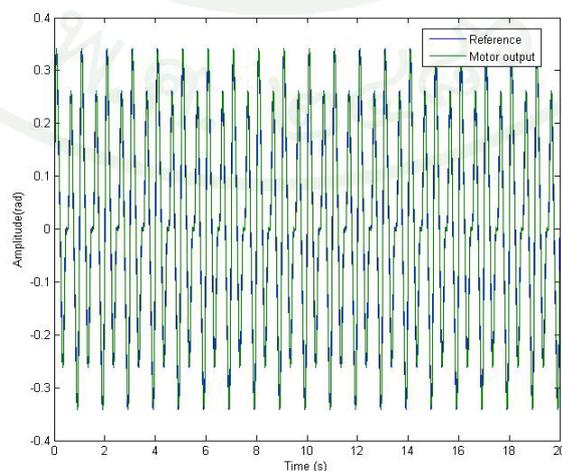


ภาพที่ 56 ชุดเฟืองขับและรางเลื่อนที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์



ภาพที่ 57 แผ่นภาพเมทริกซ์

สัญญาณอินพุตของมอเตอร์กระแสตรงที่ส่งมาจาก ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง ที่ติดกับแผ่นภาพเคลื่อนที่ในแนวระนาบตามความถี่ที่กำหนดในโปรแกรม MATLAB ซึ่งสัญญาณอินพุตดังกล่าว ประกอบด้วยสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันคือ 2 Hz 3 Hz และ 5 Hz ตามสมการ  $y(t) = 2.5 \sin 4\pi t + 0.1 \sin 6\pi t + 0.05 \sin 10\pi t$  ดังภาพที่ 58 ซึ่งแสดงสัญญาณอินพุต (Reference) และการเคลื่อนที่จริงที่วัดได้จากเฟืองขับ (Motor Output) จากนั้นทำการบันทึกภาพวิดีโอของการเคลื่อนที่แผ่นภาพด้วยกล้องที่มีอัตราเฟรมเรตสูง เฟรมเรตที่เลือกใช้คือ 300 เฟรมต่อวินาที



ภาพที่ 58 สัญญาณที่ป้อนให้กับมอเตอร์และมุมที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์

นำภาพวิดีโอการเคลื่อนที่ของแผ่นภาพ ซึ่งในที่นี้คือการจำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยานดังกล่าวมาทำการชักตัวอย่างจากภาพวีดิทัศน์ แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าการสั่นสะเทือนด้วยอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นในโปรแกรม MATLAB ดังภาพที่ 9.7

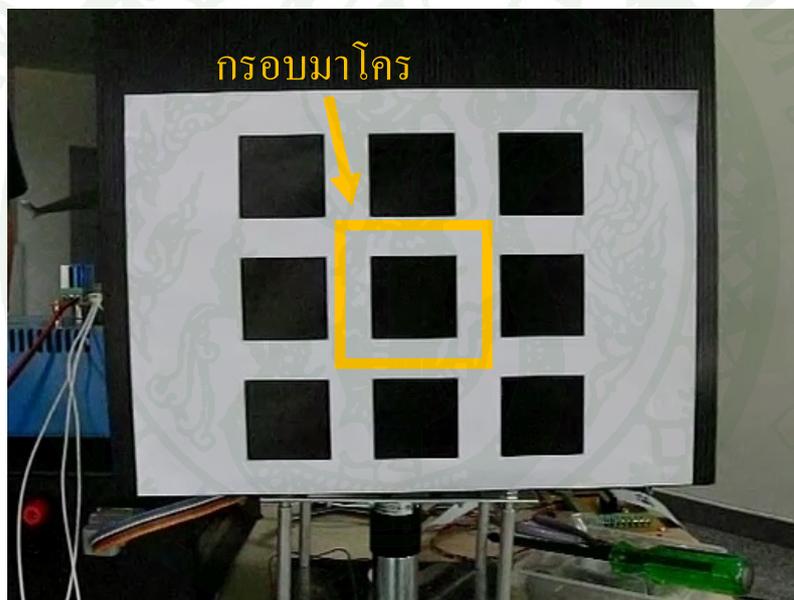
#### ภาพที่ 59 อัลกอริทึม

อัลกอริทึมที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 6 อัลกอริทึม ซึ่งทั้ง 6 อัลกอริทึมจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนการเปรียบเทียบภาพและส่วนกระบวนการค้นหา ซึ่งส่วนการเปรียบเทียบใช้ MSE ดังสมการ 3.1 และ MAE ดังสมการ 3.2 ในการเปรียบเทียบ ส่วนกระบวนการค้นหาจะใช้กระบวนการค้นหาต่างกันไป ได้แก่ Exhaustive Search, Three Step Search และ 4 Step Search

การเปรียบเทียบภาพ จะทำการเปรียบเทียบภาพในกรอบมาโครที่วางอยู่เฟรมภาพปัจจุบัน และกรอบมาโครที่วางอยู่ในเฟรมก่อนหน้า โดยใช้ตำแหน่งอ้างอิงการวางกรอบมาโครเดียวกัน อัลกอริทึมจะการเก็บค่า MAE , MSE ของการเปรียบเทียบกรอบมาโครพร้อมกับตำแหน่งอ้างอิงของกรอบมาโครเอาไว้

อัลกอริทึมในส่วนกระบวนการค้นหา จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของกรอบมาโครในเฟรม ปัจจุบันไปตามรูปแบบของกระบวนการค้นหาที่เลือกใช้ โดยเมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งอัลกอริทึม จะทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มสีในกรอบมาโครทุกครั้งพร้อมกับเก็บค่าที่ได้จาก MAE , MSE และตำแหน่งอ้างอิงไว้ทุกครั้ง

จากนั้นอัลกอริทึมจะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก MAE , MSE ว่าค่า ณ ตำแหน่งอ้างอิง ใดมีค่า MAE , MSE ต่ำที่สุด และนำตำแหน่งอ้างอิงของเฟรมปัจจุบันที่ได้เปรียบเทียบตำแหน่ง อ้างอิงในเฟรม ก่อนหน้า จะทำให้ได้เวกเตอร์การเคลื่อนที่ โดยจุดกึ่งกลางของกรอบมาโครใน เฟรมก่อนหน้าเป็นจุดเริ่มต้นและจุดกึ่งกลางของกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบัน เป็นจุดสิ้นสุดของ เวกเตอร์การเคลื่อนที่ดังภาพที่ 60 และ 61



ภาพที่ 60 การวางกรอบมาโครในเฟรมก่อนหน้าและเฟรมปัจจุบัน

อัลกอริทึมทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสีภายในกรอบมาโครระหว่างกรอบมาโคร ของเฟรมก่อนหน้าและเฟรมปัจจุบัน ด้วยวิธี MAE ดังสมการ 3.2 แล้วทำการเปลี่ยนตำแหน่ง กรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันตามรูปแบบของกระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search(ES) , Three Step Search(TSS) และ Four Step Search (4SS) พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าในกรอบมาโครของ ทั้งเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าด้วย MAE ในทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของกรอบมาโคร ในเฟรมปัจจุบัน ค่า MAE ที่น้อยที่สุดแสดงว่าค่าความเข้มของสีภายในกรอบมาโครเท่ากันหรือ เป็นรูปเดียวกันซึ่งจะทำให้เรารู้ได้ว่ากรอบมาโครในเฟรมก่อนหน้ากับกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบัน

ที่มีค่าความเข้มของสีเท่ากันอยู่ห่างกันเท่าใดซึ่งหมายความว่ากรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมในเฟรมก่อนหน้าเท่าใดโดยทำการเปรียบเทียบจุดศูนย์กลางของกรอบมาโครของเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า โดยให้จุดศูนย์กลางของกรอบมาโครในเฟรมก่อนหน้าเป็นจุดตั้งต้นและให้จุดศูนย์กลางของกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันที่มีค่า MAE น้อยที่สุดเป็นจุดสิ้นสุดของเวกเตอร์ดังภาพที่ 61



ภาพที่ 61 รูปการเลื่อนกรอบมาโคร, เวกเตอร์การเคลื่อนที่ และ ตำแหน่งอ้างอิงของกรอบมาโคร

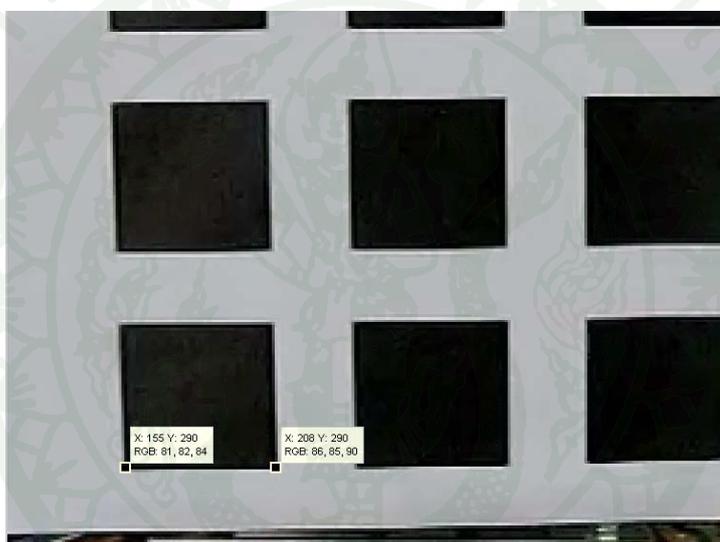
จะเห็นได้ว่าเวกเตอร์การเคลื่อนที่ที่ได้จะเป็นสิ่งบ่งชี้ว่า ภาพเฟรมปัจจุบันมีตำแหน่งต่างจากภาพในเฟรมก่อนหน้าในทิศทางใด ซึ่งตำแหน่งที่ต่างกันนี้คือการเคลื่อนที่ของภาพหรือการสั่นของภาพอันเกิดจากการสั่นของกล้องนั่นเอง และเมื่อนำเวกเตอร์การเคลื่อนที่ซึ่งบอกการเคลื่อนที่ระหว่างเฟรมแต่ละเฟรมทั้งหมดมารวมกัน จะได้กราฟการเคลื่อนที่ (การสั่น) ของภาพวิดีโอที่สนใจ ซึ่งเราจะแบ่งการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ออกเป็นแนวดิ่งและแนวระดับจากนั้นทำการวิเคราะห์กราฟการเคลื่อนที่ด้วย Fast Fourier Transform (FFT) จะทราบได้ว่าการสั่นของภาพวิดีโอที่สนใจประกอบด้วย ความถี่ใดบ้าง

ในระหว่างการคำนวณหาเวกเตอร์การเคลื่อนที่นั้น อัลกอริทึมจะนับจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครเพื่อชี้ให้เห็นว่า กระบวนการค้นหาแต่ละแบบมีความเร็วในการวิเคราะห์ความถี่ต่างกันอย่างไร ตลอดจนเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการค้นหาแต่ละแบบด้วย

## การเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแผ่นภาพแมทริกซ์กับภาพแมทริกซ์ที่ถ่ายได้

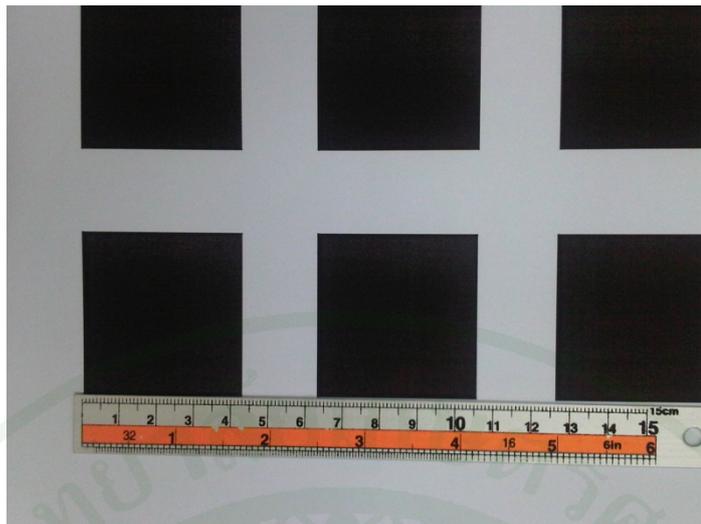
ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์โดยใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นนั้น ผลลัพธ์ที่ได้ ขนาดของการเคลื่อนที่ (magnitude) จะอยู่ในหน่วยพิกเซลซึ่งสามารถเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนกับการเคลื่อนที่ ที่เกิดขึ้นจริงได้โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่าง ขนาดของแผ่นภาพแมทริกซ์ และภาพของแผ่นภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้จากกล้อง ดังนี้

วัดขนาดของกรอบในภาพของแผ่นภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้จากกล้อง โดยใช้โปรแกรม MATLAB ว่ามีขนาดกี่พิกเซล ดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 การวัดขนาดภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้เป็นหน่วยพิกเซลในการทดลองที่ 1

เราสามารถหาขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมในแผ่นภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้นั้นจะมีขนาดเท่าใดโดยดูจากจุดพิกัด (co-ordinate) โดยใช้โปรแกรม Matlab จากภาพที่ 62 กรอบสี่เหลี่ยมในแผ่นภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้จะมีความกว้างเท่ากับ 53 พิกเซล โดยดูจาก จุดพิกัดที่แสดงกรอบสี่เหลี่ยมด้านล่างซ้าย และ ด้านล่างขวา คือ (155,290) และ (208,290)

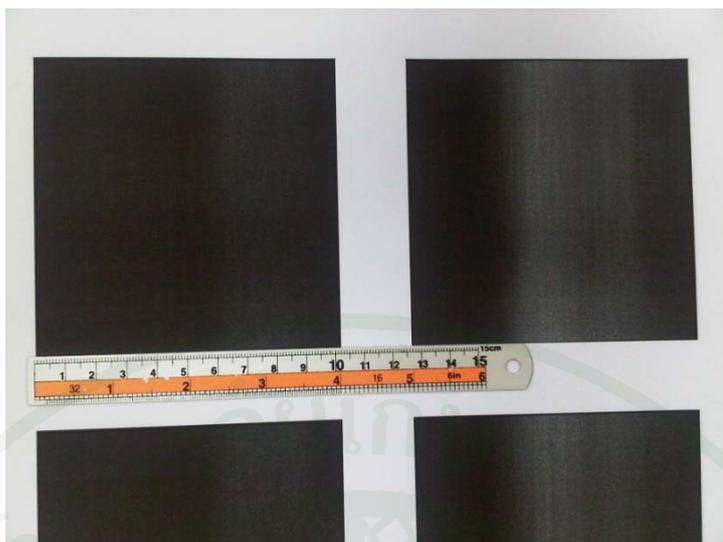


ภาพที่ 63 ขนาดจริงของกรอบสี่เหลี่ยมบนแผ่นภาพแมทริกซ์ในการทดลองที่ 1

ทำการวัดขนาดจริงของกรอบสี่เหลี่ยม ได้เท่ากับ 42 มม. ดังนั้นการเคลื่อนที่ของภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้จะเท่ากับ 1 พิกเซลต่อ 43/53 มม. หรือ 1 พิกเซลต่อ 0.8 มม. สำหรับการทดลองที่ 1 ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างแผ่นภาพแมทริกซ์และภาพของแผ่นภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้ในการทดลองที่ 3 โดยใช้วิธีเดียวกัน ดังภาพที่ 64 และ ภาพที่ 65



ภาพที่ 64 การวัดขนาดภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้เป็นหน่วยพิกเซลในการทดลองที่ 3



ภาพที่ 65 ขนาดจริงของกรอบสี่เหลี่ยมบนแผ่นภาพแมทริกซ์ในการทดลองที่ 3

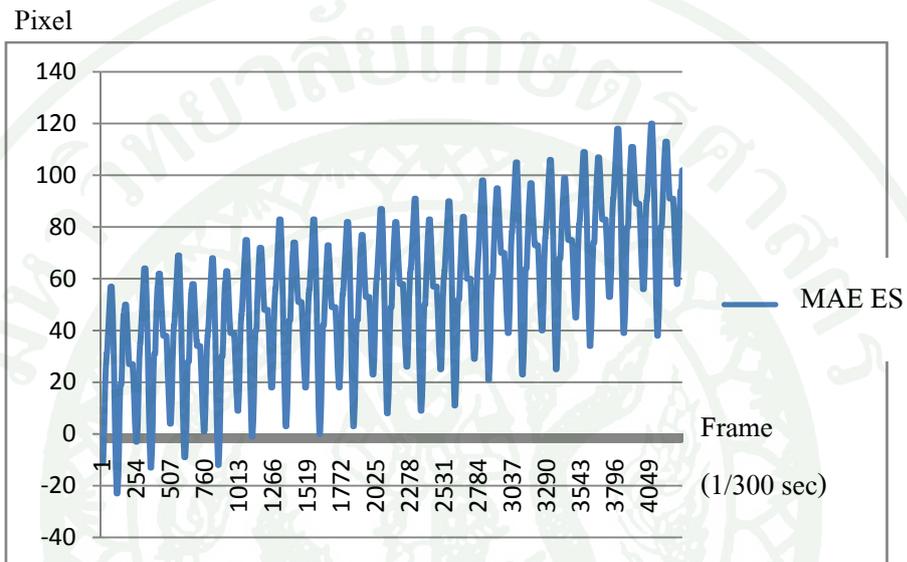
ขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมในแผ่นภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้มีขนาดเท่ากับ 55 พิกเซล โดยพิจารณาจากจุดพิกัด (176,181) และ (231,181) ขนาดจริงของกรอบสี่เหลี่ยมในแผ่นภาพแมทริกซ์เท่ากับ 102 มม. ดังนั้นอัตราส่วนของขนาดที่ใช้ในการทดลองที่ 3 คือ 1 พิกเซลต่อ 102/55 มม. หรือ 1 พิกเซลต่อ 0.54 มม.

#### แกนเวลาที่ใช้ในการแสดงผล

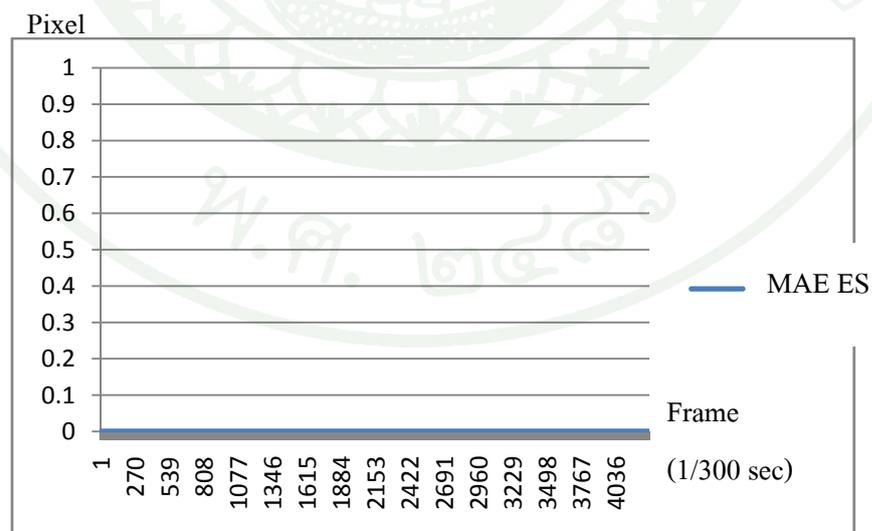
ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในการทดลองที่ 1 และ 2 นั้น ภาพวิดีโอที่บันทึกภาพด้วยเฟรมเรท 1 วินาทีต่อ 300 เฟรม และการคำนวณหาเวกเตอร์การเคลื่อนที่นั้นทำการเปรียบเทียบแบบเฟรมต่อเฟรม ดังภาพที่ 61 ดังนั้น ในการแสดงผลการเคลื่อนที่ที่วิเคราะห์ได้จากอัลกอริทึมจะแสดงผลการเคลื่อนที่ต่อ 1 เฟรมซึ่งเทียบได้กับ 1/300 วินาที

## ผลการทดลองที่ 1

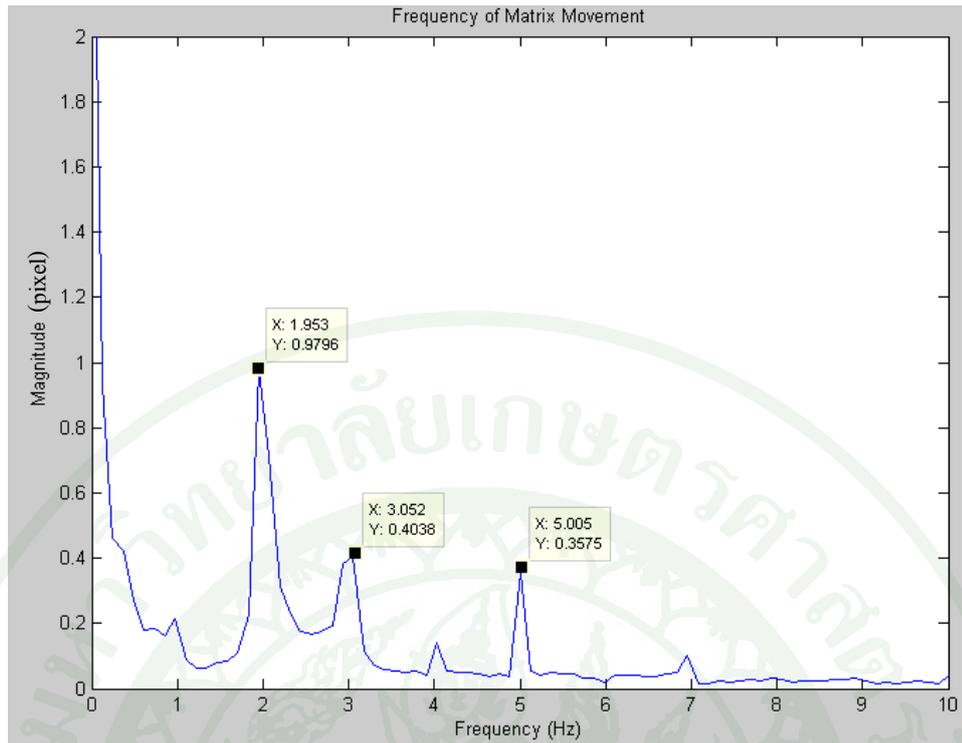
การทดลองที่ 1A ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 66



ภาพที่ 66 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับ



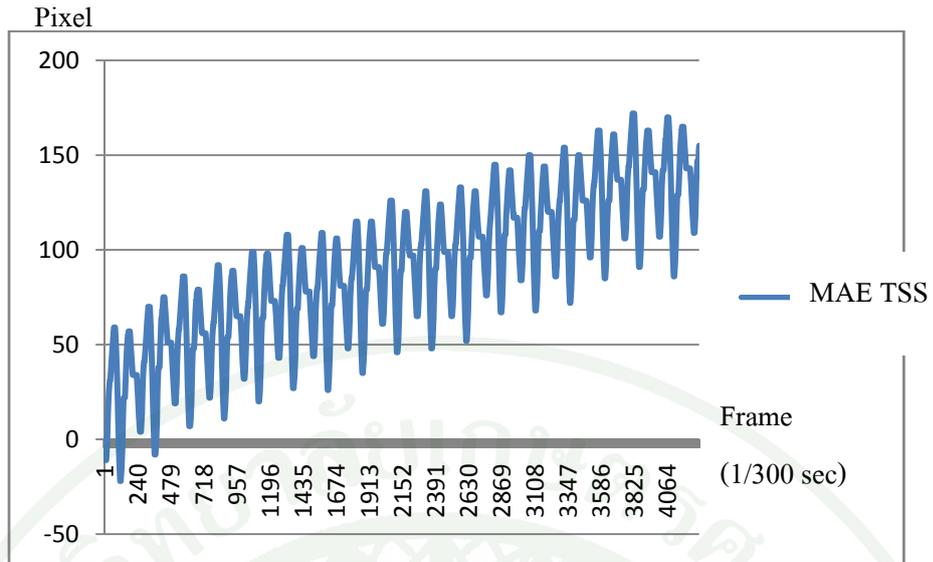
ภาพที่ 67 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้ง



