



บบตรวจสอบสภาพโครงสร้างทางวิศวกรรม ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย Wireless Sensor Networks Based Structural Health Monitoring System

• **ดร. วัศวี แสนศรีมหาชัย**

- อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
- คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

• **Dr. Watsawee Sansrimahachai**

- Lecturer, Department of Computer Science
- School of Science and Technology
- University of the Thai Chamber of Commerce
- E-mail: watsawee@yahoo.com

• **ดร. อธิพงษ์ เขมะเพชร**

- อาจารย์ประจำสาขาวิชาเว็บและโมบายเทคโนโลยี
- คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

• **Dr. Ittipong Khemapech**

- Lecturer, Department of Web and Mobile Technology
- School of Science and Technology
- University of the Thai Chamber of Commerce
- E-mail: ittipong.utcc@gmail.com

บทคัดย่อ

ระบบตรวจสอบสภาพโครงสร้างทางวิศวกรรมมีความสามารถในการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง เพื่อยืดอายุการใช้งานภายใต้สภาวะการใช้งานปกติและแจ้งเตือนยามเกิดภัยพิบัติ โดยการใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการสื่อสารข้อมูล และเทคนิคการประมวลผลกระแสข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบความเสียหาย ซึ่งมีสองแนวความคิดหลัก ได้แก่ การประมวลผลแบบรวมศูนย์ และการประมวลผลแบบแยกศูนย์ บทความนี้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์ข้อจำกัดของแต่ละวิธี พร้อมทั้งชี้ให้เห็นถึงแนวทางที่ควรศึกษาหรือพัฒนาต่อไป

คำสำคัญ: เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ระบบตรวจสอบสภาพโครงสร้าง การประมวลผลข้อมูล

Abstract

A Structural Health Monitoring (SHM) system is capable of damage detection in order to achieve two goals: to prolong the lifetime of the structure under usual conditions, and to launch a warning of impending disaster. Such goals can be achieved by applying Wireless Sensor Networks (WSNs) for data communication within the network and data stream processing for damage detection and analysis. There are currently two main approaches for facilitating structural health monitoring which include Centralized Data Processing and Decentralized Data Processing. This paper reviews key concepts and schemes, addressing their limitations and directions for the feasible improvements.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Structural Health Monitoring System, Data Processing

บทนำ

โครงสร้างทางวิศวกรรมถูกสร้างขึ้นเพื่อรองรับการขยายตัวและความเจริญของชุมชนหรือเมือง โดยเป็นพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญต่อการสร้างระบบที่ตอบสนองความต้องการร่วมของสังคมทั้งในปัจจุบันและอนาคต ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพชีวิต สวัสดิภาพ และความปลอดภัย (ระหัตถ์โรจนประดิษฐ์, 2547: 11) การเฝ้าระวังหรือตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม ทั้งในสภาวะการใช้งานตามปกติและเมื่อเกิดภัยพิบัติมีความจำเป็นและนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความมั่นคงและปลอดภัยของประชาชน สังคม และประเทศ ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาระบบการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม (Structural Health Monitoring – SHM) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดและเก็บข้อมูลจากตำแหน่งที่สนใจภายใต้สภาพการใช้งานที่เป็นมิตรหรืออันตราย และสถานีฐาน (Base Station) ซึ่งเป็นตัวรับและประมวลผลข้อมูล เชื่อมต่อและติดต่อสื่อสารกันแบบไร้สาย สามารถดำเนินงานแบบอัตโนมัติ ได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้เพิ่มมากขึ้น ทั้งในการตรวจสอบข้อมูลและสภาพทางสิ่งแวดล้อม สุขภาพ ความปลอดภัย ความมั่นคงทางการทหาร รวมถึงสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านพลังงานและทรัพยากรเป็นสิ่งต้องพึงตระหนักในการประยุกต์ใช้เครือข่ายดังกล่าว ซึ่งมีผลงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ได้พัฒนามาตรฐานของการสื่อสารข้อมูล หรือโพรโทคอลแบบประหยัด

พลังงาน นอกจากนี้ การวิเคราะห์ประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ซึ่งมีปริมาณมาก และเกิดแบบต่อเนื่องในช่วงที่เกิดภัยพิบัติต่อโครงสร้างนั้น ต้องดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพทั้งในบริบทของพลังงานและกรอบเวลา ทั้งนี้ผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการระบุหรือคาดการณ์ความเสียหาย และทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างได้โดยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้ได้ระบบที่ใช้งานได้จริง

บทความนี้ทบทวนความก้าวหน้าของงานวิจัยด้านการพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานสำหรับโครงสร้างทางวิศวกรรม พร้อมทั้งชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มที่ควรศึกษาและพัฒนาต่อไป

