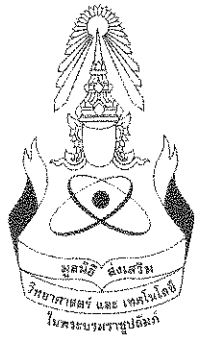
นักวิทยาศาสตร์ดีเด่น กับสังคมไทย

925.0593
ม686น
2546

งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์

or the Promotion of Science and Technology under the Patronage of His Majesty the King



การประมวลสัญญาณดิจิตัล

วงจรกรองดิจิตัล

และเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

ศาสตราจารย์ ดร. ไพรัช ธัชยพงษ์

นักวิทยาศาสตร์ดีเด่น พ.ศ. 2534

สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์

การประมวลสัญญาณดิจิตัล วงจรกรองดิจิตัล และเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

เรื่องย่อ

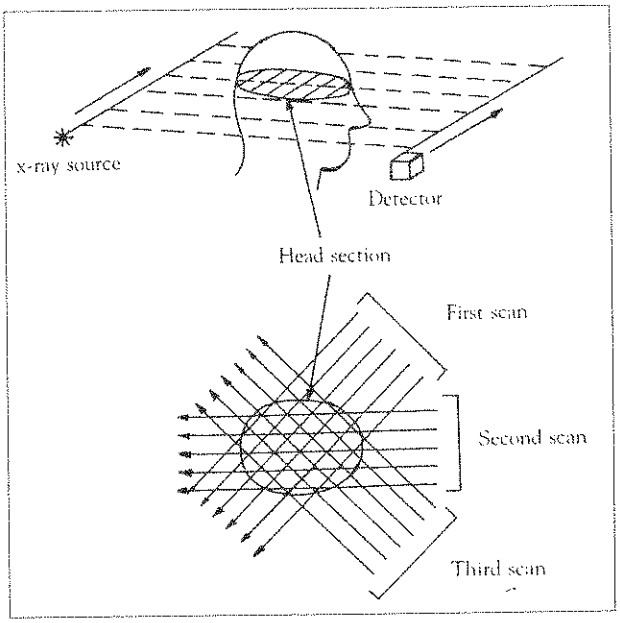
การค้นพบทรานซิสเตอร์โดยนักฟิสิกส์ 3 ท่าน คือ บาร์ดีน (Bardeen) แบรทเทน (Brattain) และช็อกลีย์ (Shockley) แห่งสหรัฐอเมริกา เมื่อประมาณ พ.ศ. 2491 นับเป็นจุดสำคัญที่ต่อมาทำให้เกิดการค้นพบวงจรรวม (Integrated Circuit หรือย่อๆ ว่า IC) ที่สามารถจะย่อส่วนให้ทรานซิสเตอร์จำนวนนับแสนตัวลงไปอยู่บนตารางมิลลิเมตรของชิ้นผลึกซิลิกอนได้ ทำให้เกิดการผลิตหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) บนซิลิกอนชิ้นเดียวที่เรียกว่าไมโครเซสเซอร์และหน่วยความจำจุเป็นล้านตัวอักษรบนชิ้นซิลิกอนขนาดตารางมิลลิเมตรเช่นเดียวกัน วิวัฒนาการดังกล่าวทำให้มีคอมพิวเตอร์ขนาดต่างๆ รวมทั้งไมโครคอมพิวเตอร์ที่ขนาดเล็กกะทัดรัดออกมาใช้งานในแทบทุกสาขาวิชาชีพ

เอกซเรย์คอมพิวเตอร์เป็นชื่อเรียกอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทำงานร่วมกับรังสีเอกซ์เพื่อถ่ายภาพตัดขวางของร่างกาย มาจากชื่อภาษาอังกฤษว่า x-ray computerized tomography หรือบางทีเรียกย่อๆ ว่า CT-Scanner องค์ประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์เอกซเรย์คอมพิวเตอร์มี 3 ส่วน คือ ส่วนกำเนิดและตรวจรับรังสีเอกซ์ ส่วนคอมพิวเตอร์และส่วนเครื่องกลการหมุนประวัติย้อนหลังของเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เริ่มตั้งแต่ พ.ศ. 2460 เมื่อราดอน (Radon) ค้นพบคณิตศาสตร์การสร้างภาพเรียกว่าการแปลงราดอน (Radon transform) และระหว่าง พ.ศ. 2510 - 2513 เมื่อเฮาซฟิลด์ (Hounsfield) แห่งบริษัท อีเอ็มไอ (EMI) สหราชอาณาจักร ทำการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางของศีรษะมนุษย์ได้เป็นครั้งแรก ต่อมาเฮาซฟิลด์ได้รับรางวัลโนเบลจากผลงานนี้ร่วมกับคอร์แมค (Cormack) ใน พ.ศ. 2515 ในการทำงานนั้นแหล่งกำเนิดและตัวตรวจรับรังสีเอกซ์จะหมุนไปรอบตัวคนไข้จนครบ 360 องศา ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ตำแหน่งของแต่ละองศา