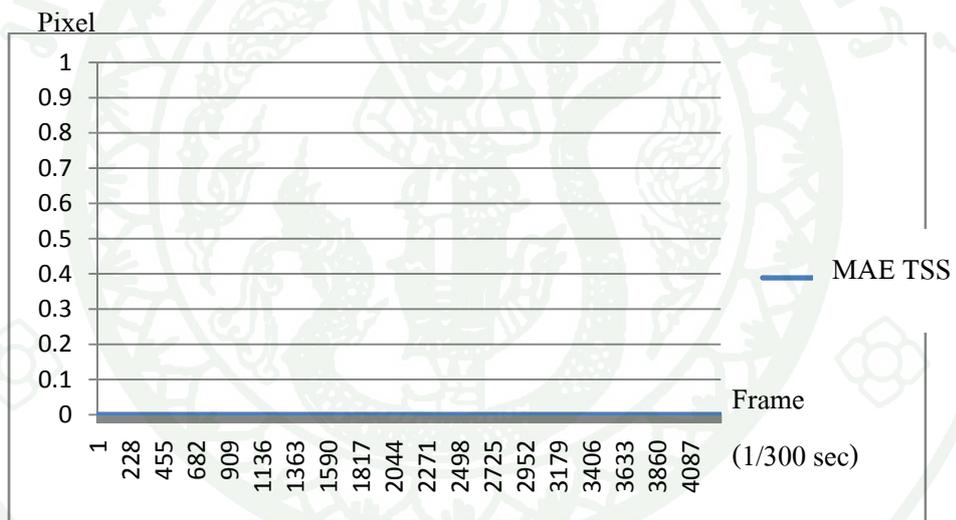
ภาพที่ 68 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1A

ในการทดลองที่ 1A นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ได้ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ากับ DC มอเตอร์มาก ในการทดลองที่ 1A นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 5041 ครั้ง

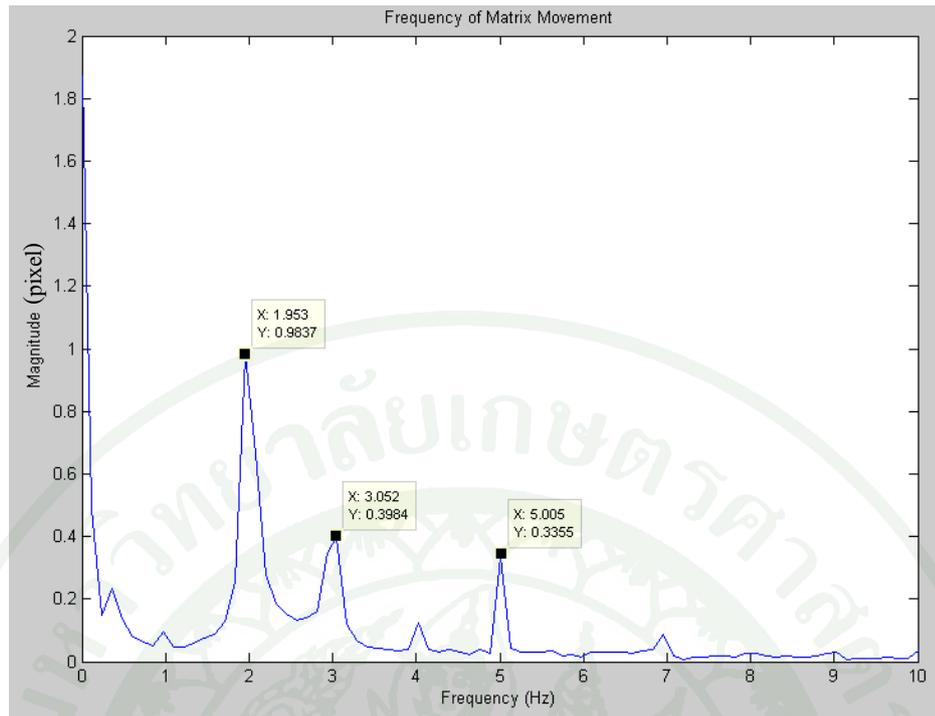
การทดลองที่ 1B ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Three Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 69



ภาพที่ 69 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1B



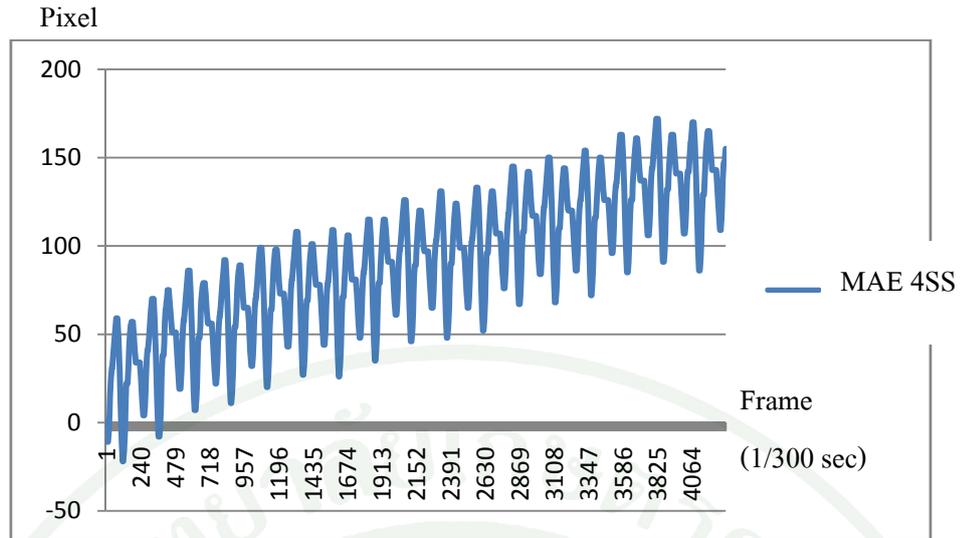
ภาพที่ 70 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1B



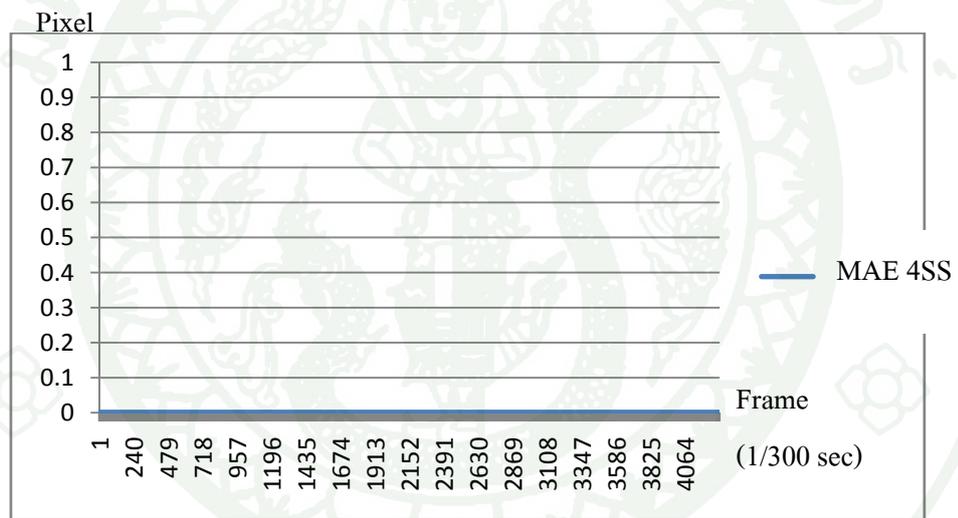
ภาพที่ 71 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวดิ่งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1B

ในการทดลองที่ 1B นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ได้ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ากับ DC มอเตอร์มาก ในการทดลองที่ 1B นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 41 ครั้ง

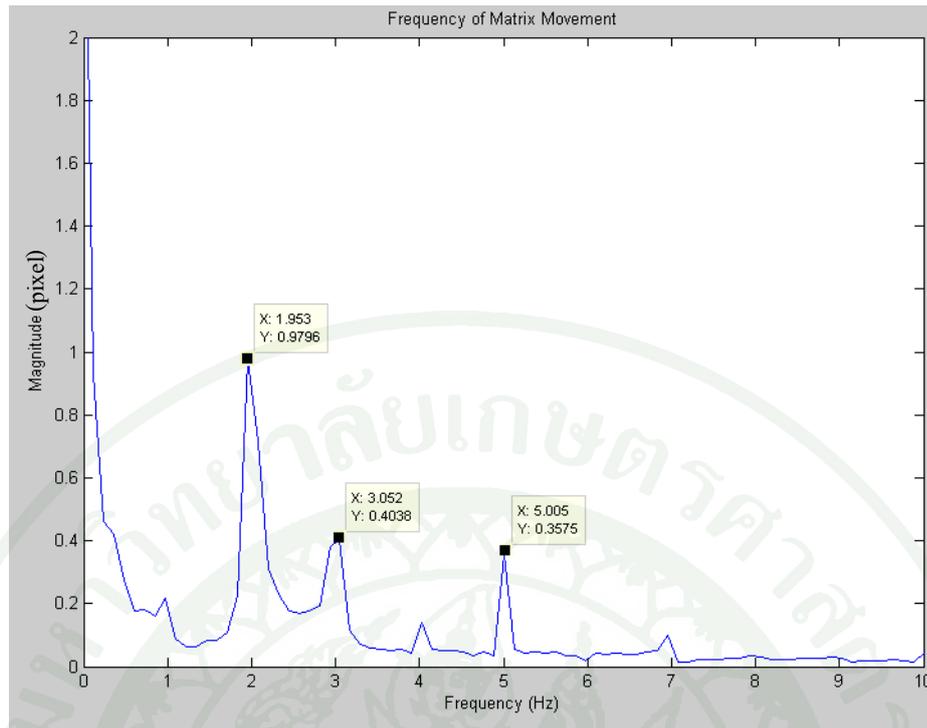
การทดลองที่ 1C ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Four Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 72



ภาพที่ 72 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1C



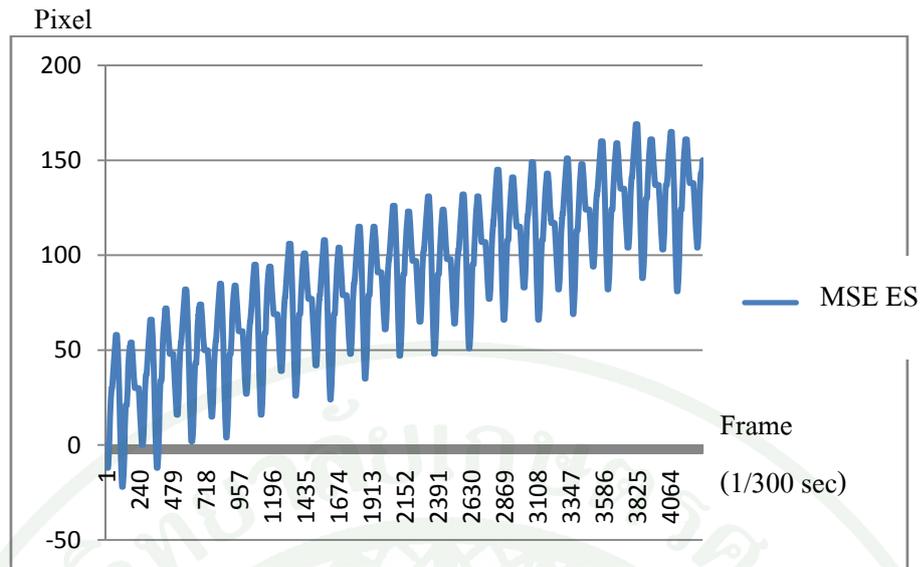
ภาพที่ 73 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1C



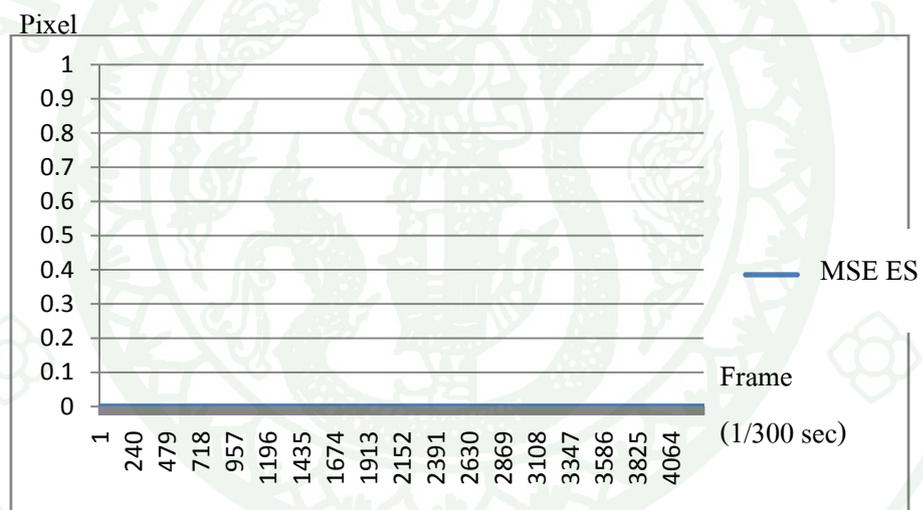
ภาพที่ 74 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1C

ในการทดลองที่ 1C นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ได้ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ากับ DC มอเตอร์มาก ในการทดลองที่ 1C นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ตั้งแต่ 17 ถึง 23 ครั้ง

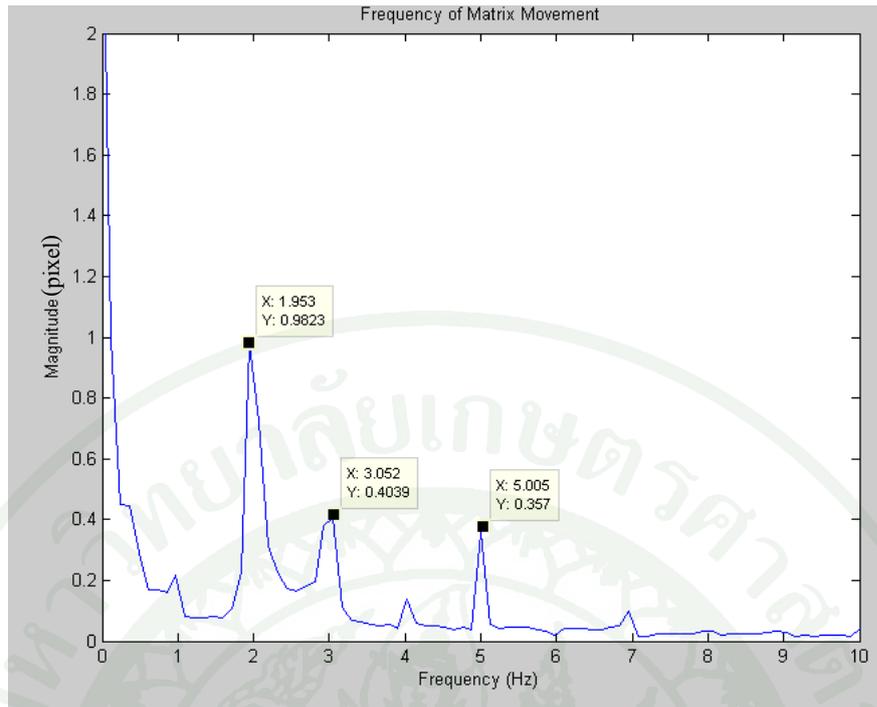
การทดลองที่ 1D ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 75



ภาพที่ 75 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1D



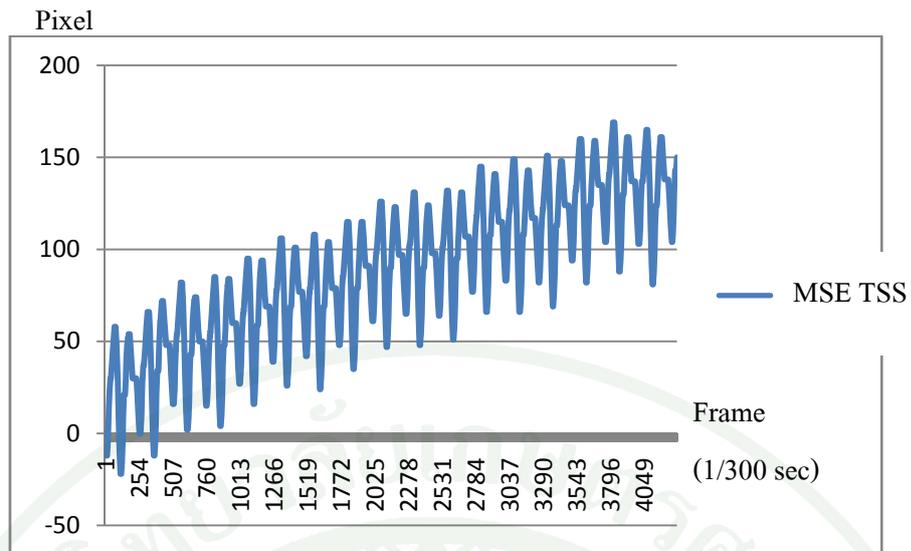
ภาพที่ 76 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1D



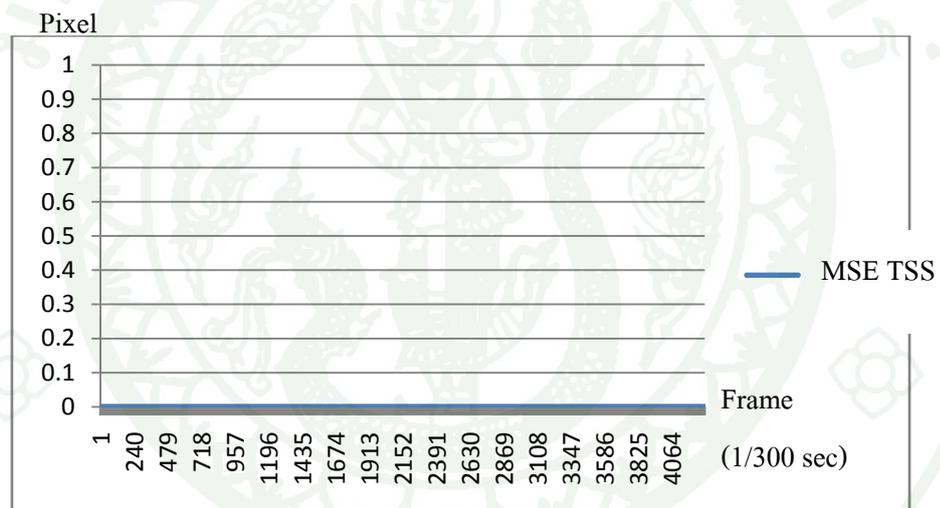
ภาพที่ 77 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1D

ในการทดลองที่ 1D นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ได้ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ากับ DC มอเตอร์มาก ในการทดลองที่ 1D นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ 5041 ครั้ง

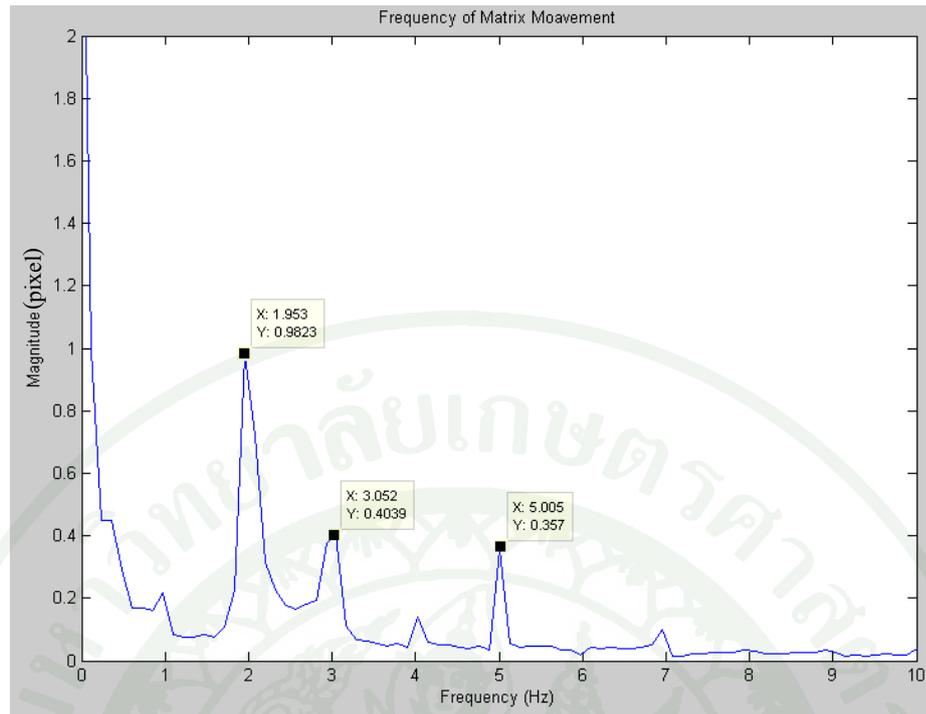
การทดลองที่ 1E ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Three Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 78



ภาพที่ 78 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1E



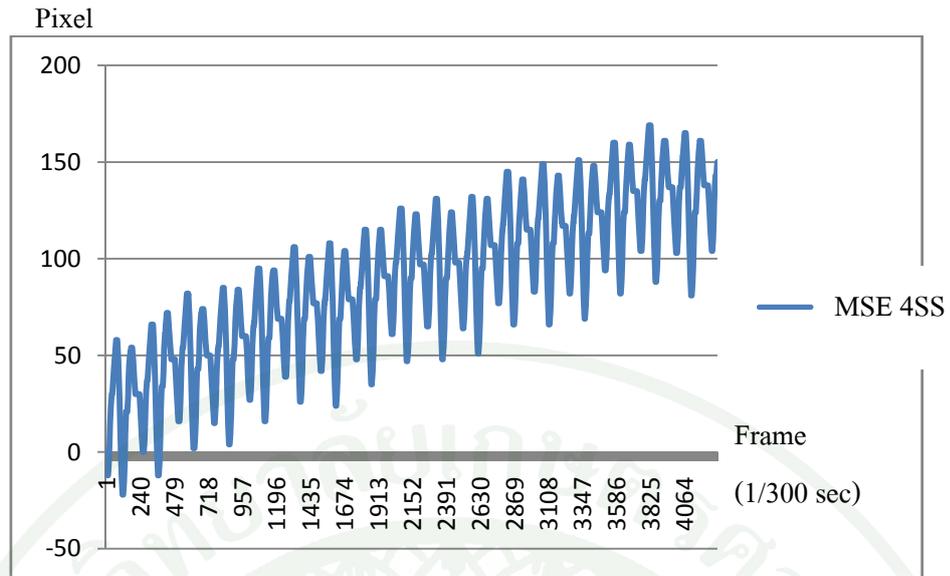
ภาพที่ 79 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1E