การสื่อสารข้อมูลภายในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

การประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับงานด้านการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรม สามารถกล่าวได้ว่ายังอยู่ในช่วงเริ่มต้นและช่วงของการทดลอง โดยจากการศึกษาพบว่าเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับงานด้านการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้าง มีจำนวนการติดตั้งและใช้งานจริงน้อย และขาดการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่ผู้ปฏิบัติงานหรือวิศวกร (Stajano, et al., 2010: 872) ประเด็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งของการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย คือ ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ซึ่งประเด็นปัญหาดังกล่าวสามารถสะท้อนผ่านอัตราความสำเร็จในการรับส่งข้อมูลภายใต้ความไม่แน่นอนของการแพร่สัญญาณวิทยุ ความถี่ในการสื่อสารข้อมูล จำนวนโหนด (Node) ที่พร้อมใช้งาน (Jang, Lee, and Choi, 2012: 33) รวมไปถึงจำนวนของการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดที่อยู่ติดกันหรือการสื่อสารข้อมูลแบบ

หลายทอด (Multi-hop) (ซึ่งถึงแม้ว่าการสื่อสารดังกล่าวสามารถจัดข้อจำกัดด้านระยะทางที่สัญญาณสามารถแพร่ออกไปได้ แต่อาจก่อให้เกิดปัญหาใหม่เกี่ยวข้องกับการจราจรของข้อมูลปริมาณมากจนส่งผลให้เกิดความคับคั่งภายในเครือข่าย และยังส่งผลให้ขาดประสิทธิภาพด้านพลังงานและมีอายุการใช้งานน้อย) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า การสื่อสารข้อมูลแบบทอดเดียว (Single-hop) ซึ่งเซ็นเซอร์สามารถส่งข้อมูลให้กับสถานีฐานได้โดยตรง สามารถประหยัดพลังงานในการส่งข้อมูลสูงกว่าร้อยละ 50 และมีความน่าเชื่อถือของระบบกว่าร้อยละ 99.97 (Khemapech, Miller, and Duncan, 2013: 21) ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยด้านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โพรโทคอลสื่อสารได้ถูกดัดแปลงให้เกิดความเหมาะสมกับเซ็นเซอร์ที่มีทรัพยากรจำกัด ผนวกกับการใช้ประโยชน์ของการสนับสนุนการสื่อสารข้อมูลแบบหลายช่องทาง (Multichannel) ของโพรโทคอล IEEE802.15.4 (Nagayama, Ushita, and Fujino, 2011: 762) เพื่อเพิ่มปริมาณงาน (Throughput) ให้กับเครือข่าย อย่างไรก็ตาม การสื่อสารข้อมูลภายในเครือข่ายเป็นเพียงส่วนเริ่มต้นของการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้าง

ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรมแบบรวมศูนย์

การวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์มีความสำคัญต่อกระบวนการตรวจสอบความเสียหาย (Damage Detection and Localization) และทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้าง ทั้งนี้ระบบต้นแบบสำหรับการตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างโดยส่วนใหญ่ จะมุ่งความสนใจไปที่การตรวจวัดข้อมูลหรือการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ และ

การสื่อสารข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไปสู่สถานีฐานเพื่อประมวลผลแบบรวมศูนย์ (Lynch, and Loh, 2006: 91) ด้วยการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเสมือนกับเป็นเครื่องมือในการตรวจวัดข้อมูลอย่างง่ายสนับสนุนการประมวลผลแบบรวมศูนย์ (Centralized Data Processing) ระบบรูปแบบนี้โดยทั่วไปถูกจัดให้อยู่ในประเภทที่เรียกว่า “ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบรวมศูนย์ (Centralized SHM System)”

Anastasi, Lo Re and Ortolana (2009: 574-575) นำเสนอระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างสำหรับตรวจวัดการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับโบราณสถาน งานวิจัยนี้ถือได้ว่าเป็นงานวิจัยที่ออกแบบระบบโดยประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลแนวคิดที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือ การแบ่งโหนดของเซ็นเซอร์ออกเป็นสองกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดข้อมูลความเร่ง (Accelerometer Nodes) และกลุ่มเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดข้อมูลความเครียดของโครงสร้าง (Strain Gauges) โหนดของเซ็นเซอร์ทั้งสองกลุ่มมีหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังเครื่องแม่ข่ายที่ส่วนกลางเพื่อประมวลผล โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะถูกจัดเก็บลงเก็บข้อมูลถาวรและประมวลผลกระบวนการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างภายหลัง แต่เนื่องด้วยระบบจำเป็นต้องจัดเก็บข้อมูลที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์จำนวนมากลงเก็บข้อมูลถาวร ดังนั้นระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงมีข้อจำกัดสำคัญในเรื่องการขยายระบบเพื่อรองรับโครงสร้างทางวิศวกรรมขนาดใหญ่ วิสเดน (Wisden) (Xu, et al., 2004: 15-16) ถือได้ว่าเป็นระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างในยุคเริ่มแรก มีจุดมุ่งหมายหลัก

