SUT7-709-60-12-34

รายงานการวิจัย

การพัฒนาโนดรับรู้ภาพที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้ตลอดชีพ

Development of Image Sensor Node using Perpetual Solar Energy Systems

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

SUT7-709-60-12-34

รายงานการวิจัย

การพัฒนาโนดรับรู้ภาพที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้ตลอดชีพ

Development of Image Sensor Node using Perpetual Solar Energy Systems

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2562

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาในที่ปรึกษาของผู้วิจัยที่ช่วยเก็บผลการทดลอง นายภูมินท์ ดวงมณีและขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล สำหรับคำแนะนำในเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์

ผู้วิจัย

เมษายน 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ในประเทศไทยเทคโนโลยีด้านเครือข่ายรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSN) ได้เข้ามามีบทบาทกับการพัฒนาอุตสาหกรรมในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านการเกษตรกรรม ด้านความปลอดภัย ด้านการสำรวจ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ส่งต่อกันเป็นข้อมูลขนาดเล็กที่บรรจุค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้ของแต่ละโนด หากต้องการให้โนดมีความสามารถส่งข้อมูลที่ใหญ่ขึ้น เช่น ภาพ หรือเสียง โนดจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานที่ใหญ่ขึ้น ในด้านการประมวลผลบอร์ดที่ใช้งานในเครือข่ายรับรู้ไร้สายยังคงใช้งานได้อยู่ แต่การประมวลภาพและการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ต้องใช้พลังงานที่มากขึ้นกว่าเดิมมาก ซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องการงานวิจัยมาช่วยเหลือ เครือข่ายรับรู้ไร้สายที่ใช้จับภาพและส่งต่อในเครือข่ายเรียกว่า เครือข่ายรับรู้ภาพไร้สาย (Wireless Image Sensor Network : WISN) เป็นเครือข่ายรับรู้อีกประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเพราะสามารถนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้ได้หลายหลากมากขึ้น เช่น การเฝ้าระวังการวางระเบิดตามจุดเสี่ยงต่างๆ โดยโนดแต่ละโนดจะบันทึกภาพ และส่งต่อเมื่อมีความผิดปกติขึ้น โครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางที่จะสร้างโนดรับรู้ภาพไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ให้ดียิ่งขึ้น ปัญหาหนึ่งที่โครงการวิจัยนี้สนใจคือการใช้พลังงานของโนดรับรู้ภาพไร้สายที่มากกว่าเมื่อไม่ส่งภาพ ผลที่เกิดขึ้นคือพลังงานในแบตเตอรี่หมดลงอย่างรวดเร็วไม่สามารถใช้งานได้ทั้งวัน แนวทางการแก้ปัญหาหนึ่งคือใช้แหล่งพลังงานที่มีไม่จำกัดเพื่อป้อนให้กับโนดเหล่านี้ แต่หากใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าก็จะมีขีดจำกัดเรื่องการติดตั้งที่ต้องอยู่ในรัศมีที่สายไฟฟ้าไปถึงและไม่ครอบคลุมพื้นที่ไกลๆ จึงเหลือแต่แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถแก้ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามพลังงานแสงอาทิตย์มีขีดจำกัดที่สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลากลางวันเท่านั้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างการใช้พลังงานของแสงอาทิตย์กับการตรวจจับภาพ แปลงภาพ และส่งภาพไปยังโนดอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาต้นแบบโนดรับรู้ภาพไร้สายที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างตลอดชีพ ซึ่งหมายความว่าโนดนี้จะตั้งอยู่ที่มีแสงอาทิตย์และจะทำงานได้ทุกวันโดยที่ไม่มีวันหมดพลังงานซึ่งสามารถส่งภาพในทั้งกลางวันและกลางคืน ทั้งนี้ไม่รวมความเสื่อมของแบตเตอรี่และวันที่ไม่มีแสงอาทิตย์ที่นอกเหนือจากการควบคุมในโครงการวิจัย

Abstract

In Thailand, Technology on Wireless Sensor Network (WSN) has been invoved into mamy industrial aspects such as agriculture, security, survey, etc. The data packet is transferred from node to node by a small size of data related to sensor information. However, if each node can send more data inoformation such as image or voice, this node requires more amount of energy to transmit such a big data packet. For procesing unit in WSN, the image processing also requires more energy to deal with more raw image data. The use of conventional wireless sensor node cannot answer all these requirements which is the main problem of this research project. Wireless Image Sensor Network (WISN) is a subset of WSN that concern on using image as a main information to transfer. It can be applied on many applications such as surveillance system on active motion sensor or detecting some abnormal condition of train track and gas pipe. The research project proposes the approach of efficient image sensor node for applying to any applications. Also, this research project concerns on energy consumption of image sensor node that consume a larger amount of energy than normal sensor node. The battery of image sensor node is ran out quicker which cannot maintain the function of image sensor node for all day. The use of solar cell to support more energy as well as charging the battery to maintain all day working is presented. However, the use of solar energy depends on daylight interval. Hence, this research project also illustrates the optimal relationship between using solar envergy for image sensor node for perpetual approach.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญรูปภาพ ..... ช
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2
1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย 2
1.4 ผลสำเร็จของโครงการ 3
1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 กล่าวนำ 5
2.2 ความสัมพันธ์ทางด้านเวลา 6
2.3 ไทม์แสตมป์ 7
2.4 บัฟเฟอร์สำหรับแสดงข้อมูลภาพและเสียง 9
2.5 RTP 9
2.6 กล่าวท้ายบท 12
บทที่ 3 การออกแบบโนดรับรู้ภาพ 13
3.1 กล่าวนำ 13
3.2 โครงสร้างการทำงานของระบบทดสอบ 13
3.3 การเชื่อมต่อกับโมดูลกล้อง 14
3.4 การเข้ารหัสสัญญาณภาพ (Video Encode) 15
3.5 ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 17
3.5.1 ฟัซซิไฟเออร์ (Fuzzifier) 17

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5.2 กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rule Base) 18
3.5.3 ตัวอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference Engine) 21
3.5.4 ดีฟัซซิไฟเออร์ (Defuzzifier) 21
3.6 โปรแกรมแสดงภาพที่ผู้ใช้งาน 23
3.6.1 การปรับเวลาให้ตรงกัน (Time Synchronization) 23
3.6.2 การพิจารณาค่า Frame Loss และค่า Frame Delay 24
3.6.3 ข้อมูลป้อนกลับ (Feedback Information) 25
3.7 ผลการส่งข้อมูลภาพไร้สาย 25
3.7.1 การควบคุมคุณภาพของภาพ 26
3.7.2 การควบคุมอัตราการส่งภาพ 27
3.7.3 การควบคุมคุณภาพและอัตราการส่งภาพผสมกัน 29
3.8 กล่าวท้ายบท 31
บทที่ 4 ต้นแบบโนดรับรู้ภาพที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และผลการทดสอบ 32
4.1 กล่าวนำ 32
4.2 โครงสร้างของต้นแบบโนดรับรู้ภาพ 32
4.3 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน 34
4.4 ผลการทดสอบ 37
4.4.1 เซลล์แสงอาทิตย์ 37
4.4.2 ตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์กระแสรั่วไหล 38
4.4.3 ตัวแปลง DC / DC 39
4.4.4 การใช้พลังงานของ MCU 39
4.4.5 การใช้พลังงานของ CMOS 43
4.4.6 การพลังงานของโมดูล XBee 43
4.4.7 การใช้พลังงานทั้งหมด 44
4.4.8 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน 44
4.5 กล่าวท้ายบท 47
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 48
5.1 สรุป 48
5.2 ปัญหาข้อเสนอแนะ 49

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต 49
บรรณานุกรม 50
ภาคผนวก ก การเผยแพร่ผลงานวิจัย 53
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ 54
ประวัติผู้วิจัย 68

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการส่งข้อมูลภาพและเสียงผ่านเครือข่ายแบบ Non Real-Time 5
รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการส่งข้อมูลภาพและเสียงแบบเรียลไทม์ 6
รูปที่ 2.3 ความสำพันธ์ทางด้านเวลาของตัวส่งและตัวรับข้อมูล 7
รูปที่ 2.4 การเกิดจิทเตอร์ในการส่งข้อมูลภาพและเสียงแบบเรียลไทม์ 8
รูปที่ 2.5 ค่าไทม์แสตมป์ในส่วนหัวของข้อมูลภาพและเสียง 8
รูปที่ 2.6 เพลย์แบ็คบัฟเฟอร์ 9
รูปที่ 2.7 ระดับชั้นในการส่งข้อมูลภาพและเสียง 10
รูปที่ 2.8 ส่วนเฮดเดอร์ของ RTP แพ็คเกจ 10
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างผลการไดร์ฟเทสพื้นที่ที่มีปัญหา 13
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างภายในตัวกล้องไอพี 14
รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการอ่านข้อมูลภาพ 1 ภาพ 16
รูปที่ 3.4 แสดงเมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของ Frame Loss และ Frame Delay 17
รูปที่ 3.5 แสดงเมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของอัตราการส่งภาพและคุณภาพของภาพ 18
รูปที่ 3.6 เมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของภาพ 22
รูปที่ 3.7 เมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งภาพ 22
รูปที่ 3.8 โปรแกรมแสดงภาพฝั่งผู้ใช้งานที่พัฒนาโดยใช้โปรแกรม Borland Delphi 7 23
รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายไร้สาย 25
รูปที่ 3.10 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้อัตราการส่งภาพมีค่าคงที่ 26
รูปที่ 3.11 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้คุณอัตราการส่งภาพมีค่าคงที่และมีการเพิ่มการใช้งานในเครือข่ายที่เวลา 20 วินาที 27
รูปที่ 3.12 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้คุณภาพของภาพมีค่าคงที่ 28
รูปที่ 3.13 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้คุณภาพของภาพมีค่าคงที่และมีการเพิ่มการใช้งานในเครือข่ายที่เวลา 20 วินาที 29
รูปที่ 3.14 การส่งข้อมูลภาพ โดยมีการปรับคุณภาพของภาพและอัตราการส่งภาพร่วมกัน 30

รูปที่ 3.15 การส่งข้อมูลภาพ โดยมีการปรับคุณภาพของภาพและอัตราการส่งภาพร่วมกันและมีการใช้งานในเครือข่ายที่เวลา 20 วินาที 31
รูปที่ 4.1 โนดรับรู้ภาพ JPEG-based ในเครือข่าย WISN 32
รูปที่ 4.2 การบีบอัดภาพ JPEG 33
รูปที่ 4.3 ต้นแบบโนดรับรู้ภาพ....33
รูปที่ 4.4 กระแสชาร์จของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับซูเปอร์ตัวเก็บประจุ 60F/2.7V....38
รูปที่ 4.5 การลดลงของความต่างศักย์เมื่อเกิดการรั่วของกระแส....39
รูปที่ 4.6 การใช้กระแสของ MCU สำหรับการบีบอัดภาพ JPEG ด้วยความถี่นาฬิกาที่ต่างกัน 41
รูปที่ 4.7 การใช้กระแสของ CMOS ที่ความละเอียด 80x60 pixel และ 12 bit RGB....41
รูปที่ 4.8 การใช้กระแสของ MCU สำหรับการบีบอัดภาพ JPEG ที่คุณภาพต่างๆกัน 42
รูปที่ 4.9 การใช้พลังงานของ MCU สำหรับการบีบอัดภาพ JPEG ที่คุณภาพต่างๆกัน 42
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของภาพ JPEG และคุณภาพของการบีบอัด 43
รูปที่ 4.11 การใช้กระแสของโมดูล XBee สำหรับการส่งข้อมูลที่ขนาดต่างๆ กัน รูปบน 1 byte รูปกลาง 500 bytes และรูปล่าง 1000 bytes....45
รูปที่ 4.12 การใช้พลังงานของโมดูล XBee....46
รูปที่ 4.13 การใช้พลังงานทั้งหมดของโนดรับรู้ภาพ....46
รูปที่ 4.14 สมรรถนะของระบบเมื่อส่งข้อมูลภาพเปรียบเทียบกับพลังงานจากแบบจำลอง 47

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในประเทศไทยเทคโนโลยีด้านเครือข่ายรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSN) ได้เข้ามามีบทบาทกับการพัฒนาอุตสาหกรรมในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านการเกษตรกรรม ด้านความปลอดภัย ด้านการสำรวจ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ส่งต่อกันเป็นข้อมูลขนาดเล็กที่บรรจุค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้ของแต่ละโนด หากต้องการให้โนดมีความสามารถส่งข้อมูลที่ใหญ่ขึ้น เช่น ภาพ หรือเสียง โนดจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานที่ใหญ่ขึ้น ในด้านการประมวลผลบอร์ดที่ใช้งานในเครือข่ายรับรู้ไร้สายยังคงใช้งานได้อยู่ แต่การประมวลภาพและการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ต้องใช้พลังงานที่มากขึ้นกว่าเดิมมาก ซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องการงานวิจัยมาช่วยเหลือ

เครือข่ายรับรู้ไร้สายที่ใช้จับภาพและส่งต่อในเครือข่ายเรียกว่า เครือข่ายรับรู้ภาพไร้สาย (Wireless Image Sensor Network : WISN) เป็นเครือข่ายรับรู้อีกประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเพราะสามารถนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้ได้หลายหลากมากขึ้น เช่น การเฝ้าระวังการวางระเบิดตามจุดเสี่ยงต่างๆ โดยโนดแต่ละโนดจะบันทึกภาพ และส่งต่อเมื่อมีความผิดปกติขึ้น หรือการติดตามความเคลื่อนไหวของยานพาหนะโดยโนดสามารถส่งต่อภาพการเคลื่อนไหวของยานพาหนะที่ต้องการได้ หรือ การตรวจสอบความผิดปกติในระบบรางของรถไฟฟ้าและท่อแก๊ส เป็นต้น โครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางที่จะสร้างโนดรับรู้ภาพไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ให้ดียิ่งขึ้น ปัญหาหนึ่งที่โครงการวิจัยนี้สนใจคือการใช้พลังงานของโนดรับรู้ภาพไร้สายที่มากกว่าเมื่อไม่ส่งภาพ ผลที่เกิดขึ้นคือพลังงานในแบตเตอรี่หมดลงอย่างรวดเร็วไม่สามารถใช้งานได้ทั้งวัน แนวทางการแก้ปัญหาหนึ่งคือใช้แหล่งพลังงานที่มีไม่จำกัดเพื่อป้อนให้กับโนดเหล่านี้ แต่หากใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าก็จะมีขีดจำกัดเรื่องการติดตั้งที่ต้องอยู่ในรัศมีที่สายไฟฟ้าไปถึงและไม่ครอบคลุมพื้นที่ไกลๆ จึงเหลือแต่แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถแก้ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามพลังงานแสงอาทิตย์มีขีดจำกัดที่สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลากลางวันเท่านั้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างการใช้พลังงานของแสงอาทิตย์กับการตรวจจับภาพ แปลงภาพ และส่งภาพไปยังโนดอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาต้นแบบโนดรับรู้ภาพไร้สายที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างตลอดชีพ ซึ่งหมายความว่าโนดนี้จะตั้งอยู่ที่มี

แสงอาทิตย์และจะทำงานได้ทุกวันโดยที่ไม่มีวันหมดพลังงานซึ่งสามารถส่งภาพในทั้งกลางวันและกลางคืน ทั้งนี้ไม่รวมความเสื่อมของแบตเตอรี่และวันที่ไม่มีแสงอาทิตย์ที่นอกเหนือจากการควบคุมในโครงการวิจัย จากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่จะศึกษาและแก้ปัญหานี้ เพราะงานวิจัยส่วนใหญ่จะพัฒนาโนดรับรู้ภาพจะใช้พลังงานจากสายไฟฟ้าเป็นหลัก ถึงแม้ว่าจะมีบางงานวิจัยที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์แต่ก็ใช้กับโนดที่ไม่ส่งภาพเท่านั้น ดังนั้นการทำวิจัยเรื่องนี้จึงเป็นเรื่องที่น่าจะให้ความสำคัญเร่งด่วนเพราะสามารถสร้างองค์ความรู้ทันกับการพัฒนาประเทศและเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบัน ทำให้เพิ่มโอกาสแข่งขันในระดับสากลมากขึ้น ซึ่งผลสำเร็จจากการวิจัยนี้จะช่วยให้ประหยัดพลังงานในภาพรวม และสามารถสร้างนวัตกรรมที่เป็นฝีมือของคนไทย ทำให้งานวิจัยนี้สอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของ และยังสอดคล้องกับแผนงานวิจัยกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ความรู้ของการพัฒนาเครือข่ายรับรู้ภาพไร้สายโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อเทคนิคในการประมวลผลสำหรับการประหยัดพลังงานในเครือข่ายรับรู้ภาพไร้สาย

1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

1.ศึกษาความสัมพันธ์ของการใช้พลังงานในโนดรับรู้ภาพไร้สาย ด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ณ ห้องปฏิบัติการ F4 ศูนย์เครื่องมือฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. ศึกษาความสัมพันธ์ของการให้พลังงานแสงอาทิตย์แก่โนดรับรู้ไร้สาย โดยใช้การจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB ณ ห้องปฏิบัติการ F4 ศูนย์เครื่องมือฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. ทดสอบการส่งภาพเพื่อวิเคราะห์การความเป็นไปได้ของโครงการ ด้วยโปรแกรม MATLAB

4. พัฒนาและทดสอบเบื้องต้นของโนดรับรู้ภาพไร้สายในทางปฏิบัติ ณ ห้องปฏิบัติการ F4 ศูนย์เครื่องมือฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5. พัฒนาและสร้างต้นแบบโนดรับรู้ไร้สาย ณ ห้องปฏิบัติการ F4 ศูนย์เครื่องมือฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. เก็บผลการส่งภาพด้วยต้นแบบที่พัฒนาขึ้น ณ พื้นที่บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ และเปรียบเทียบกับแนวทางที่เสนอไว้ในงานวิจัยอื่นๆ

8. พัฒนา ปรับปรุง แก้ไข เพื่อให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

9. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ

10. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุงงานวิจัย

11. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

1.4 ผลสำเร็จของโครงการ

ประโยชน์ที่ได้รับคือการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 บทความ ซึ่งเป็นการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เผยแพร่แก่นักวิจัยที่ทำงานใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ได้ ซึ่งหน่วยงานวิจัยทางโทรคมนาคมในประเทศไทยสามารถนำผลงานดังกล่าวไปใช้ได้

1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

ในงานวิจัยทางด้าน WSNs ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่าง ๆ การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพก็เป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญสำหรับงานวิจัยด้านนี้ [2] การลดการใช้พลังงานของโนดทำให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ในกรณีที่แหล่งพลังงานคือแบตเตอรี่เราสามารถที่จะลดการใช้พลังงานของโนดจนทำให้สามารถทำงานได้หลายปี แต่ในกรณีที่เซนเซอร์มีลักษณะเป็นภาพแล้ว อายุการใช้งานนั้นอาจจะมีอายุในระดับหลายชั่วโมงอันเนื่องมากจากการประมวลผลภาพนั้นใช้พลังงานมากกว่าเซนเซอร์ทั่ว ๆ ไป สำหรับข้อมูลซึ่งเป็นภาพนั้นหลาย ๆ งานวิจัยได้ใช้ FPGA [3-7] มาเป็นตัวประมวลผลหลักสำหรับการบีบอัดภาพเนื่องจากใช้พลังงานน้อยและสามารถประมวลผลได้รวดเร็ว ในงานวิจัย [3] ได้ศึกษางานทางด้านการตรวจจับและติดตามวัตถุเพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยข้อมูลป้อนกลับที่ช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผล ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานโนดมากขึ้น โดยที่แหล่งพลังงานของโนดคือแบตเตอรี่ ในงานวิจัย [4] ได้นำเสนอ Wireless Camera Node ที่ใช้พลังงานน้อยมากซึ่งขยายอายุการใช้งานได้ถึง 3 เดือนบนแบตเตอรี่ขนาด 2200mAh ในงานวิจัย [5] ได้นำเสนอการบีบอัดภาพอย่างมีประสิทธิภาพบนมาตรฐาน JPEG2000 ด้วยการควบคุมลำดับของข้อมูลภาพและยังสามารถลดจำนวนเกตที่ใช้ในตัว FPGA ด้วย งานวิจัย [6] ได้นำเสนอระบบที่สามารถปรับแต่งฮาร์ดแวร์ที่เป็น FPGA เพื่อที่จะใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง การบีบอัดภาพด้วย MCU การบีบอัดภาพด้วย FPGA และการส่งข้อมูลภาพโดยตรงไปยัง Server ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานบน FPGA นั้นมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งขยายอายุการใช้งานไปได้ถึง 6 ปีโดยที่แหล่งพลังงานคือแบตเตอรี่ และในงานที่ [7] นั้นเป็นงานส่วนขยายของ [6] เพื่อศึกษารูปแบบของภาพต่าง ๆ กัน

นอกจากงานวิจัยที่เน้นทางด้านในการลดพลังงานโดยใช้ FPGA ดังที่กล่าวมาแล้ว พลังงานงานแสงอาทิตย์นั้นกำลังเป็นหัวข้อที่น่าสนใจสำหรับ WSNs อันเนื่องมาจากเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษและเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ทุกวัน หลายงานวิจัยได้พยายามปรับปรุงสมรรถนะในการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้งาน ตัวอย่างงานวิจัยเหล่านี้คือ [8-15] ซึ่งเกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมรรถนะของ DC/DC Converter การปรับปรุงวงจรที่เชื่อมต่อกับเซลแสดงอาทิตย์ การหาจุดทำงานของเซลล์สุริยะที่ให้พลังงานสูงสุด การกำหนดช่วงเวลาล่วงหน้าในการทำงาน

สำหรับแบตเตอรี่ที่เป็นแหล่งพลังงานหลักในงานวิจัยด้าน WSNs นั้นกำลังจะถูกแทนที่ด้วย Super Capacitor [1][16][17] อันเนื่องมาจากแบตเตอรี่นั้นมีอายุการใช้งานจำกัด และยังถูกจำกัดด้วยจำนวนครั้งในการประจุและการคายประจุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจำนวนครั้งในการชาร์จแบตเตอรี่นั้นอยู่ที่ประมาณหลายร้อยครั้งก่อนที่จะเสื่อมสภาพ แต่สำหรับ Super Capacitor นั้นจำนวนครั้งในการชาร์จอยู่ที่ระดับหลายแสนครั้ง [1]

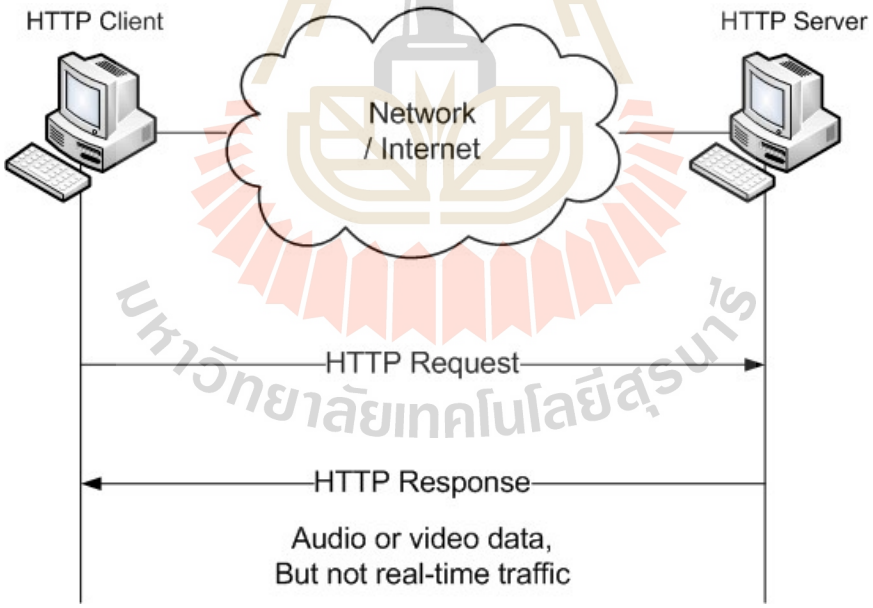
จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ WISNs หลายงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นไปในแนวทางการประหยัดการใช้พลังงานซึ่งบทสรุปก็คือการใช้ FGPA มาแทนที่ MCU แต่ถ้าหากมองถึงต้นทุนในการผลิตใช้งานจริงโดยเน้นที่การผลิตเป็นจำนวนมากแล้ว MCU เป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การหาแบบจำลองของการใช้พลังงานสำหรับโนดรับรู้ภาพที่มีการบีบอัดขนาดต่าง ๆ กันและคุณภาพของภาพที่ต่างกัน บนแพลตฟอร์ม MCU พลังงานแสงอาทิตย์และ Super Capacitor ซึ่งแบบจำลองที่แม่นยำจะช่วยให้โนดสามารถปรับตัวตามพลังงานที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนตลอดชีพได้ ซึ่งยังไม่เคยมีงานวิจัยใดนำเสนอมาก่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