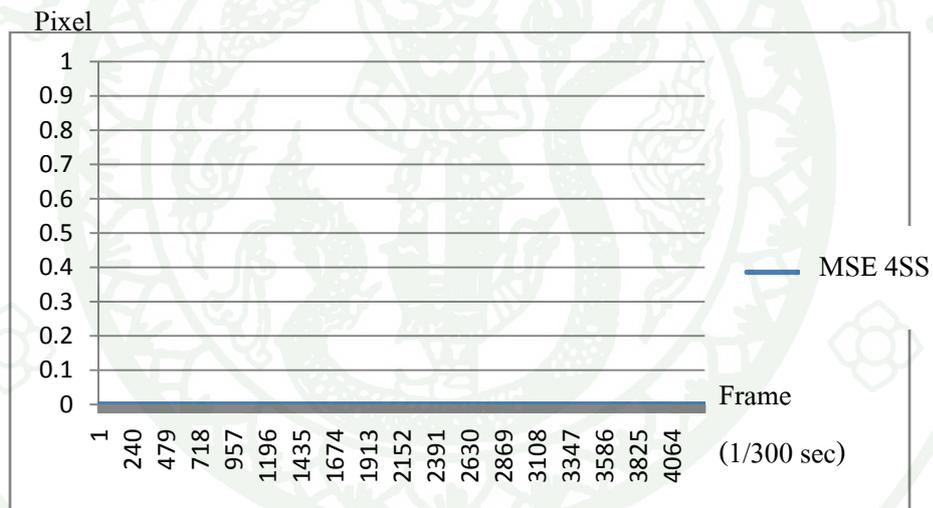
ภาพที่ 80 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1E

ในการทดลองที่ 1E นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ได้ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ากับ DC มอเตอร์มาก ในการทดลองที่ 1D นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ 41 ครั้ง

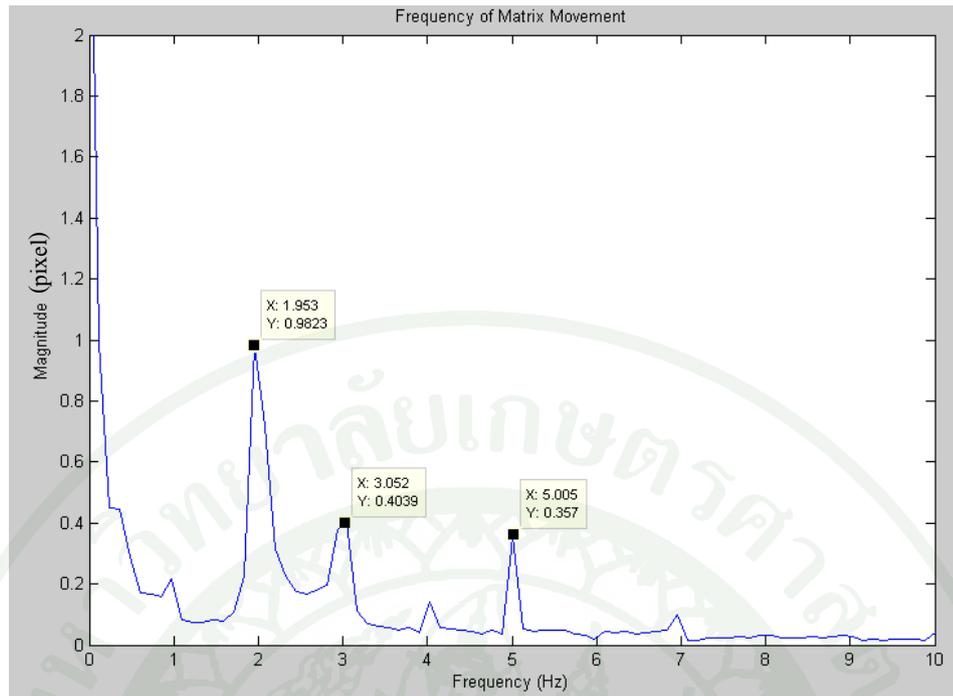
การทดลองที่ 1F ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Four Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 81



ภาพที่ 81 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1F



ภาพที่ 82 การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1F



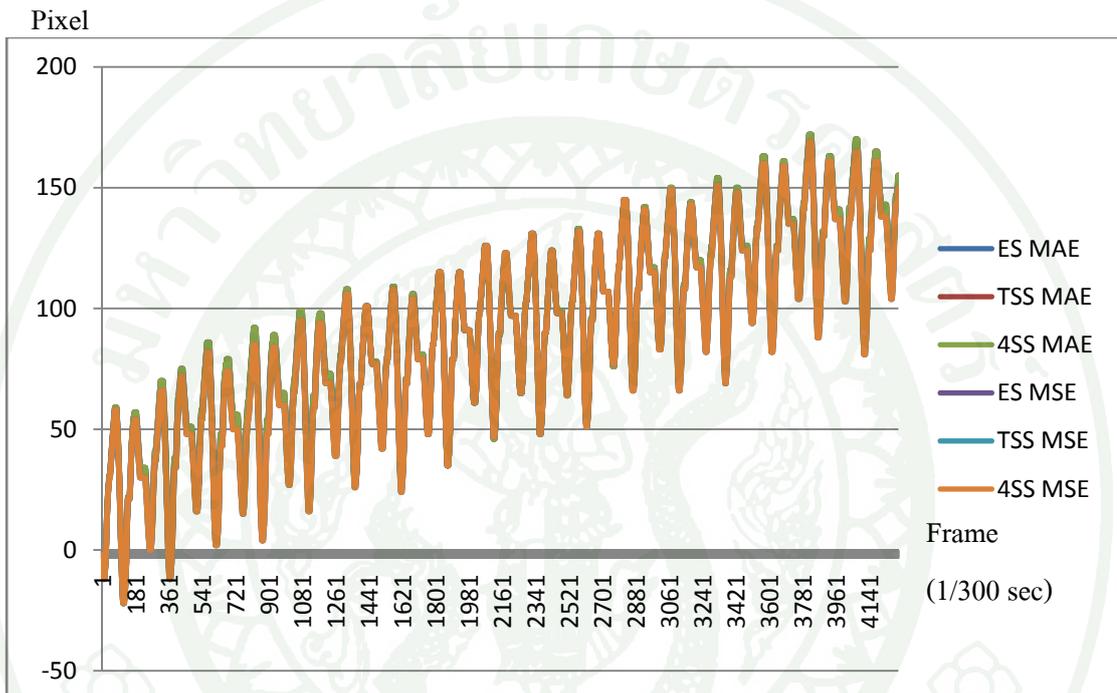
ภาพที่ 83 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1F

ในการทดลองที่ 1F นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ได้ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ากับ DC มอเตอร์มาก ในการทดลองที่ 1F นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ 17 ถึง 23 ครั้ง

### สรุปผลการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 แบ่งการทดลองเป็น 6 แบบโดยใช้อัลกอริทึมที่แตกต่างกัน โดยในส่วนกระบวนการเปรียบเทียบจะใช้ MAE และ MSE และในส่วนกระบวนการค้นหาจะใช้ Exhaustive Search, Three Step Search, Four Step Search

จากการทดลองที่ 1A – 1F เมื่อเปรียบเทียบกราฟการเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ที่ถูกควบคุมโดย DC MOTOR ให้เคลื่อนที่ด้วยความถี่ 2 Hz, 3 Hz และ 5 Hz จะเห็นได้ว่า ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ที่ได้จากกระบวนการเปรียบเทียบแบบเดียวกัน ไม่ว่าจะ เป็น MAE หรือ MSE จะได้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่เหมือนกัน สังเกตได้จากเส้นกราฟที่ทับกันพอดี และจะมีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่ได้จากกระบวนการเปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และ MSE ดังภาพที่ 84

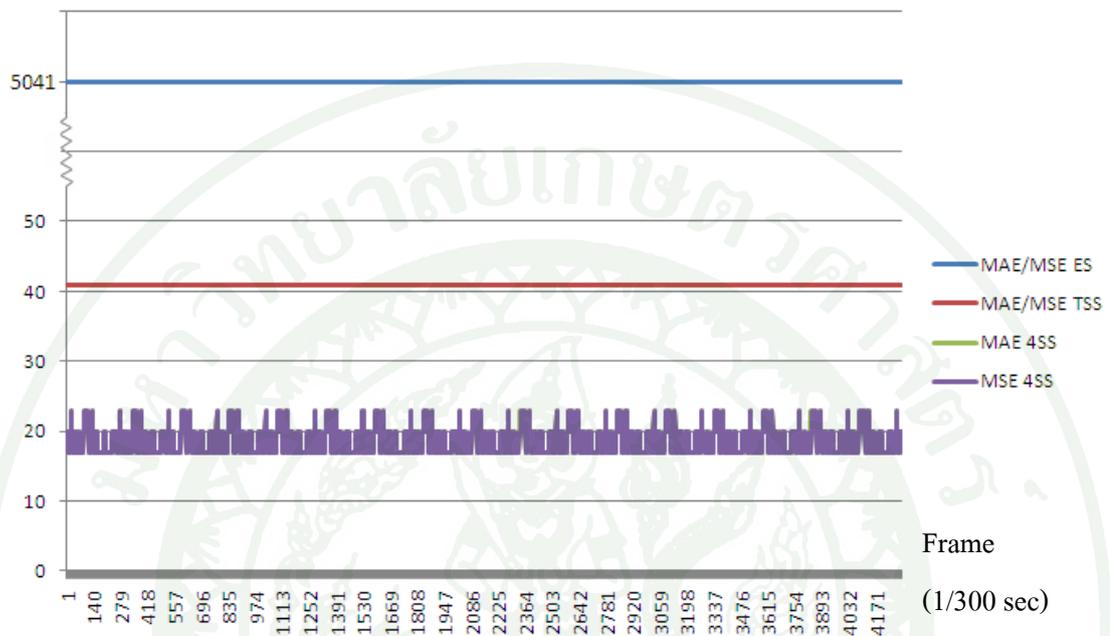


ภาพที่ 84 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 1A ถึง 1F

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบระหว่างกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าที่ใช้ในกระบวนการค้นหา ระหว่าง Exhaustive Search, Three Step Search และ Four Step Search จะพบว่า เมื่อเรากำหนดขนาดของกรอบมาโครเท่ากับ 70 พิกเซล และค่า Search Parameter เท่ากับ 35 พิกเซล เราจะได้พื้นที่ค้นหา (Search Area) มีขนาดเท่ากับ 140 x 140 พิกเซล ซึ่งในพื้นที่ค้นหานี้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search จะต้องใช้จำนวนครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในแต่ละเฟรม เท่ากับ 5041 ครั้ง ส่วน Three Step Search ใช้ 41 ครั้ง และ Four Step Search จะใช้ 17-23 ครั้ง ดังภาพที่ 85 ในการวิเคราะห์ภาพวิดีโอที่บันทึกในการทดลอง 1A – 1F นั้นจะวิเคราะห์ภาพจำนวน 4300 เฟรม เมื่อคิดเป็น Computation Time โดยนำขนาดของกรอบมาโครที่จะต้องทำการเปรียบเทียบซึ่งเท่ากับ 70 พิกเซล คูณกับจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครและคูณด้วยจำนวนเฟรมที่วิเคราะห์ซึ่งเท่ากับ 4,300 เฟรม จะได้ Computation Time ของ

Exhaustive Search เท่ากับ 1,517,341,000 ครั้ง, Three Step Search เท่ากับ 12,341,000 ครั้ง และ Four Step Search จะได้ตั้งแต่ 5,117,000 จนถึง 6,923,000 ครั้ง

จำนวน(ครั้ง)



ภาพที่ 85 เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เปรียบเทียบกรอบมาโครที่วัดได้จากการทดลอง 1A ถึง 1F

จากการทดลองที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความถี่ที่ได้คือ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz เมื่อเปรียบเทียบกับ ความถี่ 2 Hz, 3 Hz และ 5 Hz ที่เป็นสัญญาณอินพุทของมอเตอร์กระแสตรง ผลการทดลองที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

## การทดลองที่ 2

ทำการทดลองโดยใช้อัลกอริทึมเดียวกับการทดลองที่ 1 ทั้งหมด แต่เปลี่ยนวัตถุที่ทำการวิเคราะห์เป็นอากาศยาน โดยนำแผ่นภาพแมทริกซ์ติดตั้งด้านหน้าของอากาศยานและติดตั้งกล้องที่สามารถบันทึกภาพวีดิทัศน์ด้วยเฟรมเรตสูง กับอากาศยานกับชุดยึดติดกล้องบริเวณด้านใต้ห้องนักบิน ติดเครื่องยนต์และโดยปรับให้เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ MAST เท่ากับ 6,000 รอบต่อนาทีและบันทึกภาพวีดิทัศน์การสั่นสะเทือนของอากาศยานด้วยกล้องที่สามารถบันทึกภาพ วีดิทัศน์ด้วยเฟรมเรตสูง เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 โดยจะใช้อัลกอริทึมเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองที่ 1 คือส่วนกระบวนการเปรียบเทียบจะใช้ MAE และ MSE และในส่วนกระบวนการค้นหาจะใช้ Exhaustive Search, Three Step Search, Four Step Search

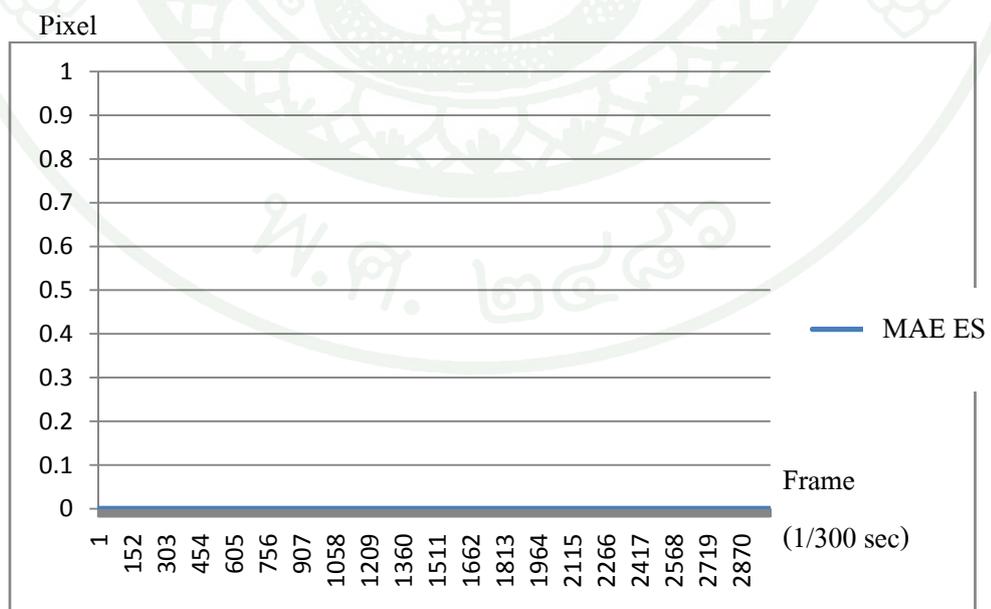
### ภาพที่ 86 การเซตอัปการทดลองที่ 2

ในการทดลองที่ 2 จะใช้สมมุติฐานเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 กล่าวคือทำการติดตั้งแผ่นภาพแมทริกซ์ไว้ด้านหน้าของอากาศยานและบันทึกการสั่นสะเทือนของอากาศยานด้วยกล้องที่ติดตั้งอยู่ใต้ห้องนักบินดังภาพที่ 86 และ 87

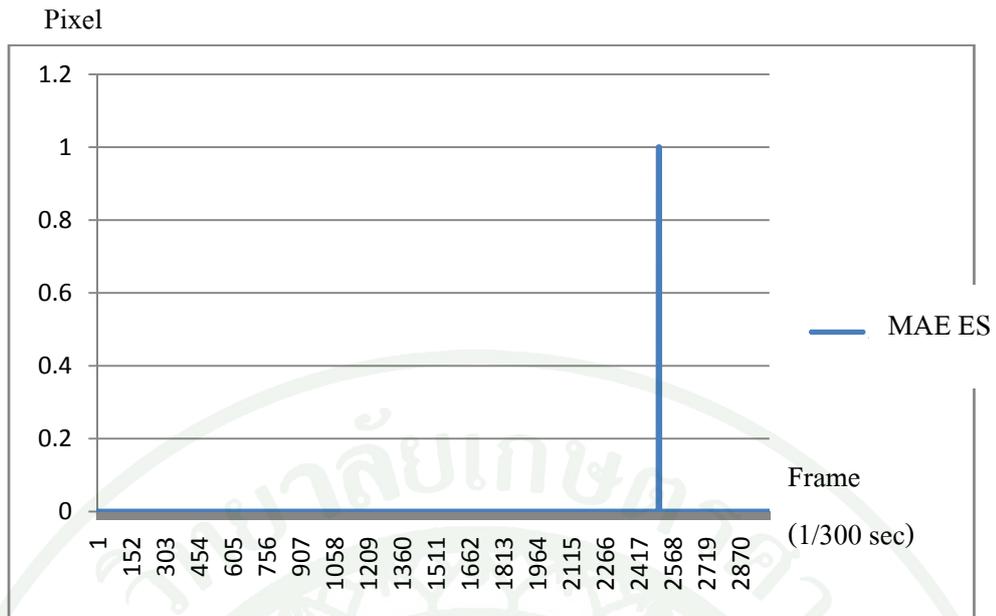


ภาพที่ 87 การติดตั้งภาพแมทริกซ์บริเวณ ด้านหน้าของอากาศยาน

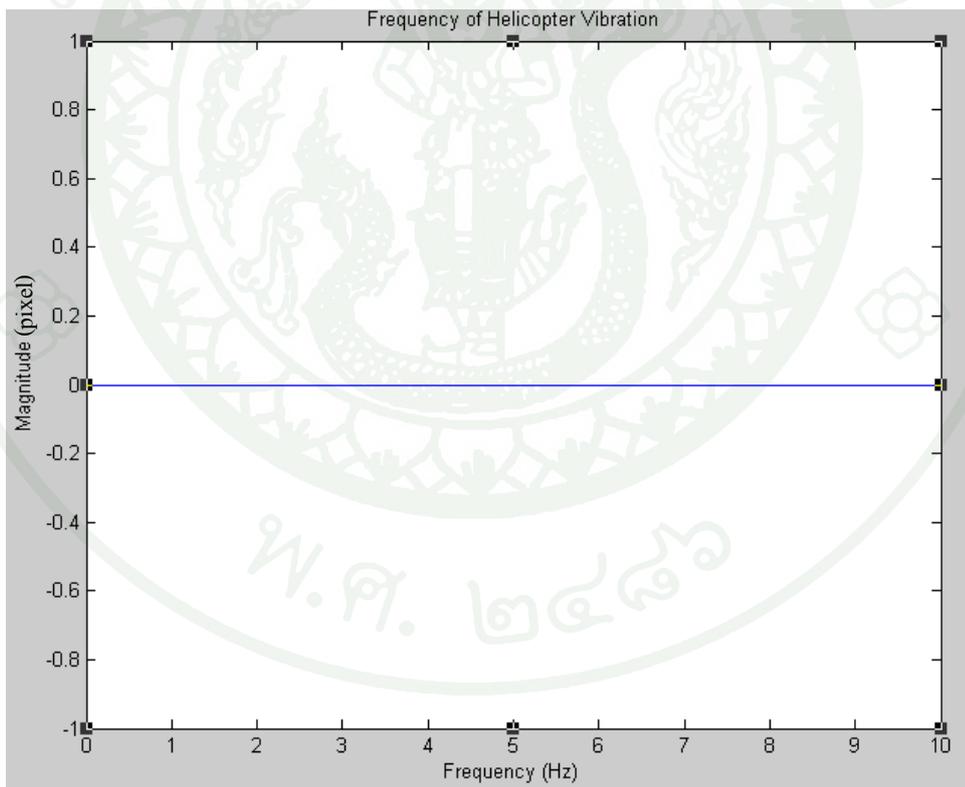
การทดลองที่ 2A ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 88



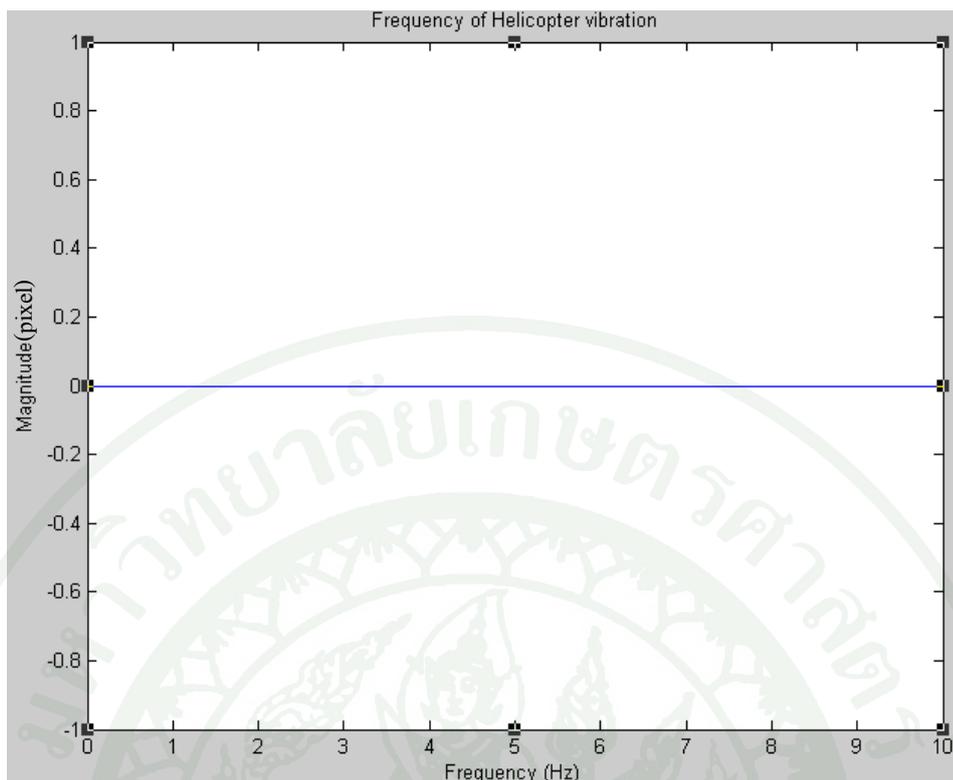
ภาพที่ 88 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2A