ของโครงการ คือ การศึกษาการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อเก็บข้อมูลสถานะและตัวชี้วัดต่างๆ ของโครงสร้าง รวมทั้งพัฒนาเทคนิคเพื่อประกันประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดของเซ็นเซอร์และสถานีฐาน จุดเด่นที่น่าสนใจในงานนี้ คือ กลไกการบีบอัดข้อมูล ซึ่งได้ถูกนำเสนอเพื่อสนับสนุนการรับส่งข้อมูลแบบทันที (Real-time Data Acquisition) ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย อีกทั้งกลไกการบีบอัดข้อมูลดังกล่าวยังสามารถใช้ในการแก้ไขปัญหาการจัดเก็บข้อมูลจำนวนมากลงแหล่งเก็บข้อมูลถาวรอีกด้วย โครงการวิจัยของมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ซึ่งพัฒนาระบบสำหรับเฟิร์มแวร์สะพานโกลเดนเกต (Golden Gate Bridge) (Kim, et al., 2007: 254; Pakzad, et al., 2008: 89) เป็นอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ได้พัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบรวมศูนย์ที่มีขนาดใหญ่เป็นอันดับต้น ๆ ของโลก โครงการนี้มีแนวทางในการออกแบบระบบคล้ายกับวิสดน กล่าวคือ เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่กับโครงสร้างสะพานจะรวบรวมข้อมูลการสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่อง และจะส่งต่อข้อมูลดังกล่าวไปที่สถานีฐานซึ่งอยู่ ณ จุดศูนย์กลางเพื่อรวบรวม ประมวลผล และวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้าง นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอเทคนิคการทำงานพิเศษซึ่งอนุญาตให้ระบบโปรแกรมที่สถานีฐานสามารถส่งคำสั่งระยะไกล (Remote Operating Commands) เพื่อควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์ด้วยวิธีการดังกล่าวส่งผลให้การตรวจสอบข้อมูลของเซ็นเซอร์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น รวมทั้งระบบยังสามารถเปลี่ยนแปลงตัวแปรหรือวิธีการดำเนินการได้อย่างทันทีทันใด

แนวคิดของการประมวลผลแบบรวมศูนย์ถูกพัฒนาและขยายขอบเขตโดยโครงการวิจัย

บริมอน (Brimon) (Chebrolu, et al., 2008: 2-4) ซึ่งได้พัฒนาระบบสำหรับเฟิร์มแวร์สะพานข้ามทางรถไฟ โดยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อตรวจจับการมาถึงของรถไฟก่อนที่ขบวนรถจะเข้าถึงช่วงกลางสะพาน พร้อมกันนี้กลไกการปรับเปลี่ยนโหมดของเซ็นเซอร์ (Sleep and Wake-up Modes) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อประหยัดการใช้พลังงาน ต่อมางานวิจัยที่พัฒนาโดย Ceriotti, et al. (2009: 277-279) ได้ออกแบบระบบโดยเน้นการประมวลผลแบบรวมศูนย์เช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ เซ็นเซอร์หลากหลายประเภท เช่น เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิและความเร่ง ได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจวัดข้อมูลของโครงสร้างโบราณสถานที่สำคัญในประเทศอิตาลี ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์จะถูกส่งมาที่ศูนย์กลางเพื่อจัดเก็บที่คลังข้อมูลขนาดใหญ่ ในงานวิจัยนี้ กลไกการกำหนดเส้นทาง (Routing Mechanism) รูปแบบใหม่ที่เรียกว่า “Flooding Mechanism” ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการรับส่งข้อมูลแบบรวมศูนย์ ในขณะเดียวกันเพื่อสนับสนุนการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เทคนิคการบีบอัดข้อมูลแบบไม่สูญเสีย (Lossless Compression Technique) ได้ถูกนำเสนอ เพื่อลดปริมาณข้อมูลที่รับส่งระหว่างโหนดของเซ็นเซอร์และสถานีฐาน และสนับสนุนการรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ โครงการงานวิจัยล่าสุดที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลแบบรวมศูนย์ได้แก่ งานวิจัยของ Hu, Wang, and Ji (2013: 193-194) ซึ่งได้พัฒนาระบบตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้แพลตฟอร์มของเซ็นเซอร์ที่มีอยู่แล้วและเชื่อมต่อเข้ากับตัววัดความเร่ง 3 แกน ความเครียด และอุณหภูมิ ซึ่งถูกควบคุมการทำงานโดยระบบซอฟต์แวร์ที่ประกอบไปด้วยชุดโพรโทคอลสื่อสารที่มีอยู่แล้วเช่นกัน เนื่องจากตัวงานเน้นการส่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดของเซ็นเซอร์มาที่สถานี

ฐานเป็นหลัก ทำให้กระบวนการตรวจสอบความเสียหายและทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัยดังกล่าว อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบการสื่อสารภายในเครือข่ายไร้สาย ระบบที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้สามารถรับประกันความน่าเชื่อถือในการสื่อสารข้อมูลได้ถึงระดับร้อยละ 99.96