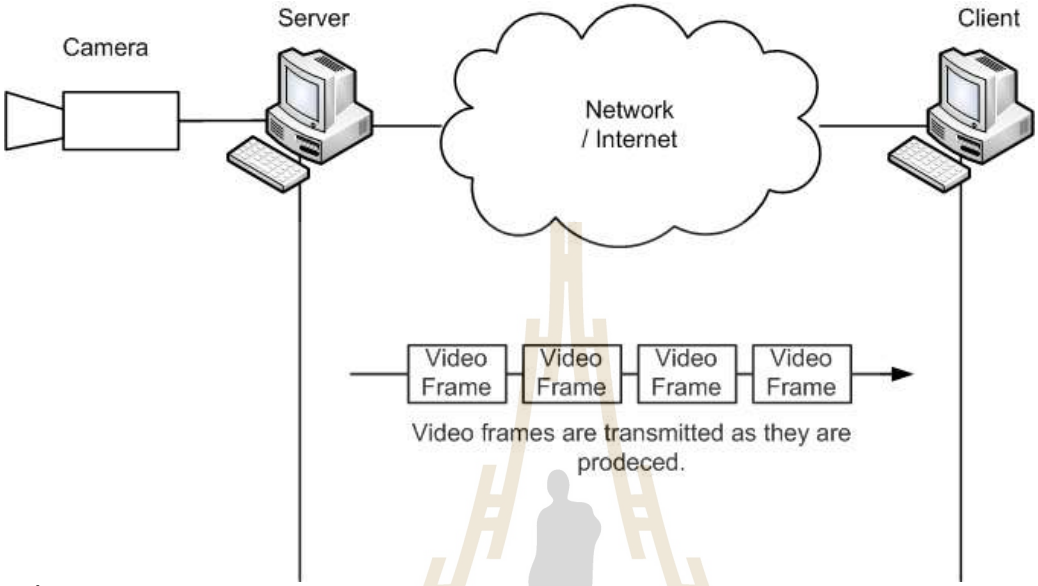
2.1 กล่าวนำ

ในการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายนั้นสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่นส่งแบบ HTTP, TCP,UDP, RTP, Unicast, Multicast เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นการส่งแบบ Real-Time และ Non Real-Time ประเภทของการส่งแบบ Non Real-Time คือการส่งในลักษณะที่การผลิตเนื้อหา การส่งข้อมูล การรับชม เกิดขึ้นในเวลาที่ต่างกัน เช่นการดาวโหลดภาพยนตร์หรือเพลงผ่านเว็บไซต์ เนื้อหาของเพลงหรือภาพยนตร์จะถูกสร้างขึ้นมาก่อนแล้วเก็บไว้เป็นข้อมูลในลักษณะไฟล์แล้วผู้ใช้จึงดาวโหลดข้อมูลเหล่านั้นมาลงที่คอมพิวเตอร์ของผู้ใช้หลังจากนั้นจึงรับชมเวลาใด ๆ ก็ได้ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการส่งข้อมูลภาพและเสียงผ่านเครือข่ายแบบ Non Real-Time

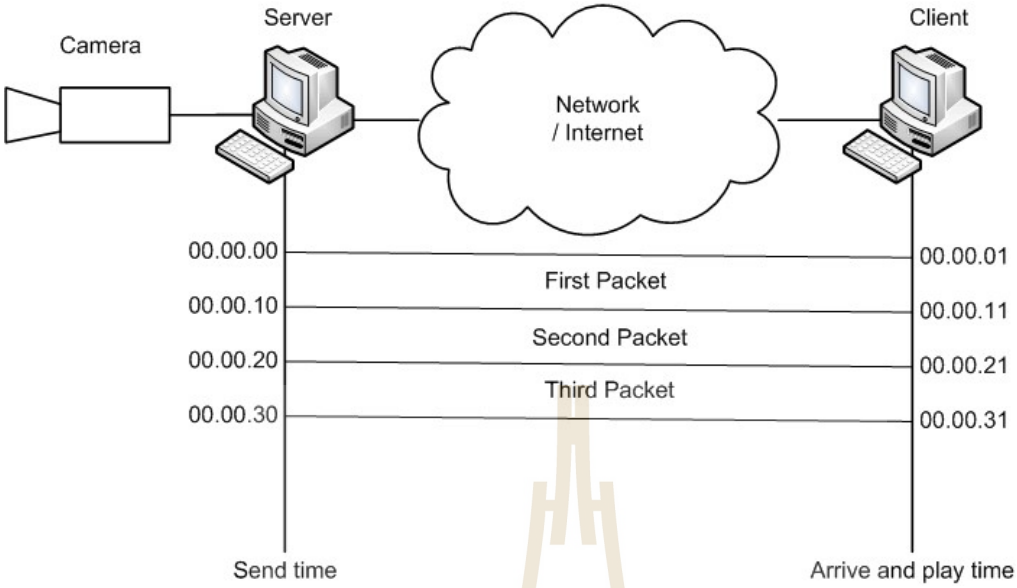
ส่วนการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์นั้นการสร้างข้อมูลภาพและเสียง การส่งข้อมูล และการรับชมข้อมูลจะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันซึ่งในขณะที่รับชมข้อมูลอยู่นั้นด้านฝั่งผลิตข้อมูลก็กำลังผลิตไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการส่งข้อมูลภาพและเสียงแบบเรียลไทม์

2.2 ความสัมพันธ์ทางด้านเวลา

ข้อมูลที่เป็นเรียลไทม์ในเครือข่ายจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าความสำพันธ์ทางด้านเวลาในระหว่างแพ็คเกจในช่วงการส่งข้อมูลใด ๆ ตัวอย่างเช่น วีดีโอเซอร์เวอร์แบบเรียลไทม์ทำการส่งภาพวีดีโอแบบถ่ายทอดสดและทำการส่งภาพออกไปในเครือข่าย ซึ่งข้อมูลวีดีโอนี้มีทั้งหมด 3 ส่วนด้วยกัน โดยแต่ละส่วนจะมีความยาว 10 วินาที ข้อมูลวีดีโอส่วนแรกนั้นเป็นข้อมูลในช่วงเวลา 00.00.00 ข้อมูลวีดีโอในส่วนที่สองนั้นข้อมูลเริ่มต้นที่เวลา 00.00.10 และในส่วนที่สามข้อมูลเริ่มต้นที่ 00.00.20 โดยแต่ละแพ็คเกจใช้เวลา 1 วินาทีที่จะเดินทางไปถึงปลายทาง ดังนั้นที่ปลายทางจะสามารถแสดงผลข้อมูลภาพนี้ที่เวลา 00.00.01 สำหรับแพ็คเกจแรก ที่เวลา 00.00.11 สำหรับแพ็คเกจที่สอง และ 00.00.21 ในแพ็คเกจที่สาม ทั้งหมดนี้แสดงในรูปที่ 2.3



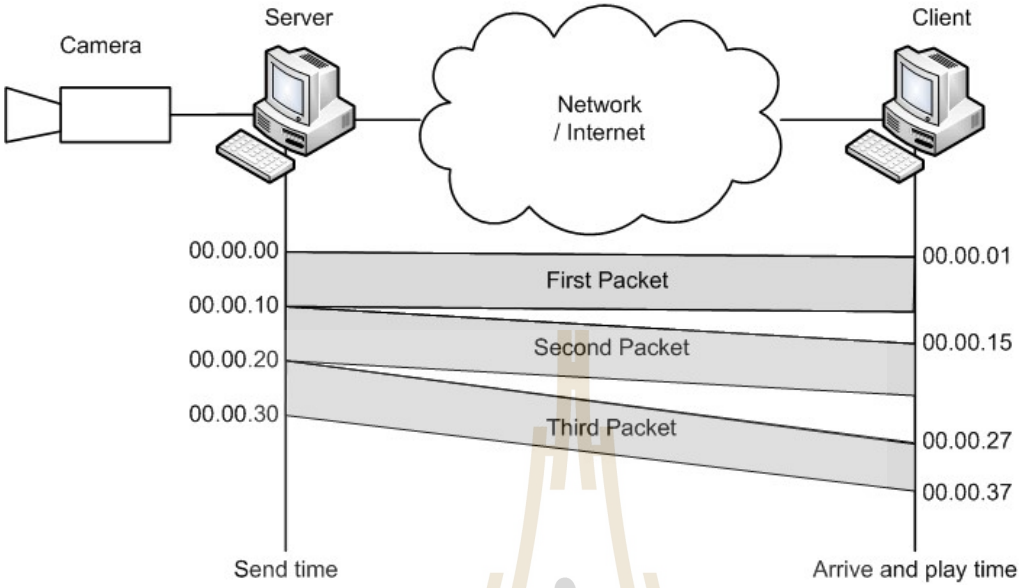
รูปที่ 2.3 ความสำพันธ์ทางด้านเวลาของตัวส่งและตัวรับข้อมูล

อะไรจะเกิดขึ้นถ้าแพ็คเกจข้อมูลมาถึงปลายทางด้วยค่าเวลาหน่วงที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นแพ็คเกจแรกมาถึงปลายทางในเวลา 00.00.01 (หน่วง 1 วินาที) แพ็คเกจที่สองมาถึงในเวลา 00.00.15 (หน่วง 5 วินาที) และแพ็คเกจที่ 3 มาถึงตอนเวลา 00.00.27 (หน่วง 7 วินาที) ถ้าโปรแกรมแสดงภาพเริ่มแสดงภาพที่เวลา 00.00.01 ซึ่งจะหมดข้อมูลที่เวลา 00.00.11 ถึงตอนนี้โปรแกรมแสดงภาพไม่สามารถแสดงภาพต่อไปได้เพราะว่าแพ็คเกจที่ 2 ยังเดินทางมาไม่ถึง ยังคงต้องใช้เวลาอีก 4 วินาทีกว่าจะมาถึง สิ่งนี้เป็นช่องว่างระหว่างแพ็คเกจข้อมูลทั้ง 3 แพ็คเกจ เหตุการณ์นี้เราเรียกว่าจิทเตอร์ (Jitter) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

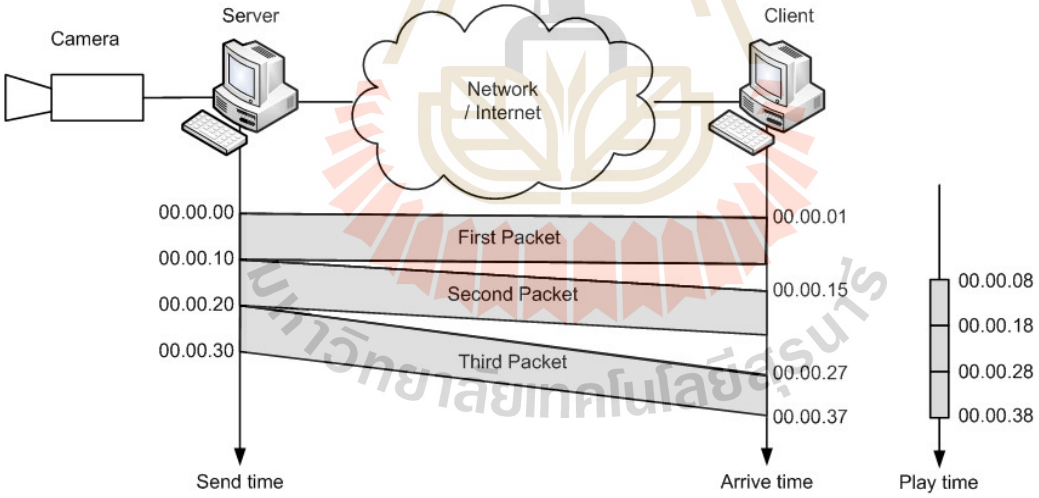
2.3 ไทม์แสตมป์

แนวทางที่จะสามารถแก้ปัญหาเรื่องจิทเตอร์ได้ก็คือไทม์แสตมป์ ถ้าข้อมูลแต่ละแพ็คเกจมีไทม์แสตมป์ที่ตัวมันเองได้ถูกผลิตขึ้นมาที่สามารถใช้เปรียบเทียบกับแพ็คเกจก่อนหน้าหรือหลังได้ ไคลเอนท์ก็จะสามารถให้ข้อมูลไทม์แสตมป์นี้ในการแสดงข้อมูลภาพได้อย่างถูกต้อง ตัวอย่างเช่น ให้แพ็คเกจแรกมีค่าไทม์แสตมป์เป็น 00.00.00 แพ็คเกจที่สอง 00.00.10 และแพ็คเก็จที่สาม 00.00.20 ถ้าจิทเตอร์เกิดขึ้นในแบบตัวอย่างที่ผ่านมา หากโปรแกรมทางด้านไคลเอนท์เริ่มแสดงข้อมูลภาพที่เวลา 00.00.08 ซึ่งแพ็คเกจที่ 2 จะถูกแสดงที่เวลา 00.00.18 และแพ็คเกจที่ 3 จะถูกแสดงที่เวลา 00.00.28 ซึ่งในกรณีนี้ช่องว่างระหว่างแพ็คเกจในการแสดงผลก็จะหายไป ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



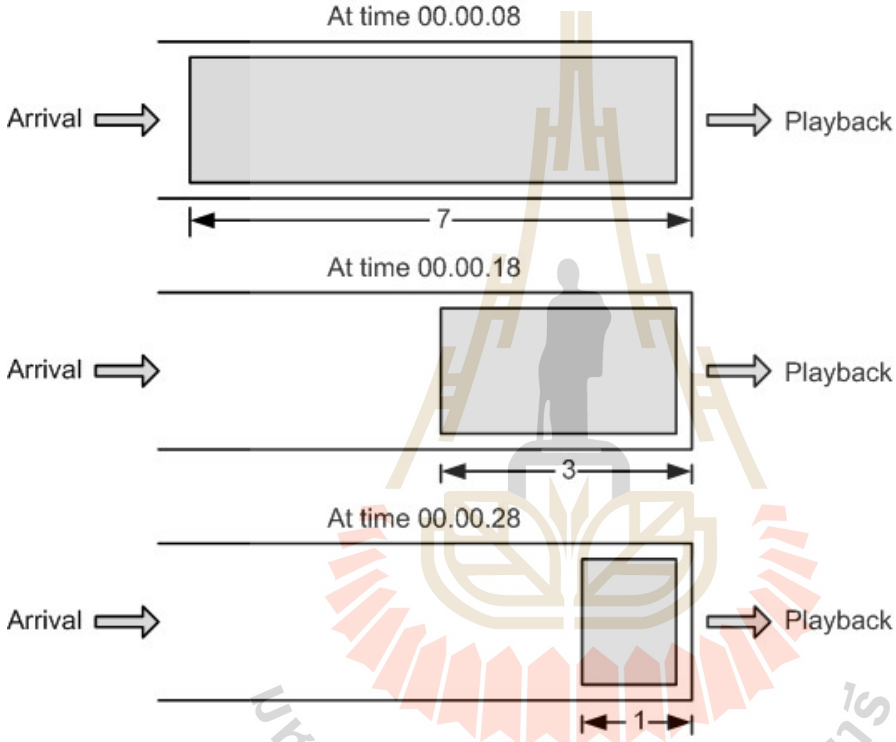
รูปที่ 2.4 การเกิดจิทเตอร์ในการส่งข้อมูลภาพและเสียงแบบเรียลไทม์



รูปที่ 2.5 ค่าไทม์แสตมป์ในส่วนหัวของข้อมูลภาพและเสียง

2.4 บัฟเฟอร์สำหรับแสดงข้อมูลภาพและเสียง

ในการที่จะสามารถแยกเวลาที่แพ็คเกจข้อมูลเดินทางมาถึงและเวลาที่จะแสดงข้อมูลให้ผู้ใช้ได้รับชม เราจำเป็นที่จะต้องมีบัฟเฟอร์สำหรับเก็บข้อมูลก่อนที่จะทำการแสดงข้อมูลออกไป เราเรียกสิ่งนี้ว่าเพลย์แบ็คบัฟเฟอร์ เมื่อการส่งข้อมูลเริ่มต้นขึ้นโปรแกรมที่แสดงภาพและเสียงทำการหน่วงเวลาออกไปจนกระทั่งปริมาณทางเวลาที่ได้เก็บไว้ถึงระดับที่กำหนดไว้จึงเริ่มแสดงผลภาพและเสียงซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



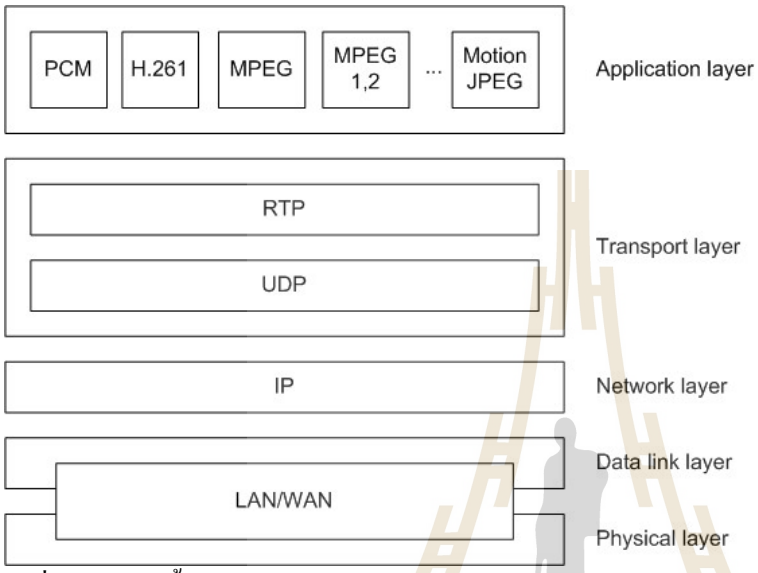
รูปที่ 2.6 เพลย์แบ็คบัฟเฟอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 RTP

เรียลไทม์ทรานสปอตโปรโตคอล (Realtime Transport Protocol – RTP) ถูกออกแบบมาเพื่อใช้จัดการกับการรับส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ในอินเตอร์เน็ต RTP นั้นไม่มีกลไกในการส่งมอบข้อมูลไปยังปลายทาง (มัลติคาส (Multicast), หมายเลขพอร์ต (Port number) และอื่น ๆ) มันจะต้องในงานร่วมกับ UDP โดย RTP

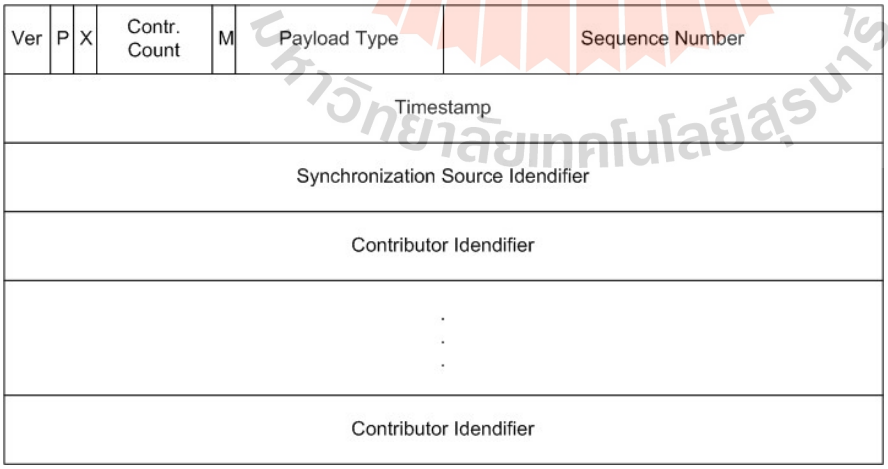
นั้นจะวางตัวอยู่ระหว่าง UDP และแอปพลิเคชั่นที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน หน้าที่หลักของ RTP ก็คือการใส่ค่าไทม์แสตมป์ การใส่ลำดับข้อมูล ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ระดับชั้นในการส่งข้อมูลภาพและเสียง

รูปแบบของ RTP แพ็คเกจ

ในรูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบของข้อมูลในส่วนหัวของ RTP รูปแบบนี้สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางในทุกการใช้งานในแบบเรียลไทม์



รูปที่ 2.8 ส่วนเฮดเดอร์ของ RTP แพ็คเกจ

Ver : เป็นข้อมูล 2 บิตที่ใช้แสดงค่าเวอร์ชัน ซึ่งเวอร์ชันที่ใช้ในปัจจุบันคือ 2

P : เป็นข้อมูล 1 บิต ถ้ามีค่าเป็น 1 จะแสดงถึงการที่มีข้อมูลแพ็ดดิ้งที่ส่วนท้ายของแพ็คเกจข้อมูล ซึ่งในกรณีนี้ข้อมูลที่อยู่ด้านท้ายในส่วนแพ็ดดิงจะเป็นการกำหนดค่าความยาวของแพ็ดดิง ถ้าไม่มีแพ็ดดิงค่าในส่วนนี้จะเป็น 0

X : เป็นข้อมูล 1 บิต ถ้ามีค่าเป็น 1 จะแสดงถึงการขยายส่วนหัวของ RTP แบบพิเศษที่อยู่ระหว่างส่วนหัวปกติและข้อมูล ถ้ามีค่าเป็น 0 แสดงว่าไม่มีส่วนขยายนี้

Contributor Count : เป็นข้อมูล 4 บิต ที่แสดงถึงจำนวน Contributor ซึ่งมีได้สูงสุด 15 Contributor

M : เป็นข้อมูล 1 บิต เป็นตัวกำหนดค่าที่ใช้โดยระดับแอปพลิเคชัน เช่นใช้เป็นตัวบอกว่าเป็นข้อมูลชุดสุดท้าย

Payload Type : เป็นข้อมูล 8 บิตที่แสดงประเภทของข้อมูลที่นำมาซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างบางส่วนได้ดังนี้

Sequence Number : เป็นข้อมูล 16 บิต ใช้สำหรับใส่หมายเลขลำดับในการส่งแต่ละแพ็คเกจ ตัวเลขนี้ถูกเลือกมาในตอนเริ่มต้นในแบบสุ่ม และมันจะเพิ่มค่าขึ้น 1 ค่าในแต่ละลำดับของแพ็คเกจ ซึ่งจะถูกใช้ที่ผู้รับข้อมูลในการที่จะตรวจจับ Packet Loss หรือการที่ข้อมูลมาผิดลำดับ

Timestamp : เป็นข้อมูล 32 บิตที่แสดงถึงความสำพันธ์ทางด้านเวลาระหว่างแพ็คเกจ ค่าไทม์แสตมป์ที่ใช้ในแพ็คเกจแรกถูกกำหนดค่าแบบสุ่ม

Synchronization Source Identifier: ถ้ามีต้นกำเนิดของข้อมูลเพียงชุดเดียว ข้อมูล 32 บิตนี้จะเป็นการกำหนดค่าต้นกำเนินนั้น แต่ถ้าหากมีหลายต้นกำเนิด...

Contributor Identifier : เป็นข้อมูล 32 บิต โดยแต่ละส่วนเป็นการนิยามค่าต้นกำเนิด

ตารางที่ 2.1 Payload Type ในส่วนของหัวของ RTP

Type	Application	Type	Application	Type	Application
0	PCMu Audio	7	LPC audio	15	G728 audio
1	1016	8	PCMA audio	26	Motion JPEG
2	G721 audio	9	G722 audio	31	H.261
3	GSM audio	10-11	L16 audio	32	MPEG1 video
5-6	DV14 audio	14	MPEG audio	33	MPEG2 video

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6 กล่าวท้ายบท

ในเนื้อหาทั้งหมดของบทที่สองได้กล่าวถึงได้กล่าวถึงเนื้อหาของการส่งข้อมูลภาพ ที่จะเป็นการสร้างรูปแบบข้อมูลสำหรับการส่งแพ็คเกจในโนดรับรู้ภาพ ซึ่งเป็นพื้นฐานของความรู้ที่เกี่ยวข้อง ส่วนในบทถัดไปจะเป็นการพัฒนาโนดรับรู้ภาพ

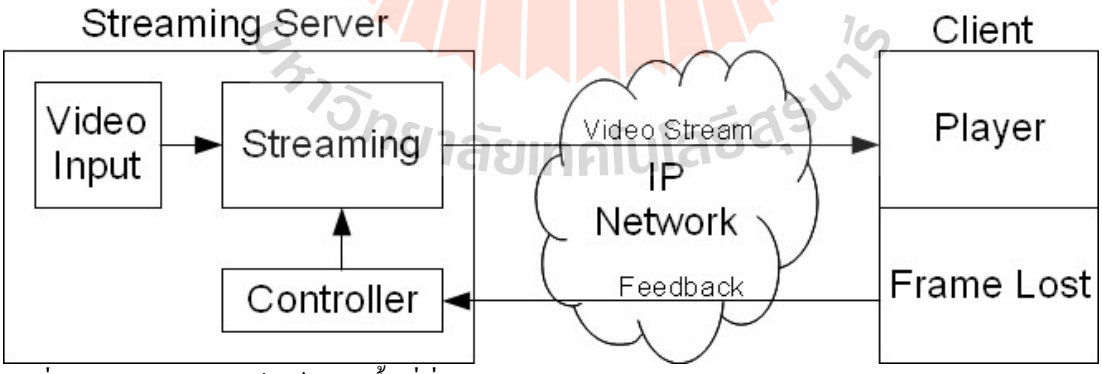
บทที่ 3 การออกแบบโนดรับรู้ภาพ

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ ในส่วนแรกเป็นกล่าวถึงโครงสร้างของโนดรับรู้ภาพ รายละเอียดของแต่ละส่วนโดยเฉพาะการออกแบบอัลกอริทึ่มที่ประมวลผลภาพ และส่วนที่สองคือการทดสอบการส่งภาพของโนดรับรู้ภาพที่ได้ออกแบบไว้แล้ว

3.2 โครงสร้างการทำงานของระบบทดสอบ

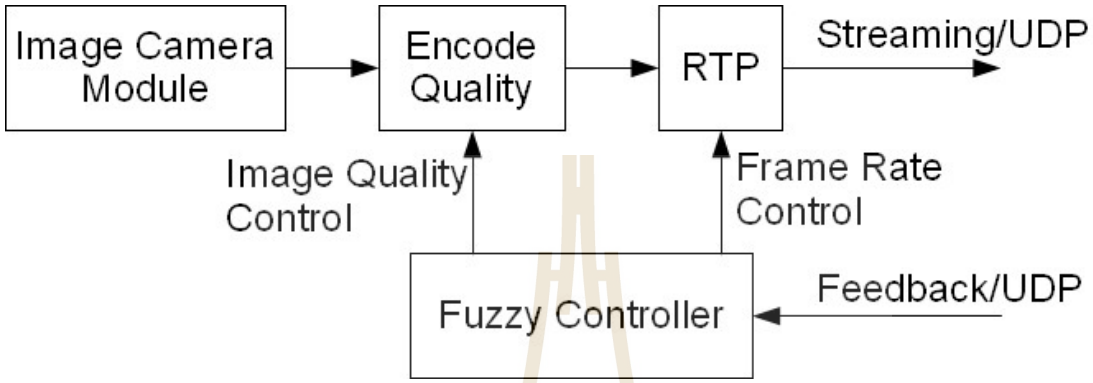
กล้องไอพีที่ทำการออกแบบใช้บอร์ดที่มีตัวประมวลผลตระกูล ARM7 เชื่อมต่อกับกล้องแบบ UART ที่ความเร็ว 115200 baud ในส่วนของโปรแกรมที่ทำงานบนกล้องไอพีได้ใช้ uIP ซึ่งเป็น TCP/IP Stack ซึ่งแจกโปรแกรมต้นฉบับฟรีโดยไม่มีค่าใช้จ่าย สำหรับตัวคอมไพเลอร์ที่ทำหน้าที่แปลงโปรแกรมต้นฉบับให้เป็นไบนารีไฟล์สำหรับดาวโหลดโปรแกรมลงไปที่กล้องไอพีนั้นได้ใช้ได้ใช้คอมไพเลอร์สำหรับตัวประมวลผล ARM ของบริษัท Keil แผนภาพการทำงานเป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างผลการไดร์ฟเทสพื้นที่ที่มีปัญหา