ภาพที่ 89 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2A



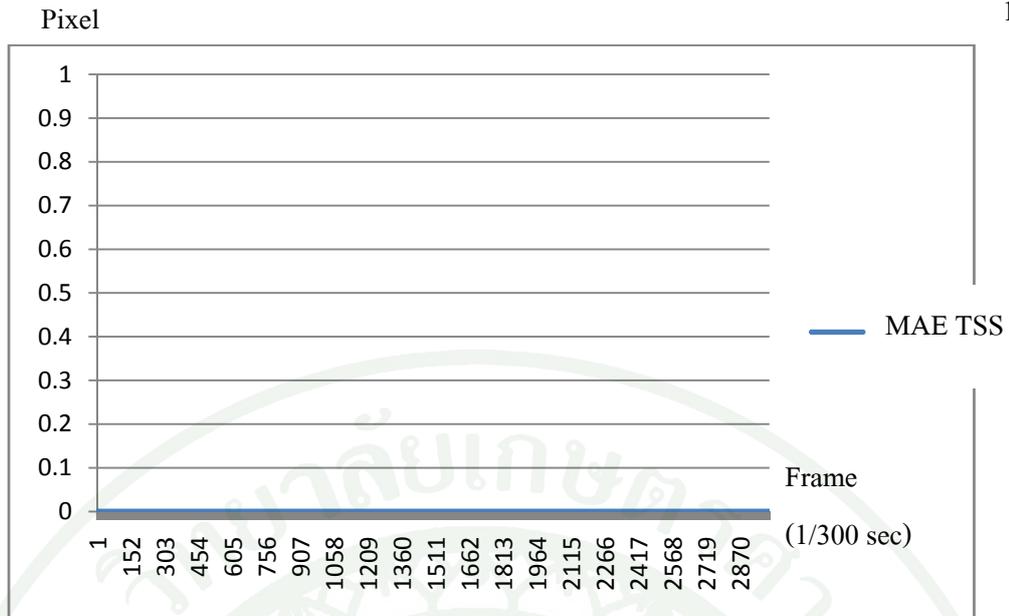
ภาพที่ 90 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2A



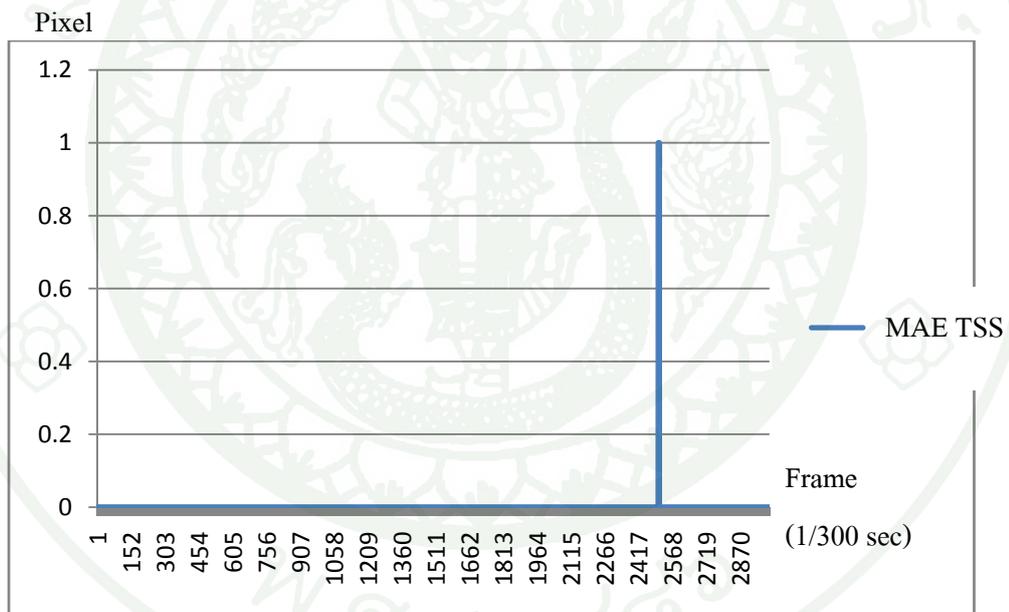
ภาพที่ 91 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2A

ในการทดลองที่ 2A ไม่สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งได้ และตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวระดับได้เล็กน้อยและการวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวดิ่งได้ 0 Hz และในแนวระดับได้ 0 Hz ในการทดลองที่ 2A นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 1681 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

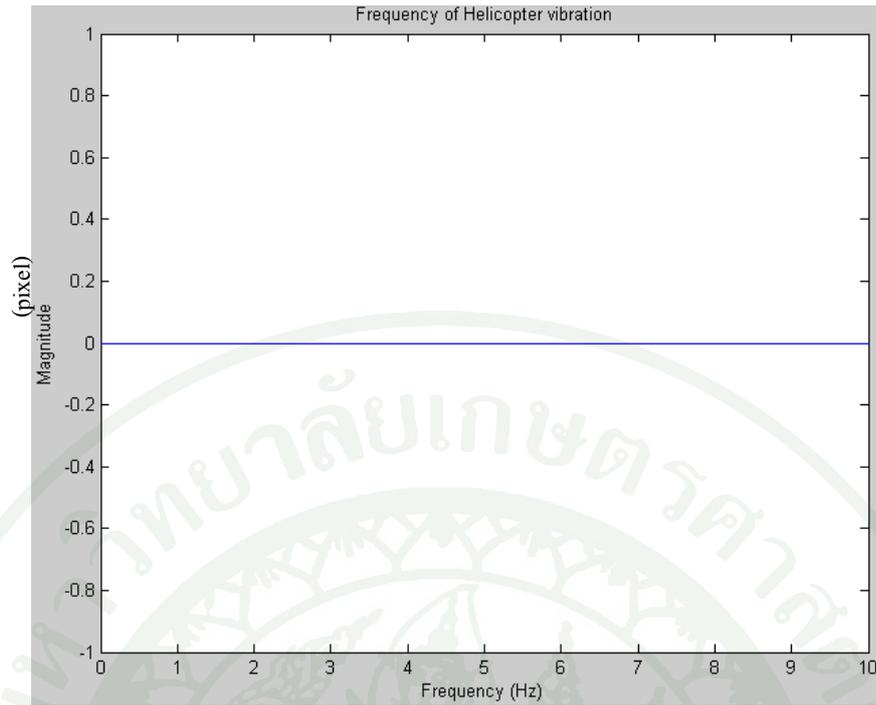
การทดลองที่ 2B ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Three Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 92



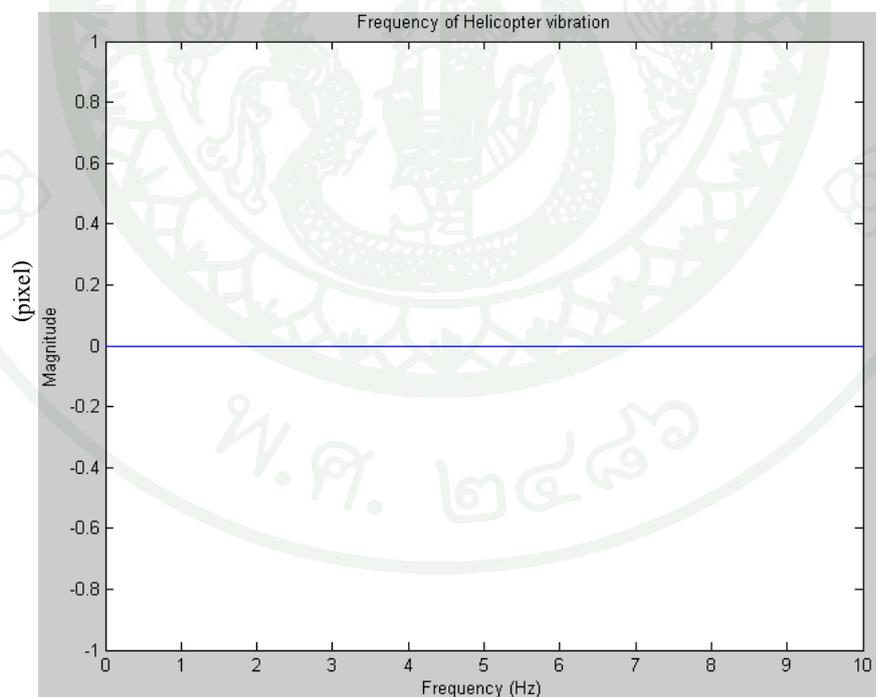
ภาพที่ 92 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2B



ภาพที่ 93 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2B



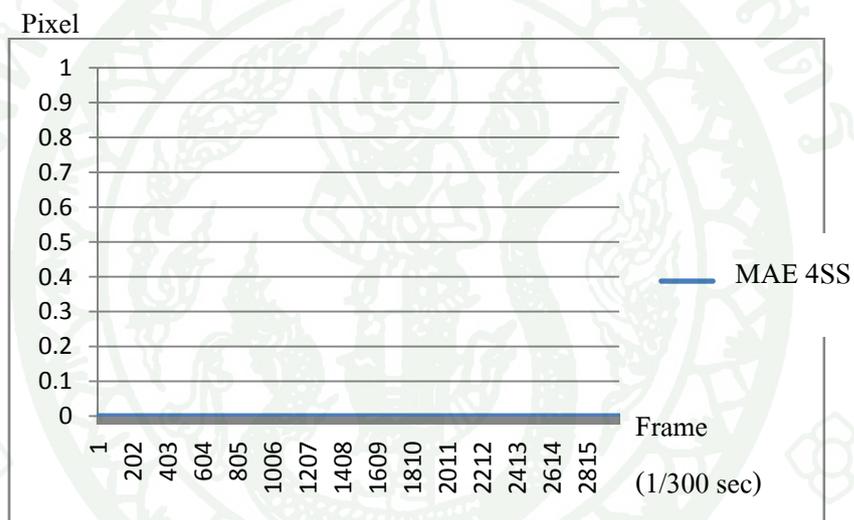
ภาพที่ 94 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2B



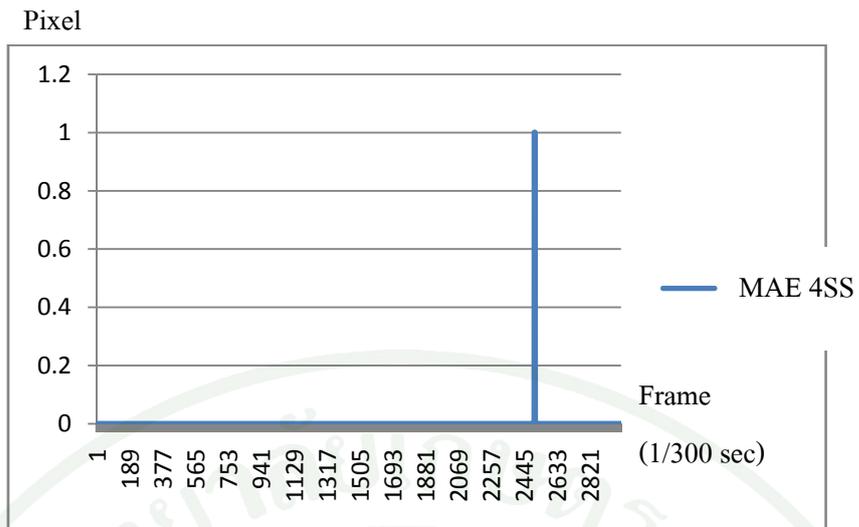
ภาพที่ 95 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2B

ในการทดลองที่ 2B ไม่สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้และตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวระดับได้เพียงเล็กน้อย และการวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 0 Hz และในแนวระดับได้ 0 Hz ในการทดลองที่ 2B นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 33 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

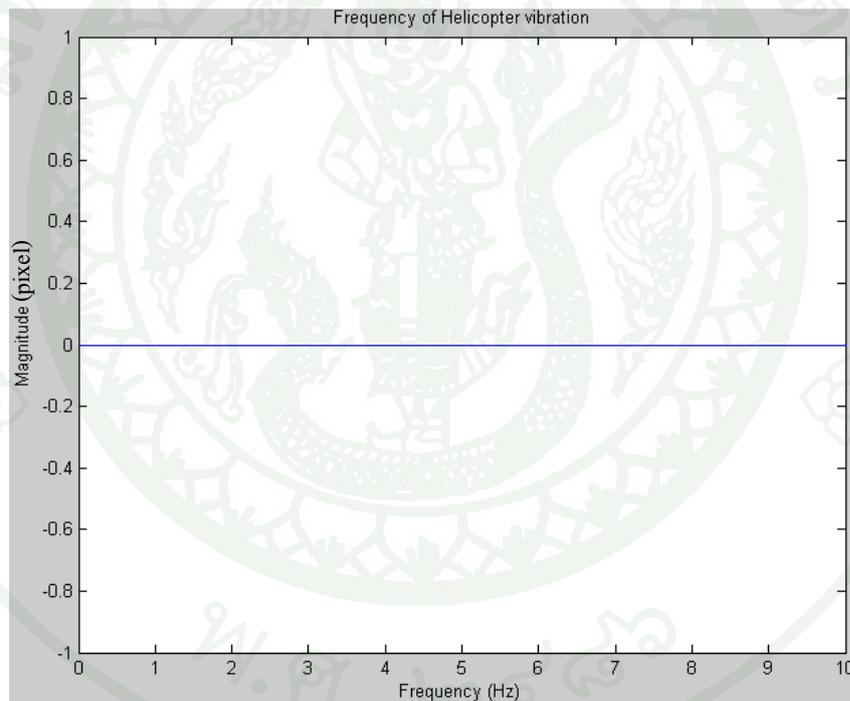
การทดลองที่ 2C ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Four Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 96



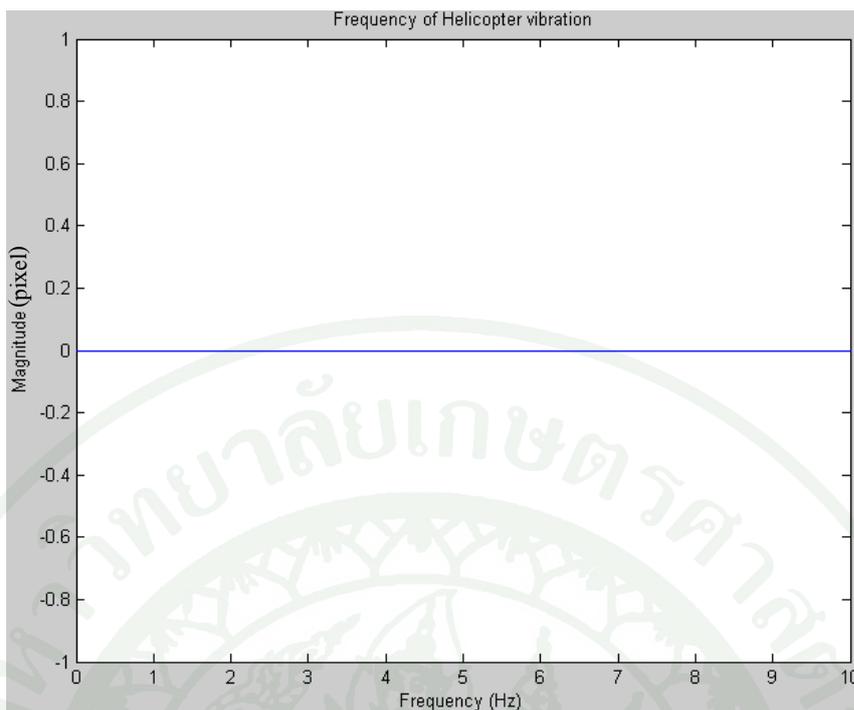
ภาพที่ 96 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2C



ภาพที่ 97 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2C



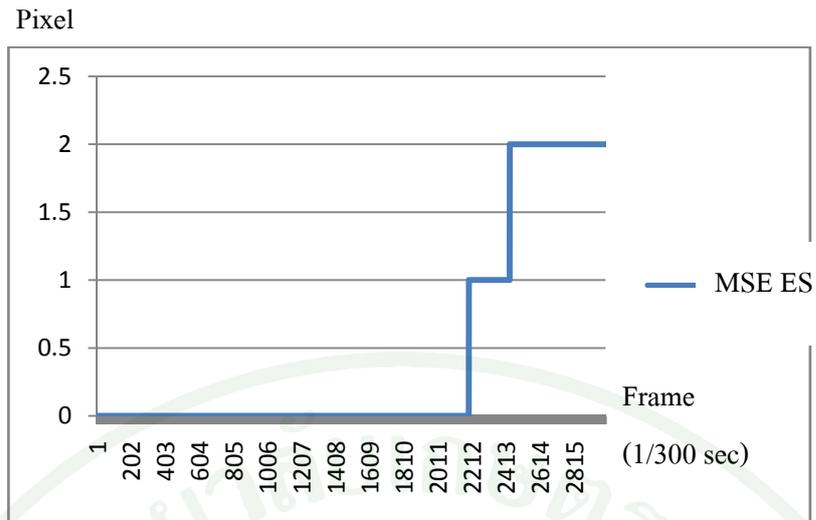
ภาพที่ 98 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2C



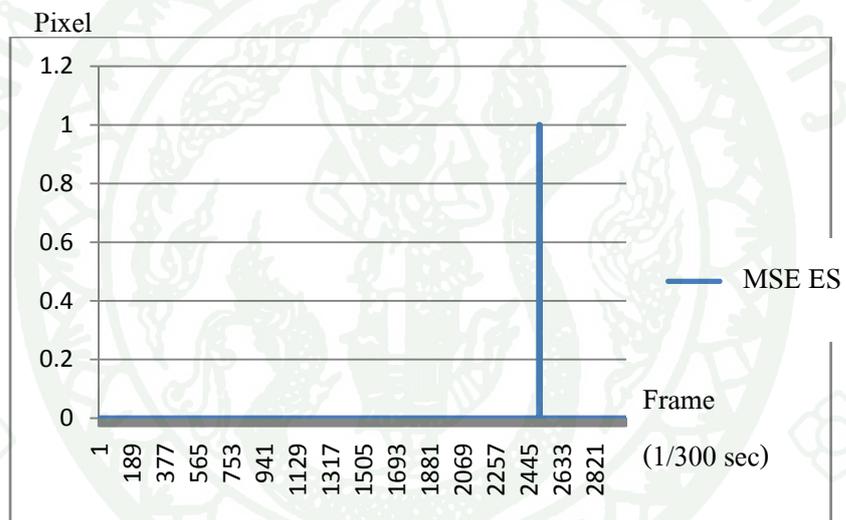
ภาพที่ 99 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2C

ในการทดลองที่ 2C ไม่สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งได้ และตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวระดับได้เล็กน้อยและการวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวดิ่งได้ 0 Hz และในแนวระดับได้ 0 Hz ในการทดลองที่ 2C นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 17 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

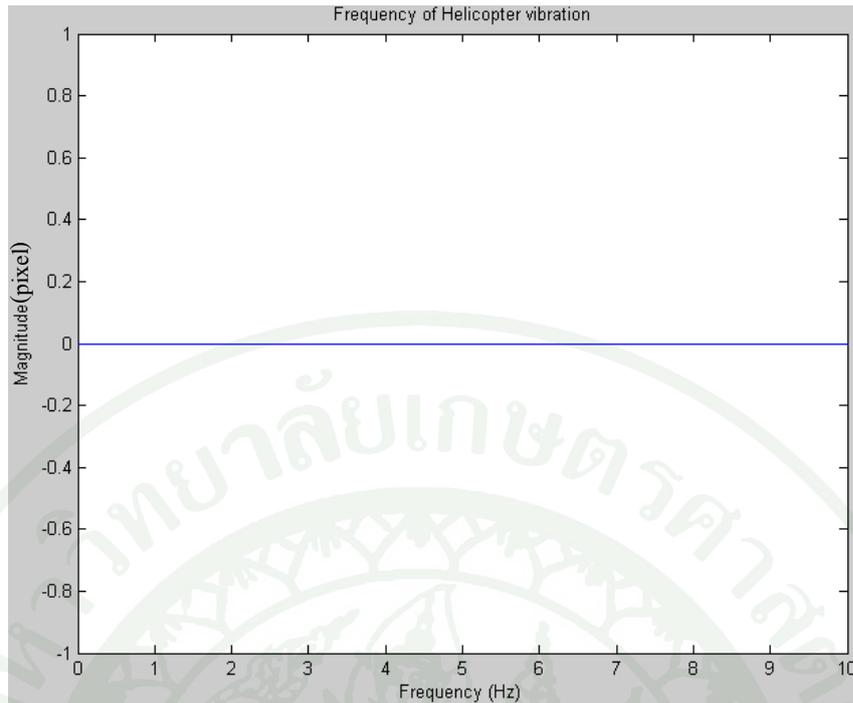
การทดลองที่ 2D ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 100



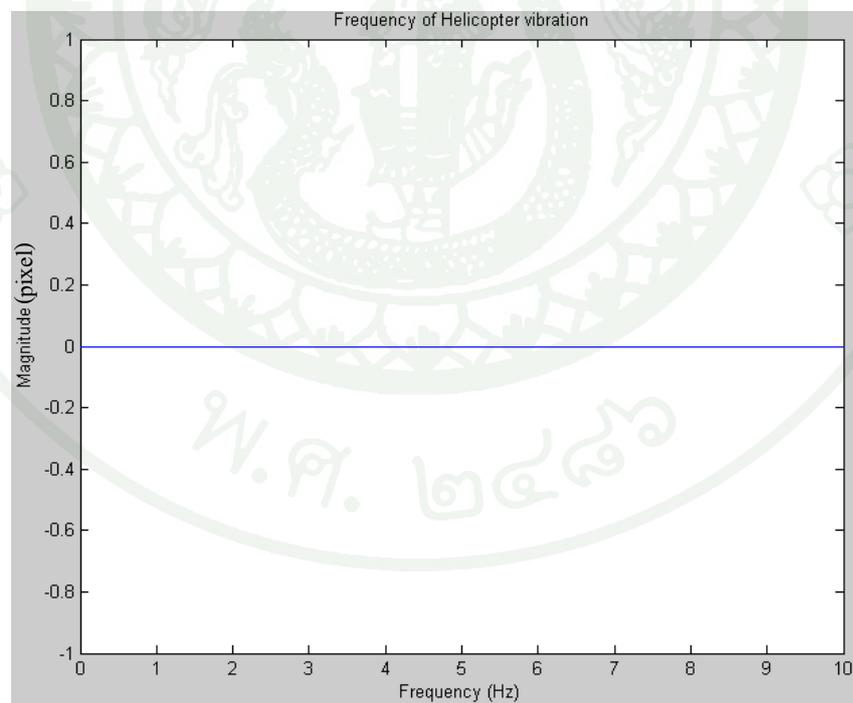
ภาพที่ 100 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2D



ภาพที่ 101 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2D



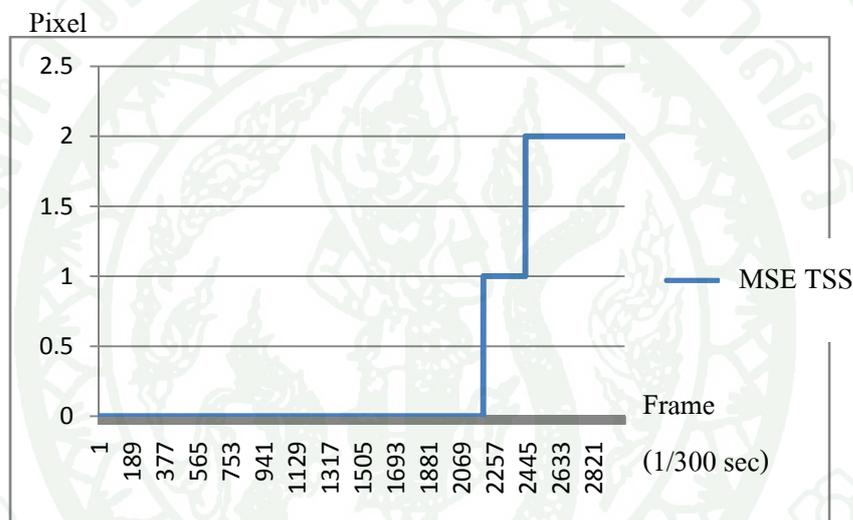
ภาพที่ 102 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2D