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยข้างต้น ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบรวมศูนย์ที่ศึกษาและมีใช้งานในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เนื่องด้วยระบบจำเป็นต้องส่งข้อมูลที่ได้รับการตรวจวัดจากโหนดของเซ็นเซอร์อย่างต่อเนื่องมายังสถานีฐานเพื่อประมวลผลแบบรวมศูนย์ จึงทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดปัญหาปริมาณข้อมูลในเครือข่ายมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น (High Network Load) และถึงแม้ว่างานวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาเทคนิคการบีบอัดข้อมูลเพื่อลดขนาดของข้อมูล และเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์กับสถานีฐานด้วยกลไกการกำหนดเส้นทาง (Routing Mechanism) แต่การสื่อสารหรือการรับส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากก็ส่งผลให้ใช้พลังงานมาก ข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการเกี่ยวข้องกับเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ก็คือ เนื่องด้วยระบบจำเป็นต้องได้รับข้อมูลจากการตรวจวัดของเซ็นเซอร์อย่างเพียงพอสำหรับการประมวลผลแบบรวมศูนย์ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของโครงการวิจัยของมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียเบิร์กลีย์ (Kim, et al., 2007: 261; Pakzad, et al., 2008: 95) ระบบใช้เวลาถึง 12 ชั่วโมงสำหรับหนึ่งวงรอบการตรวจวัดข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้าง ดังนั้น จากกรณีดังกล่าวจึงทำให้การใช้งานระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบรวมศูนย์

ไม่เหมาะสมกับกระบวนการวิเคราะห์ตำแหน่งและความเสียหายของโครงสร้างสำหรับเหตุการณ์วิกฤติ เช่น เหตุการณ์แผ่นดินไหว ซึ่งจำเป็นต้องมีการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลที่รวดเร็วและทันต่อเหตุการณ์

ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างทางวิศวกรรมแบบแยกศูนย์

ด้วยข้อจำกัดของระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบรวมศูนย์ ส่งผลให้เกิดการพัฒนาเทคนิคการประมวลผลข้อมูลใหม่ ได้แก่ เทคนิคการประมวลผลแบบแยกศูนย์ (Decentralized Data Processing Approach) โดย “ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบแยกศูนย์ (Decentralized SHM System)” คือ ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างที่การประมวลผลหลักของกระบวนการตรวจสอบและวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างกระทำในแบบขนาน (Parallel) ที่เซ็นเซอร์ ด้วยเทคนิคการประมวลผลรูปแบบนี้ ทำให้เซ็นเซอร์สามารถอ่านและประมวลผลด้วยตนเอง ซึ่งลดเวลาและการทำงานของพลังงานในการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน พร้อมทั้งลดปริมาณข้อมูลที่สื่อสารผ่านเครือข่าย มีหลายโครงการวิจัยที่ได้นำเสนอระบบซึ่งเข้าข่ายว่าจัดอยู่ในระบบประเภทนี้

กระบวนการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง 2 ชั้นตอน (Two-tiered Damage Detection Method) ซึ่งพัฒนามาบนพื้นฐานของการรู้จำแบบทางสถิติ (Statistical Pattern Recognition Paradigm) (Farrar, et al., 1999: 765) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความนิยมและถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างแบบแยกศูนย์ ประกอบด้วยแบบจำลองทางสถิติ 2 แบบ

จำลอง ได้แก่ แบบจำลองถดถอยอัตโนมัติ (Auto-regressive Model – AR) และแบบจำลองถดถอยอัตโนมัติที่มีตัวแปรภายนอก (Auto-regressive Model with Exogenous Inputs – ARX) ทั้งนี้ แบบจำลอง AR และ ARX จะรับข้อมูลที่ได้จากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์แบบอนุกรมเวลาเข้ามาตรวจสอบและผลลัพธ์ของการตรวจสอบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลพื้นฐานที่จัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูล เพื่อที่จะประเมินสภาพความเสียหายของโครงสร้าง (Sohn and Farrar, 2001: 448-449) ต่อมา Lynch, et al. (2003: 10) ได้พัฒนากระบวนการดังกล่าวเพิ่มเติมโดยประยุกต์ใช้งานในการประมวลผลข้อมูลแบบอัตโนมัติบนเซ็นเซอร์ ในกระบวนการที่พัฒนาขึ้นใหม่โดยการจำกัดการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงาน ดังนั้นข้อมูลแบบจำลอง AR และ ARX ที่ได้กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า (Pre-defined AR-ARX Models) จะถูกจัดเก็บไว้ที่เครื่องแม่ข่ายซึ่งให้บริการฐานข้อมูลที่ส่วนกลาง จากนั้นเซ็นเซอร์จำเป็นต้องเข้าถึงเครื่องแม่ข่ายและดึงข้อมูลแบบจำลองจากระยะไกลเพื่อใช้สำหรับการประมวลผล (Lynch, et al., 2004: 805) อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของกระบวนการดังกล่าว คือ รูปแบบความเสียหายของโครงสร้าง (Damage Pattern) จำเป็นต้องถูกกำหนดตั้งแต่ก่อนที่ระบบจะเริ่มประมวลผล นอกจากนี้ด้วยความจำเป็นที่ต้องสื่อสารกับฐานข้อมูลที่ส่วนกลางเพื่อเรียกดึงข้อมูล ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณการสื่อสารผ่านเครือข่ายค่อนข้างสูง