ภายในตัวกล้องไอพีนั้นจะแบ่งออกเป็นส่วนหลัก ๆ ได้ 4 ส่วนคือ การอ่านข้อมูลจากกล้อง การเข้ารหัสภาพ ตัวควบคุมฟังชั่น และการส่งข้อมูลออกไปให้ผู้ใช้ ตัวควบคุมฟังชั่นลอจิกจะรับข้อมูลป้อนกลับจากผู้ใช้ทาง

UDP ซึ่งค่าเหล่านี้คือ Frame Loss และค่า Frame Delay จากนั้นจะไปประมวลผลเทียบกับกฎฟัซซี่ซึ่งเอาท์พุทที่ได้จะไปควบคุม 2 ส่วนคือ ควบคุมการเข้ารหัสภาพและควบคุมอัตราการส่งภาพ ในการส่งภาพออกไปนั้นใช้ RTP เป็นโปรโตคอลในการส่งข้อมูล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างภายในตัวกล้องไอพี

3.3 การเชื่อมต่อกับโมดูลกล้อง

การเชื่อมต่อกับโมดูลกล้องเป็นการเชื่อมต่อแบบ UART โดยที่ความเร็วการการเชื่อมต่อคือ 115200 bps กล้องรุ่นให้ให้ภาพออกมาในรูปแบบ JPG อยู่แล้วจึงลดขั้นตอนในการแปลงข้อมูลดิบไปเป็น JPG หลักการในการติดต่อกับกล้องเบื้องต้นคือ Initialize และอ่านรูปภาพจากกล้องโดยที่การอ่านรูปภาพจากกล้องในรอบต่อ ๆ ไปไม่จำเป็นจะต้องทำการ Initialize อีก ชุดคำสั่งในการใช้งานทั้งหมดมีดังแสดงในตารางที่ 3.1

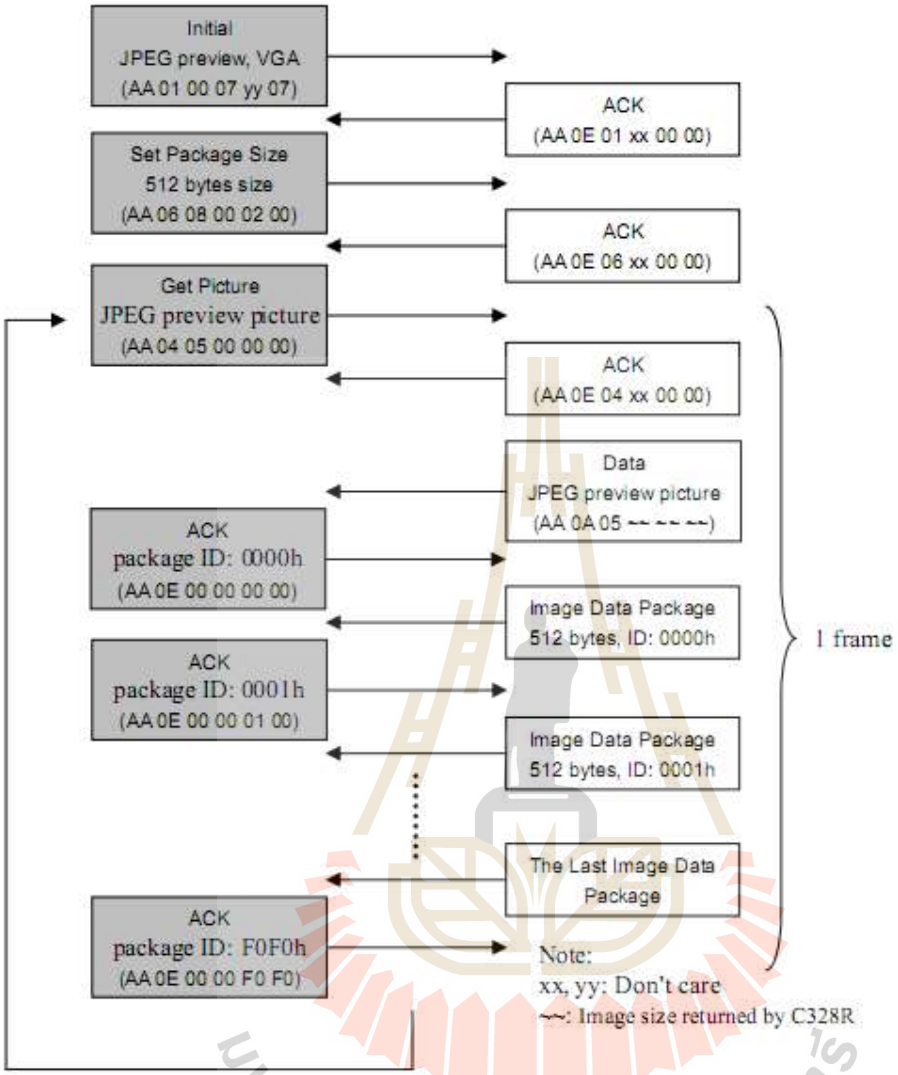
ในการอ่านข้อมูลภาพจากโมดูลกล้องนั้นจะกระทำตลอดเวลาด้วยความเร็วสูงสุด เพื่อให้ได้ความต่อเนื่องของภาพดีที่สุด ข้อมูลภาพนี้จะเก็บอยู่ในหน่วยความจำของบอร์ดประมวลผล ARM7 ซึ่งข้อมูลภาพนี้จะถูกใช้งานโดยฟังก์ชันการเข้ารหัสภาพอีกครั้งหนึ่งเพื่อลดขนาดภาพให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ต่อไป ในการอ่านข้อมูลภาพแต่ละภาพมีขั้นตอนแสดงในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 แสดงชุดคำสั่งที่ใช้กับโมดูลกล้อง

Command	ID Number	Parameter1	Parameter2	Parameter3	Parameter4
Initial	AA01h	00h	Color Type	RAW Resolution (Still image only)	JPEG Resolution
Get Picture	AA04h	Picture Type	00h	00h	00h
Snapshot	AA05h	Snapshot Type	Skip Frame Low Byte	Skip Frame High Byte	00h
Set Package Size	AA06h	08h	Package Size Low Byte	Package Size High Byte	00h
Set Baudrate	AA07h	1st Divider	2nd Divider	00h	00h
Reset	AA08h	Reset Type	00h	00h	xxh*
Power Off	AA09h	00h	00h	00h	00h
Data	AA0Ah	Data Type	Length Byte 0	Length Byte 1	Length Byte 2
SYNC	AA0Dh	00h	00h	00h	00h
ACK	AA0Eh	Command ID	ACK counter	00h / Package ID Byte 0	00h / Package ID Byte 1
NAK	AA0Fh	00h	NAK counter	Error Number	00h
Light Frequency	AA13h	Frequency Type	00h	00h	00h

3.4 การเข้ารหัสสัญญาณภาพ (VIDEO ENCODE)

ข้อมูลภาพที่ได้จากโมดูลกล้องนั้นเป็นข้อมูลในรูปแบบ JPG อยู่แล้ว แต่ที่ต้องมีตัวเข้ารหัสภาพอีกครั้งหนึ่งก็เพื่อที่จะลดคุณภาพของภาพเพื่อให้ภาพมีขนาดเล็กลงเพื่อใช้ส่งในขณะที่แบนด์วิดท์คับคั่ง โดยที่การเข้ารหัสนี้เป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของภาษาซีซึ่งจะทำการคอมไพล์ร่วมกับ uIP ที่ทำหน้าที่ TCP/IP Stack



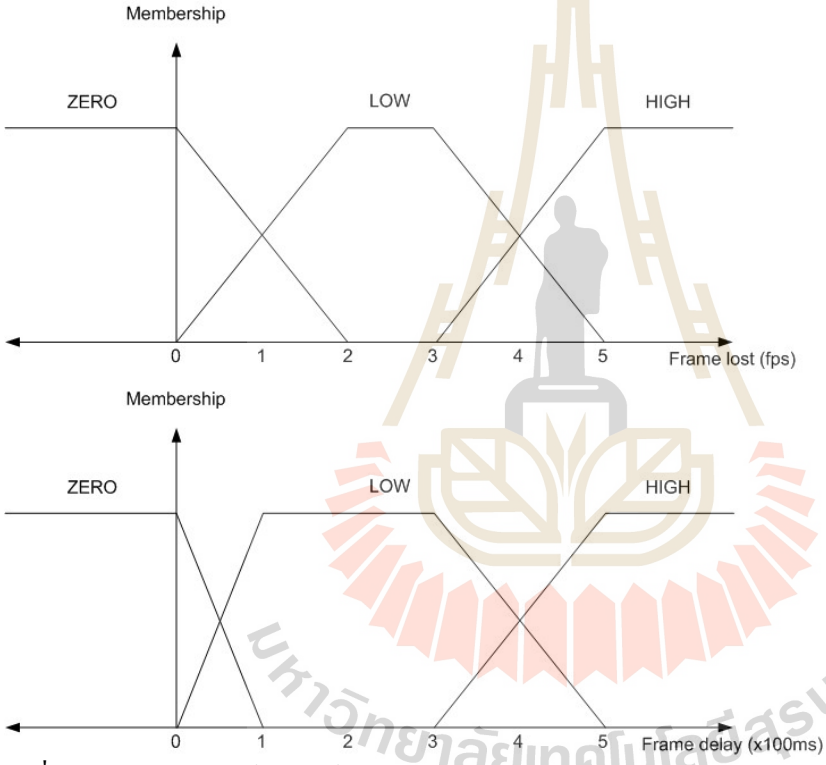
รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการอ่านข้อมูลภาพ 1 ภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5 ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

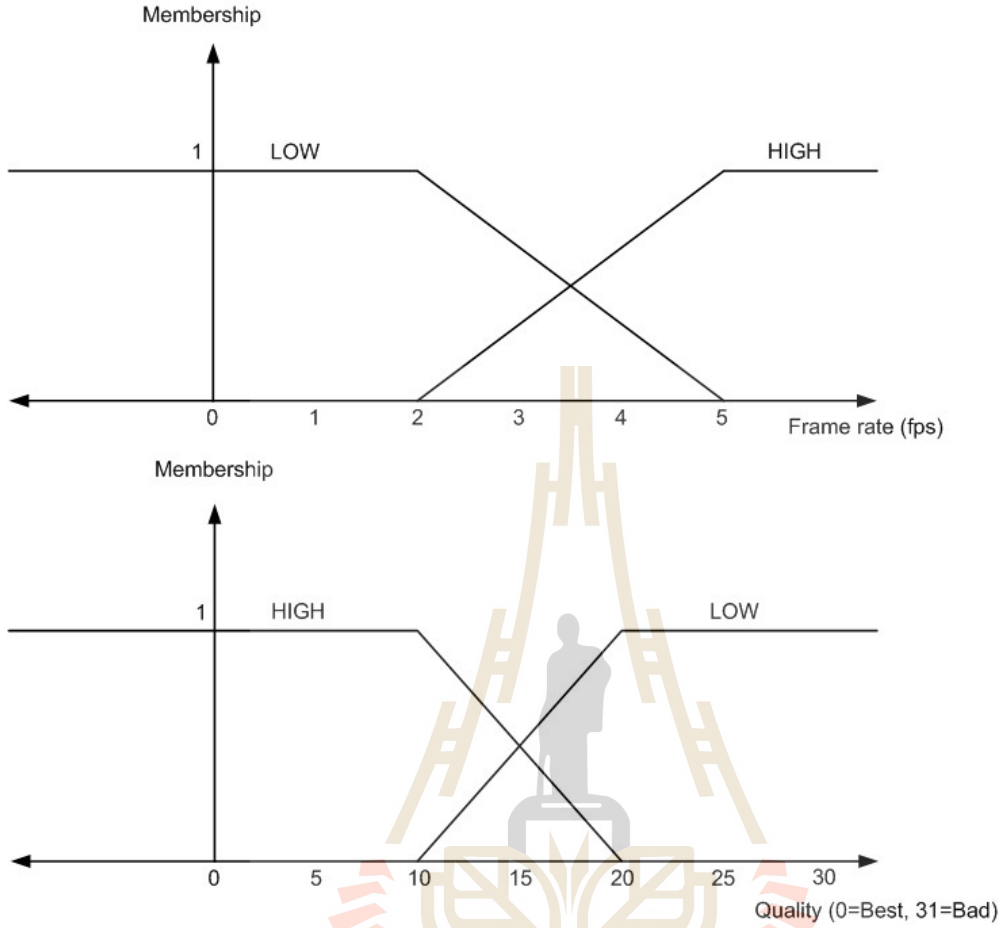
3.5.1 ฟัซซิไฟเออร์ (Fuzzifier)

ในการวิจัยนี้ฟัซซิไฟเออร์จะทำหน้าที่แปลงค่าสัญญาณจริงในที่นี้คือ Frame Loss และ Frame Delay ให้ไปอยู่ในรูปแบบของฟัซซี่เซต ค่า Frame Loss และค่า Frame Delay ที่เข้ามาจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบของค่าเมมเบอร์ชิปซึ่งมีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ซึ่งค่าเมมเบอร์ชิปนี้จะถูกส่งต่อไปยังตัวอนุมานฟัซซี่ตต่อไป ค่าเมมเบอร์ชิปของ Frame Loss และ Frame Delay แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงเมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของ Frame Loss และ Frame Delay

ค่าอัตราการส่งภาพและคุณภาพของภาพก็สามารถนำมาเป็นส่วนหนึ่งของกฎในการควบคุมได้เช่นกัน เพื่อให้รูปแบบในการควบคุมมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น เมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของอัตราการส่งภาพและคุณภาพของภาพเป็นดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงเมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของอัตราการส่งภาพและคุณภาพของภาพ

3.5.2 กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rule Base)

กฎฟัซซี่นั้นจะมาจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญที่สามารถแสดงออกมาในรูปของ ถ้า-แล้ว (If-Then) ในงานวิจัยนี้ได้สร้างกฎในการควบคุม 3 รูปแบบคือ การควบคุมอัตราการส่งภาพ ควบคุมคุณภาพของภาพและผสมทั้ง 2 แบบเข้าด้วยกัน

3.4.2.1 กฎในการควบคุมอัตราการส่งภาพ

Rule:

If (Frame Delay) is (High)

Then (Change Frame Rate) is (Negative High)

Rule:

If (Frame Delay) is (Low)

Then (Change Frame Rate) is (Negative Low)

Rule:

If (Frame Loss) is (High)

Then (Change Frame Rate) is (Negative High)

Rule:

If (Frame Loss) is (Low)

Then (Change Frame Rate) is (Negative Low)

Rule:

If (Frame Delay) is (Zero) and (Frame Loss) is (Zero)

Then (Change Frame Rate) is (Positive Low)

3.4.2.2 กฎในการควบคุมคุณภาพของภาพ

Rule:

If (Frame Delay) is (High)

Then (Change Quality) is (Positive High)

Rule:

If (Frame Delay) is (Low)

Then (Change Quality) is (Positive Low)

Rule:

If (Frame Loss) is (High)

Then (Change Quality) is (Positive High)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Rule:

If (Frame Loss) is (Low)

Then (Change Quality) is (Positive Low)

Rule:

If (Frame Delay) is (Zero) and (Frame Loss) is (Zero)

Then (Change Quality) is (Negative Low)

3.4.2.3 กฎในการควบคุมแบบผสม

Rule:

If (Frame Delay) is (High) and (Frame Rate) is (High)

Then (Change Frame Rate) is (Negative High)

Rule:

If (Frame Delay) is (High) and (Frame Rate) is (Low)

Then (Change Quality) is (Positive High)

Rule:

If (Frame Delay) is (Low) and (Frame Rate) is (High)

Then (Change Frame Rate) is (Negative Low)

Rule:

If (Frame Delay) is (Low) and (Frame Rate) is (Low)

Then (Change Quality) is (Positive Low)

Rule:

If (Frame Loss) is (High) and (Frame Rate) is (High)

Then (Change Frame Rate) is (Negative High)

Rule:

If (Frame Loss) is (High) and (Frame Rate) is (Low)

Then (Change Quality) is (Positive High)

Rule:

If (Frame Loss) is (Low) and (Frame Rate) is (High)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Then (Change Frame Rate) is (Negative Low)

Rule:

If (Frame Loss) is (Low) and (Frame Rate) is (Low)

Then (Change Quality) is (Positive Low)

Rule:

If (Frame Delay) and (Frame Loss) is (Zero) and (Frame Rate) is (Low) and (Quality) is (Low)

Then (Change Quality) is (Negative Low)

Rule:

If (Frame Delay) and (Frame Loss) is (Zero) and (Frame Rate) is (Low) and (Quality) is (High)

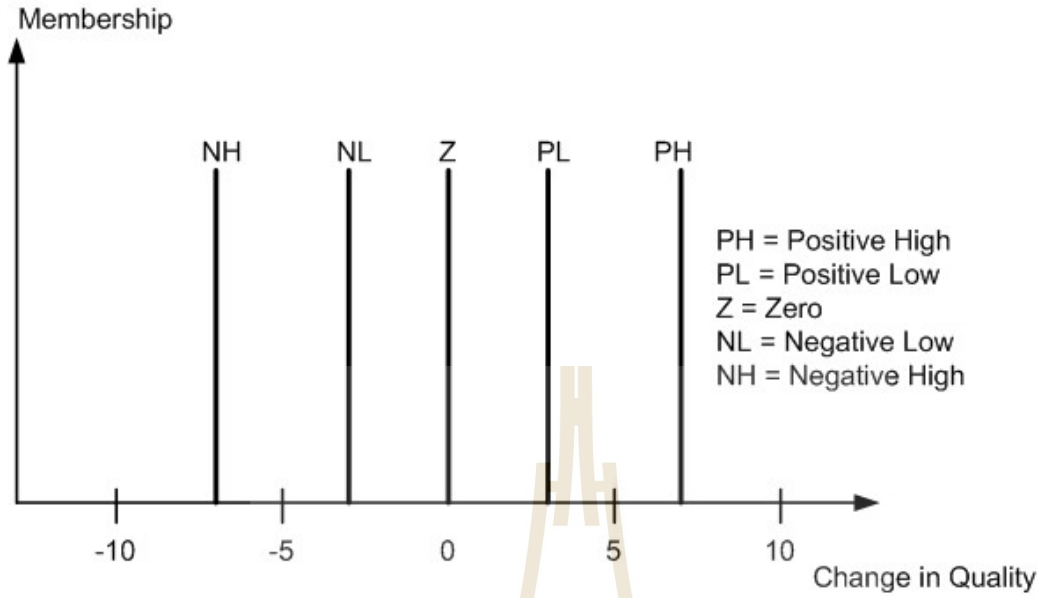
Then (Change Frame Rate) is (Positive Low)

3.5.3 ตัวอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference Engine)

ได้เลือกใช้การอนุมานแบบ Min-Max ดังสมการที่ 3.5 เนื่องจากการอนุมานแบบนี้ใช้พลังงานในการประมวลผลน้อยและมีขนาดโปรแกรมที่ได้จากการคอมไพล์มีขนาดเล็กเหมาะกับระบบฝังตัวที่มีเนื้อที่ให้เขียนโปรแกรมน้อย

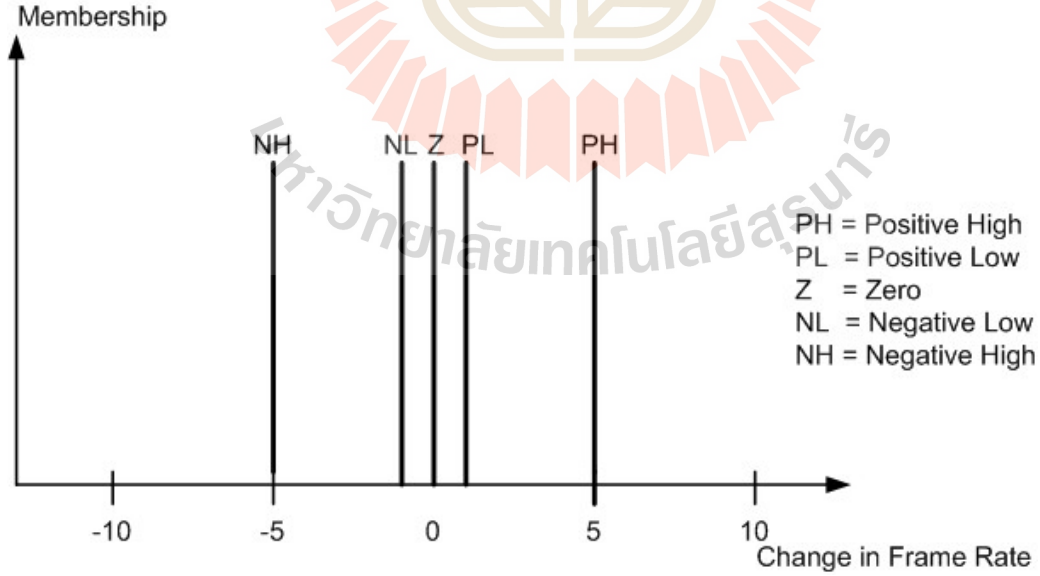
3.5.4 ดีฟัซซิไฟเออร์ (Defuzzifier)

ในส่วนของดีฟัซซิไฟเออร์จะมีการนิยามในส่วนของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและอัตราการส่งข้อมูลภาพ ซึ่งในส่วนของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้มีการนิยามเมมเบอร์ชิปฟังก์ชันไว้ 5 ระดับคือ การเปลี่ยนแปลงแบบ Positive High (PS), Positive Low (PL), Zero (Z) , Negative Low (NL), Negative High (NH) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของภาพ

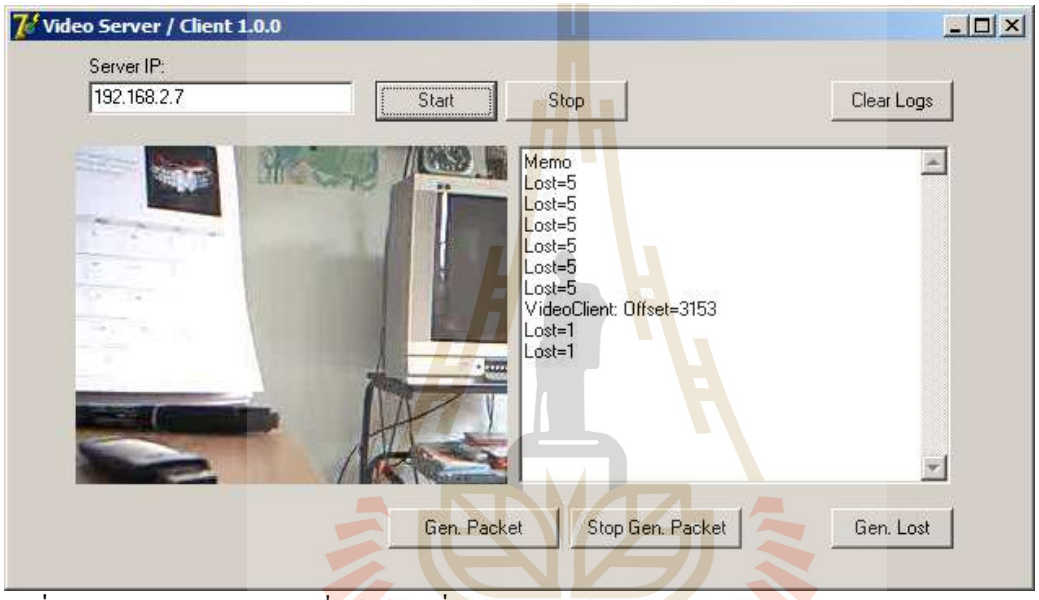
ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งภาพได้ทำการนิยามเมมเบอร์ชิปฟังก์ชันไว้ 5 ระดับเช่นกัน ซึ่งมีดังต่อไปนี้ Positive High (PH), Positive Low (PL), Zero (Z), Negative Low (NL), Negative High (NH) แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เมมเบอร์ชิปฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งภาพ

3.6 โปรแกรมแสดงภาพที่ผู้ใช้งาน

โปรแกรมรับภาพและแสดงภาพไปยังผู้ใช้ทำหน้าที่รับภาพที่ส่งมาจากกล้องไอพีที่ส่งข้อมูลมาทาง RTP ซึ่งโปรแกรมนี้จะดูค่าไทม์แสตมป์และหมายเลขลำดับของเฟรม RTP เพื่อประเมินค่า Frame Loss, Frame Delay แล้วทำการส่งค่าเหล่านี้กลับไปยังกล้องไอพีผ่านทาง UDP โปรแกรมรับภาพนี้พัฒนาขึ้นจาก Borland Delphi 7 ซึ่งมีคอมโพเนนท์ในด้านเน็ตเวิร์คให้ใช้มากมาย รูปของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โปรแกรมแสดงภาพฝั่งผู้ใช้งานที่พัฒนาโดยใช้โปรแกรม Borland Delphi 7

3.6.1 การปรับเวลาให้ตรงกัน (Time Synchronization)