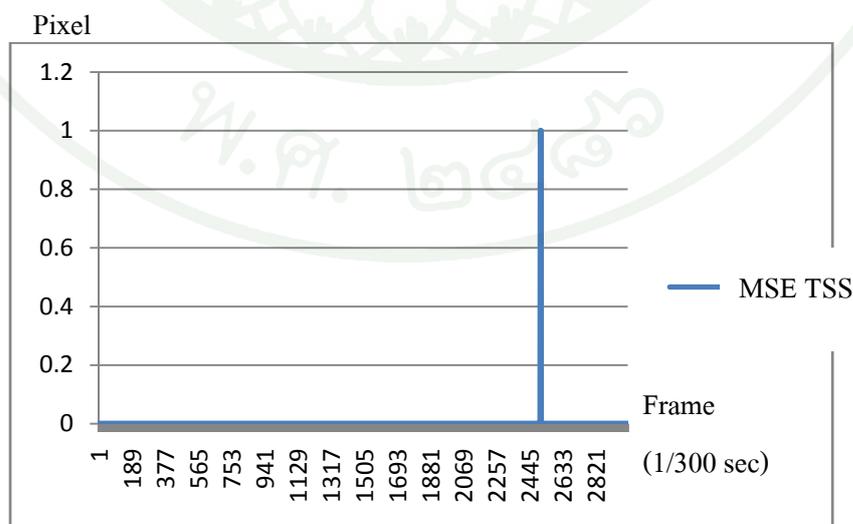
ภาพที่ 103 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2D

ในการทดลองที่ 2D สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวระดับได้เพียงเล็กน้อย และการวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 0 Hz และในแนวระดับได้ 0 Hz ในการทดลองที่ 2C นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 1681 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

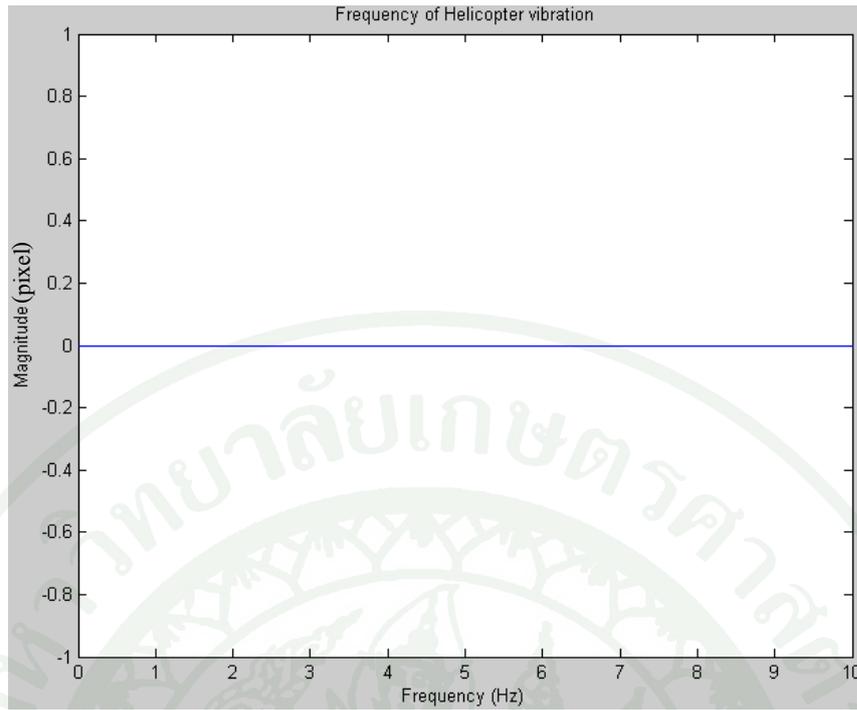
การทดลองที่ 2E ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Three Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 104



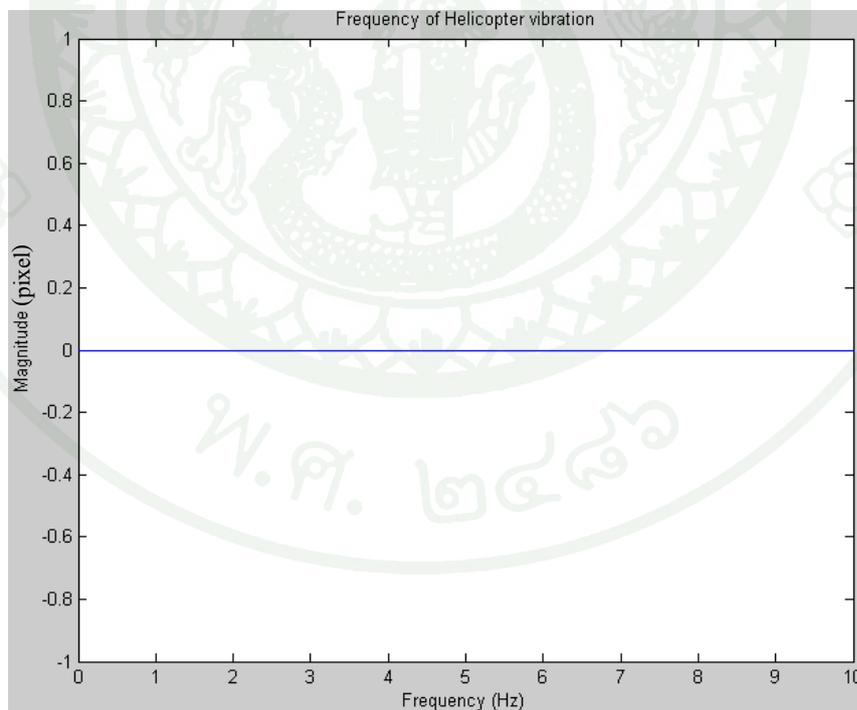
ภาพที่ 104 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2E



ภาพที่ 105 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2E



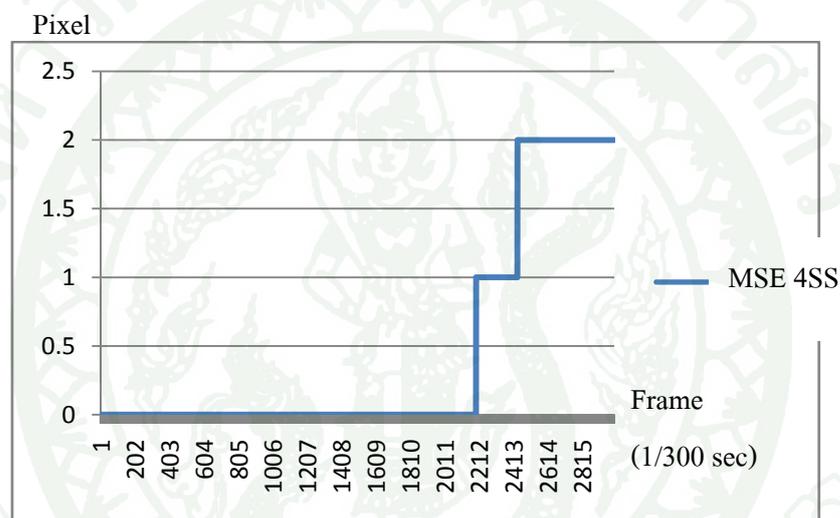
ภาพที่ 106 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2E



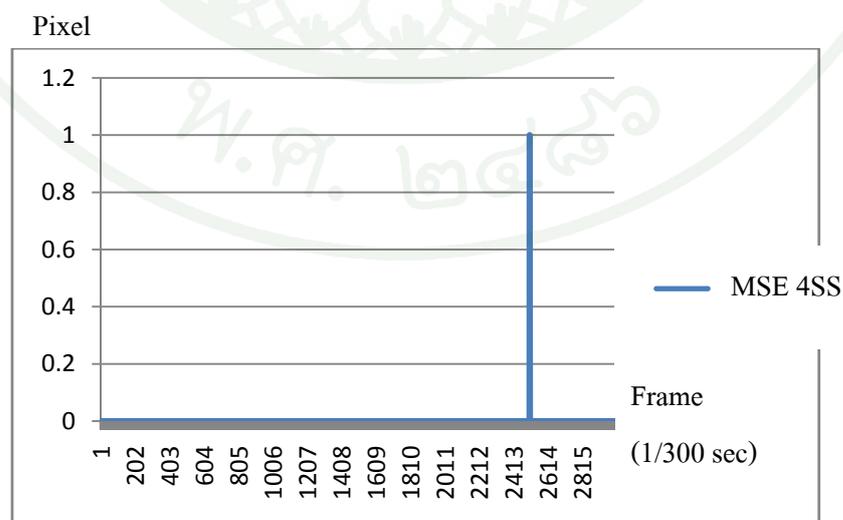
ภาพที่ 107 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2E

ในการทดลองที่ 2E สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวระดับได้เพียงเล็กน้อย และการวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 0 Hz และในแนวระดับได้ 0 Hz ในการทดลองที่ 2E นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 33 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

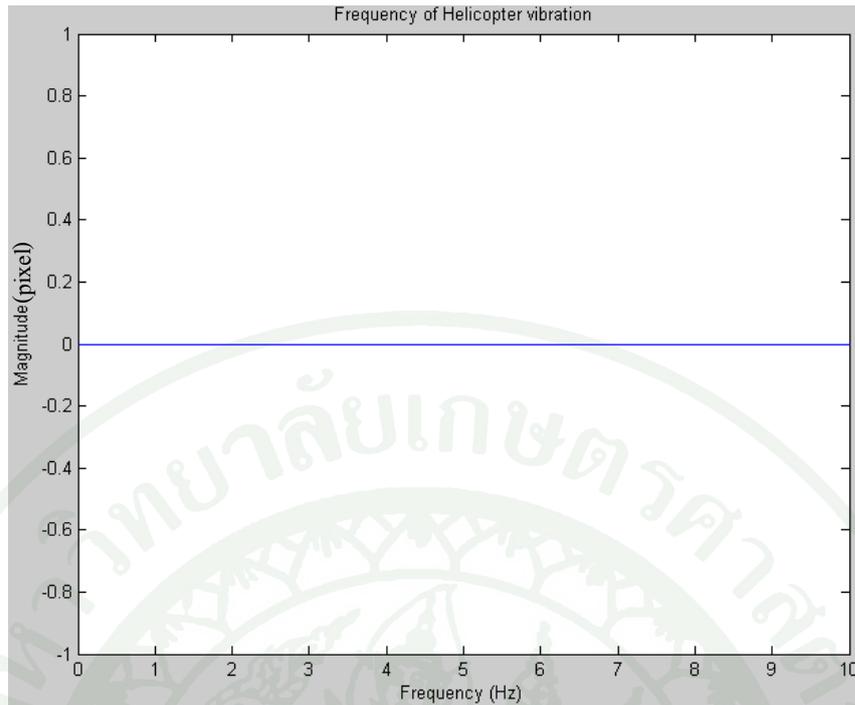
การทดลองที่ 2F ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Four Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 108



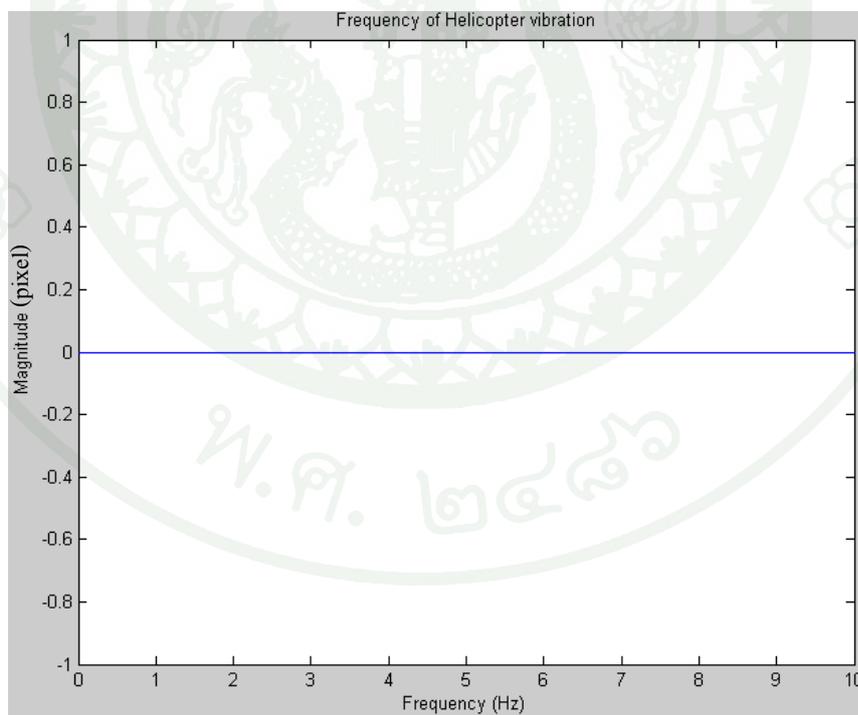
ภาพที่ 108 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2F



ภาพที่ 109 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2F



ภาพที่ 110 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2F



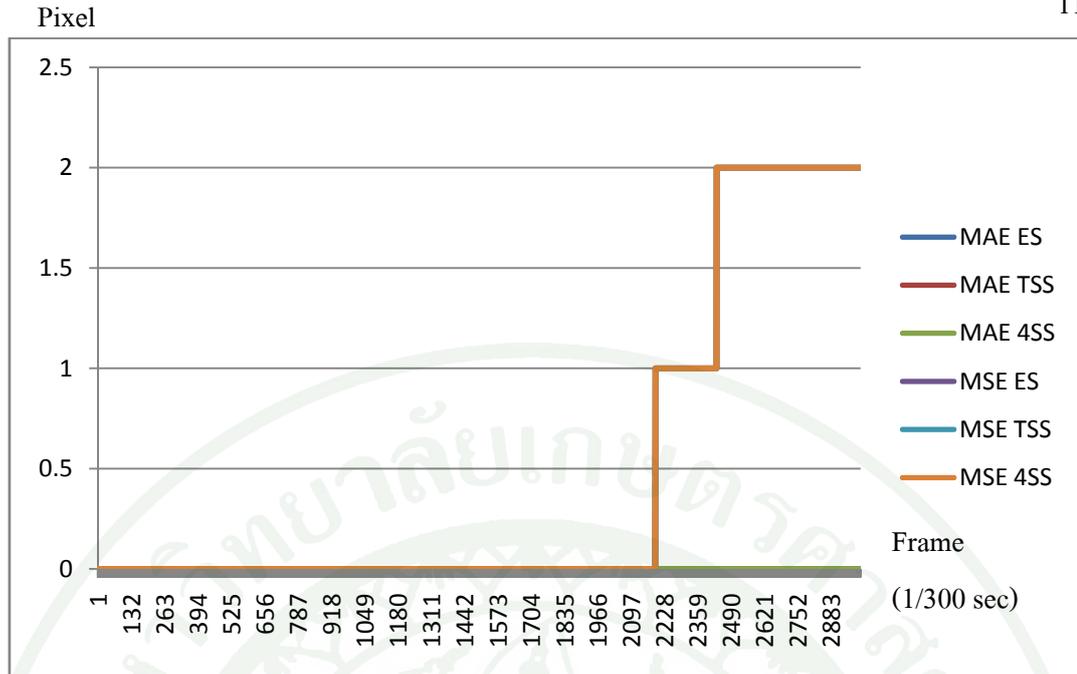
ภาพที่ 111 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 2F

ในการทดลองที่ 2F สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวระดับได้เพียงเล็กน้อย และการวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่ หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้ง ได้ 0 Hz และในแนวระดับได้ 0 Hz ในการทดลองที่ 2E นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 17 ครั้ง ในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

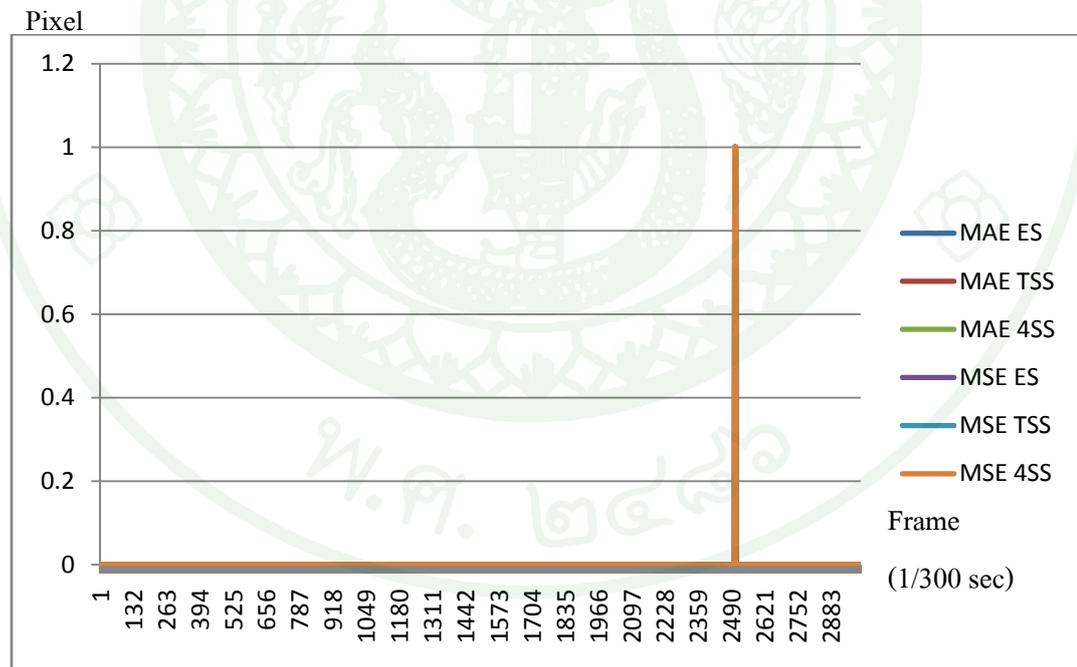
## ผลการทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 แบ่งการทดลองเป็น 6 แบบโดยใช้อัลกอริทึมที่แตกต่างกัน โดยในส่วนกระบวนการเปรียบเทียบจะใช้ MAE และ MSE และในส่วนกระบวนการค้นหาจะใช้ Exhaustive Search, Three Step Search, Four Step Search

จากการทดลองที่ 2A – 2F ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองคือ ไม่สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ หรือการสั่นสะเทือนได้หรือได้เพียงเล็กน้อย และผลการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนของภาพทั้งแนวตั้งและแนวระดับเท่ากับ 0 Hz ซึ่งถือเป็นความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานที่วิเคราะห์ได้ เหตุที่ไม่สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการสั่นสะเทือนได้เนื่องจากขนาดของแผ่นภาพแมทริกซ์ที่บันทึกด้วยภาพวิดีโอที่บันทึกมีขนาดเล็กและระยะระหว่างกล้องที่ติดตั้งบนอากาศยานกับแผ่นภาพแมทริกซ์ตั้งอยู่ห่างกัน เพื่อความปลอดภัยของผู้ทำการทดลองและเป็นไปตามข้อบังคับการบินเมื่อภาพแมทริกซ์ถูกบันทึกด้วยกล้องวิดีโอที่บันทึกมีขนาดเล็กและบันทึกที่ระยะห่าง การสั่นสะเทือนของภาพที่บันทึกได้จะเป็นการสั่นสะเทือนที่มีแอมพลิจูดน้อยๆ ที่มีขนาดเข้าใกล้ 1 พิกเซล อัลกอริทึมจะทำการประมาณค่าการเคลื่อนที่น้อยนี้ว่าเป็น 0 หรือ 1 พิกเซลเท่านั้น ทำให้การวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการสั่นสะเทือนในการทดลองนี้ไม่ถูกต้อง



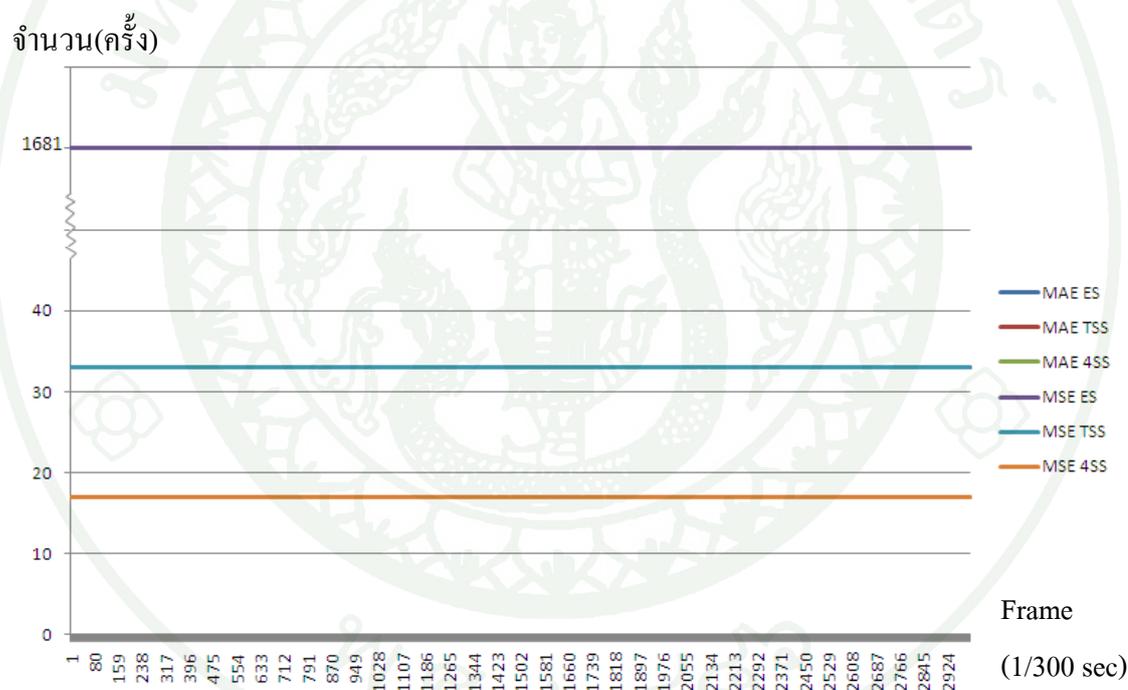
ภาพที่ 112 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากกรทดลอง 2A ถึง 2F



ภาพที่ 113 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากกรทดลอง 2A ถึง 2F

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบระหว่างกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าที่ใช้ในกระบวนการค้นหา ระหว่าง Exhaustive Search, Three Step Search และ

Four Step Search จะพบว่า เมื่อเรากำหนดขนาดของกรอบมาโครเท่ากับ 40 พิกเซล และค่า Search Parameter เท่ากับ 20 พิกเซล เราจะได้พื้นที่ค้นหา (Search Area) มีขนาดเท่ากับ 80 x 80 พิกเซลซึ่งในพื้นที่ค้นหาี้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search จะต้องใช้จำนวนครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในแต่ละเฟรม เท่ากับ 1681 ครั้ง ส่วน Three Step Search ใช้ 33 ครั้ง และ Four Step Search จะใช้ 17 ครั้ง ดังภาพที่ 114 ในการวิเคราะห์ภาพวิดีโอที่ค้นในการทดลอง 2A – 2E นั้นจะวิเคราะห์ภาพจำนวน 3,000 เฟรม เมื่อคิดเป็น Computation Time โดยนำขนาดของกรอบมาโครที่จะต้องทำการเปรียบเทียบซึ่งเท่ากับ 40 พิกเซล คูณกับจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครและคูณด้วยจำนวนเฟรมที่วิเคราะห์ซึ่งเท่ากับ 3,000 เฟรม จะได้ Computation Time ของ Exhaustive Search เท่ากับ 201,720,000 ครั้ง, Three Step Search เท่ากับ 3,960,000 ครั้ง และ Four Step Search จะได้ตั้งแต่ 2,040,000 ครั้ง