Ruiz-Sandoval (2004) นำเสนอระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างอัจฉริยะ (Smart SHM System) ที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของโครงร่างซอฟต์แวร์โปรแกรมตัวแทน (Multi-agent Framework) ชื่อระเบียบวิธีไกอา (Gaia Methodology)

(Wooldridge, Jennings, and Kenny, 2000: 286) ระบบดังกล่าวประยุกต์ใช้งานกระบวนการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง 2 ขั้นตอน โดยพัฒนาในโปรแกรมโหนดตัวแทน (Node Agent) ที่ฝังตัวอยู่ในเซ็นเซอร์ไร้สาย (Farrar, et al., 1999: 765; Sohn and Farrar, 2001: 448-449) จุดเด่นที่สำคัญของระบบนี้ซึ่งแตกต่างจากระบบอื่น คือ แทนที่จะจัดเก็บข้อมูลที่เครื่องแม่ข่ายที่ส่วนกลาง แบบจำลอง AR และ ARX รวมไปถึงข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับการประมวลผลจะถูกจัดเก็บอยู่ที่เซ็นเซอร์ ถึงแม้ว่าเทคนิคดังกล่าวจะทำให้ระบบสามารถลดปริมาณข้อมูลที่ส่งผ่านเครือข่าย แต่กระนั้นอาจจะก่อให้เกิดปัญหาใหม่เกี่ยวกับการใช้งานพื้นที่ในแหล่งเก็บข้อมูลปริมาณค่อนข้างมาก Kiremidjian, and Sarabandi (2011: 888) ได้นำเทคนิคการรู้จำแบบทางสถิติซึ่งประยุกต์ใช้งานแบบจำลอง AR และ ARX มาต่อยอด และเสริมด้วยการใช้วิธีการเคลื่อนที่เฉลี่ยแบบถดถอยอัตโนมัติ (Autoregressive Moving Average Model – ARMA) ร่วมกับมาตราระยะทาง (Distance Measure) เพื่อตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง ถึงแม้เทคนิคดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเดิมเกี่ยวกับปริมาณการสื่อสารผ่านเครือข่าย แต่จากผลการทดสอบพบว่า เทคนิคดังกล่าวสามารถใช้ในการระบุความเสียหายของโครงสร้างจำลองในห้องปฏิบัติการที่ได้รับแรงกระทำแบบสั้นไหวที่ฐานในหลากหลายรูปแบบ สามารถระบุความเสียหายของโครงสร้างในระดับความละเอียดค่อนข้างสูง (เช่น รอยแตกขนาดเล็กที่ผิวของคอนกรีต) และเทคนิคดังกล่าวยังสามารถประยุกต์ใช้งานกับการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างขนาดใหญ่ได้อีกด้วย

Hackmann, et al. (2008: 37) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคดีแอลเอซี (Damage Localization

Assurance Criterion - DLAC) (Messina, Williams, and Contursi, 1998: 792) ข้อมูลความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการสั่นสะเทือนจะถูกส่งเข้าไปประมวลผลยังอัลกอริทึมดีแอลเอซี (DLAC) ที่เครื่องแม่ข่ายเพื่อวิเคราะห์สภาพการใช้งานโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม เทคนิคดีแอลเอซียังมีข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะข้อจำกัดที่ระบบไม่สามารถตรวจสอบหรือค้นหาความเสียหายที่เกิดขึ้นหลายจุดบนโครงสร้างได้ เพื่อที่จะแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว Hackmann, et al. (2010: 120-121) ได้นำเสนอเทคนิคที่ประยุกต์ใช้ข้อมูลความยืดหยุ่นของโครงสร้าง (Flexibility-based technique) ซึ่งเป็นเทคนิคส่วนขยายที่นำมาช่วยในการวิเคราะห์สภาพการใช้งานโครงสร้าง จากผลการทดลองกับโครงสร้างที่ใช้จริง พบว่า เทคนิคดีแอลเอซีสามารถลดปัญหาความคับคั่งของข้อมูลบนเครือข่าย และช่วยประหยัดพลังงานถึงประมาณร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับระบบที่ประมวลผลแบบรวมศูนย์ (Hackmann, et al., 2012: 30) อย่างไรก็ตาม เทคนิคดีแอลเอซีพวกับเทคนิคส่วนขยายดังกล่าว ยังคงมีข้อจำกัดลักษณะเดียวกับเทคนิคการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง 2 ขั้นตอน (Farrar, et al., 1999: 765) เนื่องจากทั้งสองเทคนิคจำเป็นต้องจัดเตรียมรูปแบบความเสียหายของโครงสร้าง (Damage Pattern) ก่อนที่ระบบจะเริ่มประมวลผล Bocca, et al. (2011: 207) เสนอแนวคิดในการเพิ่มความสามารถให้กับเซ็นเซอร์ด้านการประมวลผลข้อมูลแบบทันที (Real-time Processing) เพื่อลดปริมาณการรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย และลดภาระของสถานีฐาน ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งอยู่บนพื้นฐานของขั้นตอนวิธีของเกิร์ตเซล (Goertzel Algorithm) โดยใช้การระบุดองค์ประกอบทางความถี่ที่แตกต่างกันในสัญญาณ