ตัวตรวจรับปริมาณรังสีเอกซ์ที่เหลือหลังจากผ่านเนื้อเยื่อของร่างกายแล้วจึงป้อนเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งมีซอฟท์แวร์เชิงคณิตสาสตร์ของการประมวลสัญญาณดิจิตัลทำการคำนวณเพื่อแสดงผลออกที่จอภาพ

การออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีพด้วยโปรแกรมเชิงเส้น

ใน พ.ศ. 2515 ขณะที่ผู้เขียนกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ สหราชอาณาจักร ได้พยายามที่จะสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่คำนวณการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform) เพื่อนำขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่คูลี (Cooley) แห่งห้องวิจัยวัตสันไอบีเอ็ม และดุกี (Tukey) แห่งห้องวิจัยโทรศัพท์เบลล์ สหรัฐอเมริกา ค้นพบเมื่อ พ.ศ. 2508 มาสร้างเป็นอุปกรณ์ทำงานจริงในการวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างอุปกรณ์คำนวณดังกล่าวนั้น จำเป็นต้องสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่คูณเลขความเร็วสูง (high-speed multiplier) ที่เร็วมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งอยู่ในย่านประมาณ 10^{-6} วินาที แต่ต้องประสบปัญหาการรบกวนของสัญญาณดิจิตัลอย่างรุนแรง ซึ่งเนื่องจากต้องใช้สัญญาณนาฬิกา (clock) ให้จังหวะการทำงานในย่านเป็นเมกะเฮิตซ์ซึ่งเป็นย่านที่มีการใช้งานด้านต่างๆเช่นเป็นคลื่นวิทยุอยู่มาก จึงได้นำปัญหาไปปรึกษากับ ดร. ปีเตอร์ เรย์เนอร์ (Dr. Peter Rayner) ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา



รูปที่ 1 การทำงานของเครื่อง CT-Scanner โดยการหมุนแหล่งกำเนิดและตัวตรวจจับรังสีเอกซ์จนครบ 360 องศา

และเห็นพ้องต้องกันว่าควรจะต้องหาวิธีกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวให้ได้ ขณะที่ค้นคว้าหาวงจรกรองดิจิตัลเพื่อนำมากำจัดสัญญาณรบกวน โดยการอ่านวารสารงานวิจัยที่มีผู้อื่นทำไว้ย้อนหลังไปกลับพบกับความประหลาดใจว่าวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟมีความจำกัดอย่างมาก ในรูปแบบทำให้ผู้ที่จะนำไปใช้งานถูกจำกัดตามไปด้วย สาเหตุที่สำคัญเพราะนักวิจัยที่ค้นพบวิธีออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟ ตั้งแต่อดีตจนถึง พ.ศ. 2515 ต่างใช้คณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์เพื่อให้ได้สูตรสำเร็จของค่าสัมประสิทธิ์ ทำให้ได้วงจรกรองซึ่งมีชื่อเรียกตามโปลิโนเมียลที่ใช้ กล่าวคือ บัตเตอร์เวิธ (Butterworth) เชบีเชฟ (Chebyshev) และเอเล็ปติค (Elliptic) เป็นสำคัญ การใช้เทคนิคค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยคอมพิวเตอร์แทบไม่มีเลย แม้จะเริ่มมีบ้างก็เป็นการค้นหาที่ขาดกลไกในการบังคับให้พฤติกรรมของขนาดอยู่ในขอบเขตที่ผู้ใช้ปรารถนา ขณะเดียวกันผู้เขียนได้สังเกตว่าคณิตศาสตร์ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์อีกประเภทหนึ่ง รู้จักกันในนามของโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ซึ่งใช้ในงานอื่นได้ผลมาแล้ว แต่ไม่เคยใช้งานด้านออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟเลย จากการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุสำคัญที่ไม่มีผู้ใดคิดอ่านใช้โปรแกรมเชิงเส้นในการค้นหาสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟเลย เพราะคณิตศาสตร์ประจำตัวของวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟมีความไม่เป็นเชิงเส้น ขณะที่โปรแกรมเชิงเส้นจะใช้ได้กับโจทย์ลักษณะเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ดีมีแรงจูงใจตรงที่ว่า

(1) การค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์จะให้ความหลากหลายของพฤติกรรมขนาดของวงจร