ภาพที่ 114 เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เปรียบเทียบกรอบมาโครที่วัดได้จากการทดลอง 2A ถึง 2F

### การทดลองที่ 3

ทำการทดลองโดยใช้อัลกอริทึมเดียวกับการทดลองที่ 1 ทั้งหมด แต่เปลี่ยนวัตถุที่ทำการวิเคราะห์เป็นอากาศยาน โดยติดตั้ง แผ่นภาพแมทริกซ์กับอากาศยานดังภาพที่ 115 ทำการติดเครื่องยนต์และโดยปรับให้เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ MAST เท่ากับ 6,000 รอบต่อนาทีและบันทึกภาพวิดีโอทัศนการณ์การสั่นสะเทือนของอากาศยานด้วยกล้องที่สามารถบันทึกภาพวิดีโอทัศนการณ์ด้วยเฟรมเรตสูง เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 โดยจะใช้อัลกอริทึมเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองที่ 1 คือส่วนกระบวนการเปรียบเทียบจะใช้ MAE และ MSE และในส่วนกระบวนการค้นหาจะใช้ Exhaustive Search, Three Step Search, Four Step Search

➡ แนวการเคลื่อนที่(สั่น)  
ของอากาศยาน



กล้องถ่ายวิดีโอเฟรมเรตสูง

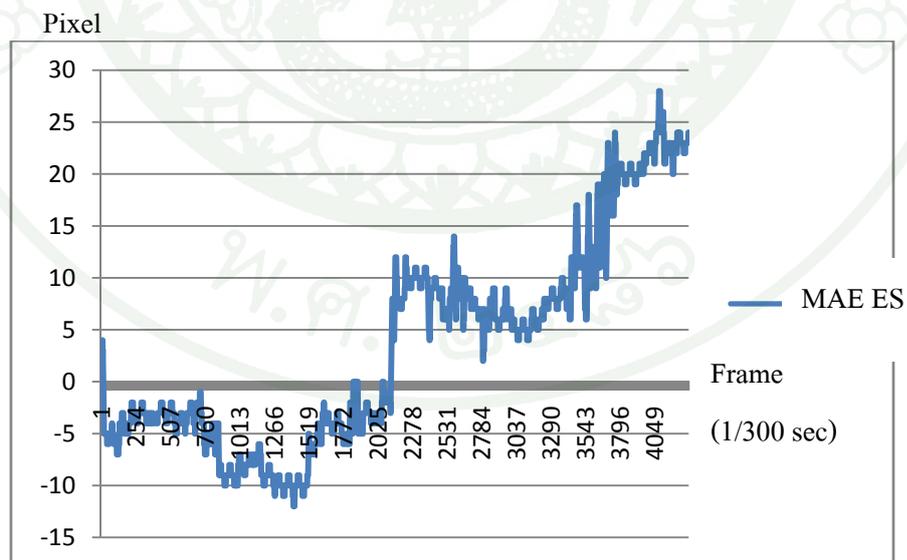
ภาพที่ 115 การเซตอัพการทดลองที่ 3

ในการทดลองที่ 3 จะใช้สมมุติฐานเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 กล่าวคือทำการติดตั้งแผ่นภาพแมทริกซ์ไว้บริเวณ Access Door ของ Avionics Compartment ด้านหน้าของอากาศยานดังภาพที่ 116

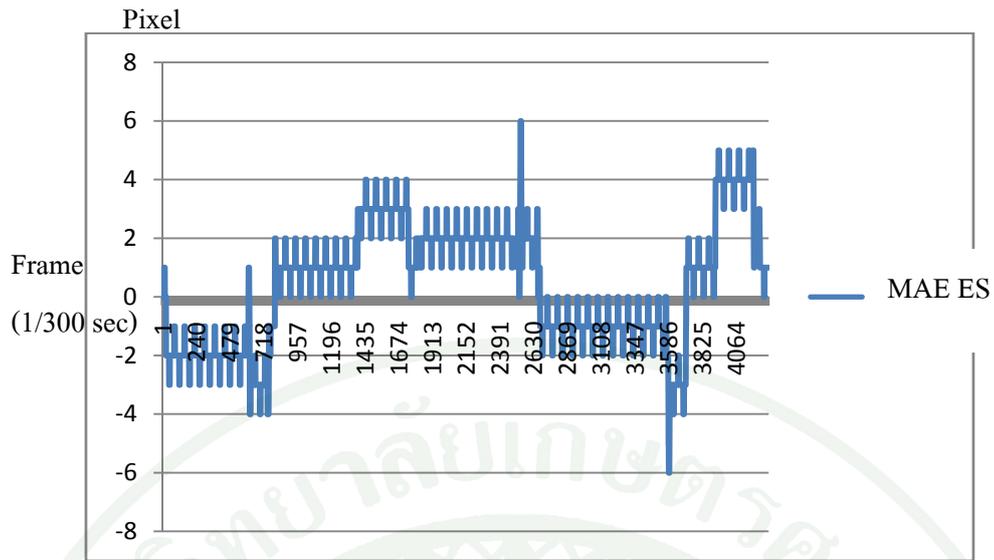


ภาพที่ 116 การติดตั้งภาพแมทริกซ์บริเวณ Avionics Compartment ของอากาศยาน

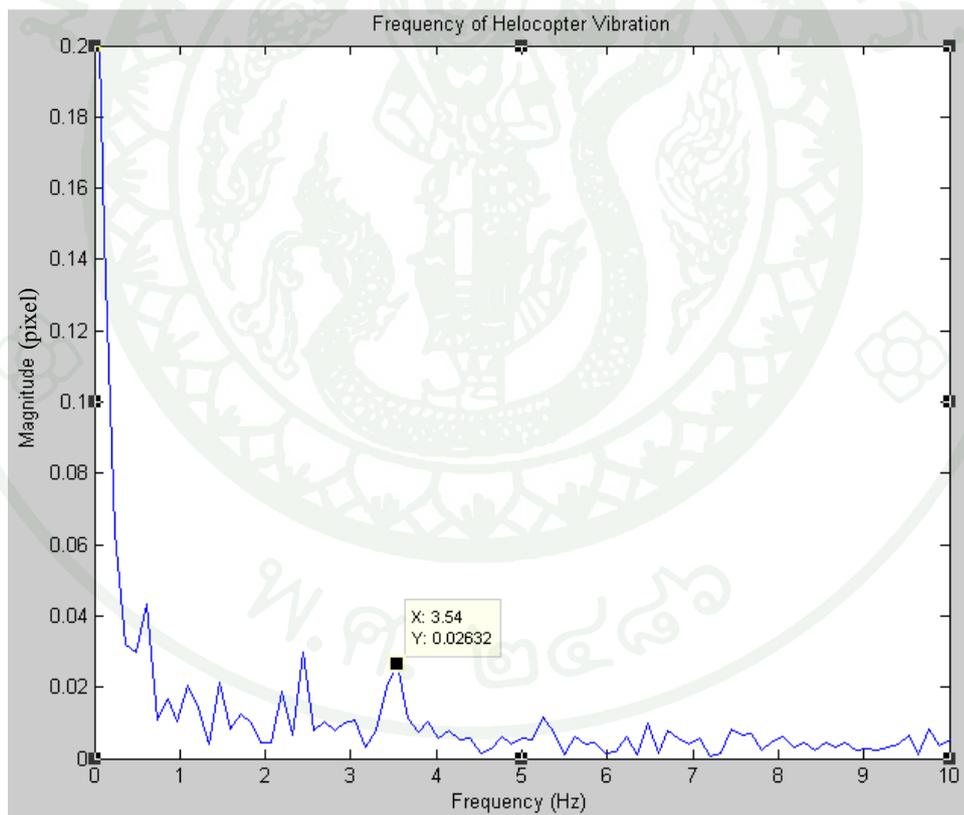
การทดลองที่ 3A ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 117



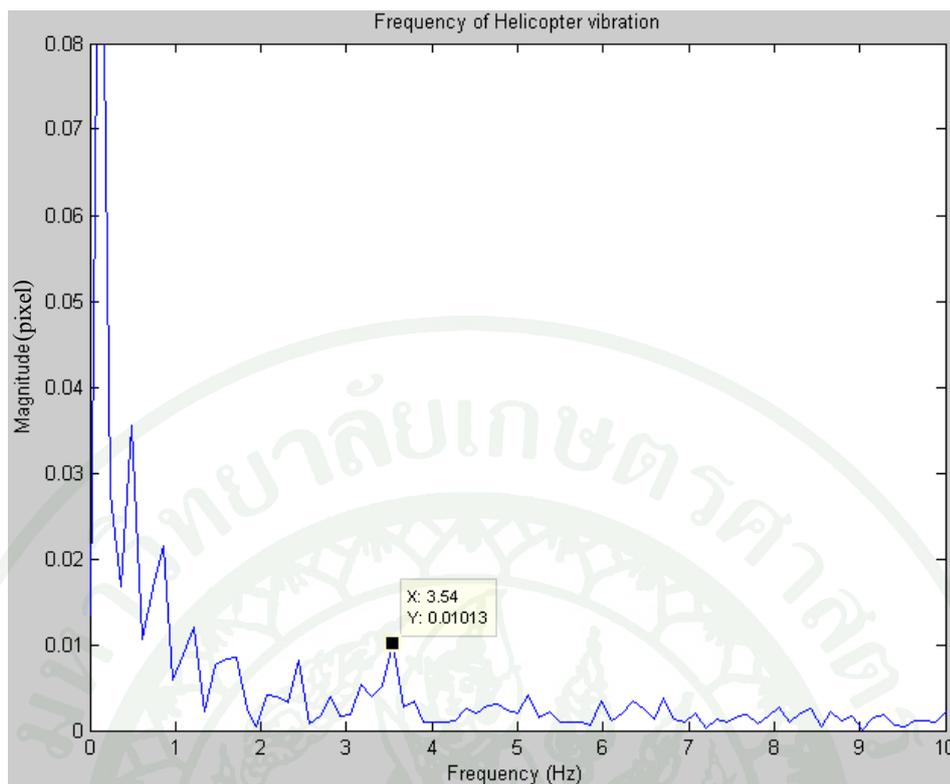
ภาพที่ 117 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวดิ่งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3A



ภาพที่ 118 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3A



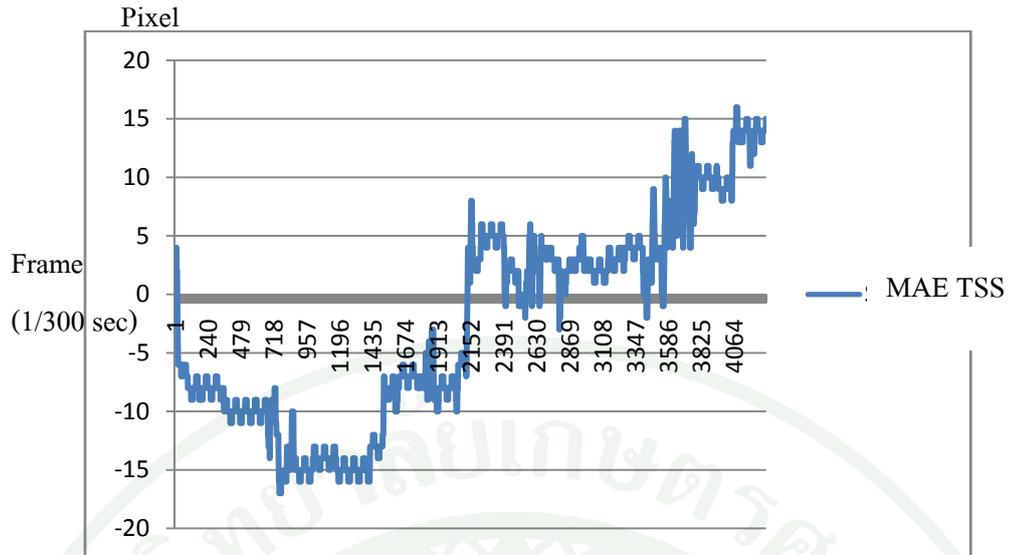
ภาพที่ 119 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3A



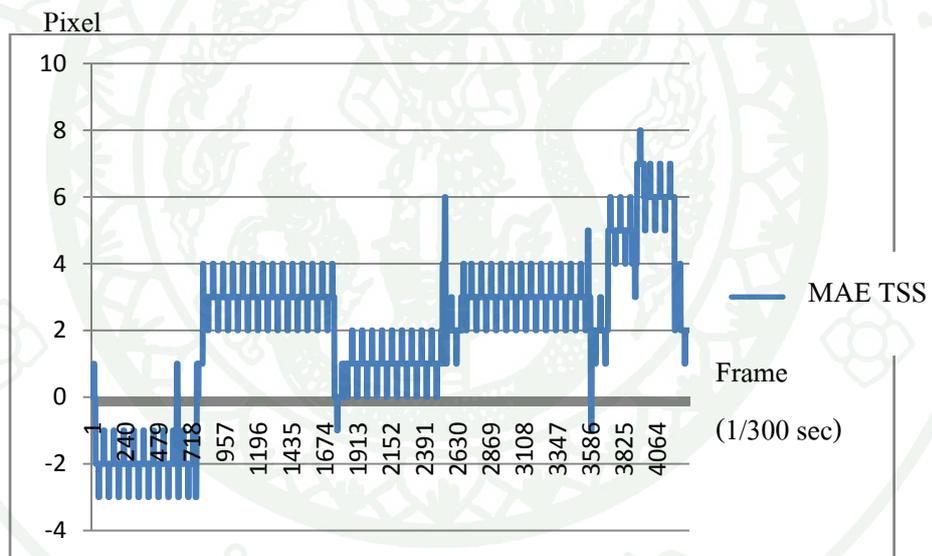
**ภาพที่ 120** ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จาก การทดลอง 3A

ในการทดลองที่ 3A นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 3.54 Hz และในแนวระดับได้ 3.54 Hz ในการทดลองที่ 3A นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 5041 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

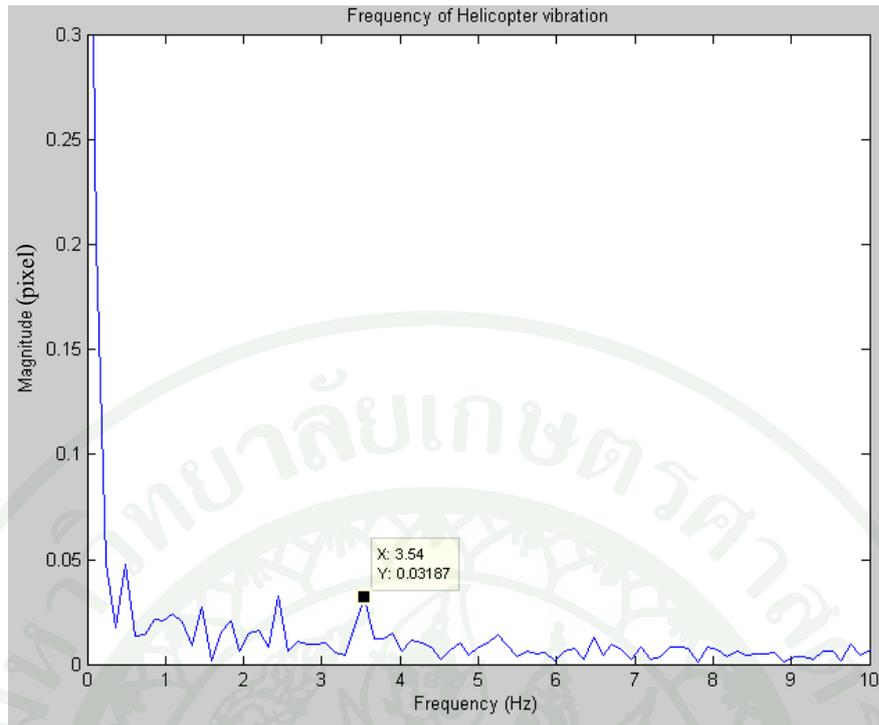
การทดลองที่ 3B ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Three Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 121



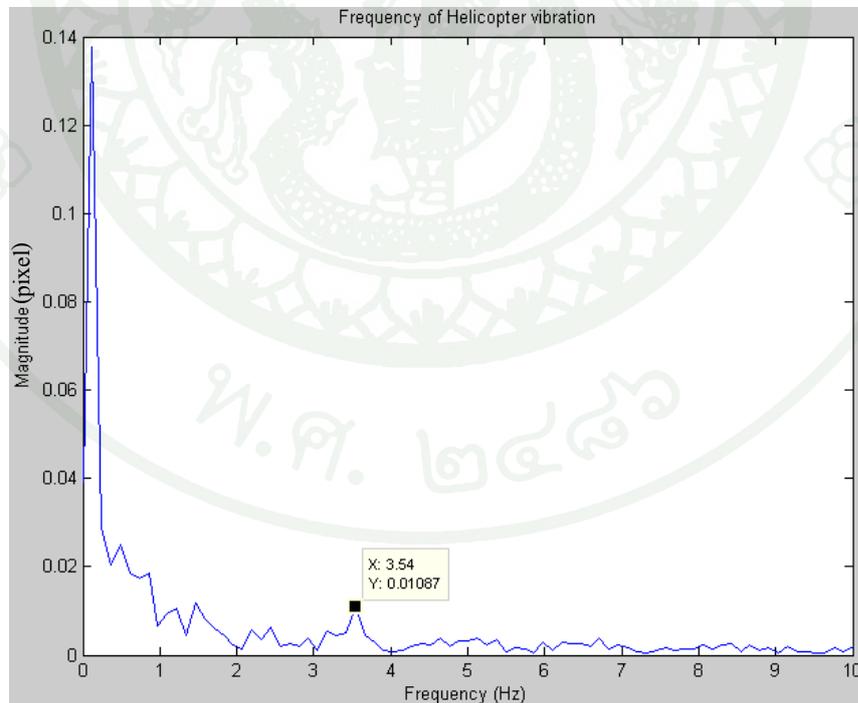
ภาพที่ 121 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3B



ภาพที่ 122 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3B



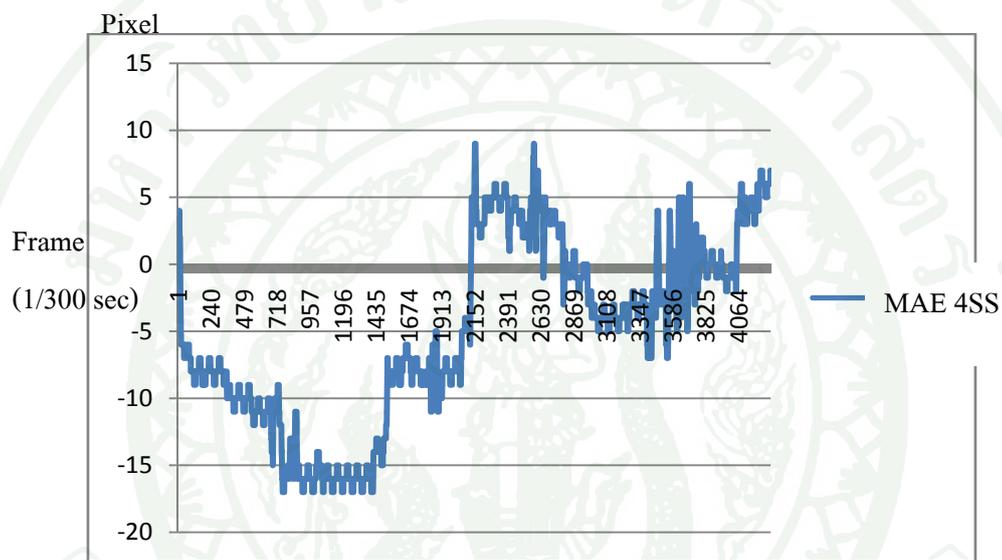
ภาพที่ 123 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวดิ่งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3B



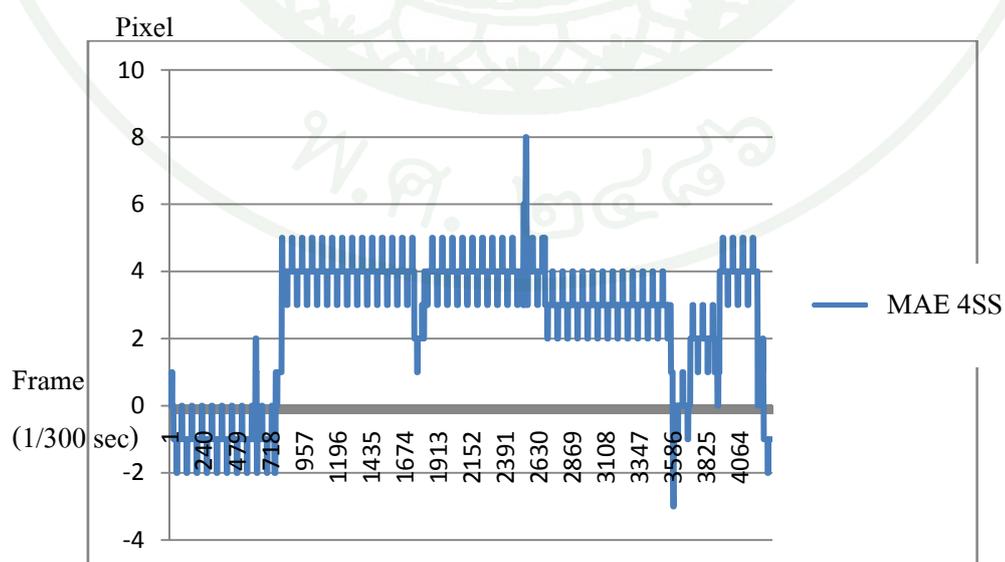
ภาพที่ 124 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3B

ในการทดลองที่ 3B นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 3.54 Hz และในแนวระดับได้ 3.54 Hz ในการทดลองที่ 3B นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่าง เฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 41 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

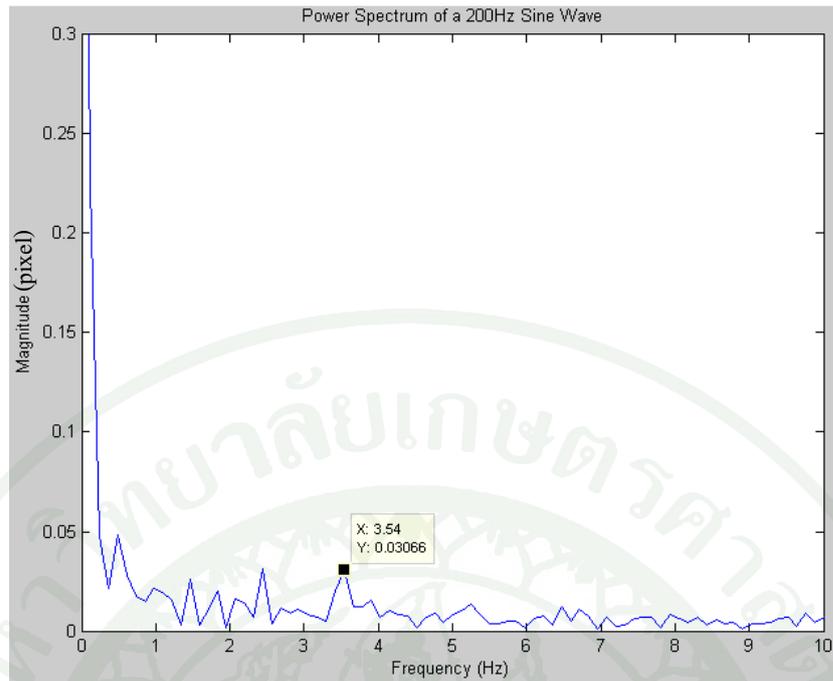
การทดลองที่ 3C ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MAE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Four Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 125