ในช่วงเริ่มต้นของการรับข้อมูลภาพโปรแกรมแสดงภาพจะทำการสร้างฐานเวลาขึ้นมาเพื่อที่จะเป็นตัวเปรียบเทียบกับค่าไทม์แสตมป์ของข้อมูลภาพที่วิ่งเข้ามาซึ่งจะทำให้สามารถบอกถึงค่า Frame Loss และค่า Frame Delay ได้ เนื่องจากโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการต่าง ๆ ในปัจจุบันนี้สามารถเข้าถึงค่าฐานเวลาของระบบได้อยู่แล้ว แต่ค่าฐานเวลาของผู้ส่งและผู้รับอาจจะมีค่าต่างกัน เช่นตำแหน่งของผู้ส่ง และผู้รับอยู่คนละช่วงเวลากัน (Time Zone) เป็นต้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ค่า Time Offset ระหว่างผู้ส่งกับผู้รับซึ่งจะเป็นไปตามสมการ

$$\text{server time base} = \text{cleint time base} + \text{offset} \quad (3.1)$$

แพ็กเกจข้อมูลภาพที่ถูกส่งมาจากกล้องไอพีโดยใช้ RTP นั้นจะมีการประทับค่าไทม์แสตมป์ที่ส่วนหัวของ RTP แพ็กเกจ เมื่อข้อมูลนี้มาถึงโปรแกรมแสดงภาพย่อมสามารถคำนวณค่า Time Offset นี้ได้ แต่เพื่อให้ข้อมูลค่า Time Offset นี้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการหาค่าเฉลี่ยจากหลายแพ็คเกจแทนที่จะใช้ข้อมูลจากแพ็คเกจเดียว โดยการหาค่าเฉลี่ยจากสมการ

$$\text{time_offset} = \frac{\text{time_offset}_1 + \cdots + \text{tim}\ \ \text{_offset}_n}{n} \quad (3.2)$$

โดยที่ n คือ จำนวนแพ็คเกจที่เข้ามา

3.6.2 การพิจารณาค่า Frame Loss และค่า Frame Delay

ในการหาค่า Frame Loss นั้นสามารถหาได้จากค่า Sequence Number ที่อยู่ในเฮดเดอร์ของ RTP ในแต่ละแพ็คเกจของ RTP อาจจะประกอบด้วยข้อมูลภาพหลาย ๆ ภาพ แต่ละแพ็คเกจของ RTP จึงจำเป็นต้องมีค่า Sequence Number นี้เพื่อบอกถึงลำดับของภาพที่จะไปแสดงผลบนหน้าจอได้อย่างถูกต้อง หากมีค่าลำดับนี้หายไปหรือมาถึงโปรแกรมแสดงภาพช้ามากเกินไปก็จะถือว่า Frame Loss ได้เกิดขึ้น

ในส่วนของ Frame Delay เมื่อได้ข้อมูล Time Offset แล้วก็จะนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการหาค่า Frame Delay ของแต่ละแพ็คเกจที่วิ่งเข้ามาที่โปรแกรมแสดงภาพดังสมการ

$$\text{packet frame delay} = \text{RTP timestamp} - \text{time offset} \quad (3.3)$$

ซึ่งหากค่า Packet Frame Delay นี้มีค่ามากเกินกว่าค่าที่กำหนดก็จะถือว่าเกิด Frame Delay ขึ้น แต่ก็เป็นไปได้ที่ค่า Packet Frame Delay นี้จะมีค่าน้อยกว่า 0 ซึ่งมีความหมายว่า RTP แพ็คเกจเข้ามาถึงก่อนกำหนดซึ่งสามารถเป็นไปได้เนื่องจากค่า Time Offset ที่คำนวณในช่วงแรก ๆ นั้นอาจจะเป็นช่วงที่เครือข่ายมีความคับคั่งในการใช้งานมากกว่าในขณะปัจจุบัน ซึ่งในกรณีนี้ก็จะถือว่าไม่มี Frame Delay เกิดขึ้น

3.6.3 ข้อมูลป้อนกลับ (Feedback Information)

ค่า Frame Loss และค่า Frame Delay ที่คำนวณได้จะถูกส่งกลับไปยังกล้องไอพีผ่านทาง UDP โดยส่งเป็นคาบเวลาตามที่ตั้งไว้เช่นทุก ๆ 5 วินาทีเป็นต้น เมื่อข้อมูลได้ถูกส่งออกไปเรียบร้อยแล้วก็จะทำการรีเซตค่า Frame Loss และ Frame Delay เพื่อเริ่มนับใหม่

3.7 ผลการส่งข้อมูลภาพไร้สาย

ในการทดลองนี้ได้ให้กล้องไอพีมีที่ตั้งอยู่คนละเครือข่ายกับผู้รับชม สำหรับเครือข่ายไร้สายนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดความคับคั่งในเครือข่ายได้ง่ายเนื่องมาจากความเร็วของไร้สายนั้นไม่สูงมากนั้นเมื่อเทียบกับแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการส่งข้อมูลภาพ การทดลองนี้เป็นการทดสอบกฎควบคุมฟัซซี่ลอจิกในเรื่องของการมี Frame Loss และ Frame Delay เช่นกฎดังนี้

Rule:

If (Frame Delay) is (High)

Then (Change Quality) is (Positive High)

Rule:

If (Frame Delay) is (Low)

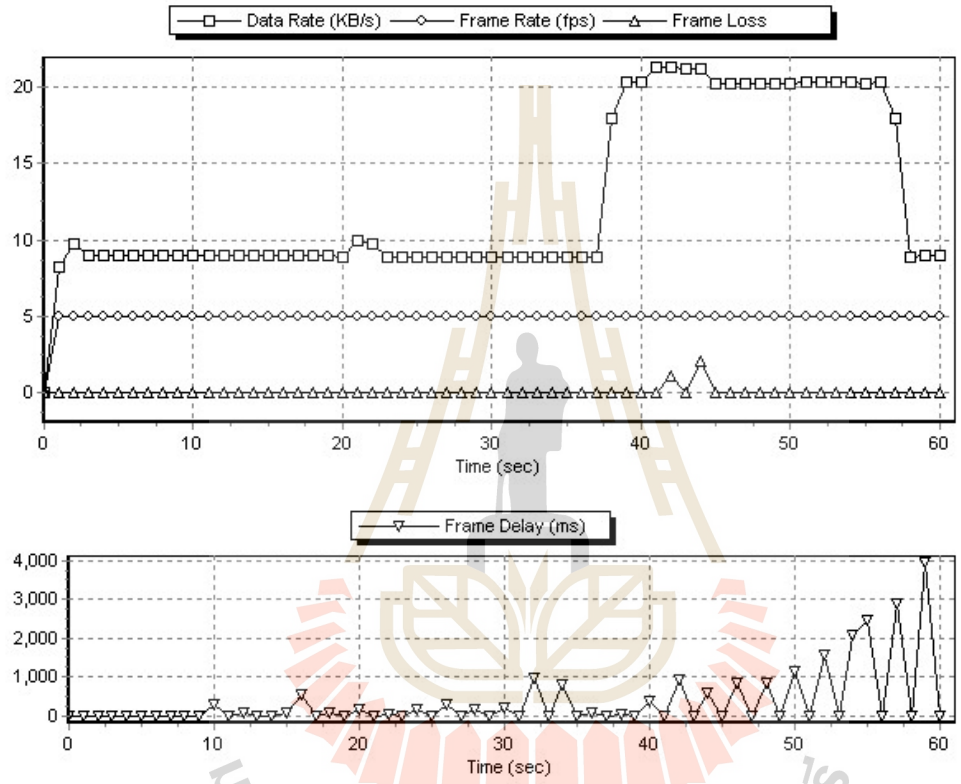
Then (Change Quality) is (Positive Low)

ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือการควบคุมคุณภาพของภาพโดยให้อัตราการส่งภาพคงที่และควบคุมอัตราการส่งภาพโดยให้คุณภาพของภาพคงที่ รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการเชื่อมต่อในแบบไร้สาย

รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายไร้สาย

3.7.1 การควบคุมคุณภาพของภาพ

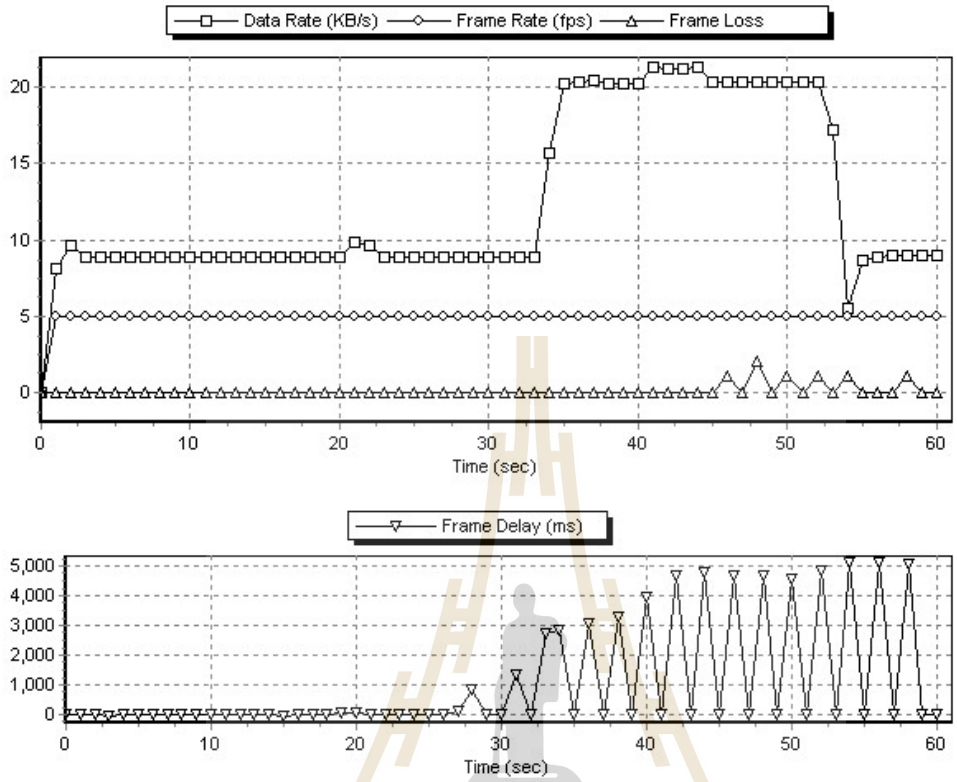
ในการทดลองนี้จะทำการคงค่าอัตราการส่งภาพ ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะปรับเปลี่ยนเฉพาะคุณภาพของภาพเพียงเท่านั้น ผลลัพธ์การทำงานแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้อัตราการส่งภาพมีค่าคงที่

จากนั้นทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการเพิ่มการใช้งานในเครือข่าย ณ เวลา 20 วินาที ได้ผลดังรูปที่ 3.11

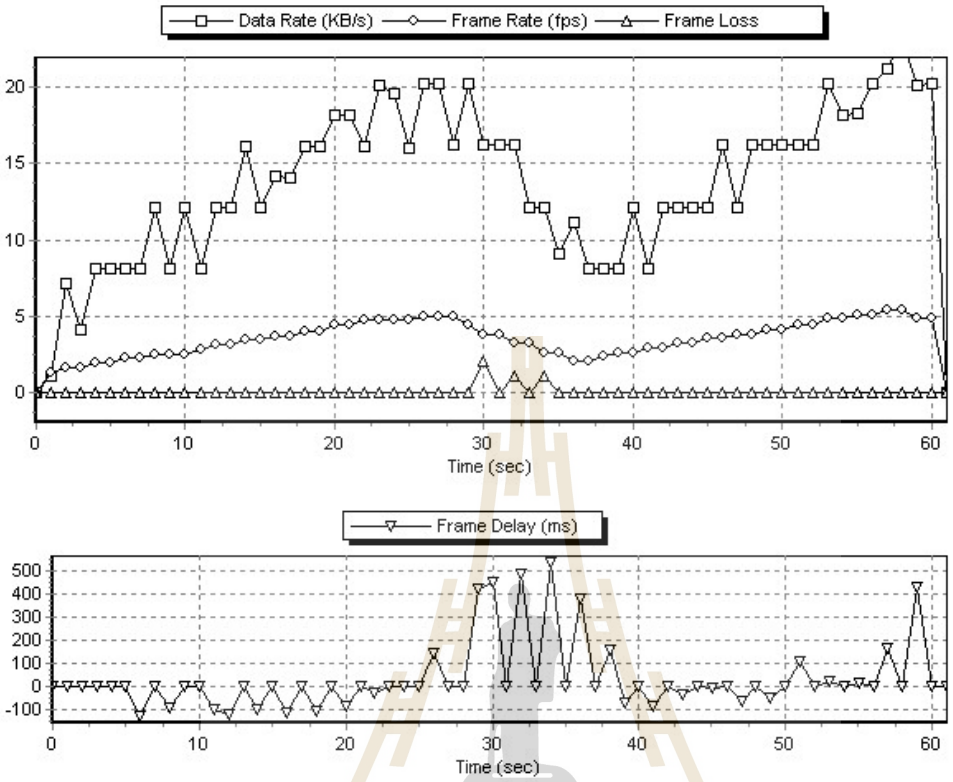
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.11 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้คุณอัตราการส่งภาพมีค่าคงที่และมีการเพิ่มการใช้งานในเครือข่ายที่เวลา 20 วินาที

3.7.2 การควบคุมอัตราการส่งภาพ

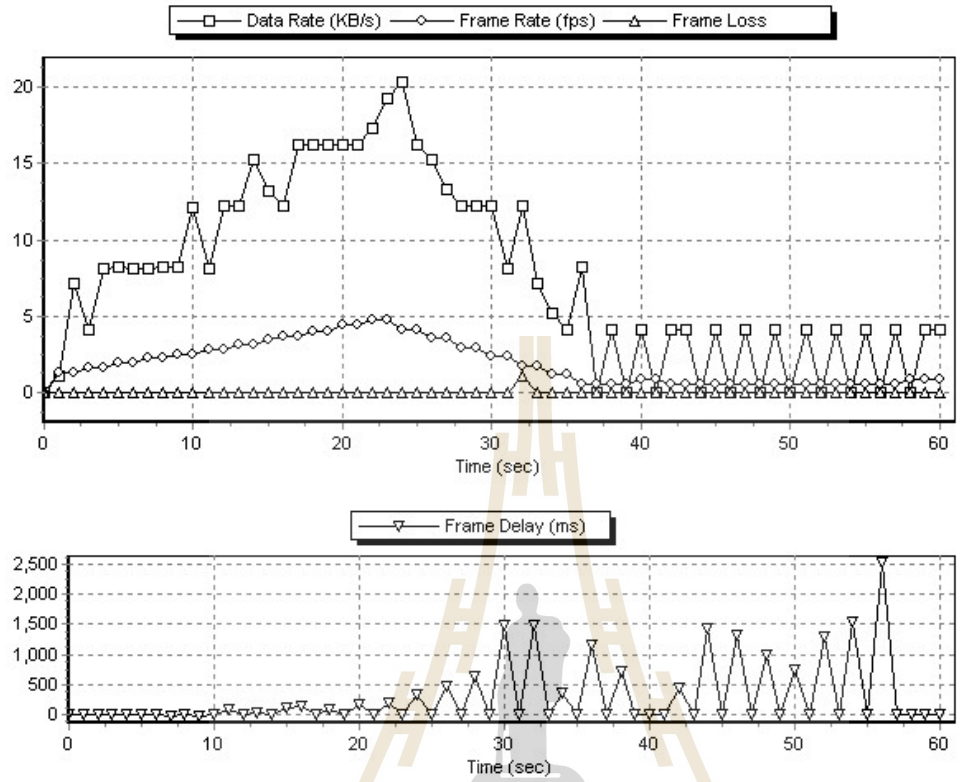
ในการทดลองนี้จะให้คุณภาพของภาพมีค่าคงที่ ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะปรับเปลี่ยนเฉพาะอัตราการส่งภาพเพียงเท่านั้น ผลลัพธ์การทำงานแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้คุณภาพของภาพมีค่าคงที่

จากนั้นทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการเพิ่มการใช้งานในเครือข่าย ณ เวลา 20 วินาที ได้ผลดังรูปที่ 3.13

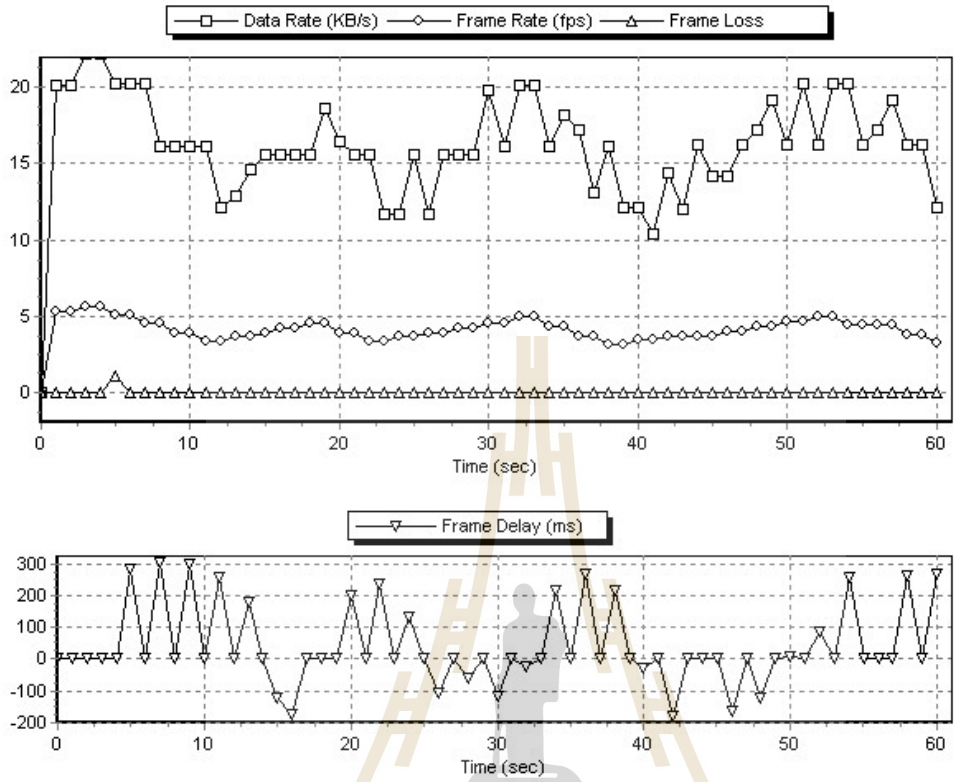
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.13 การส่งข้อมูลภาพ โดยให้คุณภาพของภาพมีค่าคงที่และมีการเพิ่มการใช้งานในเครือข่ายที่เวลา 20 วินาที

3.7.3 การควบคุมคุณภาพและอัตราการส่งภาพผสมกัน

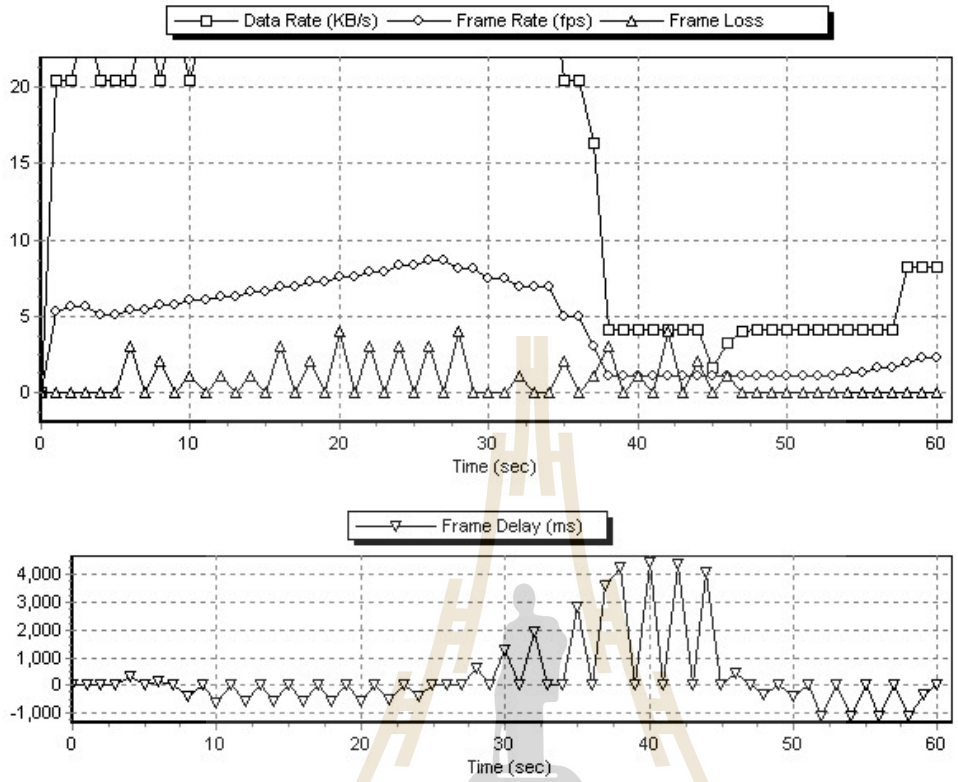
ในรูปแบบนี้กฎฟัซซี่จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือถ้าเครือข่ายไม่มีความคับคั่งก็จะเพิ่มอัตราการส่งภาพและคุณภาพของภาพไปเรื่อย ๆ แต่ถ้ามีความคับคั่งเกิดขึ้นในเครือข่ายก็จะลดอัตราการส่งภาพลงจนกระทั่งถึงค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้จากนั้นจึงลดคุณภาพของภาพลง ผลลัทธ์แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การส่งข้อมูลภาพ โดยมีการปรับคุณภาพของภาพและอัตราการส่งภาพร่วมกัน

จากนั้นทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการเพิ่มการใช้งานในเครือข่าย ณ เวลา 20 วินาที ได้ผลดังรูปที่ 3.15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.15 การส่งข้อมูลภาพ โดยมีการปรับคุณภาพของภาพและอัตราการส่งภาพร่วมกันและมีการใช้งานในเครือข่ายที่เวลา 20 วินาที

3.8 กล่าวท้ายบท

ในบทนี้เราได้แสดงให้เห็นถึงกล้องไอพีที่ได้พัฒนาขึ้นมาสามารถส่งข้อมูลภาพด้วยรูปแบบที่เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ของเน็ตเวิร์คได้ โดยมีการปรับอัตราการส่งข้อมูลภาพและคุณภาพของภาพ ซึ่งวิธีที่จะปรับนั้นก็มาจะกฎควบคุมฟัซซี่ซึ่งแต่ละกฎนั้นมาจากประสบการณ์ของผู้ใช้งานหรือผู้เชี่ยวชาญแทนที่จะเป็นคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน สำหรับโมดูลกล้องที่มาเชื่อมต่อกับบอร์ดประมวลผลนั้นเป็นกล้องที่ให้ข้อมูลในรูปแบบ JPG อยู่แล้วจึงเป็นการลดขนาดของหน่วยความจำของบอร์ดประมวลผลลง เนื่องจากว่าหากได้เป็นข้อมูลดิบในลักษณะบิตแมป (Bitmap) ก็จะใช้ขนาดของหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้น แต่ก็มีข้อด้อยคือรูปแบบที่กล้องไอพีในงานวิจัยนี้จะสนับสนุนการทำงานก็จะมีเพียง Motion JPEG

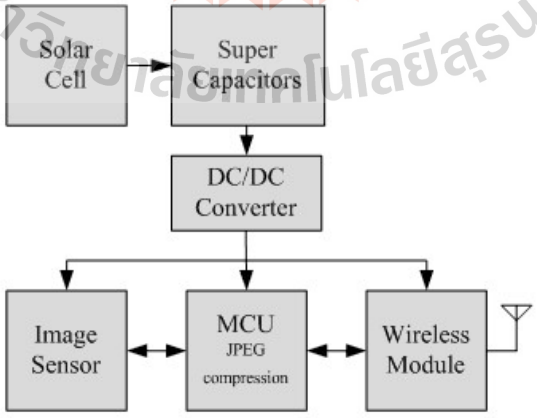
บทที่ 4 ต้นแบบโนดรับรู้ภาพที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และผลการทดสอบ

4.1 กล่าวนำ

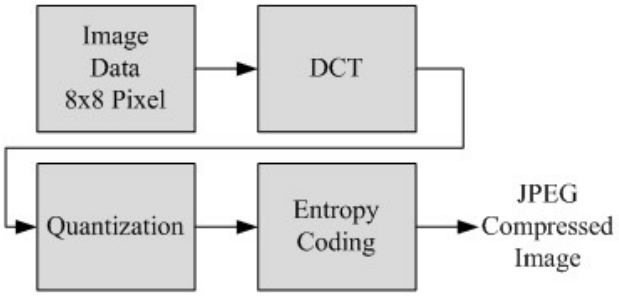
เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการพัฒนาต้นแบบโนดรับรู้ภาพที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และผลการทดสอบ เพื่อให้สามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการทำงานของโนดได้อย่างตลอดชีพ และทำการวิเคราะห์สรุปผลที่ได้จากการทดลองในตอนสุดท้าย

4.2 โครงสร้างของต้นแบบโนดรับรู้ภาพ

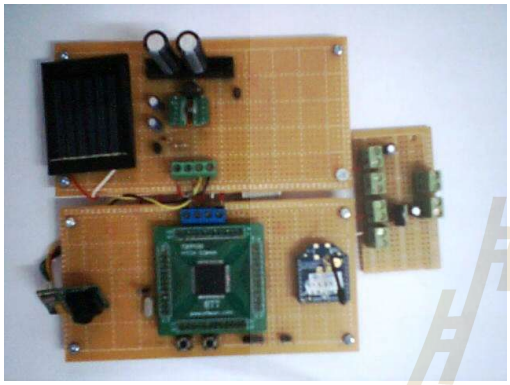
โนดรับรู้ภาพที่ใช้ JPEG ประกอบด้วยโมดูลเซ็นเซอร์ภาพ CMOS, MCU, XBeemodule, เซลล์แสงอาทิตย์และตัวแปลง DC / DC ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แหล่งพลังงานของระบบได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรควบคุมจากนั้นจะถูกเก็บไว้ในตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์ ตัวแปลง DC / DC จะแปลงแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น 3.3 โวลต์เป็นซัพพลายเออร์ของ MCU, เซ็นเซอร์รับภาพ CMOS และโมดูล XBee อย่างไรก็ตามตัวแปลง DC / DC มีข้อ จำกัด เกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตขั้นต่ำและขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเมื่อกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พุ่งเข้าสู่ตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์อย่างต่อเนื่องแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซุปเปอร์จะเพิ่มขึ้นจนกว่าจะเกินแรงดันไฟฟ้าต่ำ / ตัวแปลง DC ณ จุดนี้พลังงาน 3.3 โวลต์สามารถใช้ได้