(2) โปรแกรมเชิงเส้นอนุญาตให้ผู้ออกแบบกำหนดขอบเขตพฤติกรรมของขนาดของวงจรได้ และ

(3) โปรแกรมเชิงเส้นให้คำตอบเสมอหากคำตอบนั้นมีจริง

แรงจูงใจดังกล่าวมีมากจนทำให้ผู้เขียนเกิดความเชื่อว่า หากสามารถใช้โปรแกรมเชิงเส้นออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟได้แล้ว นอกจากจะเป็นการค้นพบใหม่ที่สำคัญแล้ว ยังจะให้ประโยชน์ต่อวงการนี้อย่างมากประกอบกับขณะนั้นมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์มีคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ที่อนุญาตให้นักวิจัยระดับปริญญาเอกเข้าถึงเครื่องได้ตลอด 24 ชั่วโมง (กล่าวคือเป็นระบบ on-line และ interactive) จึงได้ตัดสินใจเริ่มทำการทดลองเบื้องต้น และประมาณต้นปี พ.ศ. 2516 จึงพบว่าประเด็นที่สำคัญนั้นต้องหาวิธีดัดแปลงให้คณิตศาสตร์ประจำตัวของวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟมีความเป็นเชิงเส้นก่อน จากนั้นจึงใช้โปรแกรมเชิงเส้นค้นหาคำตอบได้ จึงได้ทำการทดลองจนประสบความสำเร็จ

ผลการค้นหาวิธีใช้โปรแกรมเชิงเส้นออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟได้เป็นครั้งแรกโดยผู้เขียนและอาจารย์ที่ปรึกษานี้ได้นำไปสู่ผลงานวิจัยอื่นๆเพิ่มเติมทั้งในการทำรายละเอียดมากขึ้น

การออกแบบพฤติกรรมของเฟสและการออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟใน 2 มิติ ตลอดจนได้รับการอ้างอิงในตำราการประมวลสัญญาณดิจิตัลและการออกแบบวงจรกรองดิจิตัล และผลที่ตามมาคือวิทยานิพนธ์ของผู้เขียนกลายเป็นเรื่องการออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟด้วยวิธีออปติมัล (The Optimal Design of Recursive Digital Filters) เพราะปริมาณงานที่มากจนไม่มีเวลากลับไปดูแลเรื่องการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คำนวณการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว ซึ่งได้โอนไปให้นักศึกษาปริญญาเอกชาวอังกฤษรุ่นต่อไปทำวิจัยแทน

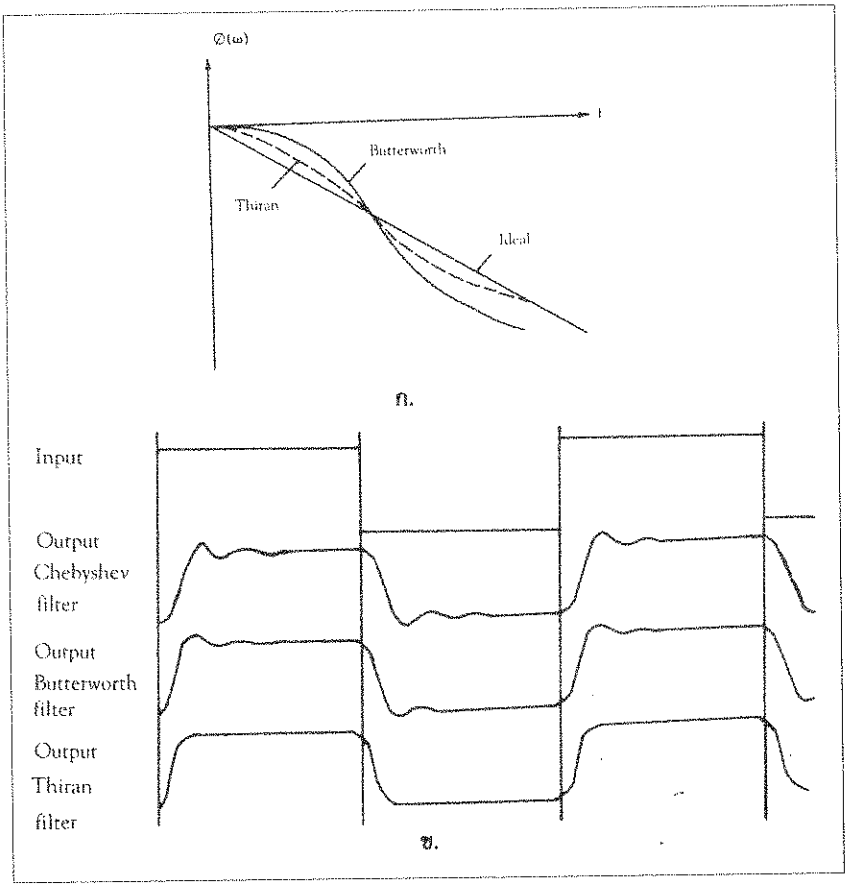
การออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟโดยพิจารณาเฟสด้วย

หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกแล้ว ผู้เขียนได้กลับมารับราชการเมื่อ พ.ศ. 2517 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งในขณะนั้นกำลังวางแผนการขยายจากวิทยาเขตเดิมที่จังหวัดนนทบุรี ไปที่วิทยาเขตใหม่ที่เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ด้วยความร่วมมือระหว่างรัฐบาลไทยและรัฐบาลญี่ปุ่น ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ การขยายภาควิชาเพิ่มเป็น 10 ภาควิชา จากเดิมที่มีเพียงภาควิชาโทรคมนาคม เป็นการขยายฐานการผลิตนักศึกษาระดับปริญญาตรีในแนวกว้าง ใน พ.ศ. 2519 ผู้เขียนเป็นผู้หนึ่งที่ได้รับมอบหมายให้จัดตั้งห้องปฏิบัติการโซลิดสเตทของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยได้รับทุนจากรัฐบาลญี่ปุ่นไปทำการศึกษาและทดลองผลิตทรานซิสเตอร์และไดโอด ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของวงจรรวมเป็นเวลาประมาณ 3 เดือน ที่แผนกวิจัยและพัฒนาของบริษัท โอกิเดนกิ จำกัด และได้ร่วมในการติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์โซลิดสเตทที่ได้รับจากรัฐบาลญี่ปุ่นด้วย ในระยะเวลาที่ใกล้กันนั้นได้มีการจัดตั้งหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า นับว่าเป็นการขยายวิทยาการด้านนี้ในแนวลึกเพราะเป็นการเปิดโอกาสให้มีการวิจัยและที่สำคัญทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสทำงานวิจัยระดับสากลร่วมกับนักศึกษาไทยเป็นครั้งแรก

ใน พ.ศ. 2520 หลังจากที่ห้องปฏิบัติการโซลิดสเตทเริ่มทำงานได้แล้ว ผู้เขียนได้มีโอกาสทำงานวิจัยด้านการออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟอีกครั้งหนึ่ง โดยมีแรงจูงใจที่สำคัญคือในการกำจัดสัญญาณรบกวนนั้น ต้องพยายามออกแบบให้พฤติกรรมขนาดของวงจรใกล้อุดมคติมากที่สุด คือใกล้ค่า 1 มากที่สุดในย่านความถี่ที่ต้องการให้สัญญาณผ่าน และใกล้ 0 มากที่สุด ในย่านความถี่ที่ต้องการกำจัดสัญญาณ แต่การกระทำดังกล่าวจะทำให้พฤติกรรมเฟสของวงจรมีความไม่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด ผลที่ได้รับคือแม้ว่าสัญญาณที่ผ่านวงจรออกไปจะสะอาดปราศจากสัญญาณรบกวน แต่รูปลักษณ์ของสัญญาณจะเพี้ยนจากสัญญาณเริ่มต้นที่ป้อนเข้าสู่วงจรมากที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัยเพื่อออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดรีเคอร์ซีฟให้เฟสเป็นเชิงเส้นมากที่สุด

ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของธิราน (Thiran) และต่อมาเฟทไวส์ (Fettweis) ได้ใช้คณิตศาสตร์ที่ง่ายกว่า แต่ให้ผลเช่นเดียวกันกับของธิราน รูปที่ 2 แสดงเฟสลักษณะต่างๆ และอาการที่สัญญาณออกเพี้ยนไปจากสัญญาณเข้า ซึ่งจะพบว่าขณะที่สัญญาณออกของวงจรกรองแบบเชบีเชฟ และบัตเตอร์เวิธมีส่วนที่สูงกว่า (overshoot) และต่ำกว่า (undershoot) แต่วงจรกรองแบบธิรานจะแทบปราศจากอาการดังกล่าว ทั้งนี้เพราะเฟสของวงจรกรอบแบบหลังนี้ใกล้เชิงเส้นมากที่สุด

ผู้เขียนและคณะที่ร่วมวิจัยได้ตั้งข้อสังเกตว่า แม้ว่าวงจรกรองดิจิตัลแบบของธิรานจะให้เฟสใกล้เชิงเส้นมากที่สุด แต่มีข้อเสียคือมิอาจบังคับความกว้างของขนาดในย่านผ่านสัญญาณได้ ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนและคณะที่ร่วมวิจัยจึงได้ทำการทดลองและพบวิธีการที่สามารถรักษาเฟสให้เป็นเชิงเส้น แต่ขณะเดียวกันสามารถปรับความกว้างของย่านความถี่ที่ผ่านสัญญาณได้ และต่อมาได้แสดงวิธีออกแบบเพื่อให้สามารถปรับขนาดในย่านความถี่ที่หยุดสัญญาณได้ด้วย