ที่ตรวจวัดได้มาช่วยในการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้าง นอกจากนี้ ขั้นตอนวิธีของเกิร์ตเซลสามารถปรับค่าผลลัพธ์จากตัวอย่างที่เพิ่มเติมได้ จึงไม่มีความจำเป็นในการเก็บข้อมูลความเร่งในหน่วยความจำ จากผลการทดลอง วิธีการที่นำเสนอสามารถลดเวลาแฝง (Latency) ได้ร้อยละ 80 และยืดอายุการใช้งานของระบบร้อยละ 52

โครงการระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้าง อิลลินอยส์ (Illinois Structural Health Monitoring Project) (Jang, et al., 2010: 440; Park, et al., 2010: 2) เป็นโครงการวิจัยล่าสุดที่พัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างแบบแยกศูนย์ โดยอาจกล่าวได้ว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้เป็นระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างที่มีโครงข่ายขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ในโครงการนี้ ซอฟต์แวร์กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของสถาปัตยกรรมเชิงบริการ (Service Oriented Architecture – SOA) (Sim and Spencer, 2009: 10; Rice, et al., 2010: 430) การทำงานถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ 1) บริการพื้นฐาน (Foundation Services) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมการส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย 2) บริการโปรแกรมประยุกต์ (Application Services) ซึ่งครอบคลุมอัลกอริทึมที่จำเป็นในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข สำหรับตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้าง และ 3) เครื่องมือและอรรถประโยชน์ (Tool and Utilities) อัลกอริทึมกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างที่พัฒนาขึ้นอ้างอิงกับแนวคิดการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความสั่นสะเทือน (Modal Analysis) (Jo, et al., 2012: 684) โดยอัลกอริทึมจะประมวลผลค่าที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์อย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติ โดยส่วนการประมวลผลหลักจะทำงาน

ที่โหนดของเซ็นเซอร์ (Decentralized / In-network Processing) ถึงแม้อัลกอริทึมดังกล่าวจะยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้งานพื้นที่ในแหล่งเก็บข้อมูลของโหนดของเซ็นเซอร์ปริมาณค่อนข้างมาก แต่กระนั้น อัลกอริทึมได้เพิ่มส่วนงานสำคัญที่สนับสนุนฟังก์ชันในการคัดกรองข้อมูลและสนับสนุนฟังก์ชันการปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานของกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานพลังงานแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิเคราะห์แนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคการประมวลผลแบบแยกศูนย์

ความก้าวหน้าของเทคนิคการประมวลผลแบบแยกศูนย์เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดการพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพการประมวลผลข้อมูลสูงและประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตาม ระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างแบบแยกศูนย์ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดในการทำงาน ประการแรก สำหรับระบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ผู้ใช้มีภาระที่จะต้องกำหนดรูปแบบความเสียหายของโครงสร้าง (Damage Pattern) ก่อนที่ระบบจะเริ่มประมวลผลเสมอ ประการที่สอง กระบวนการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน จำเป็นต้องเชื่อมโยงและแลกเปลี่ยนข้อมูลจำนวนมากระหว่างเซ็นเซอร์และสถานีฐาน ซึ่งการทำงานในลักษณะดังกล่าวอาจก่อให้เกิดปัญหาการคับคั่งของข้อมูลบนเครือข่ายและการใช้พลังงานค่อนข้างสูง ประการที่สาม ระบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน เกือบทั้งหมดประยุกต์ใช้กระบวนการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างที่จำเป็นต้องจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ทั้งหมดลงในแหล่งเก็บข้อมูลถาวรก่อนที่จะประมวลผลข้อมูล ด้วยการ

จัดเก็บข้อมูลลักษณะนี้ทำให้ระบบมีข้อจำกัดในการประมวลผลและแสดงผลลัพธ์แบบทันที (Real-time Responses) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการตอบสนองอย่างทันท่วงทีในกรณีที่มีภัยพิบัติเกิดขึ้น นอกจากนี้ การจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์ทั้งหมด ยังอาจส่งผลให้เกิดปัญหาพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในแหล่งเก็บข้อมูลไม่เพียงพออีกด้วย