รูปที่ 4.1 โนดรับรู้ภาพ JPEG-based ในเครือข่าย WISN



รูปที่ 4.2 การบีบอัดภาพ JPEG



รูปที่ 4.3 ต้นแบบโนดรับรู้ภาพ

ตัวเก็บประจุซุปเปอร์มีกระแสไฟรั่วที่ต้องรวมอยู่ในการออกแบบ ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่อง กระแสรั่วไหลของตัวเก็บประจุซุปเปอร์อยู่ในช่วงตั้งแต่ μA ถึง mA ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต นอกจากนี้การจัดเรียงของตัวเก็บประจุพิเศษสามารถเปลี่ยนปริมาณการรั่วไหลของกระแส [15] สำหรับตัวแปลง DC / DC นั้นยังมีกระแสไฟรั่วที่ต้องรวมอยู่ในการออกแบบ ผู้ผลิตหลายรายแสดงกระแสรั่วไหลในช่วง rangeA และประสิทธิภาพในช่วง 80% ถึง 95%

แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟจากตัวแปลง DC / DC ที่จัดหา MCU, เซ็นเซอร์รับภาพ CMOS และโมดูล XBee เมื่อถึงเวลาส่งภาพ JPEG ไปยังโหนดเป้าหมาย MCU จะปลุกจากโหมดสลีปและเริ่มต้นการเริ่มต้นบนอุปกรณ์ต่อพ่วงเช่น เฟสล็อกลูป (PLL), การสื่อสารแบบอนุกรม (UART) ฯลฯ จากนั้นจะเปิดเซ็นเซอร์ภาพ CMOS เพื่อรับข้อมูลภาพดิบซึ่งถูกเก็บไว้ใน RAM ภายในของ MCU หลังจากเสร็จสิ้นด้วยเซ็นเซอร์รับภาพ CMOS, MCU ปิดโมดูลเพื่อลดการใช้พลังงานก่อนที่จะเริ่มกระบวนการบีบอัด JPEG ในการวิจัยของเราเราใช้โมดูลปิดเชิงพาณิชย์เพื่อความเรียบง่ายและการพัฒนาที่รวดเร็ว รูปแบบภาพดิบของเซ็นเซอร์ภาพ CMOS คือรูปแบบ RGB444 และ MCU ได้รับข้อมูลนี้ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรมที่อัตราการรับส่งข้อมูล 115200 และความละเอียดของภาพได้รับการแก้ไขที่ 60x80 พิกเซลหลังจากกระบวนการบีบอัด

JPEG แล้วภาพ JPEG จะถูกเก็บไว้ จากนั้น MCU จะเปิดใช้งานโมดูล XBee ส่งสัญญาณ Request To Send (RTS) รอสัญญาณ Clear To Send (CTS) จากโมดูล XBee และเข้าสู่ห่วงการส่ง งานวิจัยของเราไม่ได้มุ่งเน้นไปที่พลังงานของการกำหนดเส้นทางของ WSN ดังนั้นเราจึงใช้ XBee ผู้ส่งและผู้รับอย่างง่าย นอกจากนี้เรายังใช้โมดูล XBee เชิงพาณิชย์เพื่อการใช้งานที่ง่ายและรวดเร็ว MCU สื่อสารกับโมดูล XBee ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรมที่อัตรา baud 115200 เช่นเดียวกับเซ็นเซอร์ภาพ CMOS

MCU เริ่มกระบวนการบีบอัด JPEG ด้วยคุณภาพของภาพที่กำหนดเพื่อให้พลังงานโดยประมาณเท่ากับพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์ นี่คือทางออกที่ดีที่สุดของการรวมพลังงานแสงอาทิตย์และตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์ ในชีวิตจริงพลังงานแสงอาทิตย์สามารถคาดคะเนได้โดยประมาณดังนั้นพลังงานที่เก็บในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ควรถูกสงวนไว้สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์บางรูปแบบ เมื่อ MCU บีบอัดภาพดิบเป็นภาพ JPEG กระบวนการบีบอัดที่มีคุณภาพสูงจะใช้เวลานานกว่ากระบวนการคุณภาพต่ำ นอกจากนี้เมื่อค่าคุณภาพสูงข้อมูลภาพ JPEG จะใหญ่กว่าค่าคุณภาพต่ำกระดาษนี้เน้นการเลือกค่าคุณภาพที่ดีที่สุดเพื่อให้พลังงานทั้งหมดที่เก็บไว้ในซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถใช้งานได้ ผู้เขียนยังลดการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการให้น้อยที่สุด ผลการวิจัยพบว่าเราจะได้ภาพ JPEG คุณภาพดีที่สุดสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์รายวัน เราสามารถขยายระยะเวลาการประมาณจาก 1 วันเป็นหลายวันขึ้นอยู่กับความต้องการที่แท้จริง สิ่งนี้จะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าของ super-capacitor และช่วงเวลาการส่ง

4.3 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

การพิจารณากระบวนการใช้พลังงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงเวลาคือ ในเวลากลางวัน T_{day} และในเวลากลางคืน T_{night} โดยที่ $T_{day} + T_{night}$ = 24 ชั่วโมง ความเหมาะสมของค่าเหล่านี้มาจากผลการทดลองในช่วงกลางวันกระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการชาร์จพลังงานเข้าไปในตัวเก็บประจุซุปเปอร์ พลังงานของตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์จะได้รับเป็น

$$E_{cap} = \frac{1}{2} C V_{cap}^2 \tag{4.1}$$

แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุพิเศษถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าคงที่เพื่อจ่ายระบบโดยรวมโดยใช้ตัวแปลง DC / DC ระบบประกอบด้วย MCU, เซ็นเซอร์รับภาพ CMOS และโมดูล XBee ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบคือ 3.3Volt อย่างไรก็ตามตัวแปลง DC / DC มีแรงดันไฟฟ้าการทำงานขั้นต่ำ V_min ดังนั้นพลังงานที่ใช้งานของระบบจะได้รับจาก

$$E_{cap}(d) = \frac{1}{2}C(V_{cap}(d) - V_{min})^2 \quad (4.2)$$

ที่ $E_{cap}(d)$ คือที่เก็บพลังงานในซุปเปอร์ตัวเก็บประจุ d คือวัน C เป็นค่าคงที่ของซุปเปอร์ตัวเก็บประจุ หน่วยใน Farad และ $V_{cap}(d)$ เป็นแรงดันไฟฟ้าของซุปเปอร์ตัวเก็บประจุ

ก่อนเข้าสู่เวลากลางคืนพลังงานในสมการ (4.2) จะถูกใช้เป็นเวลากลางคืนทั้งหมดเพื่อส่งภาพ JPEG ไปยังโหนดเป้าหมาย ในแต่ละช่วงเวลาส่ง MCU จะตื่นขึ้นจากโหมดสลีปและดำเนินการขั้นตอนการบีบอัดพลังงานทั้งหมดของการบีบอัด JPEG ต่อการส่งเวลา ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{jpeg}(q) = E_{cmos} + E_{mcu}(q) + E_{xbee}(q) + E_{sleep} \quad (4.3)$$

เมื่อ $E_{jpeg}(q)$ คือค่าประมาณของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการบีบอัดสัญญาณในแต่ละคาบของการส่งข้อมูล q คือคุณภาพของการบีบอัดภาพ JPEG มีค่าในช่วง 1-99 E_{cmos} คือพลังงานของการส่งภาพข้อมูลดิบไปที่ MCU $E_{mcu}(q)$ คือพลังงานที่จำเป็นสำหรับการบีบอัด JPEG และการสื่อสาร $E_{xbee}(q)$ คือพลังงานที่จำเป็นสำหรับโมดูล XBee เพื่อส่งข้อมูล JPEG ไปยังโนดเป้าหมาย E_{sleep} คือพลังงานที่ใช้สำหรับโหมดการหลับของ MCU

ดังนั้นพลังงานทั้งหมดของกระบวนการบีบอัดภาพ JPEG ตอนกลางคืนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_{jpeg_night}(q) = E_{jpeg}(q) * \frac{T_{night}}{T_{send}} \quad (4.4)$$

เมื่อ T_{send} คือช่วงเวลาส่งข้อมูล

พลังงานที่เก็บในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในสมการ (4.2) จะถูกใช้สำหรับการบีบอัด JPEG อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุซุปเปอร์มีกระแสรั่วไหลภายในระหว่างชั้นไดอิเล็กตริกและตัวแปลง DC / DC ซึ่งไม่ได้มีประสิทธิภาพ 100% ดังนั้นพลังงานที่เก็บในซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับการบีบอัด JPEG จึงเป็น:

$$\left(E_{cap_night}(d) - E_{cap_leak}\right) * \eta = E_{jpeg_night}(q) \quad (4.5)$$

เมื่อ $E_{cap_night}(d)$ คือพลังงานที่เก็บในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ E_{cap_leak} คือพลังงานที่กระแสรั่วไหลจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์ η คือประสิทธิภาพของตัวแปลง DC/DC

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในช่วงเวลากลางวันเซลล์สุริยะจะสร้างกระแสเฉลี่ย $i_{solar}(d)$ ในช่วงเวลากลางวัน T_{day} กระแสนี้จะถูกใช้สำหรับกระบวนการบีบอัดภาพ JPEG ในเวลากลางวันและขณะเดียวกันก็ทำการชาร์จไฟให้กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์เพื่อใช้ในตอนกลางคืน ค่าเฉลี่ยของพลังงานในเวลากลางวัน T_{day} คือ $E_{solar}(d)$ โดยทั่วไปแล้วครึ่งหนึ่งของพลังงานจะถูกใช้ในเวลากลางวันและอีกครึ่งจะถูกใช้ในเวลากลางคืน อย่างไรก็ตามพลังงานที่สะสมไว้ถูกจำกัดด้วย V_{max} เพราะค่าพลังงานสูงสุดที่เก็บไว้ได้จะเป็นไปตาม $E_{cap_max} = \frac{1}{2} C {V_{max}}^2$

ถ้าค่าเฉลี่ยของพลังงานจากเซลล์สุริยะมีค่าน้อยกว่า $2E_{cap_max}$ นั่นคือพลังงานสามารถถูกแบ่งเป็นสองส่วนที่เท่าๆ กันสำหรับเวลากลางวันและเวลากลางคืนซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$E_{night} = \frac{E_{solar}}{2}$$

$$E_{day} = \frac{E_{solar}}{2}$$

แต่ถ้าค่าเฉลี่ยของพลังงานมากกว่า $2E_{cap_max}$ พลังงานสำหรับในเวลากลางวันจะเขียนได้ดังนี้

$$E_{day}(d) = E_{solar}(d) - E_{cap_max} \quad (4.6)$$

ในทุกวันก่อนเข้าสู่เวลากลางคืน *MCU* อ่านค่าพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุพิเศษและคำนวณปริมาณพลังงานจริง จากนั้น *MCU* ค้นหาคุณภาพที่เหมาะสม *q* เพื่อให้สมการ (4.5) เป็นที่พอใจ รูปแบบภาพได้รับผลกระทบโดยตรงกับขนาดภาพ *JPEG* หากรูปแบบภาพธรรมดาเช่นภาพท้องฟ้าปลอดโปร่งขนาดภาพ *JPEG* จะเล็กลงเมื่อเทียบกับรูปแบบภาพโดยละเอียดเช่น ป่า เนื่องจากท้องฟ้าแจ่มใสจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ *AC* ทั้งหมดเป็นศูนย์ผลลัพธ์จะมีขนาดเล็กกว่าของภาพ *JPEG* เพื่อจัดการรูปแบบภาพที่หลากหลายเราปรับคุณภาพของการบีบอัด *JPEG* ในแต่ละช่วงเวลาการส่งเพื่อชดเชยช่องว่างระหว่างรุ่นอ้างอิงและสภาพแวดล้อมจริง

ผู้วิจัยจะต้องตระหนักถึงความสมดุลของพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะใช้ในเวลากลางวันและกลางคืน ในฤดูร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยจะสูงมากจนสามารถรับพลังงานได้มากในเวลากลางวันในตอนกลางคืนอย่างไรก็ตามพลังงานยังคงถูก จำกัด โดยแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซุปเปอร์ ในฤดูฝนกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยจะต่ำความสมดุลของพลังงานระหว่างกลางวันและกลางคืนเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง กระแสโซล่าร์ต่ำอาจไม่เพียงพอที่จะชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์จาก V_{min} ถึง V_{max} แต่จะหยุดในบางค่าระหว่าง V_{min} และ V_{max}

4.4 ผลการทดสอบ

ในส่วนนี้การใช้งานของระบบที่นำเสนอได้รับการดำเนินการโดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบต่าง ๆ ส่วนประกอบหลักประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ตัวเก็บประจุซุปเปอร์ตัวแปลง DC / DC เซ็นเซอร์ภาพ CMOS โมดูล MCU และ XBeeโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรองรับกระแสสูงสุดที่ 45mA พร้อมแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 3.5Volt กระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์ไหลผ่านไดโอดไบแอสไปข้างหน้าจากนั้นเก็บไว้ในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซุปเปอร์เพิ่มขึ้นในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ เมื่อแรงดันเกินแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำของตัวแปลง DC / DC, แหล่งจ่ายไฟ 3.3Volt จะพร้อมใช้งานสำหรับ MCU, เซ็นเซอร์รับภาพ CMOS และโมดูล XBee

ชิปของโมดูลเซ็นเซอร์ภาพ CMOS คือ C328 จาก COMedia โมดูลนี้ทำงานที่ 3.3 โวลต์และการใช้ในปัจจุบันคือ ~ 60mA เมื่อโมดูลนี้เข้าสู่โหมดสลีปการใช้กระแสไฟ ~ 100uA การสิ้นเปลืองกระแสไฟยังคงสูง ดังนั้นเราจึงใช้ทรานซิสเตอร์เปิด / ปิดโมดูลแทนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลสถานะใด ๆ กระแสรั่วของทรานซิสเตอร์น้อยกว่า 1uA เมื่อโมดูลถูกปิด เซ็นเซอร์รับภาพ CMOS สื่อสารกับ MCU ผ่านซีเรียลที่ baud 115200

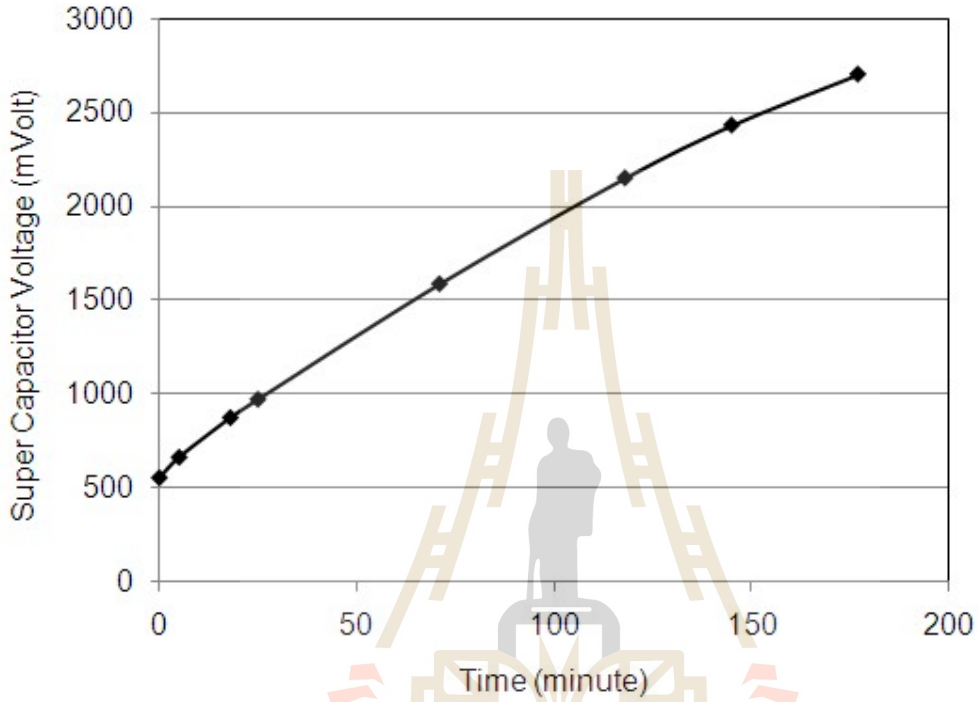
MCU เป็น ARM7TDMI จากสารกึ่งตัวนำ NXP หมายเลขชิ้นส่วนคือ LPC2378 MCU นี้มีหน่วยความจำแฟลช 512KB สำหรับรหัสผู้ใช้และ 64KB SRAM งานนี้ใช้หน่วยความจำแฟลช ~ 10KB จาก 512KB วัตถุประสงค์ของ MCU คือการแปลงข้อมูลภาพ RGB444 ที่มาจากเซ็นเซอร์ภาพ CMOS เป็นรูปแบบ JPEG ทั้งภาพ RGB444raw และภาพ JPEG ถูกเก็บไว้ใน SRAM ของ MCU ในงานนี้ข้อมูลภาพดิบจะถูกกำหนดไว้ที่ 60x80 พิกเซลเพื่อให้ขนาดข้อมูลภาพดิบคงที่ 7200 ไบต์

โมดูลการสื่อสารไร้สายเป็นโมดูล XBee จาก DIGI International หมายเลขชิ้นส่วนคือ XB24-Z7WII การใช้กระแสไฟอยู่ที่ ~ 50mA ที่ 3.3 โวลต์และอัตราข้อมูลสูงสุดคือ 250Kbps พร้อมกำลังขับ 1mW MCU สื่อสารกับ XBee ผ่านอินเตอร์เฟสแบบอนุกรมที่อัตรา baud 115200 พร้อมการควบคุมการไหลของฮาร์ดแวร์ RTS / CTS มีโมดูล XBee เพียงสองโมดูลเท่านั้นที่ใช้ หนึ่งโมดูลสำหรับเครื่องส่งสัญญาณและอีกโมดูลหนึ่งสำหรับเครื่องรับ โปรดทราบว่างานนี้ไม่ได้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบการกำหนดเส้นทางต่อพลังงานและมีการตรวจสอบการใช้พลังงานของแต่ละโหนดเท่านั้น

4.4.1 เซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปแล้วพลังงานแสงอาทิตย์คาดว่าจะสามารถใช้งานได้ทุกวันอย่างไรก็ตามปริมาณพลังงานและระยะเวลาที่ใช้งานได้ขึ้นอยู่กับสถานที่ติดตั้งสถานที่ทำงานของเราอยู่ในจังหวัดนครราชสีมาประเทศไทยใกล้กับเส้นศูนย์สูตร พลังงานแสงอาทิตย์สามารถคาดหวังได้ในระยะเวลา 12 ชั่วโมง การจัดเรียงของ

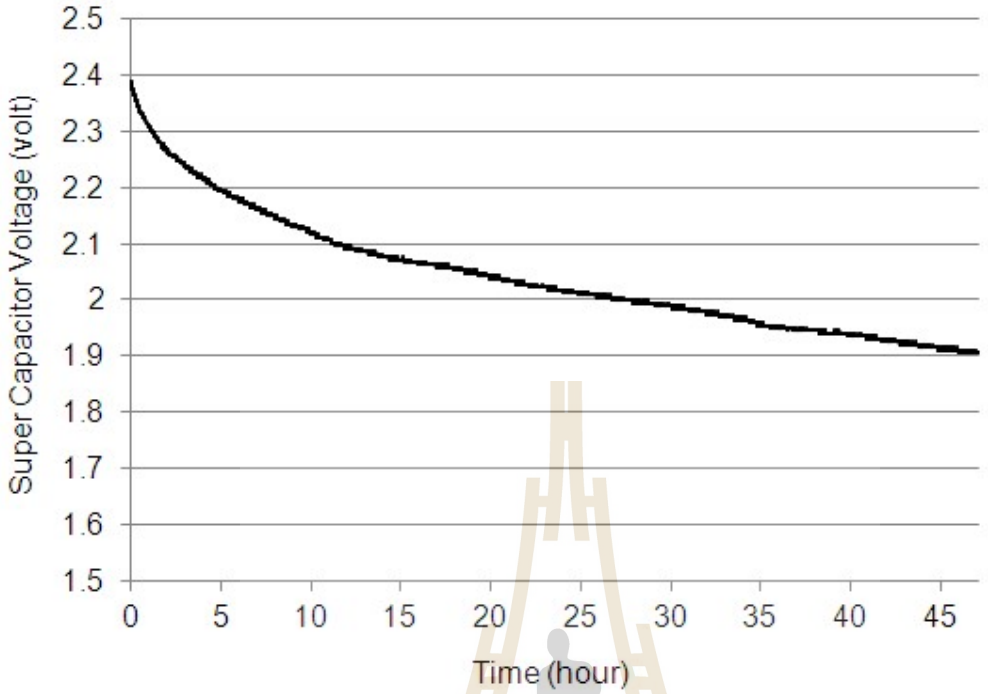
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีผลต่อพลังงานที่ส่งออก การจัดเรียงที่ดีที่สุดคือตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ตอนเที่ยง เราวัดแรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุโดยตรงในไม่กี่ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4.4 กระแสเฉลี่ยของเซลล์แสงอาทิตย์คือ ~ 12mA และพลังงานโดยประมาณต่อวันคือ 2275 J



รูปที่ 4.4 กระแสชาร์จของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับซูเปอร์ตัวเก็บประจุ 60F/2.7V.

4.4.2 ตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์กระแสรั่วไหล

ตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์มีการวางแผนที่จะใช้เป็นเวลา ~ 12 ชั่วโมงในเวลากลางคืน พลังงานโดยประมาณของตัวเก็บประจุซุปเปอร์ในงานนี้ต้องใช้ความจุ 60F ด้วยการใช้ 10F / 2.7V มันเป็นเรื่องง่ายที่จะเชื่อมต่อตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์สองสามตัวขนานกันเพื่อให้ได้ 60F ในการวัดกระแสรั่วไหลของตัวเก็บประจุซุปเปอร์ตัวเก็บประจุซุปเปอร์จะถูกชาร์จจนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้า 2.7Volt จากนั้นแรงดันไฟฟ้าตกเกิน 45 ชั่วโมง ผลลัพธ์จะแสดงในรูปที่ 4.5 กระแสการรั่วไหลโดยประมาณของตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์แต่ละตัว ~ 95uA



รูปที่ 4.5 การลดลงของความต่างศักย์เมื่อเกิดการรั่วของกระแส

4.4.3 ตัวแปลง DC / DC

ในปัจจุบันตัวเก็บประจุมีค่า capacitive เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุซุปเปอร์สูงมาก ถ้าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สำหรับการติดตั้งแบบประหยัดต้นทุนตัวเก็บประจุซูเปอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2.7 โวลต์ ถูกเลือก ตัวแปลง DC / DC จะแปลงช่วงแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำไปเป็นแรงดัน 3.3 ของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ในงานนี้มีการใช้งานตัวแปลง MAX1674 DC / DC เนื่องจากมีกระแสไฟจ่ายต่ำมากที่ 16uA และมีประสิทธิภาพสูงถึง 94% โดยมีแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำ 1 โวลต์

4.4.4 การใช้พลังงานของ MCU

MCU ถูกตั้งโปรแกรมให้ปลุกทุกช่วงเวลาการส่ง RTC อินเตอร์รัปต์ถูกตั้งค่าให้ปลุก MCU จากโหมดสลีป เมื่อ MCU เป็น Wakeup มันจะตั้งค่าอุปกรณ์ต่อพ่วงที่จำเป็นสำหรับการสื่อสารและกระบวนการบีบอัด ในช่วงแรกของการสื่อสาร MCU กับเซ็นเซอร์รับภาพ CMOS ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรมที่ baud

115200 เฟสล็อคลูปจะต่ำที่สุดเพื่อให้การสื่อสารยังคงทำงานได้อย่างถูกต้อง หลังจาก MCU ได้รับข้อมูลภาพดิบทั้งหมดแล้วมันจะปิดเซ็นเซอร์ภาพ CMOS

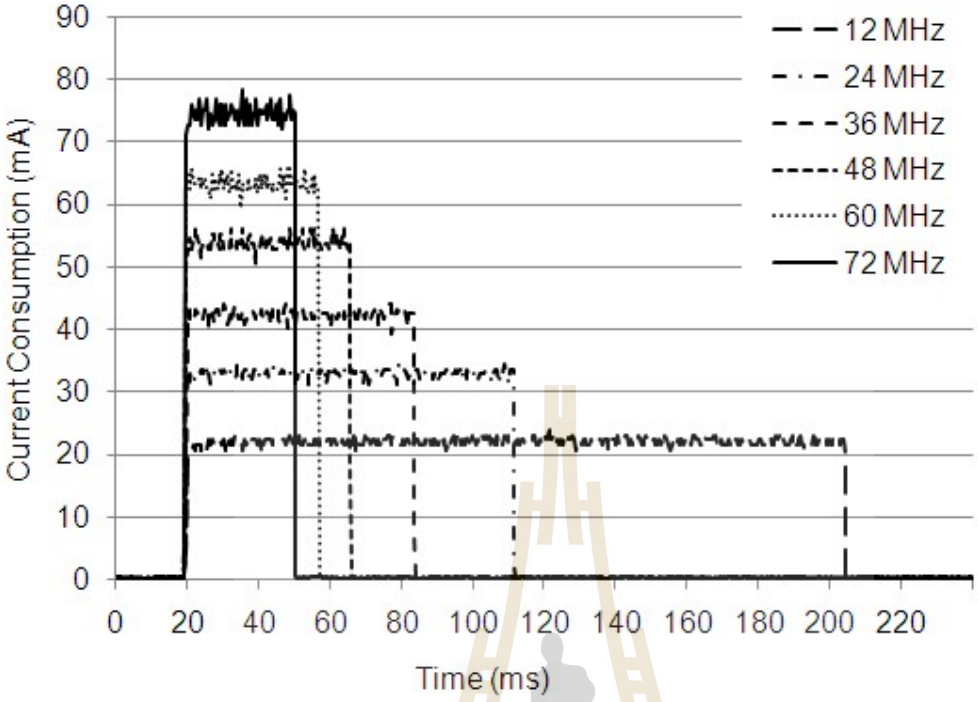
ขั้นตอนต่อไปคือกระบวนการบีบอัด JPEG จากผลการทดลองพบว่าหากเราบีบอัดภาพ JPEG ที่มีความถี่สูงกว่า (PLL) ก็จะใช้พลังงานน้อยกว่าความถี่ PLL ที่ลดลง ผลลัพธ์ของการบีบอัดภาพ JPEG ที่มี PLL แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 4.6 ในตารางที่ 4.1 แสดงการใช้พลังงานที่มีความถี่ PLL ที่แตกต่างกัน PLL ถูกตั้งค่าเป็นค่าสูงสุดที่รองรับโดย MCU เพื่อลดพลังงานการบีบอัดด้วยคุณภาพที่แตกต่างกัน การบีบอัด JPEG, MCU จะใช้เวลาในการประมวลผลที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ของเวลาการบีบอัดที่มีคุณภาพแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 4.8 นอกจากนี้ยังแสดงการใช้พลังงานของ MCU ที่มีคุณภาพแตกต่างกันในรูปที่ 4.9