รูปที่ 2 (ก) เฟสอุดมคติ เฟสของธิรานและบัตเตอร์เวิธ
(ข) รูปลักษณ์ของสัญญาณเข้าและออกจากวงจรกรองประเภทต่างๆ

อย่างไรก็ดีผลงานวิจัยให้เฟสใกล้เชิงเส้นมากที่สุดทั้งที่ปรับขนาดไม่ได้และปรับได้ยังเป็นวงจรกรองดิจิตัลที่ทำงานในย่านความถี่ต่ำเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนและคณะที่ร่วมวิจัยจึงได้ทำการสร้างทฤษฎีและทดลองได้ผลว่าสามารถออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยให้วงจรดิจิตัลมีเฟสใกล้เชิงเส้นอย่างเดียวที่มีความถี่ใดๆ ได้ หรือทั้งเฟสใกล้เชิงเส้นและขนาดในย่านความถี่ที่ผ่านสัญญาณเรียบที่สุดได้ด้วย ผลการวิจัยดังกล่าวต่อมาได้มีนักวิจัยอื่นๆ ได้นำไปขยายผลอีกทั้งในลักษณะงานวิจัยและเผยแพร่ในตำราการประมวลสัญญาณดิจิตอล

การออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดนันรีเคอร์ซีฟซึ่งกำหนดจุดตัดความถี่ได้

ในราว พ.ศ. 2514 เฮอร์มานน์ (Herrmann) ได้แสดงวิธีการออกแบบวงจรกรองดิจิตัลชนิดนันรีเคอร์ซีฟ ซึ่งมีขนาดเรียบที่สุดโดยมีประเด็นที่สำคัญคือ สามารถใช้คณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์ทำให้ได้สูตรสำเร็จที่กะทัดรัด นับเป็นครั้งแรกที่วงจรกรองดิจิตัลชนิดนันรีเคอร์ซีฟได้รับการออกแบบที่ประหยัดเวลาในการคำนวณอย่างมาก และในปีถัดมา พ.ศ. 2515 มิลเลอร์ (Miller) ได้แสดงวิธีการออกแบบที่ให้ผลลัพธ์เดียวกันแต่ใช้คณิตศาสตร์ที่ง่ายกว่ามาก อย่างไรก็ดีเทคนิคทั้งสองแบบประสบปัญหาที่สำคัญเดียวกันคือ มิอาจกำหนดให้ขนาดผ่านจุดตัดความถี่ (cut off frequency) ใดๆ ได้ ทำให้การกำหนดความกว้างของย่านความถี่ที่ผ่านสัญญาณเป็นไปโดยปราศจากความแม่นยำจนกระทั่งใน พ.ศ. 2523 ขณะที่ผู้เขียนกำลังมีประสบการณ์จากการทำงานวิจัยเรื่องการควบคุมขนาดวงจรกรองอนาลอกอยู่ได้สังเกตว่าคณิตศาสตร์ที่มิลเลอร์ใช้นั้นเป็นคณิตศาสตร์ของวงจรกรองอนาลอก เมื่อได้ผลลัพธ์แล้วจึงแปลงไปเป็นวงจรกรองดิจิตัลชนิดนันรีเคอร์ซีฟอีกทีหนึ่ง ผู้เขียนจึงได้ทดลองนำทฤษฎีควบคุมขนาดวงจรกรองอนาลอกมาใช้กับวิธีการออกแบบมิลเลอร์ พบว่าสามารถควบคุมให้ผ่านจุดตัดความถี่ใดๆ ที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ ผลงานวิจัยนี้ต่อมาได้มีนักวิจัยอื่นอีกหลายคนนำไปขยายผลเป็นรายละเอียดให้กว้างขวางต่อไปอีก

การออกแบบและสร้างวงจรวัดระยะทางและทิศทาง

ระหว่าง พ.ศ. 2525-2528 ผู้เขียนและคณะที่ร่วมวิจัยได้ศึกษาปัญหาที่สำคัญ 2 เรื่อง เรื่องแรกเป็นปัญหาที่โรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในประเทศไทยต้องการที่จะสร้างเครื่องตัดกระดาษควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยจะต้องสร้างทั้งอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ของคอมพิวเตอร์ที่จะไปควบคุมมอเตอร์ซึ่งขับใบมีดขนาดกว้างประมาณ 1 เมตร ซึ่งจะเคลื่อนไปมาเป็นระยะทางประมาณ 3 เมตร เพื่อตัดกระดาษให้มีขนาดความยาวตามที่ต้องการได้ โดยตำแหน่งของใบมีดจะต้องแม่นยำเป็นมิลลิเมตร เพื่อนำกระดาษที่ตัดได้ไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในการ

ควบคุมตำแหน่งของใบมีดนั้นได้ใช้วิธีควบคุมว่ามอเตอร์หมุนไปกี่องศาก็จะแปลงไป เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นของใบมีดได้ ตอนเริ่มต้นก็ได้ใช้วงจรมาตรฐานในการนับระยะทาง (counter) แต่ผู้เขียนและคณะที่ร่วมวิจัยต้องพบกับความประหลาดใจที่ว่าเมื่อมอเตอร์หมุนไปข้างหน้าสมมติว่า 10 องศา วงจรนับระยะทางก็จะอ่าน 10 องศา แต่เมื่อหมุนมอเตอร์ถอยหลังให้กลับไปสู่ที่ตำแหน่ง 0 องศา วงจรกลับจะอ่าน 20 องศาแทนที่จะอ่านเป็น 0 องศา หรือนั่นคือวงจรนับระยะทางจะนับได้อย่างเดียว มิอาจบอกทิศทางว่าขึ้นหน้าหรือถอยหลังได้ จึงกลายเป็นปัญหาว่าต้องวิจัยค้นหาวงจรบ่งทิศทางด้วย ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าสาเหตุที่วงจรนับระยะทางไม่สามารถบอกทิศทางได้เพราะใช้สัญญาณที่ออกจากเครื่องรับรู้ (sensor) ที่ติดอยู่กับมอเตอร์มีเพียงสัญญาณเดียว แต่หากใช้สองสัญญาณให้ทำงานสัมพันธ์กันก็น่าที่จะวัดทิศทางได้ด้วย จึงได้ทำการทดลองก็พบว่าเป็นจริง เมื่อส่งงานให้กับโรงงานจนเป็นผลสำเร็จแล้ว จึงอ่านพบในวารสารโดยบังเอิญว่าเคยมีผู้วิจัยเรื่องวงจรวัดระยะทางและทิศทางมาก่อนและพบโดยบังเอิญอีกเช่นกันว่าวงจรวัดระยะทางและทิศทางที่ผู้เขียนและคณะร่วมวิจัยพบมีความแม่นยำเป็น 2 เท่าของผลในวารสารดังกล่าว จึงได้ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานใหม่นี้

เรื่องสำคัญที่เกิดขึ้นเป็นเรื่องที่สองคือ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหารกองบัญชาการทหารสูงสุด ได้ติดต่อให้สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำการวิจัยให้กองทัพเรือเพื่อออกแบบและสร้างคอมพิวเตอร์ควบคุมการยิงปืนเรือขนาด 76/53 ขึ้นใช้ในประเทศเพื่อทดแทนเครื่องคอมพิวเตอร์มาร์ค 6 ซึ่งเทคโนโลยีล้าสมัย ในบรรดาจุดมุ่งหมายหลายประการของคุณสมบัติที่ละเอียดอ่อนของคอมพิวเตอร์ควบคุมการยิงปืนเรือดังกล่าว มีประเด็นที่สำคัญคือจะต้องมีอุปกรณ์วัดตำแหน่งของเรือเป้าหมายว่าทำมุมเท่าไรกับหัวเรือเพื่อป้อนตำแหน่งดังกล่าวเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ ผู้เขียนและคณะที่ร่วมวิจัยพบปัญหาเดียวกันกับตอนวิจัยเรื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมการตัดกระดาษคือ ต้องวัดทั้งระยะทางและทิศทาง ซึ่งพบว่าวงจรที่เคยใช้ในเครื่องตัดกระดาษก็สามารถนำมาใช้ในงานนี้ได้ และต่อมาได้ปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มอีกเท่าตัว จากนั้นได้มีนักวิจัยอื่นนำไปพัฒนาปรับปรุงขึ้นอีกด้วย

การออกแบบวงจรกรองอนาลอกที่ประหยัดชิ้นส่วนและคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของชิ้นส่วน

วงจรกรองอนาลอกเกิดก่อนวงจรกรองดิจิตัลมาช้านาน ตั้งแต่ พ.ศ. 2463 ที่ใช้เพียงตัวความต้านทานคาแพซิเตอร์ และขดลวดอินดักเตอร์เป็นองค์ประกอบวงจรกรองอนาลอกประเภทนี้เรียกว่าวงจรกรองพาสซีฟ (passive filter) ต่อมาตั้งแต่ประมาณ พ.ศ. 2503 มีอีกประเภท