ด้วยข้อจำกัดที่กล่าวมาข้างต้น สนับสนุนให้เกิดความพยายามในการวิจัยที่จะพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างที่ประยุกต์ใช้แนวคิดการประมวลผลแบบแยกศูนย์ ระบบและเทคนิคที่จะนำเสนอจำเป็นต้องจัดปัญหาการคับคั่งของข้อมูลบนเครือข่าย (High Network Load) และปัญหาการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูงในเซ็นเซอร์แบบไร้สาย อีกทั้งจำเป็นต้องลดภาระการทำงาน โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องกำหนดรูปแบบความเสียหายของโครงสร้าง (Pre-defined Damage Pattern) ก่อนที่ระบบจะประมวลผล และท้ายที่สุดระบบที่จะพัฒนาขึ้นจำเป็นต้องสนับสนุนการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างแบบทันที (Real-time Damage Analysis) อีกทั้งเทคนิคการประมวลผลควรมีการทำงานในลักษณะ “On-the-fly” นั่นคือไม่จำเป็นต้องจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดในขณะประมวลผล ทั้งนี้ เพื่อแก้ไขปัญหพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในแหล่งเก็บข้อมูลไม่เพียงพอและสนับสนุนการบริหารหน่วยความจำอย่างมีประสิทธิภาพ (Sansrimahachai, Moreau, and Weal, 2013: 476) ซึ่งแนวทางการทำงานลักษณะ On-the-fly สอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาขั้นตอนวิธีในการตรวจสอบสภาพการใช้งานโครงสร้างในปัจจุบัน (Bocca, et al., 2011: 207) และงานวิจัยที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต ที่มีความต้องการ

ที่จะประมวลผลข้อมูลที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์อย่างอัตโนมัติ และปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีส่วนสำคัญในการประมวลผลแบบพลวัต โดยไม่จัดเก็บข้อมูลในพื้นที่หน่วยความจำอย่างถาวร

บทสรุป

โครงสร้างทางวิศวกรรมมีความสำคัญ และส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนและสังคม การตรวจสอบสภาพการใช้งานทั้งในภาวะปกติและยามเกิดภัยพิบัติช่วยยืดอายุการใช้งานและป้องกันความเสียหาย เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเซ็นเซอร์และสถานีฐาน โดยการพัฒนาหรือปรับปรุงโพรโทคอลที่มีอยู่ เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ การตรวจสอบความเสียหายโดยการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์สามารถทำได้ทั้งที่สถานีฐานหรือส่วนกลาง ซึ่งมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานในการสื่อสารข้อมูลจำนวนมากและกรอบเวลา เนื่องจากการประมวลผลเกิดที่จุดศูนย์กลางของระบบ การประมวลผลแบบแยกศูนย์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซ็นเซอร์ ลดภาระการประมวลผลของสถานีฐาน และสามารถลดข้อจำกัดด้านกรอบเวลาได้ การประมวลผลข้อมูลโดยไม่ต้องจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดในหน่วยความจำเป็นหนึ่งในแนวทางหลักที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ และลดข้อจำกัดของระบบตรวจสอบสภาพของโครงสร้างได้

บรรณานุกรม

Anastasi, G., Lo Re, G., and Ortolani, M. 2009. "WSNs for Structural Health Monitoring of Historical Buildings." In **Proceedings of the 2nd International Conference on**

Human System Interactions, pp. 574-579. Catania, Italy: IEEE.

Bocca, M., et al. 2011. "Structural Health Monitoring in Wireless Sensor Networks by the Embedded Goertzel Algorithm." In **Proceedings of the IEEE/ACM 2nd International Conference on Cyber-Physical Systems**, pp. 206-214. Chicago, IL: IEEE.

Cerioti, M., et al. 2009. "Monitoring Heritage Buildings with Wireless Sensor Networks: The Torre Aquila Deployment." In **Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks**, pp. 277-288. San Francisco, CA: IEEE.

Chebroly, K., et al. 2008. "Brimon: A Sensor Network System for Railway Bridge Monitoring." In **Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services**, pp. 2-14. Colorado: ACM.

Farrar, C.R., et al. 1999. "A Statistical Pattern Recognition Paradigm for Vibration-based Structural Health Monitoring." In **Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring**, pp. 765-773. Stanford, CA: Stanford University.

Hackmann, G., et al. 2012. "A Holistic Approach to Decentralized Structural Damage Localization Using Wireless Sensor Networks." **Computer Communications**