ในรูปที่ 4.10 ภาพดิบไปยัง SRAM ของ MCU ได้รับการจัดวางและมีการทดสอบคุณภาพที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้แบบจำลองคุณภาพโดยประมาณและขนาดข้อมูล JPEG นี่เป็นเพราะขนาดข้อมูลที่แตกต่างกันของภาพ JPEG จะส่งผลให้การใช้พลังงานที่แตกต่างกันทั้งในโมดูล MCU และ XBee
ในเฟสสุดท้าย MCU จะตั้งความถี่ PLL ให้ต่ำที่สุดเพื่อให้การสื่อสารแบบอนุกรมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องกับโมดูล XBeee MCU ทำงานบนโมดูล XBee และส่งภาพ JPEG ไปยังโหนดเป้าหมาย เวลาของ MCU และ XBee ในการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับขนาดภาพ JPEG

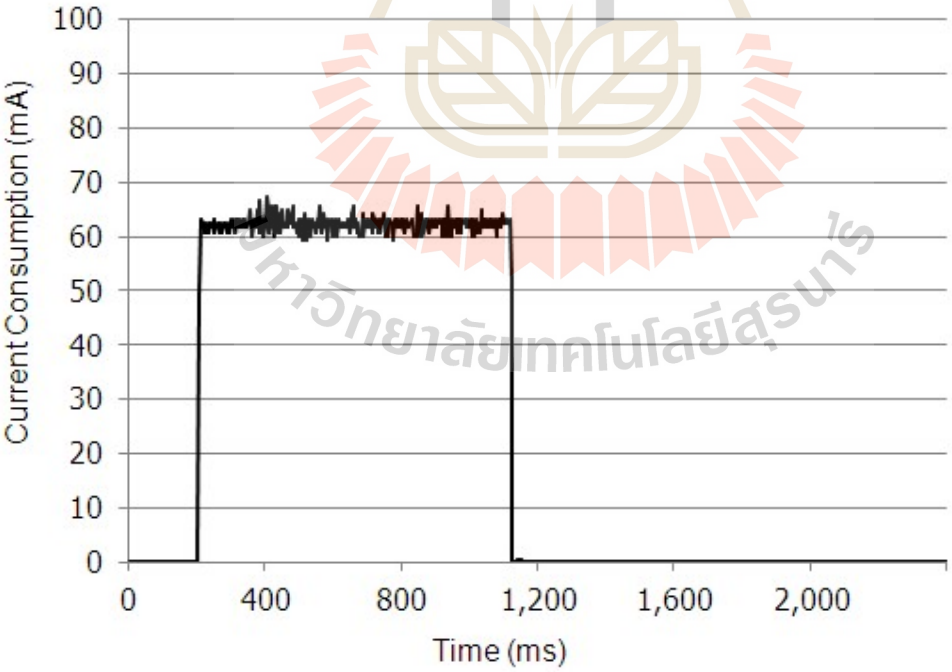
ตารางที่ 4.1 การใช้พลังงานของ MCU สำหรับการบีบอัด JPEG ด้วยความถี่ที่ต่างกัน

PLL frequency	Quality	Processing Time (msec)	Energy (mJ)
12 MHz	75	184.0	13.680
24 MHz	75	92.0	10.685
36 MHz	75	64.0	9.486
48 MHz	75	46.0	8.990
60 MHz	75	37.2	8.731
72 MHz	75	30.8	8.529

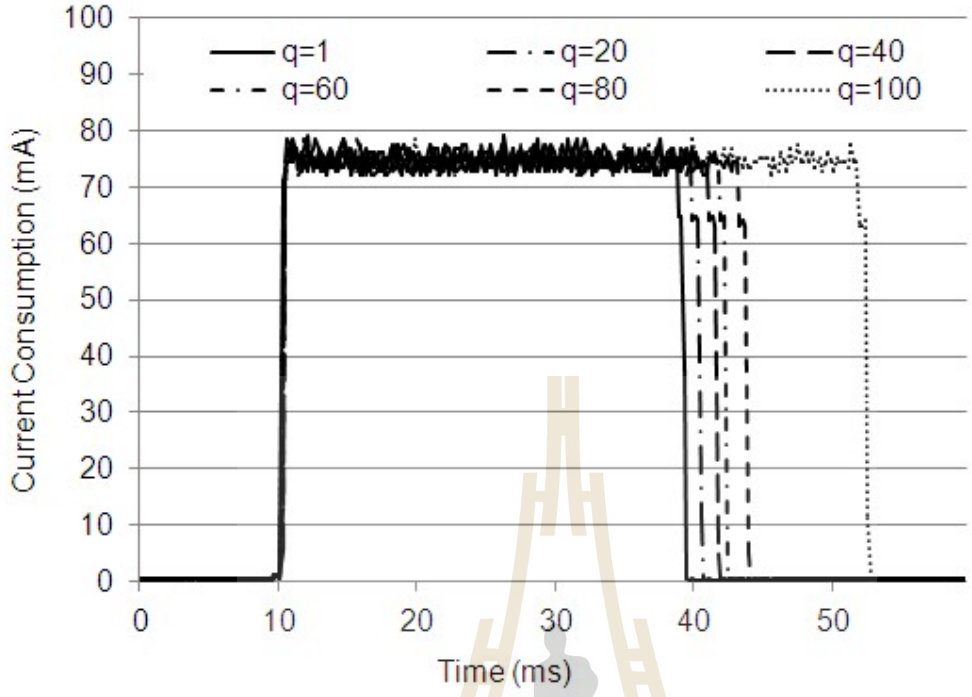
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



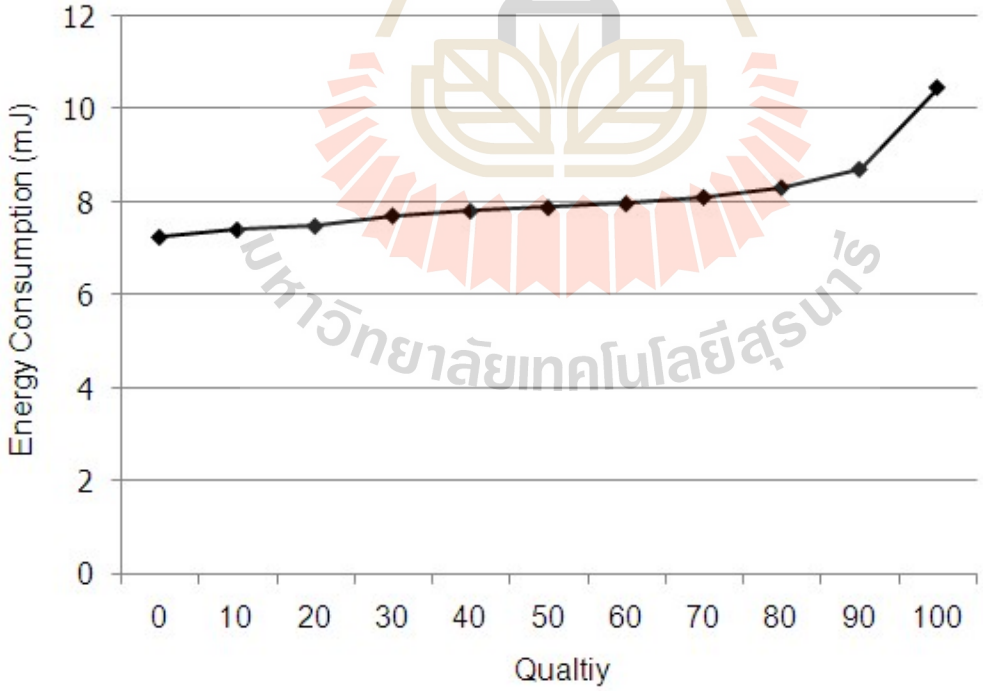
รูปที่ 4.6 การใช้กระแสของ MCU สำหรับการบีบอัดภาพ JPEG ด้วยความถี่นาฬิกาที่ต่างกัน



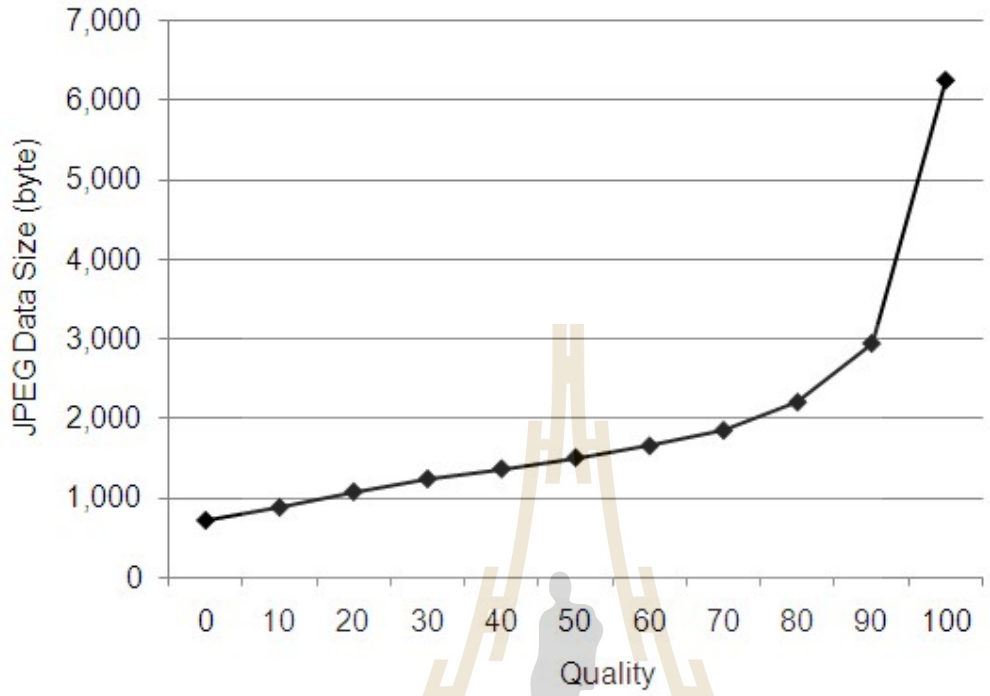
รูปที่ 4.7 การใช้กระแสของ CMOS ที่ความละเอียด 80x60 pixel และ 12 bit RGB.



รูปที่ 4.8 การใช้กระแสของ MCU สำหรับการบีบอัดภาพ JPEG ที่คุณภาพต่างๆกัน



รูปที่ 4.9 การใช้พลังงานของ MCU สำหรับการบีบอัดภาพ JPEG ที่คุณภาพต่างๆกัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของภาพ JPEG และคุณภาพของการบีบอัด

4.4.5 การใช้พลังงานของ CMOS

เซ็นเซอร์ภาพ CMOS จะเปิดใช้งานเมื่อ MCU ต้องการรับข้อมูลภาพดิบ ปริมาณการใช้กระแสของเซ็นเซอร์แสดงในรูปที่ 4.7 ที่ความละเอียดของภาพ 80x60 พิกเซลและอัตราส่งข้อมูลที่ 115200 พลังงานเฉลี่ยของเซ็นเซอร์ภาพ CMOS คือ ~ 194mJ

4.4.6 การใช้พลังงานของโมดูล XBee

หลังจาก MCU บีบอัด JPEG เสร็จแล้วจะเปิดโมดูล XBee เพื่อส่งภาพไปยังโหนดเป้าหมาย จากนั้น MCU จะส่งการร้องขอเพื่อส่ง (RTS) ไปยังโมดูล XBee และรอสัญญาณ clear to send (CTS) จาก XBeemodule ก่อนส่ง ในระหว่างการส่งข้อมูลไบต์ผ่าน UART MCU จำเป็นต้องตรวจสอบ CTS pin บนโมดูล XBee อย่างต่อเนื่อง หากถึงขนาดของบัฟเฟอร์การส่ง XBee ในบางจุดเช่น 90% ของบัฟเฟอร์เต็ม

บัฟเฟอร์ CTS จะถูกยกเลิกเพื่อแจ้งให้ MCU หยุดการส่งข้อมูลชั่วขณะหนึ่งจนกว่าจะส่งบัฟเฟอร์ของ XBeebecome ต่ำอีกครั้ง

ระหว่างการส่งกระแสไฟที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือ ~ 10mA โดยมีช่วงเวลาสั้น ๆ ในการใช้กระแสไฟสูงสุดที่ ~ 35mA รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณการใช้ปัจจุบันของโมดูล XBee ที่มีขนาดข้อมูลต่างกัน เวลาที่ส่งของโมดูล XBee นั้นขึ้นอยู่กับแพ็คเก็ตการตอบรับของโหนดเป้าหมายที่ไม่รวมอยู่ในการวิเคราะห์ของเราบทความนี้ใช้เครื่องส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ XBee แบบธรรมดาโดยไม่มีการกำหนดเส้นทางหรือรับรู้ถึงผลการหน่วงเวลา ในเครือข่ายมัลติฮอปการเพิ่มเวลาหน่วงของแพ็กเก็ตตอบรับจะเพิ่มเวลาในการส่งและพลังงานในการส่งโหนด รูปที่ 4.12 แสดงการใช้พลังงานของโมดูล XBee ที่มีขนาดข้อมูลการส่งต่างกันตามที่คาดไว้ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานเกือบเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นตรงของขนาดข้อมูล

4.4.7 การใช้พลังงานทั้งหมด

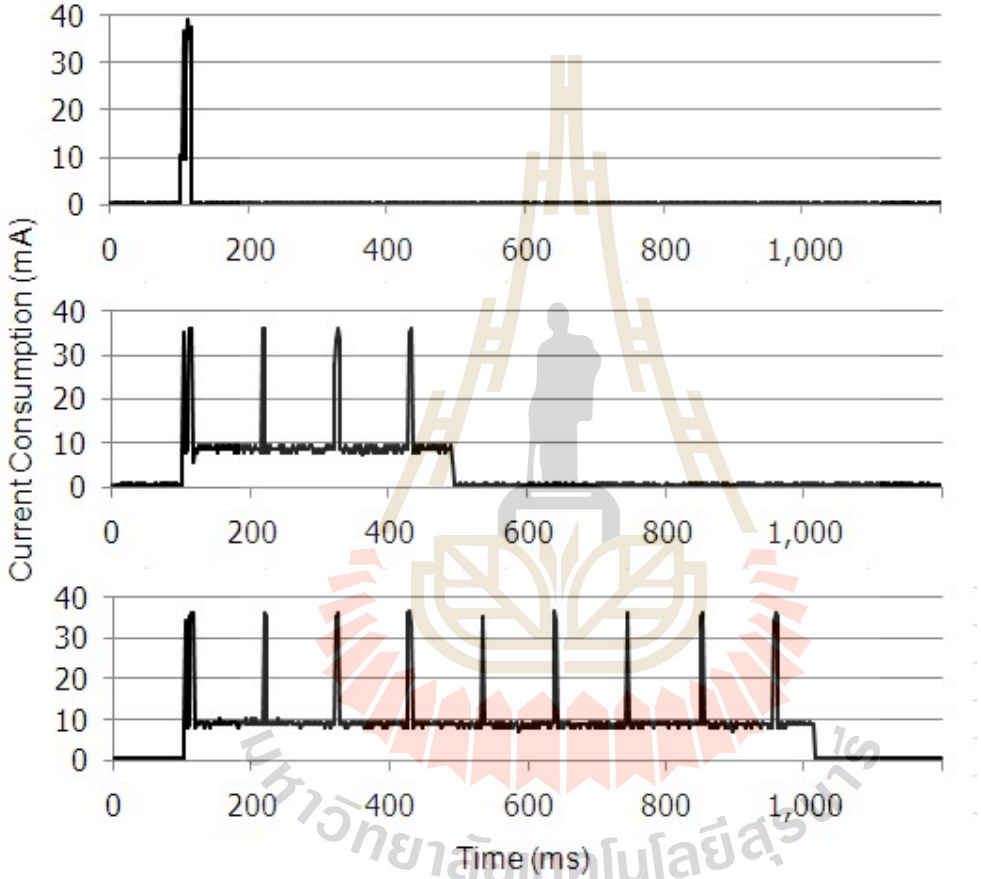
รูปที่ 4.13 แสดงการใช้พลังงานโดยรวมของโหนดเซ็นเซอร์ด้วยพารามิเตอร์เหล่านี้: ความละเอียดของภาพดิบคือ 60x80 พิกเซลคุณภาพ JPEG คือ 75 และขนาดข้อมูล JPEG คือ ~ 2Kbytes
การดำเนินการทั้งหมดในรูปที่ 4.13 ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน: a) MCU ปลุกตัวเองด้วยความถี่ MCU PLL ต่ำและรับภาพดิบจากกล้องภาพ CMOS, b) กระบวนการบีบอัด JPEG บน MCU เริ่มต้นและ c) MCU ส่งข้อมูลภาพ JPEG ไปที่ โหนดเป้าหมายที่มีความถี่ MCU PLL ต่ำ

4.4.8 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน

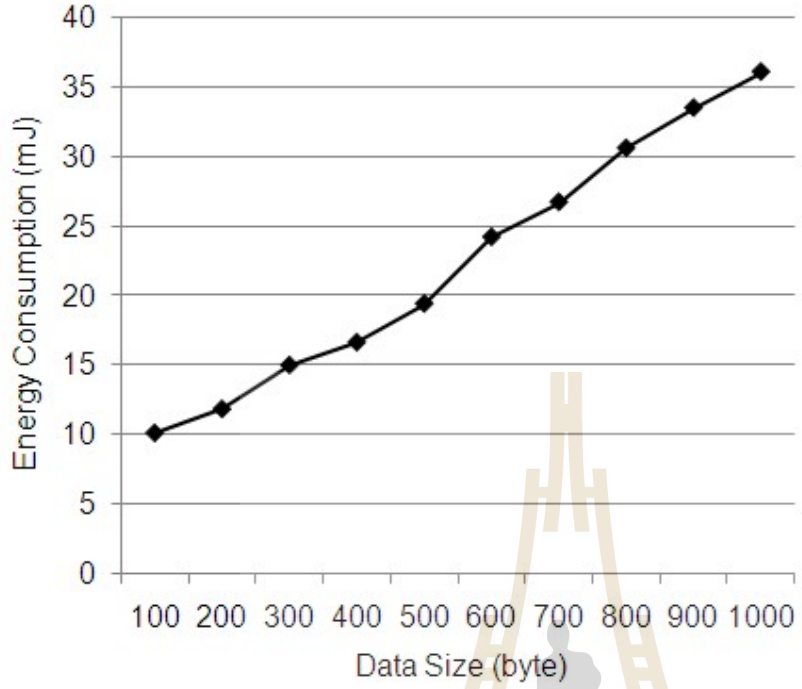
ผลการทดลองการใช้พลังงานทั้งหมดนั้นใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองอ้างอิงสำหรับ MCU เพื่อปรับคุณภาพของภาพที่จับคู่กับพลังงานแสงอาทิตย์รายวัน ในส่วนนี้เราจะแสดงผลลัพธ์ของระบบที่มีสามรูปแบบที่แตกต่างกัน 1) ส่งภาพดิบโดยไม่ต้องบีบอัด 2) ส่งภาพ JPEG โดยใช้ข้อมูลจากแบบจำลองอ้างอิงการทดลองและ 3) ส่งภาพ JPEG โดยใช้ข้อมูลจากแบบจำลองการอ้างอิงการทดสอบและปรับคุณภาพในแต่ละครั้งที่ส่ง ผลลัพธ์ของสามรูปแบบมีอยู่ในรูปที่ 4.14

ในการทดลองระยะเวลาการส่งคือ 15 นาทีและตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซุปเปอร์หลังจากรอบการชาร์จเต็มเส้นสีแดงแสดงผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลดิบ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซุปเปอร์ลดลงแบบไม่เชิงเส้นเนื่องจากพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของตัวเก็บประจุและตัวแปลง DC / DC ในการส่งรูปแบบข้อมูลภาพดิบระบบสามารถทำงานได้ ~ 340 นาทีหลังจากระบบดังกล่าวยังคงใช้งานปัจจุบัน

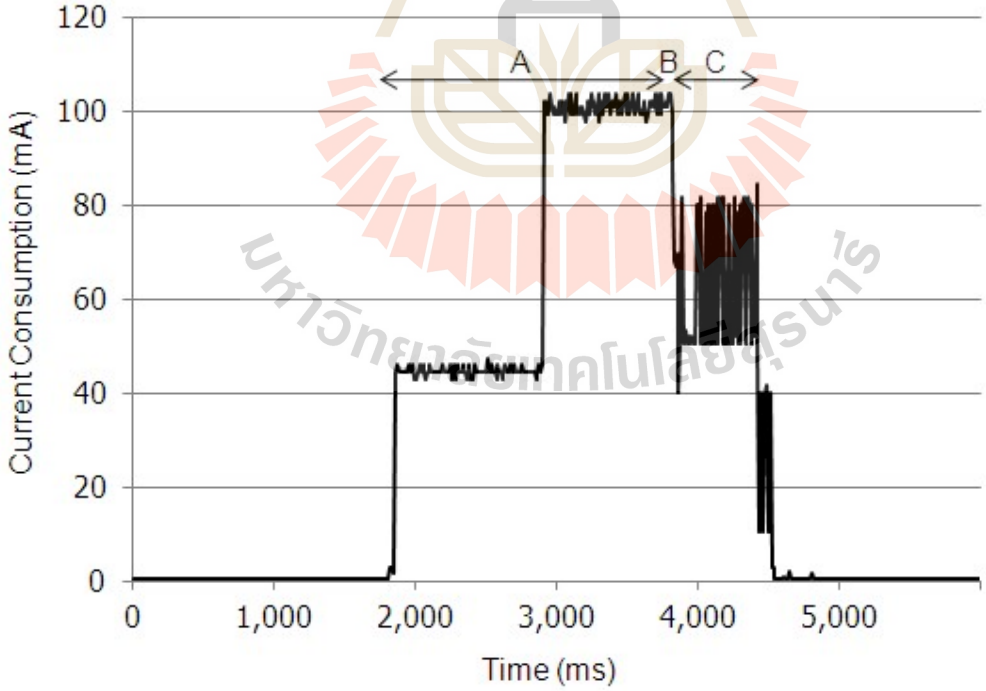
แต่ไม่สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง เส้นแนวตั้งสีแดงขนาดเล็กแสดงจุดหยุดการทำงานชุดรูปแบบนี้ล้มเหลวในการบรรลุเป้าหมายเวลา 12 ชั่วโมง เส้นสีน้ำเงินแสดงการทำงานของระบบพร้อมกับแบบจำลองการอ้างอิง เราเห็นเวลาการทำงานที่นานขึ้น แต่ยังไม่สามารถทำงานได้นานถึง 12 ชั่วโมงเนื่องจากพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปลง DC / DC และตัวเก็บประจุซุปเปอร์ เส้นสีเหลืองสุดท้ายเป็นผลมาจากการใช้แบบจำลองผู้อ้างอิงและการปรับคุณภาพในแต่ละช่วงเวลาการส่งระบบสามารถรับการทำงานได้ตลอดเวลา



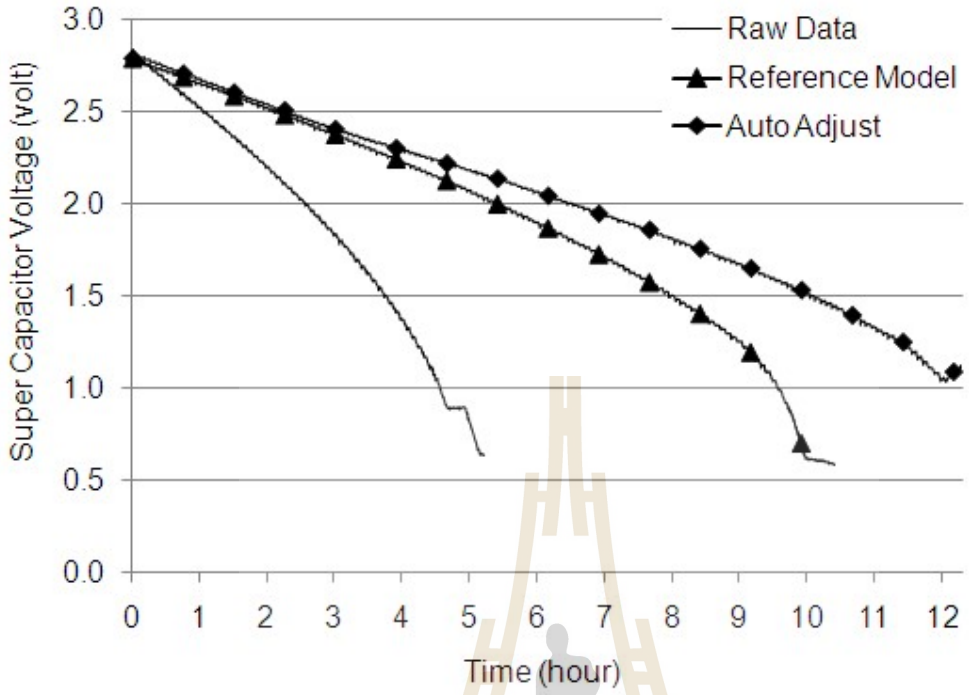
รูปที่ 4.11 การใช้กระแสของโมดูล XBee สำหรับการส่งข้อมูลที่ขนาดต่างๆ กัน รูปบน 1 byte รูปกลาง 500 bytes และรูปล่าง 1000 bytes.