หนึ่งซึ่งใช้เพียงตัวความต้านทาน คาแพซิเตอร์และอ็อปแอมป์ (op amp มาจาก operational amplifer) เป็นองค์ประกอบเราเรียกว่าวงจรกรองอนาลอกประเภทนี้ว่าวงจรกรองแอกตีฟ (active filter)

ผู้เขียนสนใจวงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟตรงที่ว่าราว พ.ศ. 2521-2522 ไบอี (Biey) และพรีโมลี (Premoli) ได้แสดงวิธีการหนึ่งในการออกแบบเพื่อลดจำนวนอ็อปแอมป์ที่ใช้ กล่าวคือปกติการสร้างวงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟที่ใช้อ็อปแอมป์จะนิยมสร้างจากหน่วยย่อยลำดับที่สอง (2nd order section) แต่ไบอีและพรีโมลีได้เสนอให้ใช้หน่วยย่อยลำดับที่สาม (3rd order section) เพราะทั้งหน่วยย่อยลำดับที่สองหรือสามต่างก็ใช้อ็อปแอมป์เพียงตัวเดียว ฉะนั้นวงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟที่ลำดับใดๆ เช่น ลำดับที่ 12 เป็นต้น หากใช้หน่วยย่อยลำดับที่สองก็ต้องใช้หน่วยย่อยทั้งหมด 6 หน่วย ขณะที่หากใช้หน่วยย่อยลำดับที่สามจะใช้เพียง 4 หน่วย หรือนั่นคือประหยัดอ็อปแอมป์ไปได้ 2 ตัว ต่อมาได้มีการปรับปรุงให้สามารถปรับขนาดของวงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟที่ใช้หน่วยย่อยลำดับสามดังกล่าวให้กว้างขวางขึ้น งานวิจัยอีกหัวข้อหนึ่งที่สนใจกันมากคือ การออกแบบวงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟให้มีความไวต่ำ (low sensitivity) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือคุณสมบัติทางขนาดจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของชิ้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบ ทำให้สามารถใช้ชิ้นส่วนที่คุณภาพไม่ต้องสูงได้ เช่น อาจใช้ตัวความต้านทานที่ค่าผิดพลาดไม่เกิน 5% แทนที่จะใช้ค่าผิดพลาด 1% เป็นต้น แนวทางหนึ่งที่ทำให้วงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของชิ้นส่วนนี้ ได้รับการเสนอโดยพรีโมลี และต่อมาได้รับการปรับปรุงพฤติกรรมขนาดให้กว้างขวางขึ้น

ใน พ.ศ. 2523 วาย (Wei) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงพฤติกรรมขนาดของวงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟที่ประหยัดชิ้นส่วนโดยวิธีการเพิ่มโปลีโนเมียลเศษ แต่พบกับปัญหาที่ว่ามิอาจรักษาขนาดให้มีลักษณะเรียบที่สุดได้ ผู้เขียนและคณะร่วมวิจัยได้เสนอวิธีแก้ไขให้ขนาดเรียบที่สุดได้ ตลอดจนปรับปรุงพฤติกรรมของขนาดในย่านความถี่ที่หยุดสัญญาณด้วย นอกจากนี้ยังขยายผลไปสู่การออกแบบวงจรกรองอนาลอกชนิดแอกตีฟที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของชิ้นส่วนโดยการเพิ่มโพลีโนเมียลเศษอีกด้วย

เอกซเรย์คอมพิวเตอร์

มนุษย์มองเห็นวัตถุใดๆ ได้ก็เพราะธรรมชาติสร้างตาของเราให้สามารถทำงานร่วมกับคลื่นแสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้นๆ และหากคลื่นแสงสามารถเดินทางทะลุทะลวงผ่านร่างกายมนุษย์ได้ เราก็จะสามารถมองเห็นอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายโดยสายตาเปล่าของเราได้ อย่างไร