- 36, 1: 29-41.
- Hackmann, G., et al. 2010. "Cyber-physical Codesign of Distributed Structural Health Monitoring with Wireless Sensor Networks." In **Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems**, pp. 119-128. Philadelphia, PA: ACM.
- Hackmann, G., et al. 2008. "A Holistic Approach to Decentralized Structural Damage Localization Using Wireless Sensor Networks." In **Proceedings of the 2008 Real-Time Systems Symposium**, pp. 35-46. Barcelona, Spain: IEEE.
- Hu, X., Wang, B., and Ji, H. 2013. "A Wireless Sensor Network-based Structural Health Monitoring for Highway Bridges." **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering** 28, 3: 193-209.
- Jang, W-S., Lee, D-E., and Choi, J-H., 2012. "Ad-hoc Performance of Wireless Sensor Network for Large Scale Civil and Construction Engineering Applications." **Automation in Construction** Vol.26: 32-45.
- Jang, S., et al. 2010. "Structural Health Monitoring of a Cable-stayed Bridge Using Smart Sensor Technology: Deployment and Evaluation." **Smart Structures and Systems** 5, 6: 439-459.
- Jo, H., et al. 2012. "Development and Application of High-sensitivity Wireless Smart Sensors for Decentralized Stochastic Modal Identification." **Journal of Engineering Mechanics** 138, 6: 683-694.
- Khemapech, I., Miller, A., and Duncan, I. 2013. "An Energy Aware Protocol for Cyclic Monitoring Wireless Sensor Networks." In **Proceedings of the 8th International Conference on Networking, Architecture, and Storage**, pp. 13-22. Xi'an, China: IEEE.
- Kim, S., et al. 2007. "Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks." In **Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks**, pp. 254-263. Cambridge, MA: IEEE.
- Kiremidjian, A.S., Kiremidjian, G., and Sarabandi, P. 2011. "A Wireless Structural Monitoring System with Embedded Damage Algorithms and Decision Support System." **Structure and Infrastructure Engineering** 7, 12: 881-894.
- Lynch, J.P., and Loh, K J. 2006. "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring," **Shock and Vibration Digest** 38, 2: 91-128.
- Lynch, J.P., et al., 2004. "Embedding Damage Detection Algorithms in a Wireless Sensing Unit for Operational Power Efficiency." **Smart Materials and Structures** 13, 4: 800-810.
- Lynch, J.P., et al. 2003. "Design of Wireless Sensor Units with Embedded Statistical

- Time-series Damage Detection Algorithms for Structural Health Monitoring.” In **Proceedings of Caltrans/UCSD Workshop on Structural Health Monitoring and Diagnostics of Bridge Infrastructure**, pp. 7-22. San Diego, CA: UCSD.
- Messina, A., Williams, E., and Contursi, T. 1998. “Structural Damage Detection by a Sensitivity and Statistical-based Method.” **Journal of Sound and Vibration** 216, 5: 791-808.
- Nagayama, T., Ushita, M., and Fujino, Y. 2011. “Suspension Bridge Vibration Measurement Using Multihop Wireless Sensor Networks.” In **Proceedings of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction**, pp. 761-768. Netherlands: Elsevier.
- Pakzad, S., et al. 2008. “Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring.” **Journal of Infrastructure Systems** 14, 1: 89-101.
- Park, J.W., et al. 2010. “Long-term Structural Health Monitoring System of a Cable-stayed Bridge based on Wireless Smart Sensor Networks and Energy Harvesting Techniques.” In **Proceedings of the 5th World Conference of Structural Control and Monitoring**, pp. 1-6. Tokyo, Japan: IASCM.
- Rice, J.A, et al. 2010. “Flexible Smart Sensor Framework for Autonomous Structural Health Monitoring.” **Smart Structures and Systems** 6, 5-6: 423-438.
- Rodjanapradied, R. 2004. “Railway Mass Transit and Bangkok Development.” **University of the Thai Chamber of Commerce Journal** 24, 3: 7-19. (in Thai).
- ระหัตถ์ โรจนประดิษฐ์. 2547. “การขนส่งมวลชนระบบรางกับการพัฒนากรุงเทพมหานคร.” **วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย** 24, 3: 7-19.
- Ruiz-Sandoval, M.E. 2004. “Smart Sensors for Civil Infrastructure Systems.” Master’s thesis, Graduate Program in Civil Engineering and Geological Sciences, the University of Notre Dame, Indiana, USA.
- Sansrimahachai, W., Moreau, L., and Weal, M. 2013. “An On-the fly Provenance Tracking Mechanism for Stream Processing Systems.”, In **Proceedings of the 12th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science**, pp. 475-481. Niggata, Japan: IEEE.
- Sim, S.H., and Spencer, Jr., B.F. 2009. **Decentralized Strategies for Monitoring Structures using Wireless Smart Sensor Networks**. NSEL Report Series 019, Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Sohn, H., and Farrar, C.R. 2001. “Damage Diagnosis Using Time Series Analysis of Vibration Signals.” **Smart Materials**

and Structures 10, 3: 446-451.

Stajano, F., et al. 2010. "Smart Bridges, Smart Tunnels: Transforming Wireless Sensor Networks from Research Prototypes into Robust Engineering Infrastructure." **Ad Hoc Networks** 8, 8: 872-888.

Wooldridge, M., Jennings, N.R., and Kinny, D. 2000. "The Gaia Methodology for

Agent-oriented Analysis and Design."

Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 3, 3: 285-312.

Xu, N., et al. 2004. "A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring." In **Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems**, pp. 13-24. Baltimore, MD: ACM.



Dr. Watsawee Sansrimahachai is a lecturer in School of Science and Technology at University of the Thai Chamber of Commerce. He received his Ph.D. in Computer Science from the University of Southampton, UK. His research interest is in the area of parallel and distributed processing with a special emphasis on data stream processing.



Dr. Ittipong Khemapech is the Associate Dean for Administrative Affairs in School of Science and Technology at University of the Thai Chamber of Commerce. He received his B.Eng. in Civil Engineering and Ph.D. in Computer Science from the University of St Andrews, UK. His research interests are structural engineering and wireless sensor networks.