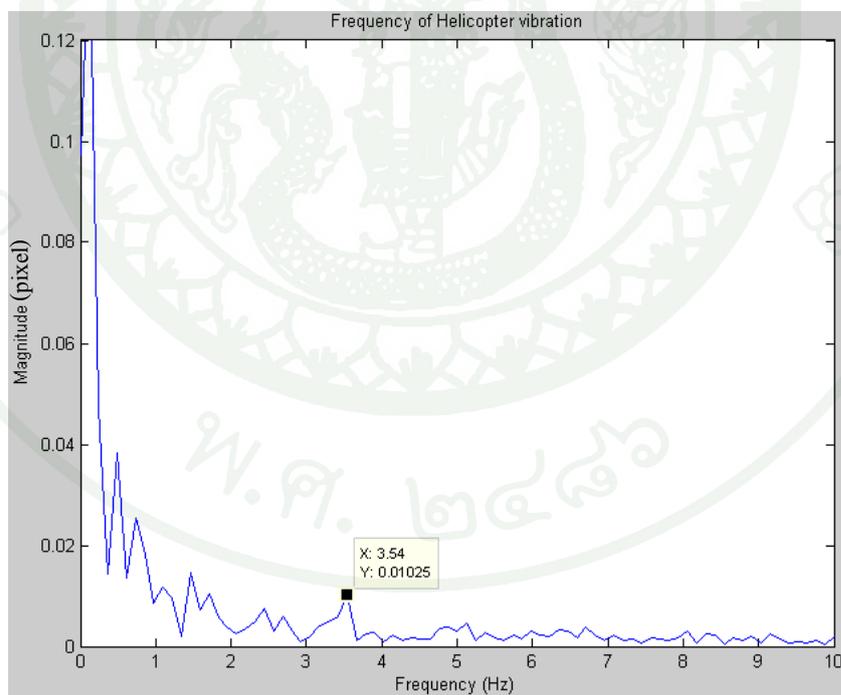
ภาพที่ 125 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3C



ภาพที่ 126 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3C



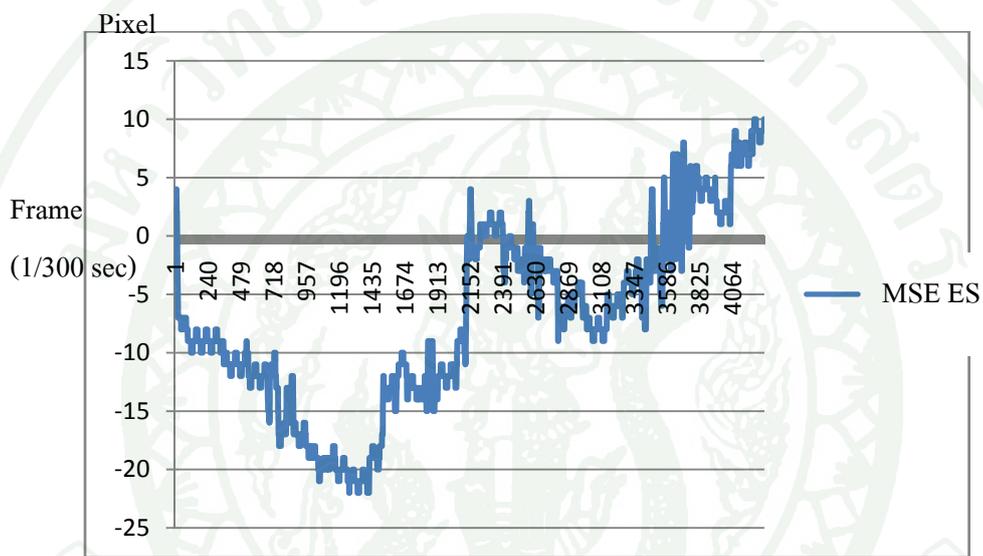
ภาพที่ 127 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3C



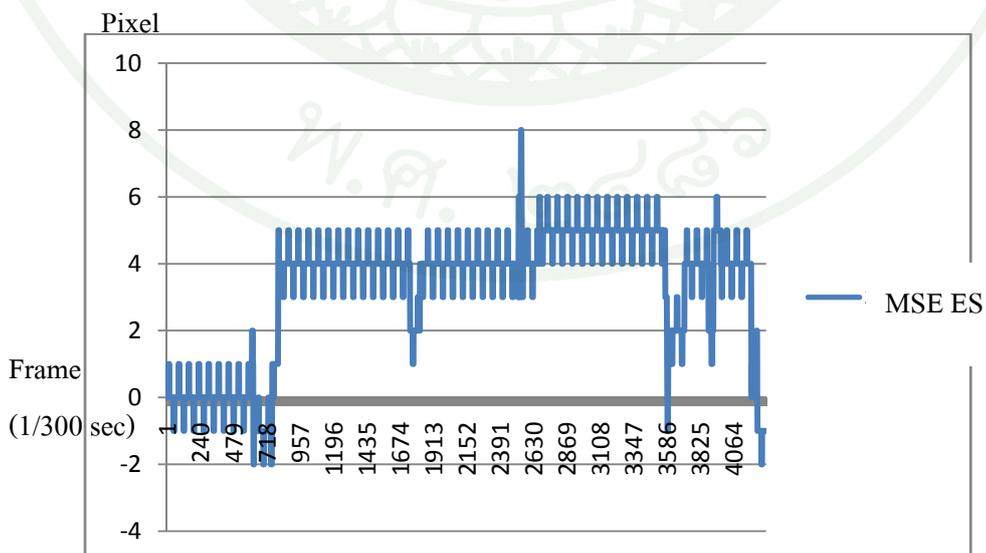
ภาพที่ 128 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3C

ในการทดลองที่ 3C นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 3.54 Hz และในแนวระดับได้ 3.54 Hz ในการทดลองที่ 3C นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 17 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

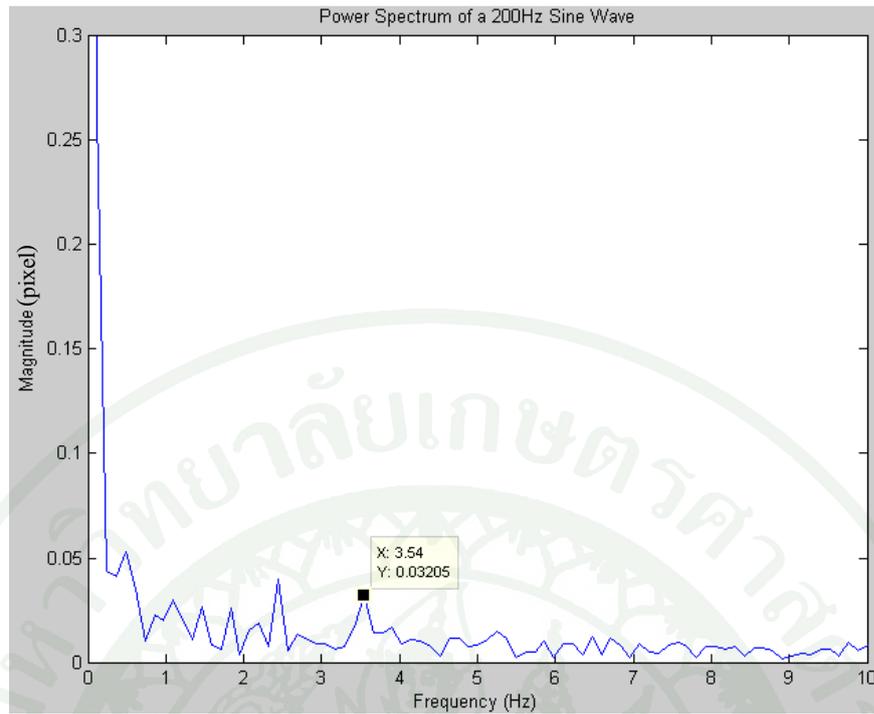
การทดลองที่ 3D ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 129



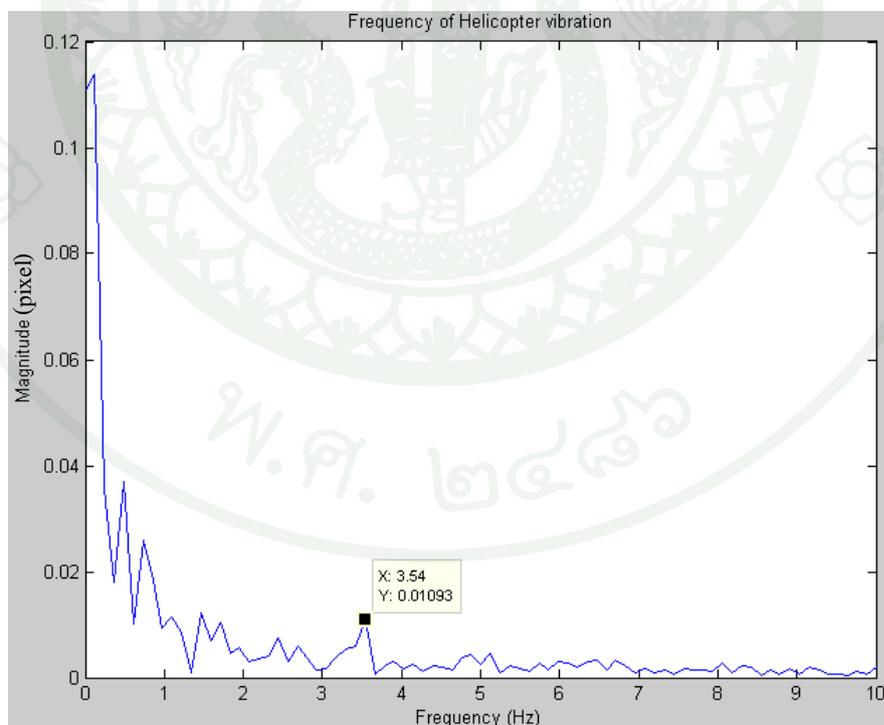
ภาพที่ 129 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3D



ภาพที่ 130 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3D



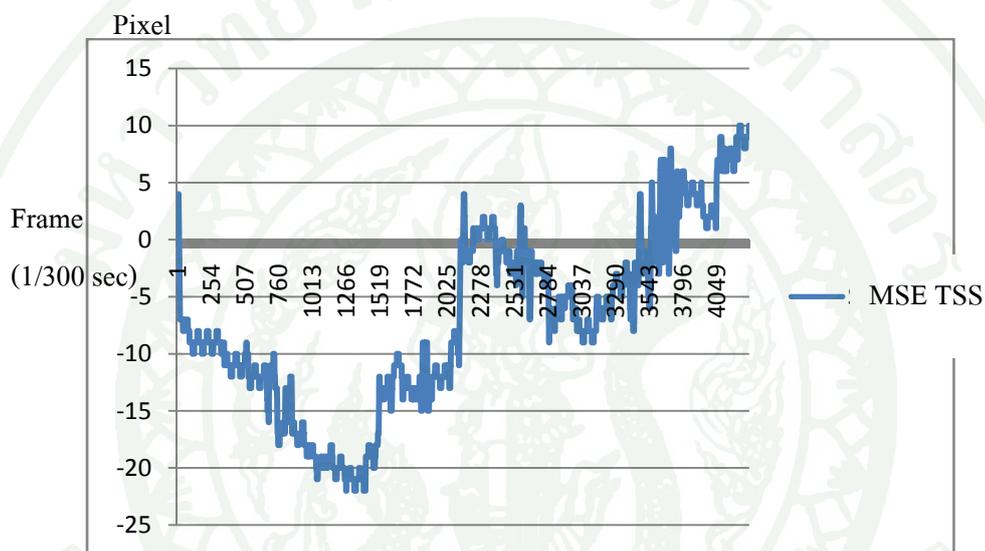
ภาพที่ 131 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3D



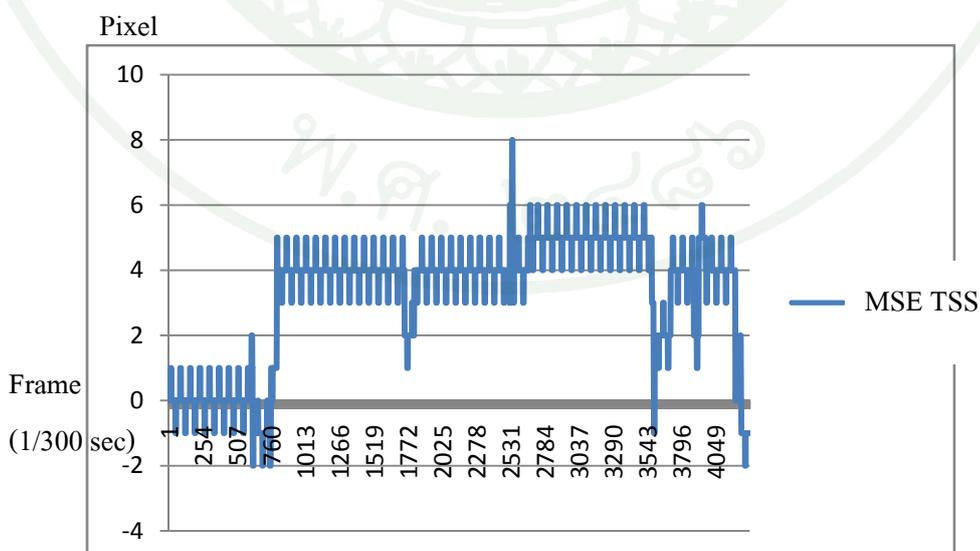
ภาพที่ 132 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3D

ในการทดลองที่ 3D นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 3.54 Hz และในแนวระดับได้ 3.54 Hz ในการทดลองที่ 3D เราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ 5041 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

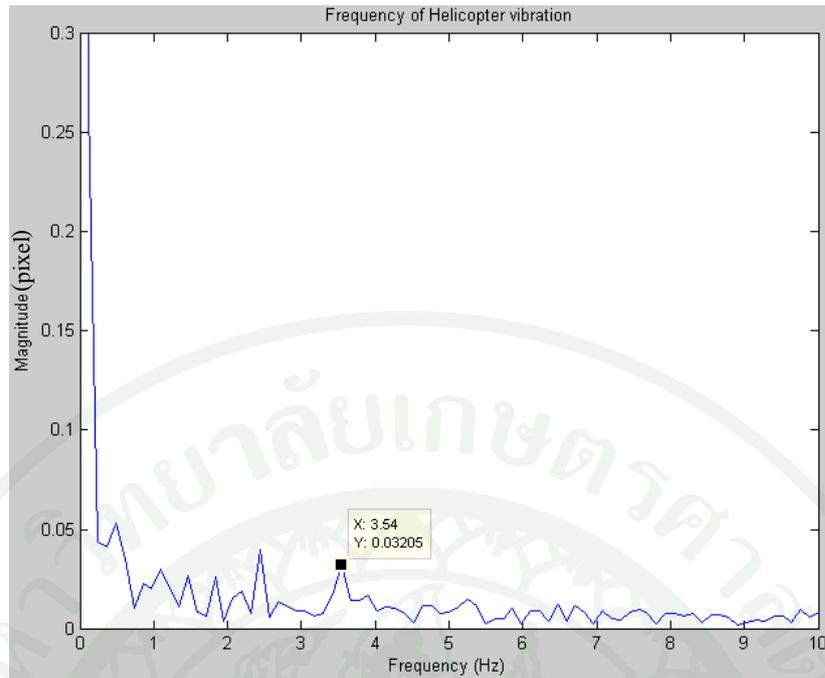
การทดลองที่ 3E ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Three Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 133



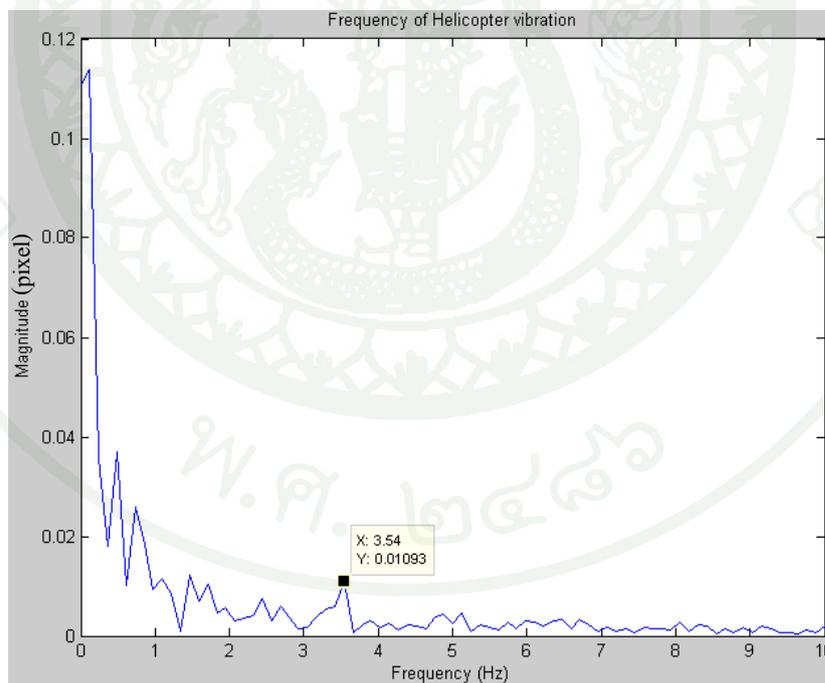
ภาพที่ 133 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3E



ภาพที่ 134 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3E



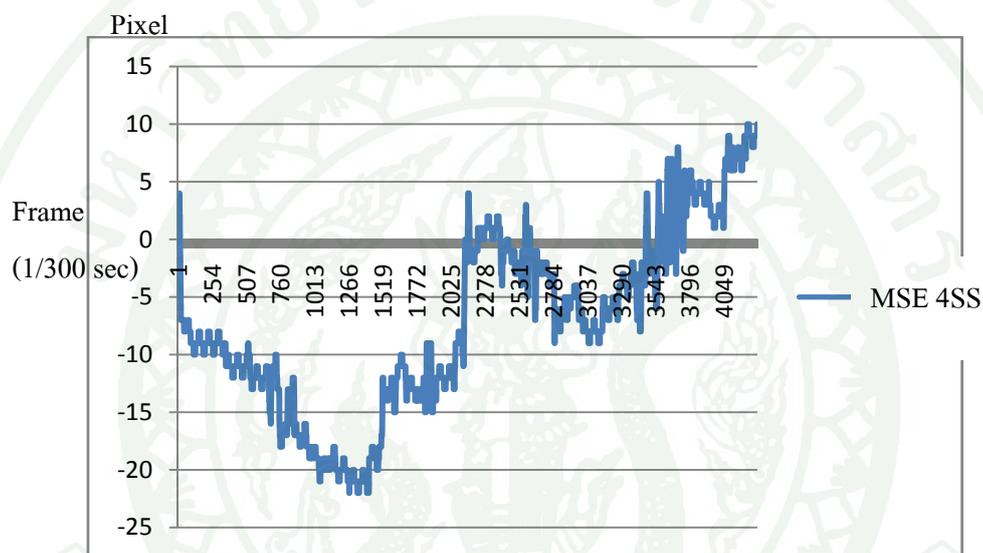
ภาพที่ 135 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3E



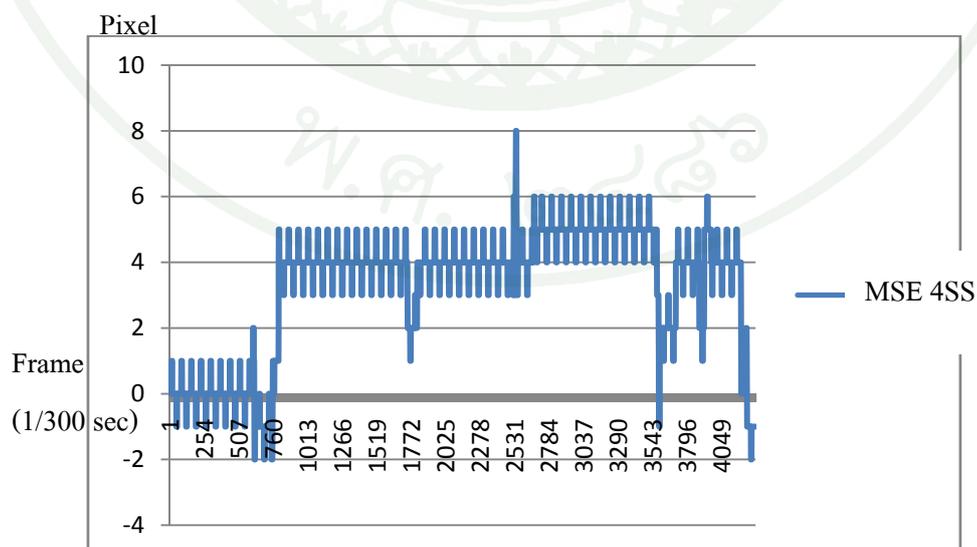
ภาพที่ 136 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3E

ในการทดลองที่ 3E นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 3.54 Hz และในแนวระดับได้ 3.54 Hz ในการทดลองที่ 3E นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโคร ระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ทั้งหมด 41 ครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

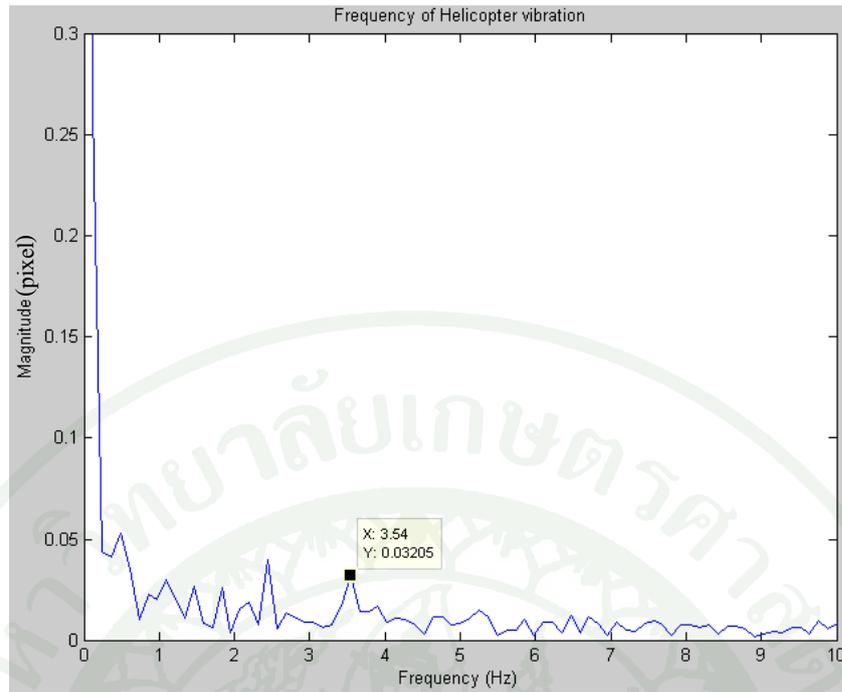
การทดลองที่ 3F ใช้อัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกรอบมาโครแบบ MSE และใช้กระบวนการค้นหาแบบ Four Step Search ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของภาพ ได้ดังภาพที่ 137