รูปที่ 4.12 การใช้พลังงานของโมดูล XBee



รูปที่ 4.13 การใช้พลังงานทั้งหมดของโนดรับรู้ภาพ



รูปที่ 4.14 สมรรถนะของระบบเมื่อส่งข้อมูลภาพเปรียบเทียบกับพลังงานจากแบบจำลอง

4.5 กล่าวท้ายบท

โนดรับรู้ภาพแบบไร้สายขึ้นอยู่กับแบตเตอรีมีข้อ จำกัด เกี่ยวกับเวลาทำงานเนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงสำหรับเซ็นเซอร์ภาพ / วิดีโอและ MCU / FPGA แทน งานวิจัยนี้เสนอแหล่งพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ในตัวรวมซูเปอร์คาปาซิเตอร์ รักษาการดำเนินงานตลอดมันสามารถแก้ปัญหาทางเลือกสำหรับโหนดเซ็นเซอร์ภาพ / วิดีโอไร้สายที่ต้องการพลังงานมากกว่าโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายทั่วไปเพื่อให้เกิดการปรับใช้ต้นทุนต่ำการพิจารณาใช้ MCU เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด งานวิจัยได้รับการยืนยันการดำเนินงานตลอดเวลาโดยการใช้โหนดเซ็นเซอร์ภาพ JPEG ตามการใช้พลังงานแสงอาทิตย์และแพลตฟอร์มตัวเก็บประจุซุปเปอร์ จากนั้นแนวคิดพลังงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์สามารถเปลี่ยนจาก "ลดการใช้พลังงานสำหรับอายุการใช้งานที่ยาวนาน" เป็น "เพิ่มการใช้พลังงานสูงสุดสำหรับพลังงานที่มี" งานวิจัยนี้ได้พิสูจน์แนวคิดนี้โดยการปรับคุณภาพของภาพ JPEG เพื่อให้การใช้พลังงานสอดคล้องกับพลังงานแสงอาทิตย์รายวัน

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ในประเทศไทยเทคโนโลยีด้านเครือข่ายรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSN) ได้เข้ามามีบทบาทกับการพัฒนาอุตสาหกรรมในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านการเกษตรกรรม ด้านความปลอดภัย ด้านการสำรวจ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ส่งต่อกันเป็นข้อมูลขนาดเล็กที่บรรจุค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้ของแต่ละโนด หากต้องการให้โนดมีความสามารถส่งข้อมูลที่ใหญ่ขึ้น เช่น ภาพ หรือเสียง โนดจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานที่ใหญ่ขึ้น ในด้านการประมวลผลบอร์ดที่ใช้งานในเครือข่ายรับรู้ไร้สายยังคงใช้งานได้อยู่ แต่การประมวลภาพและการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ต้องใช้พลังงานที่มากขึ้นกว่าเดิมมาก ซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องการงานวิจัยมาช่วยเหลือ เครือข่ายรับรู้ไร้สายที่ใช้จับภาพและส่งต่อในเครือข่ายเรียกว่า เครือข่ายรับรู้ภาพไร้สาย (Wireless Image Sensor Network : WISN) เป็นเครือข่ายรับรู้อีกประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเพราะสามารถนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้ได้หลายหลากมากขึ้น เช่น การเฝ้าระวังการวางระเบิดตามจุดเสี่ยงต่างๆ โดยโนดแต่ละโนดจะบันทึกภาพ และส่งต่อเมื่อมีความผิดปกติขึ้น โครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางที่จะสร้างโนดรับรู้ภาพไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ให้ดียิ่งขึ้น ปัญหาหนึ่งที่โครงการวิจัยนี้สนใจคือการใช้พลังงานของโนดรับรู้ภาพไร้สายที่มากกว่าเมื่อไม่ส่งภาพ ผลที่เกิดขึ้นคือพลังงานในแบตเตอรี่หมดลงอย่างรวดเร็วไม่สามารถใช้งานได้ทั้งวัน แนวทางการแก้ปัญหาหนึ่งคือใช้แหล่งพลังงานที่มีไม่จำกัดเพื่อป้อนให้กับโนดเหล่านี้ แต่หากใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าก็จะมีขีดจำกัดเรื่องการติดตั้งที่ต้องอยู่ในรัศมีที่สายไฟฟ้าไปถึงและไม่ครอบคลุมพื้นที่ไกลๆ จึงเหลือแต่แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถแก้ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามพลังงานแสงอาทิตย์มีขีดจำกัดที่สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลากลางวันเท่านั้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างการใช้พลังงานของแสงอาทิตย์กับการตรวจจับภาพ แปลงภาพ และส่งภาพไปยังโนดอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาต้นแบบโนดรับรู้ภาพไร้สายที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างตลอดชีพ ซึ่งหมายความว่าโนดนี้จะตั้งอยู่ที่มีแสงอาทิตย์และจะทำงานได้ทุกวันโดยที่ไม่มีวันหมดพลังงานซึ่งสามารถส่งภาพในทั้งกลางวันและกลางคืน ทั้งนี้ไม่รวมความเสื่อมของแบตเตอรี่และวันที่ไม่มีแสงอาทิตย์ที่นอกเหนือจากการควบคุมในโครงการวิจัย ผลจากโครงการวิจัยนี้แสดงให้เห็นต้นแบบโนดรับรู้ภาพที่สามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการส่งภาพได้ตลอดทั้งวัน และต่อเนื่องในทุกๆ วัน

โนดรับรู้ภาพแบบไร้สายขึ้นอยู่กับแบตเตอรีมีข้อ จำกัด เกี่ยวกับเวลาทำงานเนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงสำหรับเซ็นเซอร์ภาพ / วิดีโอและ MCU / FPGA แทน งานวิจัยนี้เสนอแหล่งพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ในตัวรวมซูเปอร์คาปาซิเตอร์ รักษาการดำเนินงานตลอดมันสามารถแก้ปัญหาทางเลือกสำหรับโหนดเซ็นเซอร์ภาพ / วิดีโอไร้สายที่ต้องการพลังงานมากกว่าโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายทั่วไปเพื่อให้เกิดการปรับใช้ต้นทุนต่ำการพิจารณาใช้ MCU เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด งานวิจัยได้รับการยืนยันการดำเนินงานตลอดเวลาโดยการใช้โหนดเซ็นเซอร์ภาพ JPEG ตามการใช้พลังงานแสงอาทิตย์และแพลตฟอร์มตัวเก็บประจุซุปเปอร์ จากนั้นแนวคิดพลังงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์สามารถเปลี่ยนจาก "ลดการใช้พลังงานสำหรับอายุการใช้งานที่ยาวนาน" เป็น "เพิ่มการใช้พลังงานสูงสุดสำหรับพลังงานที่มี" งานวิจัยนี้ได้พิสูจน์แนวคิดนี้โดยการปรับคุณภาพของภาพ JPEG เพื่อให้การใช้พลังงานสอดคล้องกับพลังงานแสงอาทิตย์รายวัน

5.2 ปัญหาข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้อุปกรณ์ MCU ที่หาได้จากท้องตลาดที่มีลักษณะไม่เหมือนกันในแต่ละแบบ ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องทำการวัดค่าการใช้กระแสของอุปกรณ์แต่ละตัวเพื่อให้สามารถคำนวณได้แม่นยำขึ้น ซึ่งหากมีการปลี่ยนอุปกรณ์ไปใช้ในรุ่นอื่นๆ ก็จำเป็นต้องนำมาวัดค่าใหม่ และป้อนในสมการใหม่อีกรอบเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดต่อไป

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

ระบบที่ใช้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้นหากใช้ตัวเก็บประจุที่มีคุณภาพดีมากยิ่งขึ้น และการใช้ MCU ที่ประหยัดพลังงานกว่านี้ย่อมทำให้สามารถส่งภาพด้วยคุณภาพที่ดีขึ้น

บรรณานุกรม

[1] Farhan I. Simjee and Pai H. Chou, "Efficient Charging of Super Capacitors for Extended Lifetime of Wireless Sensor Nodes", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 23, no. 3, May, 2008, pp. 1526-1536.

[2] MS Pawar, JA Manore, and MM Kuber, " Life Time Prediction of Battery Operated Node for Energy Efficient WSN Applications" , International Journal of Computer Science and Technology, vol. 2, no. 4, Oct.-Dec., 2011, pp. 491-495.

[3] Mauricio Casares and Senem Velipasalar, " Adaptive Methodologies for energy-Efficient Object Detection and Tracking with battery-powered Embedded Smart Camera" , IEEE Trans. On Circuits and Systems for video technology, vol. 21, no. 10, Oct, 2011, pp. 1438-1452.

[4] Leonardo Gasparini and Massimo Gottardi, " An Ultralow-Power Wireless Camera Node: Development and Performance Analysis" , IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, vol. 60, no. 12, Dec., 2011, pp. 3824-3832.

[5] Syed Mahfuzul and Duc Minh Pham, " Energy Efficient Image Transmission in Wireless multimedia Sensor Networks", IEEE Communications Letters, vol. 17, no. 6, June, 2013, pp. 1084-1087.

[6] Muhammad Imran, Khursheed Khursheed, Najeem Lawal, Mattias O' Nils and Naeem Ahmad, " Implementation of Wireless Vision Sensor Node for Characterization of Particles in Fluids" , IEEE Trans. On Circuits and Systems for Video Technology, vol. 22, no. 11, Nov, 2012, pp. 1634-1643.

[7] Imran, M., Ahmad N., Khursheed K., Waheed M.A., Lawal N. and O'Nils M., " Implementation of Wireless Vision Sensor Node With a Lightweight Bi-Level Video Coding" , IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 3, no. 2, 2013, pp. 198 - 209.

[8] Alippi C., Camplani R., Galperti C. and Roveri M., A Robust, "Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring", IEEE Sensors Journal, vol. 11, no. 1, 2011, pp. 45 – 55.

[9] Clemens Moser, Davide Brunelli, Lothar Thiele and Luca Benini, " Real-time scheduling for energy harvesting sensor nodes", jul., 2007, pp. 233-260.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[10] Yibin Li, Zhiping Jia, Shuai Xie and Fucai Liu, "Dynamically Reconfigurable Hardware With a Novel Scheduling Strategy in Energy-Harvesting Sensor Network", IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 5, May, 2013, pp. 2032-2038.

[11] Davide Brunelli, Clemens Moser, Lothar Thiele and Luca Benini, "Design of a Solar-Harvesting Circuit for Batteryless Embedd Systems", IEEE Trans. On Circuits and Systems, vol.56, no.11, nov., 2009.

[12] Denis Dondi, Alessandro Bertacchini, Davide Brunelli, Luca Larcher and Luca Benini, " Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks", IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 55, no.7, July, 2008, pp. 2759-2766.

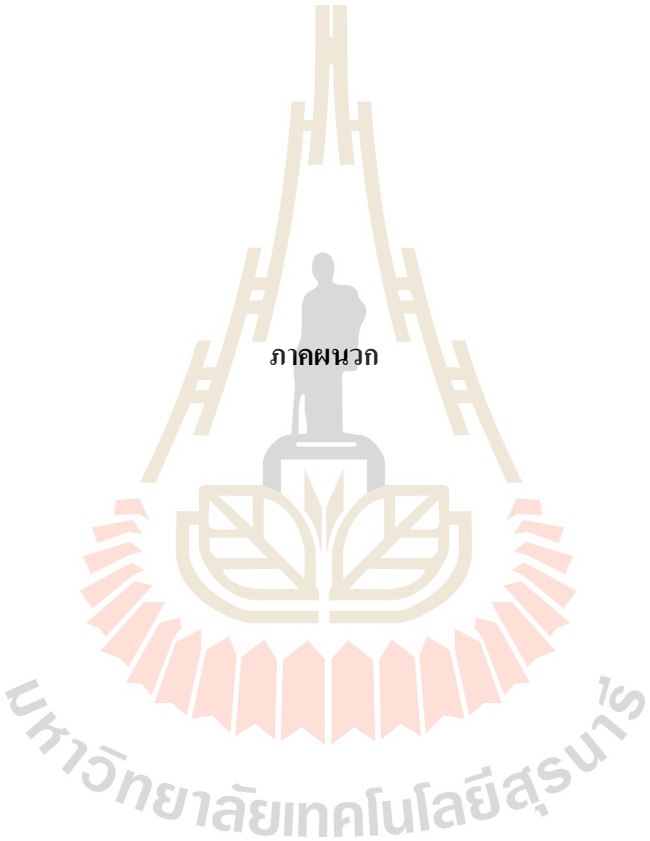
[13] Ko Ko Win, Xinhui Wu, Souvik Dasgupta, Wong Jun Wen, Rajesh Kumar and Panda S.K., " Efficient Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Nodes", IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), 2010, pp. 289-294.

[14] Peter Gyorke and Bela Pataki, " Application of energy-harvesting in wireless sensor networks using predictive scheduling", IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012, pp. 582-587.

[15] Cesare Alippi, Romolo Camplani, Cristian Galperti and Manuel Roveri, " A Robust, Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring", IEEE Sensors Journal, vol.11, no.1, Jan, 2011, pp. 45-54.

[16] Naveen, K.V. and Manjunath, S.S., A reliable ultracapacitor based solar energy harvesting system for Wireless Sensor Network Enabled Intelligent Buildings, 2 nd International Conference on Intelligent Agent and Multi-Agent Systems (IAMA), 2011, 20-25.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ

Duangmanee, P. ; Uthansakul, P. Clock-Frequency Switching Technique for Energy Saving of Microcontroller Unit (MCU)-Based Sensor Node. Energies 2018, 11, 1194.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

energies

MDPI

Article

Clock-Frequency Switching Technique for Energy Saving of Microcontroller Unit (MCU)-Based Sensor Node

Pumin Duangmanee and Peerapong Uthansakul *

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasimina 30000, Thailand; puminsoft@gmail.com

* Correspondence: uthansakul@sut.ac.th; Tel.: +66-850-865-588

Received: 27 April 2018; Accepted: 7 May 2018; Published: 8 May 2018

check for updates

Abstract: In this paper; a technique is proposed for reducing the energy consumption of microcontroller-based sensor nodes by switching the operating clock between low and high frequencies. The proposed concept is motivated by the fact that if the application codes of the microcontroller unit (MCU) consist of no-wait state instruction sets, it consumes less energy when it operates with a higher frequency. When the application code of the MCU consists of wait instruction sets; e.g., a wait acknowledge signal, it switches to low clock frequency. The experimental results confirm that the proposed technique can reduce the MCU energy consumption up to 66.9%.

Keywords: energy saving; microcontroller unit (MCU); clock frequency

1. Introduction

The operating clock frequency of most modern microcontroller units (MCUs) used in Wireless Sensor Networks (WSNs), such as Alf and Vegard's reduced instruction set computing (RISC) processor (AVR), peripheral interface controller (PIC), mixed signal processing (MSP), and 8051, is fixed [1,2]. The clock source is an internal/external crystal oscillator/resonator. The energy used by such MCUs can be decreased by reducing the current consumption. Reduced current consumption can be achieved by reducing the operating clock frequency of the MCU. The result of such energy saving is a long sensor node operation lifetime. A sensor node always includes a short instruction to read a sensor value and to complete data transmission. Most of the energy is used for transmitting the data to the target node. For example, the energy required to read the temperature with a 16-bit resolution is very small as compared with that required to send this value to a target node/server every minute. However, if the sensor node is of the image type or has a considerable amount of data that needs to be processed [3], the MCU needs more time to process the data before transmitting them to the other module. Examples of data processing include image compression, data compression, data integrity checking, and data encryption.

The time consumed by the MCU to process data depends on the operating clock frequency, the architecture of the MCU, and the data size. The energy consumption of data processing is currently increasing significantly, and with this increase, may approach or exceed that of data transmission. This means that the data-processing energy is also an important factor and thus should be reduced at the sensor node. Many means of reducing the processing energy exist, e.g., replacing the MCU with an field programmable gate array (FPGA) [4–6], employing a mixed FPGA/MCU [7,8], and improving the MCU algorithm [9,10].

When the sensor node is of the image type, the data size increases hugely. The raw data size of an image sensor may be range from 1 kilobyte to 100 kilobytes, depending on the image resolution.

This amount of raw image data is not suitable for sending via wireless communication and, thus, the amount of raw data must first be reduced by applying an appropriate method. A popular image compression scheme is joint photographic experts group (JPEG) compression [11,12]. JPEG is a lossy compression scheme that can convert a two-dimensional image pixel to frequency components and coefficients. Most of the high-frequency components of the image are lost during the compression process, but this loss is not detected by the human eye.

In JPEG compression, first the data are divided into blocks of 8 × 8 pixels. Then, quantization, zigzag scan, and discrete cosine transform (DCT) are performed. All these operations consume processing time of the MCU/FPGA. In the case of an MCU, the data are processed in the sequence of instruction, block by block of the image. The energy consumption of the MCU depends on its operating frequency and architecture. In the case of the FPGA, the image compression is performed by using logic synthesis and parallel processing, which is much more energy efficient than MCU processing. However, the cost of an FPGA that can support image compression is very high compared to that of an MCU. An additional advantage of an MCU over an FGPA is that the firmware of the system can be upgraded over wireless communication, which provides greater flexibility. Many MCU venders support in-application programming (IAP) [13,14]. The code together with the IAP concept allow the MCU to program itself, which is an advantage in terms of maintenance.

In many studies in the literature, attempts have been made to improve the instructions used in the JPEG compression process in MCU-based image compression [15–18]. The authors of [15] improved data loading and restoration by replacing the zigzag scan with a lookup table. In [16], the authors improved the processing speed by using parallel instruction. The floating-point in the C program is mapped to integers [17] with the purpose of increasing the precision of the MCU. The results reported in [18–20] show that the energy consumed by FPGA-based image compression is greatly reduced as compared with that of MCU-based image compression. The results include many details of the energy consumed in each task, e.g., image capturing, segmentation, and morphology. In [20], the authors implemented a zonal DCT to reduce the number of alternating current (AC) coefficients. The results indicate a significant reduction in the energy consumption. The authors of [21] reduced the energy consumption by integrating processors, the image processing unit, and wireless communications into a single unit using a very-large-scale integration (VLSI) design. Their paper also presents battery-aware task scheduling to control the current consumption of a task so that it remains within a certain range. In [22], the authors designed a JPEG image compression scheme for a capsule endoscope based on an ARM Cortex M3 processor with a JPEG compression engine. This device is effective for human body images. The MCU receives a JPEG image from an external JPEG compression engine, the energy consumption of which is lower than that of the MCU.

An additional means of reducing the energy consumption of image compression is to reduce the number of data retransmissions. In [23], the authors presented an architecture and protocol for energy-efficient image transmission on FPGA-based hardware. The image is divided into smaller blocks and effective queue control is used to reduce the packet error rate. The number of retransmissions is reduced and, thus, the energy consumption is also reduced. Data compression is another interesting topic in WSN research areas. A sensor node may collect many data records and send all the records to a target node at a predefined time. The results presented in [24] show that the optimal parameters can be designed for compression on a TI MSP430 series, which runs on a fixed operating clock frequency. The energy efficiency on an MCU-based platform without the energy consumption of the radio frequency (RF) circuit was presented in [25]. The RF part of a sensor node receives energy from the RF harvester circuit and does not consume any of the battery's energy, while the MCU, which has to consume energy supplied by a battery, is in deep sleep mode and waits for an interrupt signal from the RF circuit.

Thus far, in the literature no studies exist that focus on saving energy by considering the operating clock frequency of the MCU. In some MCUs that contain a phase lock loop (PLL), the user can set the operating clock frequency dynamically to achieve the desired performance. From datasheets

and experiments, we found that an increase in the operating clock frequency leads to an increase in the current consumption. However, the current consumption does not increase at the same rate as the operating clock frequency. This is because an MCU contains many components, the current consumption of which is either dependent on or independent of the operating clock frequency. The relation of the current consumption of no-wait state instruction sets to the operating clock frequency [26] can be estimated by $i_{MCU} = m * f + i_{offset}$, where m is a constant value and depends on the MCU architecture, f is the operating clock frequency, and i_{offset} is the current consumption of the MCU, which is independent of the operating clock frequency. If, for example, the operating clock frequency is increased two-fold, the increase in current consumption is less than two-fold, whereas, the application code can be completed more than two times faster. This means that if the application code contains no wait-state instruction sets, the total energy consumption of the application code can be reduced if the MCU operating clock frequency is higher.

Normally, the processing of a sensor node can be divided into three steps: (1) retrieve the data from the sensor; (2) process the data; and (3) transmit the data via wireless communication. The application codes in Steps 1 and 3 contain a wait-state instruction set, because of the delay time and waiting time in the data bus. In this processing period, we can set the MCU operating frequency to the lowest value, but the data bus peripheral still operates correctly. In Step 2, the code contains a no-wait instruction set. In this period, we set the MCU operating frequency to the highest value to save energy. In this paper, a technique for switching the MCU operating clock frequency is newly proposed in order to reduce the energy consumption of MCU-based sensor nodes. The experimental results show that the proposed technique can reduce the energy consumed more effectively than a fixed operating clock frequency in many applications, e.g., JPEG compression, cyclic redundancy check (CRC), and the Lempel–Ziv–Oberhumer (LZO) method. The results confirm that this technique can be used to improve the energy saving of MCU-based sensor nodes. It has two major attractive advantages: low cost and the upgraded flexibility of the platform.

Notations: there are many technical terms used as acronyms in this paper. Table 1 is presented in order to improve the readable quality of this paper.

Table 1. Acronyms used in this paper.

Acronym	Definition
MCU	Microcontroller Unit
WSN	Wireless Sensor Network
AVR	Alf and Vegard's RISC processor
PIC	Peripheral Interface Controller
MSP	Mixed Signal Processing
FPGA	Field Programmable Gate Array
JPEG	Joint Photographic Experts Group
DCT	Discrete Cosine Transform
IAP	In-Application Programming
VLSI	Very-Large-Scale Integration
TI	Texas Instruments
RF	Radio Frequency
PLL	Phase Lock Loop
CRC	Cyclic Redundancy Check
LZO	Lempel–Ziv–Oberhumer
ARM	Acorn RISC Machines
RISC	Reduced Instruction Set Computing
USB	Universal Serial Bus
RTC	Real-Time Clock
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. Clock-Frequency Switching Technique

A high performance MCU running at high speed always contain a phase lock loop (PLL) unit. The PLL boosts input frequency to a higher frequency, e.g., from 12 MHz to 72 MHz. It is the responsibility of the designer to choose an appropriate operating frequency. For example, the MCU must operate at 48 MHz to provide appropriate universal serial bus (USB) operation, regardless of the input frequency.

Some applications do not need to run at a specific frequency. In the case of sensor nodes, we attempt to keep the clock frequency of the MCU as low as possible to maintain a low-level current consumption. This is because many sensor nodes contain a much shorter time for data acquisition than for data transmission. However, in the case of a long data task, it is possible that the processing time may be close to or greater than the transmission time. The reduction in the energy consumption for such a long data task affects the total energy consumption of the sensor node.

The energy consumption of a fixed frequency can be described as:

$$E_{mcu} = E_{proc} + E_{tx} \quad (1)$$

where E_{proc} is the energy required for data processing and E_{tx} is the energy required for data transmission.

The energy required by a typical sensor node for processing is very small compared with that required for transmission energy, e.g., reading the analog input from the analog input pin of the MCU takes a few milliseconds. The value of the term E_{proc} is thus very small as compared to that of E_{tx}. However, in the case of a long data processing time, such as that required for image compression, data integrity checking, and data compression, it takes more time to complete the processing and thus the term E_{proc} is the dominant term of the total energy consumption. In a fixed frequency platform, such as a low cost 8-bit MCU that does not contain a PLL unit, one means of reducing the processing energy is to improve the instruction code or acquire an off-the-shelf module to provide better energy consumption; however, the cost of the node is also increased.

An MCU that contains a PLL unit cannot exploit the benefits of a frequency-switching technique that allows the MCU to operate at high frequency in the data-processing period and then return to low-frequency operation for the data transmission period. The relation between the execution time and the operating frequency is:

$$t_{exec} = \frac{k}{f} \quad (2)$$

where t_{exec} is the execution time, k is the constant value depending on the MCU architecture, and f is the operating frequency.

When the operating frequency is increased, the execution time is decreased. However, from many datasheets and experimental results, we found that the current consumption is increased as a function of the operating frequency. The relation is:

$$i(m \times f_{low}) < m \times i(f_{low}) \quad (3)$$

where $i(f)$ is the current consumption of the MCU at the operating frequency, m is the multiplier of the new higher operating frequency and $m > 1$, and f_{low} is a low operating frequency of the MCU.

The processing energy during t_{exec} is:

$$E = v \times i \times t_{exec} \quad (4)$$

The processing energy at high frequency in terms of low frequency is:

$$E_{proc} = v \times i(m \times f_{low}) \times \frac{k}{m \times f_{low}} \quad (5)$$

The processing energy at low frequency is:

$$E_{proc} = v \times i(f_{low}) \times \frac{k}{f_{low}} \quad (6)$$

Finally, a comparison of the energy consumed at high frequency (5) and at low frequency (6), on the left and right side of (7), respectively, reveals that less energy is consumed at the higher frequency.

$$\frac{i(m \times f_{low})}{m \times f_{low}} < \frac{i(f_{low})}{f_{low}} \quad (7)$$

In the transmission part, the transmission energy of the MCU is the energy expended when the MCU transmits a data packet to a target node successfully; that is, the sender receives an acknowledge packet of all the data packets that it sent. The transmission time period may vary depending on the conditions of the wireless networks, e.g., the number of hops, quality of signal, and level of noise. 802.15.4 PHY allows 127 bytes per packet at 2.4 GHz. The RF band rate is 250 Kbps. We assume the condition of the acknowledgement timing is the best case and the address length is 16 bit. The total duration of the transmission period is:

$$t_{tx} = 0.928 + (0.032 \times b) \quad (8)$$

where t_{tx} is the total transmission time in ms and b is the data size in bytes.

Then, the total energy consumed by the MCU for the best case transmission is:

$$E_{tx} = i \times v \times t_{tx} \quad (9)$$

where E_{tx} is the transmission energy, i is the average current consumption of the MCU, and v is the supply voltage of the MCU, which is 3.3 V.

Now, suppose that only the data processing is considered and the data acquisition period is ignored. The energy consumption of data processing and transmission when the operation is fixed at a low frequency is:

$$E_{mcu_fix} = E_{pll_low} + E_{proc} + E_{tx} \quad (10)$$

where E_{mcu_fix} is the energy consumed by the MCU operating at a fixed low frequency and E_{pll_low} is the energy consumed by the PLL locked at a low frequency.

Next, the proposed technique allows the MCU to operate at high frequency during the data-processing period and then return to low-frequency operation during the data-transmission period. This is represented by

$$E_{mcu_{sw}} = E_{pll_{high}} + E_{proc} + E_{pll_{low}} + E_{tx} \quad (11)$$

where E_{mcu_sw} is the energy of the MCU when the frequency-switching technique is applied, E_{pll_high} is the energy of the PLL locked at high frequency, and E_{pll_low} is the energy of the PLL locked at low frequency.

It should be noted that there exists an issue based on (11): the data-processing period must not contain any wait-state instructions; if it does, the frequency-switching technique cannot be used to achieve energy reduction.

Figure 1 shows the difference between operating at a fixed frequency and when the frequency is switched. In the transmission period, the MCU always operates at the lowest frequency, because a wait-state is included in the communication with the transceiver. Some examples of applications that can benefit from the switching technique are cyclic redundancy check (CRC), image compression, and data compression. In this study, all three examples were implemented to validate the benefit of the proposed technique.

CRC is useful for checking data integrity. A sender node appends the CRC code at the end of the data packet. The receiver node receives packets and checks all the data packets that include the CRC code. If the resulting value is zero, this means the packet is valid and then the data packet

is passed to the upper layer for further processing. The implementation of the CRC in this study was based on C programming, that is, a lookup table, because it offers the best MCU performance. There are various CRC polynomials that are suitable for each application [27].

As an image-compression scheme, JPEG compression was selected for our demonstration, because JPEG is a popular image type widely used in many sensor node applications.

Finally, for data-compression, in this study the LZO method was selected because it requires a low memory footprint so that it is suitable for an MCU-based platform. LZO compression is lossless data compression, which allows the receiver to receive data that are exactly the same as the original data transmitted by the sender.

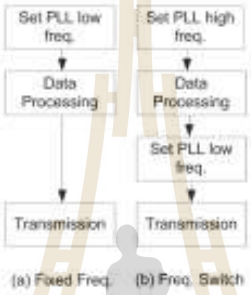


Figure 1. Difference between (a) fixed frequency and (b) frequency-switching technique.

3. Experimental Details

3.1. *Hardware*

The ARM7 MCU family, LPC2387, was selected for use in all experiments. This MCU has a PLL unit that can boost input crystal frequency up to 72 MHz. The MCU has an Static RAM (SRAM) of 64 K bytes for general purpose memory. This SRAM is used for many data-processing operations. The experimental environment is shown in Figure 2. The direct current (DC) input voltage power supply was stepped down to 3.3 V to supply the MCU and the MAX232. RS-232 communication was employed to debug the MCU and to set the parameters, such as data length, for the MCU operation for each experiment. The current consumption of the MCU was measured by a simple resistor in series with the current path to the ground. A resistor value of 0.5 ohm was selected for all experiments. Note that the resistor value should be kept as low as possible, so that it does not affect the voltage drop across the resistor, which may cause the MCU to stop operating.

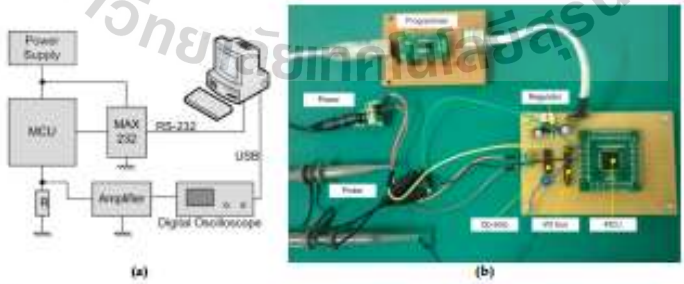


Figure 2. Experimental setup (a) hardware diagram (b) photograph of operating hardware.

The voltage across the resistor was amplified to the appropriate level so that it could easily be analyzed by the digital oscilloscope. In our experiment, the amplify gain was set to 50. The USB port from the digital oscilloscope was for data transfer/setup, so that the data points could easily be saved on the computer in many file different formats, including bmp and csv.

3.2. Software

The compiler suite used for compiling the source code was ARM with GNU Compiler Collection (GCC). This is freeware that has a command line style. First, the program initializes scripts, which are implemented in assembly language. These initializing sections set up the stack for each operation mode of the Acorn RISC Machines (ARM) processor, clear the memory, and then jump to the main function.

The main function is written using C programming. It contains one-time initialized code and continues with forever loops. In the initial section, it sets a sleep mode, real-time lock (RTC) for wakeup period, memory, and universal asynchronous receiver-transmitter (UART), and then, waits for a command string from the PC. The command string contains parameters, e.g., data size and quality. After receiving a command string, the MCU goes to sleep mode with a periodic wakeup periodically 15 s for energy measurement. The parameters of the MCU are as follows.

- Exp: experimental applications: CRC-8, CRC-32, JPEG, and LZO.
- FsEn: operating modes: either the frequency-switching technique or a fixed frequency.
- Len: data length for CRC-8 and CRC-32.
- Qual: quality of compression for JPEG.
- TxEn: choice of only data processing or including data transmission.

To measure the amount of energy, the MCU is woken up every 15 s and then the PLL is set, as shown in Figure 1.

When the MCU is woken up from the sleep mode, it sets the PLL according to the FsEn parameter. If the value of FsEn is zero, the MCU operating frequency is set to 4 MHz. This is the lowest frequency for this MCU that allows communication to be operated correctly. If the value of FsEn is 1, the MCU operates with the frequency-switching technique and the operating frequency is set to 72 MHz, which is the maximum frequency for this MCU. After the PLL has been locked, the MCU runs the code according to the Exp parameter.

If the Exp parameter is CRC-8 or CRC-32, the code is run using the Len parameter. If Exp is JPEG, the code is run using the Qual parameter. If Exp is LZO, no additional parameters are needed, because the data size is fixed to 500 bytes.

The final parameter is TxEn. If its value is zero, the MCU goes to sleep mode immediately after completing a data processing operation. If the value is 1, the MCU performs a transmission process to send data to the target node. The time spent during this period is according to the parameter Len in (4) for CRC-8 and CRC-32. If Exp is JPEG, Len is assigned a compressed image data length. If Exp is LZO, Len is assigned the compressed data length of sample data records.

4. Results

This section presents the comparative experimental results for operations at fixed frequency and when the frequency-switching technique was applied. As described previously, the amount of energy saving depends on the time period of the data processing. To obtain the exact time period, the assembly code that is generated after the C source code is compiled needs to be examined, which is not convenient. It is better to show the results in parameters that are easily understood, e.g., data length. The experimental results for CRC-8, CRC-32, JPEG, and LZO with different data lengths, fixed frequency/frequency switching, and transmission/no transmission are shown. The current consumption in all experiments was scaled down by a factor of 50, e.g., 1 volt/division is equivalent to 20 mA.

4.1. Cyclic Redundancy Check (CRC-8)

The polynomial of CRC-8 in this experiment was $x^8 + x^5 + x^4 + 1$ and it requires a lookup table for the best performance for C code. The parameters of this experiment were as follows:

- Data size: 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000.
- With and without transmission.
- With and without frequency-switching technique.

The current consumption of data-processing and -transmission operations at a fixed frequency and when the frequency-switching technique was applied is shown in Figure 3. The total energy consumption is presented in Figure 4. It can be clearly seen that the energy consumption is at approximately the same level when the data size is ~10 bytes. In addition, when the data size is increased, the difference between fixed frequency and switching frequency is more pronounced. It can be seen that the difference appears to be a linear function of the data size after a data size of 10 bytes.

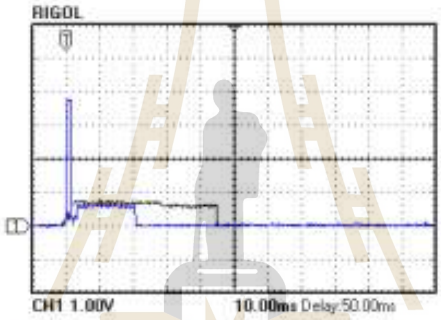


Figure 3. Current consumption of cyclic redundancy check (CRC-8) generator code with fixed frequency (black) and switched frequency (blue) for data size 500 bytes.

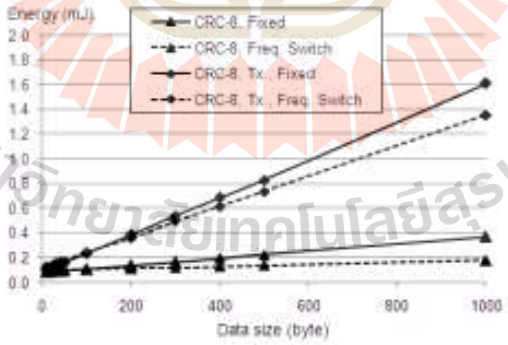


Figure 4. Total energy consumption of CRC-8 versus data sizes.

4.2. CRC-32

The polynomial generator used for CRC-32 was $x^{32} + x^{28} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{23} + x^{22} + x^{20}x^{19} + x^{18} + x^{14} + x^{13} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + 1$. In addition, the processing employed a lookup table, as does CRC-8. The parameters of the experiments are also the same as for CRC-8.

The current consumption of data processing and transmission operations at a fixed frequency and when the frequency-switching technique was applied is shown in Figure 5. The total energy consumption is presented in Figure 6. It is clear that the energy consumption is still at approximately the same level when the data size is ~10 bytes. When the data size is increased, the difference between fixed frequency and switched frequency is also increased and the difference appears to be a linear function for a data size >= 100 bytes.

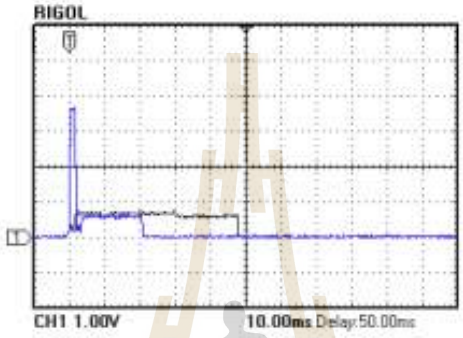


Figure 5. Current consumption of CRC-32 generator of fixed frequency (black) and switched frequency (blue) for data size 500.

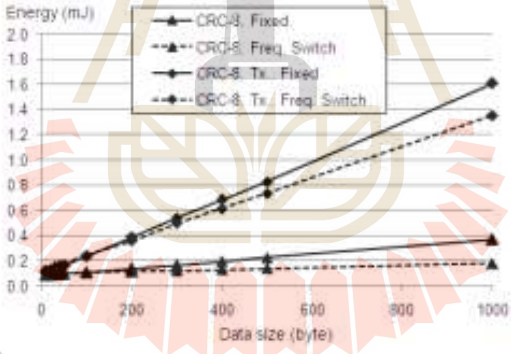


Figure 6. Energy consumption of CRC-32 versus data sizes.

4.3. Joint Photographic Experts Group (JPEG) Compression

Image compression is more complicated than CRC generation. The compression process consists of partitioning an image into sub-images of 8 × 8 pixels, forward discrete cosine transform (FDCT), quantization, and Huffman encoding. The DC/AC coefficients of luminance, chrominance, and Huffman encoding are obtained by the JPEG standard [28]. The input parameter of compression is a quality value in the range 1 to 99. This quality is multiplied by all the entries in the luminance and chrominance tables. The total processing time varies according to the quality value. If the quality value is higher, more luminance and chrominance AC coefficients have a non-zero value and the compressed JPEG data size is higher. This consumes more MCU processing time and also increases the transmission time to other nodes. The raw image data was a C constant array located on a flash section of the MCU. A popular Lena image was selected for the experiments. The size of the image was 64 × 64 pixels in YUV422 format.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

The current consumption of JPEG compression with transmission operating at a fixed frequency and when the frequency-switching technique was applied is shown in Figure 7. The total energy consumption is presented in Figure 8.

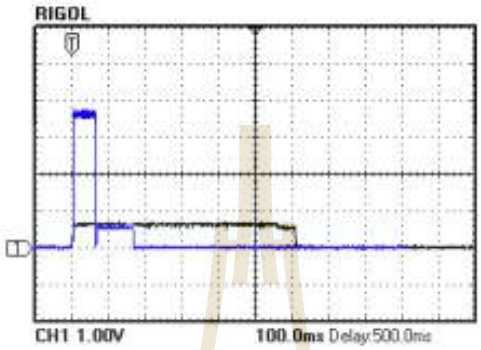


Figure 7. Current consumption of joint photographic experts group (JPEG) compression at fixed frequency (black) and switched frequency (blue) with a quality value of 50.

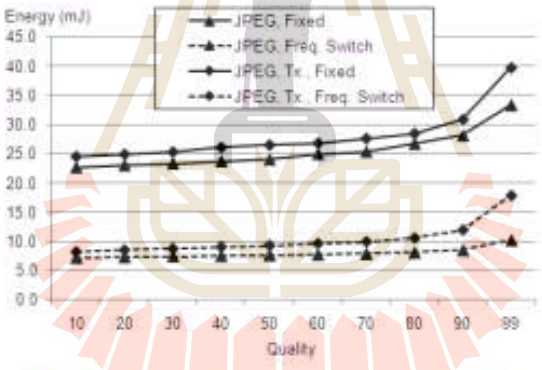


Figure 8. Energy consumption of JPEG compression versus quality.

4.4. Lempel–Ziv–Oberhumer (LZO) Compression

LZO compression is a lossless data compression that is suitable for application on an MCU, because it requires a low memory size. It is a dictionary-based compression. For real-time compression, it should be carefully designed because of the dynamic memory usage of the dictionary. In this experiment, the samples of temperature data for 500 records were compressed using LZO and transmitted to a target node. The efficiency of the compression depends on the repeat pattern of the data. In Figure 9, the samples of temperature in Celsius are shown. The sampling interval between each record is 1 m. The current consumption of the operation at fixed frequency and when the frequency-switching technique was applied, where the operation was completed with the transmission process, is shown in Figure 10. It can be seen in this figure that the energy consumption of LZO when the frequency is fixed is ~3.5 mJ and when the switched frequency technique is applied is ~1.6 mJ.

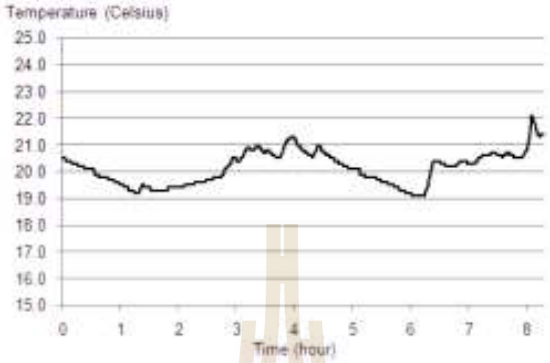


Figure 9. 500 samples of temperature data.

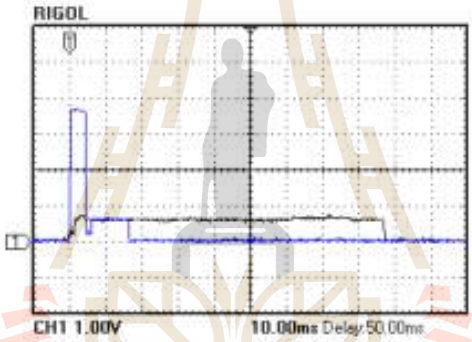


Figure 10. Current consumption of Lempel–Ziv–Oberhumer (LZO) compression of 500 temperature samples with a fixed frequency (black) and switched frequency (blue).

The experimental results for CRC-8, CRC-32, JPEG, and LZO show that the frequency-switching technique reduced the energy consumption of the MCU in all the experiments. The energy saving in percentage is summarized in Table 2. The maximum of energy saving is 66.9% when JPEG compression is employed.

Table 2. Comparative summary of energy consumption for fixed frequency and switched frequency.

Experiment (with TX.)	Parameters	Energy (mJ)		Energy Saving
		Fixed Frequency	Frequency Switching	
CRC-8	Len = 100	0.24	0.24	0%
	Len = 500	0.82	0.73	10.90%
	Len = 1000	1.6	1.35	15.70%
CRC-32	Len = 100	0.27	0.25	5.70%
	Len = 500	0.88	0.76	14.20%
	Len = 1000	1.65	1.37	16.90%
JPEG (Lena 64 × 64)	Q = 10	24.5	8.1	66.90%
	Q = 50	26.5	9.2	65.20%
	Q = 99	39.7	17.8	55.10%
LZO (Temperature)	Len = 500	3.5	1.6	54%

5. Conclusions

The experimental results showed the advantage of using the frequency-switching technique in terms of reducing the energy consumption of an MCU. The amount of energy saving depends on the data-processing time, the difference between two operating frequencies, and the architecture and the peripherals of the MCU. An additional advantage of the proposed technique is that there is no additional hardware cost and it can be implemented easily in only the software. The proposed technique can be used to improve the energy efficiency of a low-cost MCU-based sensor node when a PLL unit is available. In summary, the image sensor nodes can save energy by using the proposed technique. The experimental results indicate that energy saving up to 66.9% can be achieved when using the frequency-switching technique compared with normal operation.

Author Contributions: P.U. worked on the conceptual modelling and finding solutions. P.D. was responsible for the experiments. Both authors contributed to revising and improving the quality of the paper. The major and th most significant contribution was by the second author P.U.

Acknowledgments: This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) Research and Development Fund. We would like to thank the reviewers and editor for their valuable comments and constructive suggestions, which helped to improve the quality of this article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Kaur, J.; Reddy, S.R.N. Operating systems for low-end smart devices: A survey and a proposed solution framework. *Int. J. Inf. Technol.* 2018, *10*, 49–58. [CrossRef]
2. Jain, N.; Madan, S.; Malik, S.K. Review of Multiparameter Techniques for Precision Agriculture Using Wireless Sensor Network. *J. Netw. Commun. Emerg. Technol.* 2018, *8*, 1–17.
3. Mubashir, F.A.; Rehmani, H. Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, *45*, 769–784.
4. Karray, F.; Jmal, W.M.; Houssaini, M.A.D.; Obeid, A.M.; Qasim, S.M.; BenSaleh, M.S. Architecture of wireless sensor nodes for water monitoring applications: From microcontroller-based system to soc solutions. In Proceedings of the 2014 5th IMEKO TC19 Symposium on Environmental Instrumentation and Measurements (IMEKO), Chemnitz, Germany, 23–24 September 2014.
5. Bao, S.; Yan, H.; Chi, Q.; Pang, Z.; Sun, Y. FPGA-Based Reconfigurable Data Acquisition System for Industrial Sensors. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 2017, *13*, 1503–1512. [CrossRef]
6. Suresh, G. Effective Replacement of FPGA for Microcontrollers in Home Automation. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2018, *13*, 2710–2713.
7. Wunderlich, R.; Adil, F.; Hasler, P. Floating gate-based field programmable mixed-signal array. *IEEE Trans. VLSI Syst.* 2013, *21*, 1496–1505. [CrossRef]
8. Schlottmann, C.; Shapero, S.; Nease, S.; Hasler, P. A digitally enhanced dynamically reconfigurable analog platform for low-power signal processing. *IEEE J. Solid-State Circuits* 2012, *47*, 2174–2184. [CrossRef]
9. Chien, T.K.; Chiou, L.Y.; Sheu, S.S.; Lin, J.C.; Lee, C.C.; Ku, T.K.; Tsai, M.J.; Wu, C.I. Low-Power MCU With Embedded ReRAM Buffers as Sensor Hub for IoT Applications. *IEEE J. Emerg. Sel. Circuits Syst.* 2016, *6*, 247–257. [CrossRef]
10. Kee, M.; Seon, H.S.; Kwon, S.; Lee, J.; Park, C.H. Hardware accelerator for low-power sensor hub MCU to process sensor fusion algorithm. In Proceedings of the 2015 International SoC Design Conference (ISOCC), Gyungju, Korea, 2–5 November 2015.
11. Uss, M.; Vozel, B.; Lukin, V.; Chehdi, K. Analysis of signal-dependent sensor noise on JPEG 2000-compressed Sentinel-2 multi-spectral images. In Proceedings of the Image and Signal Processing for Remote Sensing, Warsaw, Poland, 11–14 September 2017.
12. Lee, C.; Kim, B.S.; Jeon, B.K. Improvement of Image Sensor Performance through Implementation of JPEG2000 H/W for Optimal DWT Decomposition Level. *Int. J. Adv. Smart Convers.* 2017, *6*, 68–75. [CrossRef]
13. Balsamo, D.; Elboreini, A.; Al-Hashimi, B.M.; Merrett, G.V. Exploring ARM mbed support for transient computing in energy harvesting IoT systems. In Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces, Vieste, Italy, 15–16 June 2017.

14. Poncelina, G.; Poolammal, M.; Priyanka, S.; Rakshana, M.; Praghash, K.; Ananth, C. GSM Based AMR. *Int. J. Adv. Res. Biol. Ecol. Sci. Technol.* **2015**, *1*, 26–28. [CrossRef]
15. Sakamoto, T.; Hase, T. JPEG software solution for a 32-bit MCU. *IEEE Trans. Comers. Electron.* **1997**, *43*, 410–417. [CrossRef]
16. Sakamoto, T.; Hase, T. Software JPEG for a 32-bit MCU with dual issue. *IEEE Trans. Comers. Electron.* **1998**, *44*, 1334–1341. [CrossRef]
17. Lee, D.-U.; Hyungjin, K.; Rahimi, M.; Estrin, D. Energy-efficient image compression for resource-constrained platforms. *IEEE Trans. Image Proc.* **2009**, *18*, 2100–2113. [CrossRef] [PubMed]
18. Imran, M.; Ahmad, N.; Khursheed, K.; Waheed, M.A.; Lawal, N.; O'Nils, M. Implementation of wireless vision sensor node with a lightweight bi-level video coding. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.* **2013**, *3*, 198–209. [CrossRef]
19. Chao, H.Z.; Liu, Y.P.; Zhenxing, Z. A novel FPGA-based wireless vision sensor node. In Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Shenyang, China, 5–7 August 2009.
20. Kaddachi, M.L.; Makkaoui, L.; Soudani, A.; Lecuire, V. FPGA-based image compression for low-power wireless camera sensor networks. In Proceedings of the 3rd International Conference on Next Generation Networks and Services, Hammamet, Tunisia, 18–20 December 2011.
21. Renyan, Z.; Leibo, L.; Shouyi, Y.; Ao, L.; Zinkai, C.; Shaojun, W. A VLSI design of sensor node for wireless image sensor network. In Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Paris, France, 30 May–2 June 2010.
22. Chang, C.; Zhiyong, L.; Chao, H. A novel wireless capsule endoscope with JPEG compression engine. In Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics, Hong Kong/Macau, China, 16–20 August 2010.
23. Aziz, S.M.; Duc, M.P. Energy efficient image transmission in wireless multimedia sensor networks. *IEEE Commun. Lett.* **2013**, *6*, 1084–1087. [CrossRef]
24. Capo-Chichi, M.E.P.; Friedt, J.-M.; Guyennet, H. Using data compression for delay constrained applications in wireless sensor networks. In Proceedings of the 2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Application, Venice/Mestre, Italy, 18–25 July 2010.
25. Merenda, M.; Felini, C.; Della Corte, F.G. An autonomous and energy efficient smart sensor platform. In Proceedings of the 2014 IEEE Sensors, Valencia, Spain, 2–5 November 2014.
26. Data PC2364/66/68. Available online: http://www.keil.com/dd/docs/datashts/philips/lpc236x_ds.pdf (accessed on 1 May 2018).
27. Koopman, P.; Chakravarty, T. Cyclic redundancy check (CRC) polynomial selection for embedded networks. In Proceedings of the 2004 International Conference on Dependable Systems and Networks, Florence, Italy, 28 June–1 July 2004.
28. JPEG JFIF. Available online: http://www.w3.org/Graphics/JPEG/itu-t81.pdf (accessed on 7 June 2016).

© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 และ 2541 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบโทรคมนาคมที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จนกระทั้ง พ.ศ. 2543 จึงได้ย้ายมาเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia เมื่อ พ.ศ. 2549 จึงได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ MIMO, Information Theory, Signal Processing, Radio Wave Modelling, Mobile Communication, Advance Wireless Communication ปัจจุบันมีบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 30 บทความ ในวารสารวิชาการระดับชาติ 6 บทความ ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 115 บทความ หนังสือวิชาการในประเทศ 1 เล่มและต่างประเทศ 1 เล่ม มีลิขสิทธิ์ 1 รายการและ สิทธิบัตร 1 รายการ

รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัล Young Scientist Travel Grant Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antenna Propagation ปี พ.ศ. 2547 ณ ประเทศญี่ปุ่น และได้รับรางวัล Best Student Presentation Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ Australian Symposium on Antanna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2553 รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัลพนักงานดีเด่น ด้านการวิจัย สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และในปี พ.ศ. 2556 บทความที่เป็นผู้ประพันธ์หลักเรื่อง Low-profile beamforming MIMO systems for wireless communications ได้รับรางวัลประกาศนียบัตร ผู้นำเสนอผลงานวิจัยดีมากแบบโปสเตอร์ ในงานการประชุมสุดยอดมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ครั้งที่ 2 (The Second Thailand National Research Universities Summit : NRU SUMMIT II) วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2556 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