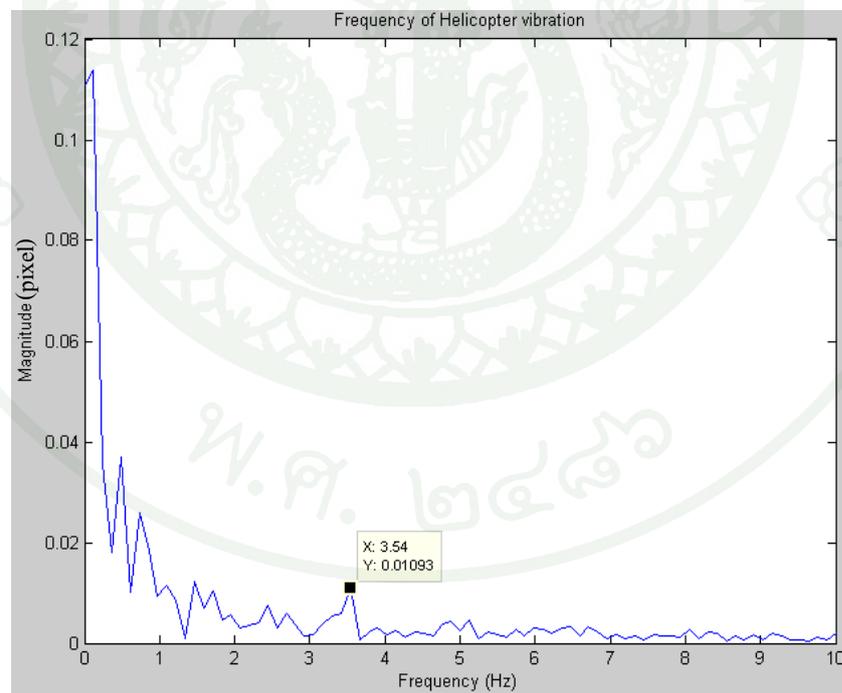
ภาพที่ 137 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3F



ภาพที่ 138 การเคลื่อนที่ของอากาศยานในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3F



ภาพที่ 139 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3F



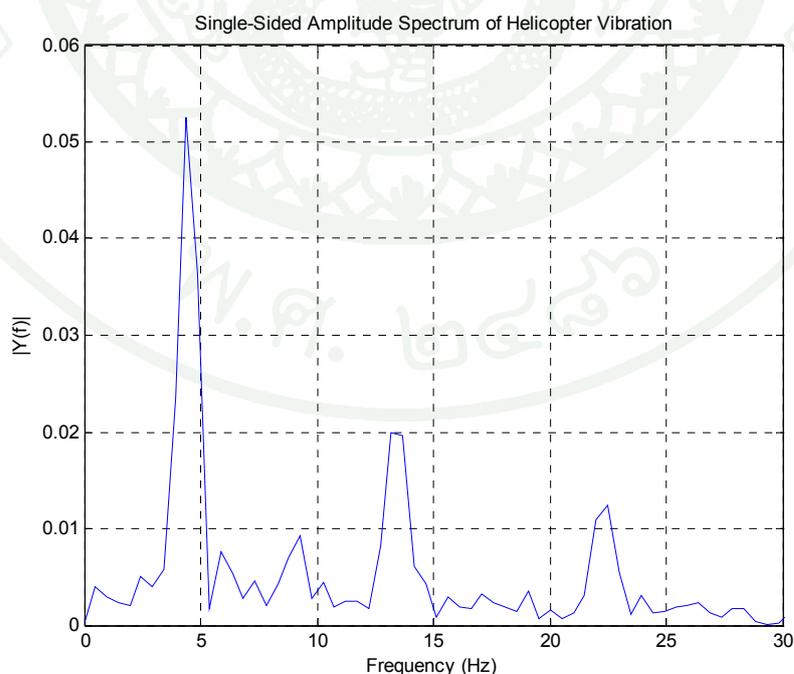
ภาพที่ 140 ความถี่การเคลื่อนที่ของแผ่นภาพเมทริกซ์ในแนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3F

ในการทดลองที่ 3F นั้นเราสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของแผ่นภาพแมทริกซ์ในแนวตั้งได้ 3.54 Hz และในแนวระดับได้ 3.54 Hz ในการทดลองที่ 3F นั้นเราสามารถนับจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบกรอบมาโครระหว่างเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าได้ 17 ถึง 20 ครั้ง การเปรียบเทียบกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้า 1 ครั้ง

### ผลการทดลองที่ 3

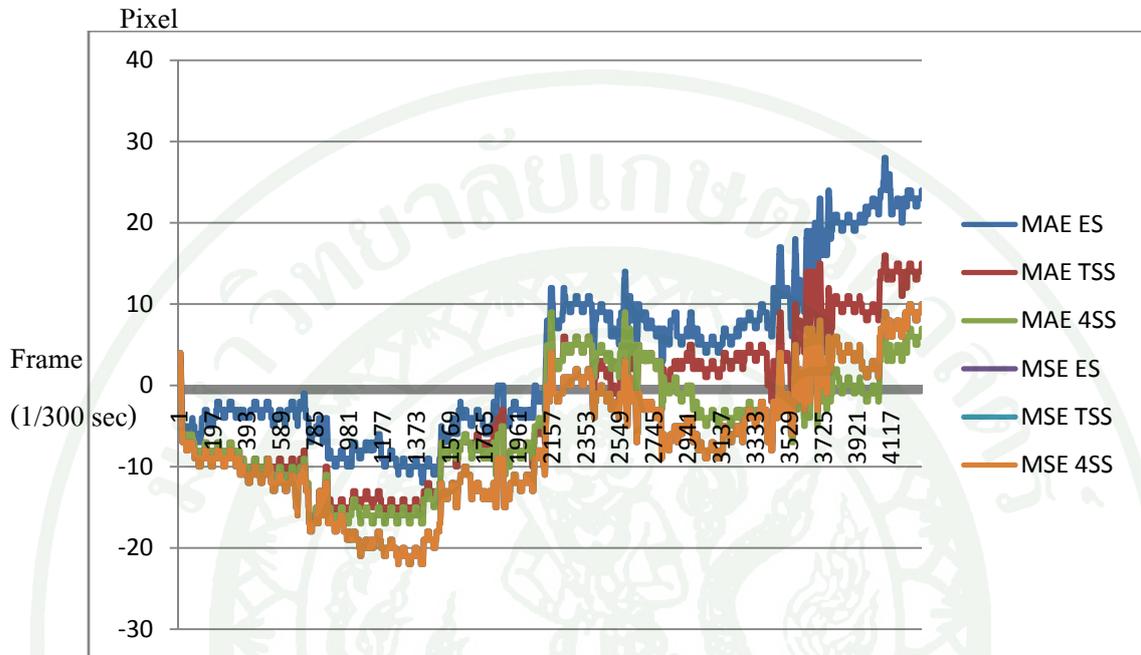
การทดลองที่ 3 แบ่งการทดลองเป็น 6 แบบโดยใช้อัลกอริทึมที่แตกต่างกัน โดยในส่วนกระบวนการเปรียบเทียบจะใช้ MAE และ MSE และในส่วนกระบวนการค้นหาจะใช้ Exhaustive Search, Three Step Search, Four Step Search

จากการทดลองที่ 3A – 3F ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองคือ แผ่นภาพแมทริกซ์มีการสั่นสะเทือนในแนวตั้งและแนวระดับเท่ากับ 3.54 Hz ซึ่งถือเป็นความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานที่วิเคราะห์ได้ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ดังกล่าว กับผลการทดลองการวัดความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานแบบ UH-1H ของกองทัพอากาศ ซึ่งวัดความถี่ของอากาศยานด้วย accelerometer ได้เท่ากับ 4.3 Hz ดังภาพที่ 141 ซึ่งคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองที่ 3 เท่ากับ 16.7 เปอร์เซ็นต์

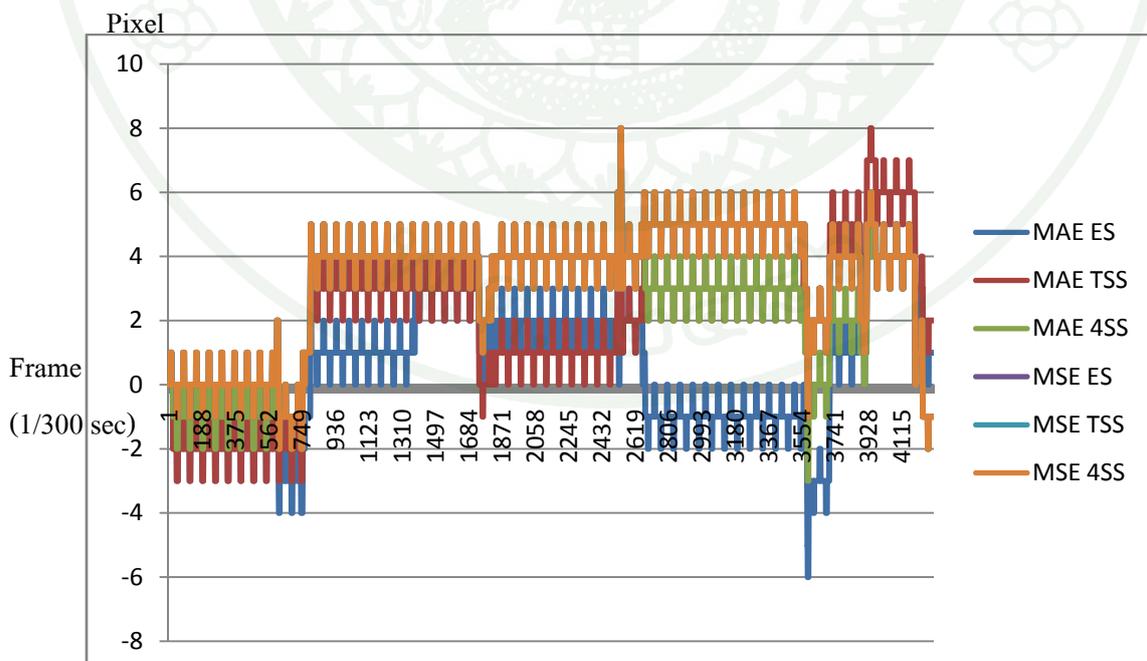


ภาพที่ 141 ผลการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานแบบ UH-1H ของกองทัพอากาศ

จะเห็นว่าผลการทดลองที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึง 16.7 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีแสงสะท้อนบนแผ่นภาพแมทริกซ์ อีกทั้งการเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ยังเคลื่อนที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองที่ 1 ซึ่งมีแอมพลิจูดการเคลื่อนที่สูง จึงทำให้มีโอกาสเกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ความถี่ได้มาก

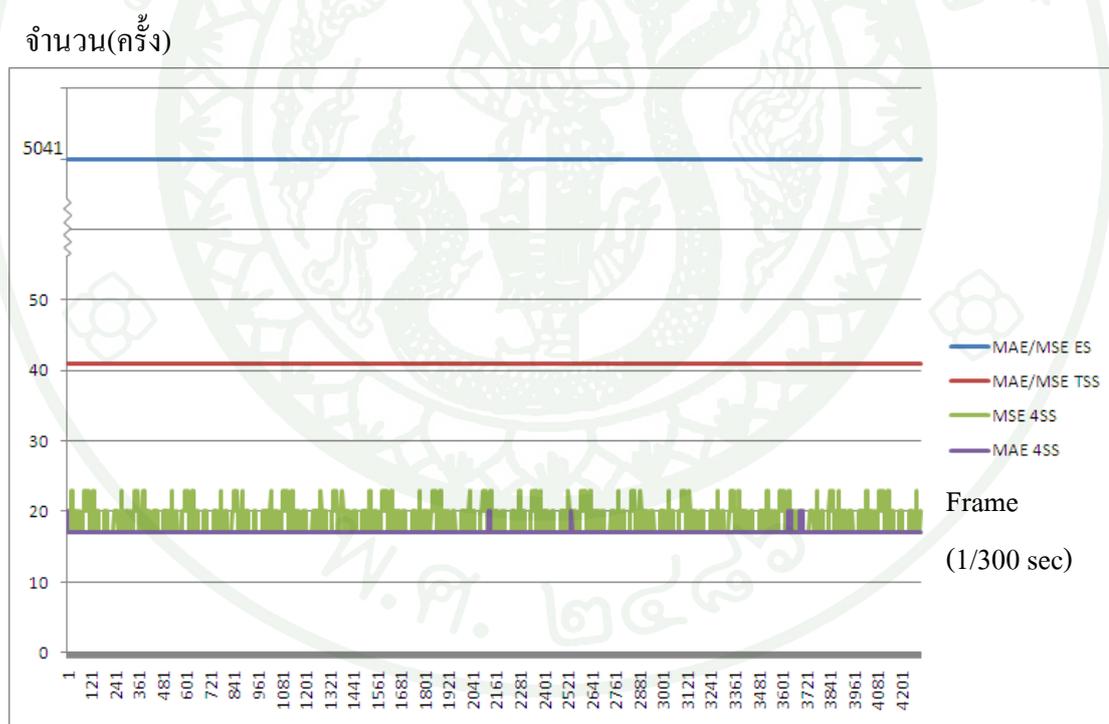


ภาพที่ 142 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวตั้งที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3A ถึง 3F



ภาพที่ 143 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวระดับที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง 3A ถึง 3F

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบระหว่างกรอบมาโครในเฟรมปัจจุบันและเฟรมก่อนหน้าที่ใช้ในกระบวนการค้นหา ระหว่าง Exhaustive Search, Three Step Search และ Four Step Search จะพบว่า เมื่อเรากำหนดขนาดของกรอบมาโครเท่ากับ 70 พิกเซล และค่า Search Parameter เท่ากับ 35 พิกเซล เราจะได้พื้นที่ค้นหา (Search Area) มีขนาดเท่ากับ 140 x 140 พิกเซล ซึ่งในพื้นที่ค้นหานี้กระบวนการค้นหาแบบ Exhaustive Search จะต้องใช้จำนวนครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครในแต่ละเฟรม เท่ากับ 5041 ครั้ง ส่วน Three Step Search ใช้ 41 ครั้ง และ Four Step Search จะใช้ 17-23 ครั้ง ดังภาพที่ 143 ในการวิเคราะห์ภาพวิดีโอทัศนในการทดลอง 3A – 3E นั้นจะวิเคราะห์ภาพจำนวน 4300 เฟรม เมื่อคิดเป็น Computation Time โดยนำขนาดของกรอบมาโครที่จะต้องทำการเปรียบเทียบซึ่งเท่ากับ 70 พิกเซล คูณกับจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบกรอบมาโครและคูณด้วยจำนวนเฟรมที่วิเคราะห์ซึ่งเท่ากับ 4,300 เฟรม จะได้ Computation Time ของ Exhaustive Search เท่ากับ 1,517,341,000 ครั้ง, Three Step Search เท่ากับ 12,341,000 ครั้ง และ Four Step Search จะได้ตั้งแต่ 5,117,000 จนถึง 6,923,000 ครั้ง



ภาพที่ 144 เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่ใช้เปรียบเทียบกรอบมาโครที่วัดได้จากการทดลอง 3A ถึง 3F

## ผลและวิจารณ์

### ผล

ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

จากผลการทดลองที่ 1 เมื่อใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นดังภาพที่ 59 – 61 วิเคราะห์หาความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนจากภาพวิดีโอที่ถ่ายจากอุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของอากาศยานที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับมอเตอร์กระแสตรง ผ่านโปรแกรม Matlab โดยใช้สมการความถี่อินพุตเท่ากับ

$$y(t) = 2.5 \sin 4\pi t + 0.1 \sin 6\pi t + 0.05 \sin 10\pi t$$

ซึ่งประกอบด้วยความถี่อินพุต 2 Hz, 3 Hz และ 5 Hz ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หามี 3 ความถี่ คือ 1.953 Hz, 3.052 Hz และ 5.005 Hz โดยใช้อัลกอริทึมที่แตกต่างกันตามการทดลองที่ 1A – 1F ดังรูปกราฟการวิเคราะห์ความถี่ภาพที่ 68, 71, 74, 77, 81 และ 83 ซึ่งเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุตจะมีค่าคลาดเคลื่อนเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น จากภาพที่ 84 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ที่วิเคราะห์ด้วยกระบวนการวิเคราะห์กรอบภาพแบบเดียวกันไม่ว่าจะเป็น MAE หรือ MSE จะได้ค่าการเคลื่อนที่ที่ตรงกันจึงทำให้วิเคราะห์ความถี่ได้เท่ากัน นอกจากนี้จากรูปกราฟดังกล่าวจะปรากฏความถี่ 0 Hz รวมอยู่ด้วยเนื่องจากแรงเคลื่อนที่ใช้มีความเสียดทานทำให้เกิดภาวะหยุดนิ่งชั่วคราวก่อนการเปลี่ยนทิศทาง

จากผลการทดลองที่ 2 อัลกอริทึมไม่สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนและความถี่การเคลื่อนที่จากภาพวิดีโอได้ เนื่องจากบันทึกภาพจากระยะไกลทำให้ภาพของแผ่นภาพแมทริกซ์มีขนาดเล็กและแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนมีขนาดเล็ก ไม่มี ความละเอียดเพียงพอในการจำแนกสภาพการเคลื่อนที่จากสภาพหยุดนิ่งได้

จากผลการทดลองที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้คือ แผ่นภาพแมทริกซ์ที่ติดตั้งกับอากาศยานมีการสั่นสะเทือนในแนวตั้งและแนวระดับเท่ากับ 3.54 Hz ซึ่งถือเป็นความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานที่วิเคราะห์ได้ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ดังกล่าวกับผลการทดลองการวัดความถี่การสั่นสะเทือน

ของอากาศยานแบบ UH-1H ของกองทัพอากาศ ซึ่งวัดความถี่ของอากาศยานด้วย accelerometer ได้เท่ากับ 4.3 Hz ดังภาพที่ 141 ซึ่งคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองที่ 3 เท่ากับ 16.7 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าผลการทดลองที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึง 16.7 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากมีแสงสะท้อนบนแผ่นภาพแมทริกซ์ ซึ่งแสงสะท้อนนี้จะส่งผลให้ขอบของภาพขาดความคมชัดทำให้อัลกอริทึมไม่สามารถคำนวณหากรอบมาโครที่ถูกต้องได้ อีกทั้งการเคลื่อนที่ของแผ่นภาพแมทริกซ์ยังเคลื่อนที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 1 ซึ่งมีแอมพลิจูดการเคลื่อนที่สูง จึงทำให้มีโอกาสเกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ความถี่ได้มาก

ความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานที่วิเคราะห์ได้จากอัลกอริทึมจะได้ผลลัพธ์แตกต่างจากผลการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนของอากาศยานแบบ UH-1H ของกองทัพอากาศ เนื่องจากความละเอียดในการวัดของ accelerometer มากกว่าความละเอียดของภาพวิดีโอที่ใช้ในการทดลองที่ 3 จึงทำให้ไม่สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่มีขนาดน้อยกว่า 1 พิกเซลได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 1 ดังภาพที่ 84 และแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 1 ดังภาพที่ 142 จะเห็นว่าแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ในการทดลองที่ 1 จะมีมากกว่าการทดลองที่ 3 จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 1 ได้ละเอียดมากกว่าการทดลองที่ 3

## วิจารณ์

### การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

จากผลการทดลองที่ 1 จะเห็นได้ว่า อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของภาพได้ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมนี้มีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากกระบวนการประมวลผลภาพนั้น ความคมชัดของภาพและความละเอียดของภาพจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยสังเกตได้จากผลการทดลองที่ 2 และ 3 เกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากแสงสะท้อน ระยะการบันทึกภาพวิดีโอที่สั้นและแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้ กล่าวคือเมื่อบันทึกภาพจากระยะไกลภาพแมทริกซ์ที่บันทึกได้จะมีขนาดเล็กซึ่งจะทำให้ตรวจจับแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนได้ขนาดเล็กหรือไม่ได้เนื่องจาก เวกเตอร์การเคลื่อนที่ที่อัลกอริทึมวิเคราะห์ได้นั้น จะมีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 1 พิกเซลเท่านั้น เมื่อถ่ายภาพจากระยะไกลระยะการสั่นสะเทือนต่อ 1 พิกเซลจะมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถจำแนกได้ว่ามีการสั่นสะเทือนหรือไม่ ดังนั้นการนำอัลกอริทึมไปใช้งาน จำเป็นจะต้องจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและความถี่การสั่นสะเทือนได้อย่างแม่นยำ

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

สรุปการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพด้วยอัลกอริทึมที่ต่างกัน 6 แบบ

อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของภาพได้ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามก็อัลกอริทึมนี้มีข้อจำกัดในการใช้งาน ทั้งในเรื่องระยะเวลาการถ่ายภาพวีดิทัศน์และขนาดของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนที่จะวิเคราะห์ เนื่องจากกระบวนการประมวลผลภาพนั้น ความคมชัดของภาพและความละเอียดของภาพได้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบโดยตรงต่อ ผลลัพธ์ที่ได้จากการ ดังนั้นหากต้องการนำอัลกอริทึมนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและความถี่การสั่นสะเทือนจากภาพวีดิทัศน์ จะต้องพิจารณาควบคุมแสงสะท้อน, ระยะเวลาบันทึกภาพวีดิทัศน์และขนาดแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนที่ต้องการวิเคราะห์ ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

หากต้องการนำอัลกอริทึมนี้ไปใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนและความถี่การสั่นสะเทือนจากภาพวีดิทัศน์ จะต้องพิจารณาควบคุมแสงสะท้อน, ระยะเวลาบันทึกภาพวีดิทัศน์และขนาดแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนที่ต้องการวิเคราะห์ ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำขึ้น ตลอดจนควรใช้กล้องที่มีความละเอียดสูงขึ้นไปเพื่อให้ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและความถี่การสั่นสะเทือนที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สุชาติ ขุนทอง. 2550. การพัฒนาอัลกอริทึมการบีบอัดวิดีโอที่สนับสนุนภาพถ่ายทางอากาศสำหรับกล้อง  
ตรวจจับรังสีความร้อน(FLIR) ให้มีความสามารถชี้เป้าหมายทางยุทธวิธี. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มงคลเดช นครินทร์. 2549. คณิตศาสตร์วิศวกรรมไฟฟ้า. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
กรุงเทพ

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2548. การควบคุมระบบกลศาสตร์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
, กรุงเทพ

ประดิษฐ์ หมู่มืองทอง และ สุขญาณ วรรณสุข. 2550. การวิเคราะห์การสันสะเทือน. ซีเอ็ดยูเคชั่น,  
กรุงเทพ

Iain E. G. Richardson. 2002. **Video Codec Design**. John Wiley & Sons

Aroh Barjatya. 2004. **Block Matching Algorithms For Motion Estimation**. DIP 6620 Spring  
2004 Final Project Paper

Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. 2002. **Digital Image Processing 2<sup>th</sup> Ed.** Prentice Hall

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	วศวัตต์ โททอง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 มิถุนายน 2517
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ ฯ
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(ไฟฟ้า) โรงเรียนนายเรืออากาศ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	