ก็ดีธรรมชาติมิได้เอื้ออำนวยทุกสิ่งทุกอย่างให้เราไปหมด ด้วยเหตุนี้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจึงต้องทำการค้นคว้าวิจัยเพื่อดัดแปลงหรือผสมผสานสิ่งที่มีอยู่แล้วให้สามารถทำให้คุณภาพชีวิตของเราดีขึ้น มีผู้สังเกตว่ารังสีเอกซ์มีคุณสมบัติที่เดินทางทะลุทะลวงผ่านวัตถุทึบแสง เช่น ร่างกายมนุษย์ได้ แต่ธรรมชาติมิได้สร้างให้สายตาของเราทำงานโดยตรงกับรังสีเอกซ์ได้ จึงต้องใช้ทางอ้อมโดยให้รังสีเอกซ์หลังจากผ่านร่างกายมนุษย์แล้วตกกระทบกับสารเคมีบางประเภทที่เคลือบอยู่บนแผ่นฟิล์มดังกล่าว จึงทำให้เสมือนมองเห็นภาพถ่ายของอวัยวะในร่างกายได้ อย่างไรก็ดีภาพที่ได้โดยวิธีการดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องในลักษณะเชิงซ้อน กล่าวคือภาพซี่โครงซ้อนทับบางส่วนของปอด หรือหากเป็นบริเวณศีรษะจะเป็นภาพกระโหลกบดบังบริเวณเนื้อเยื่อสมองทั้งหมด เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาสร้างอุปกรณ์ที่เรารู้จักกันในนามว่า เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT ย่อมาจาก computerized tomography) ซึ่งสามารถถ่ายภาพตัดขวางของร่างกาย โดยภาพดังกล่าวมีลักษณะเสมือนหนึ่ง "เฉือน" ร่างกายในแนวตัดขวางบางขนาด 2 - 3 มิลลิเมตร ทำให้แพทย์สามารถมองเห็นเนื้อเยื่อสมองได้ชัดเจนเพื่อวินิจฉัยอาการผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อสมอง ตัวอย่างเช่น ก้อนเนื้อ (tumour) เลือดคั่งในสมอง เป็นต้น

ระหว่าง พ.ศ. 2525 จนปัจจุบัน ผู้เขียนและคณะผู้วิจัย ได้ทำการสร้างและทดลองอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางของร่างกาย โดยในระยะแรกสามารถเข้าใจคณิตศาสตร์การกำจัดสัญญาณรบกวน การดัดแปลงรังสีเอกซ์ และการสร้างภาพ จนสามารถถ่ายภาพตัดขวางของวัตถุปราศจากชีวิตและสิ่งที่มีชีวิต เช่น ส่วนต่างๆ ของหนูและสมองกระต่ายได้

การพัฒนาซอฟท์แวร์ในการประมวลสัญญาณภาพถ่ายจากดาวเทียม

องค์การนาซา (NASA) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เริ่มโครงการดาวเทียมสำรวจทรัพยากรพิภพ (Earth Resource Technology Satellite Program) และส่งดาวเทียมสำรวจทรัพยากรชื่อว่าอีอาร์ทีเอส-1 (ERTS-1) ขึ้นโคจรรอบโลกในวันที่ 23 กรกฎาคม 2515 ซึ่งต่อมาภายหลังเรียกดาวเทียมอีอาร์ทีเอส-1 นี้ว่าแลนด์แซท-1 (Landsat-1) นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ข้อมูลดาวเทียมแลนด์แซท ได้เริ่มมีบทบาทช่วยพัฒนาทรัพยากรในด้านต่างๆ จนเป็นที่ประจักษ์แก่ประเทศต่างๆ ทั่วโลกแล้วว่ามีคุณประโยชน์มากมาย องค์การนาซาได้ดำเนินโครงการและส่งดาวเทียมแลนด์แซทเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งสิ้น 5 ดวง

ประเทศไทยได้เข้าร่วมโครงการนี้ โดยมีกองสำรวจทรัพยากรธรรมชาติด้วยดาวเทียม สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เป็นผู้ดำเนินการจัดตั้งดำเนินงานสถานีรับสัญญาณข้อมูลจากดาวเทียมแลนด์แซท และเป็นศูนย์

บริการข้อมูลดาวเทียมสำรวจทรัพยากรของประเทศไทยและให้บริการข้อมูลแก่ประเทศต่างๆ ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยบริการข้อมูลในรูปแบบต่างๆ เช่น ฟิล์มภาพข้อมูลดาวเทียม เทปข้อมูลดาวเทียม (Computer Compatible Tape ชื่อย่อ CCT) และอื่นๆ

ข้อมูลที่เผยแพร่ให้แก่ผู้ใช้ดังกล่าวข้างต้นจะมีประโยชน์อย่างมาก หากสามารถจะประมวลผลได้ด้วยคอมพิวเตอร์ การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลดาวเทียมในประเทศไทยเริ่มมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519 แต่จะเป็นลักษณะของการใช้เครื่องขนาดใหญ่ (mainframe) และขนาดกลาง

การใช้คอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่และขนาดกลาง แม้ว่าจะมีประโยชน์ในด้านของอัตราเร็วการคำนวณและความจุของขนาดความจำรอง (secondary storage) แต่มีข้อเสียเปรียบในประเด็นที่ว่าราคาสูงและมีอยู่แต่ที่เฉพาะหน่วยงานบางแห่งเท่านั้น ประกอบกับปัจจุบันวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีทำให้เกิดไมโครคอมพิวเตอร์ที่แพร่หลายมากขึ้นตามลำดับ อันเนื่องมาจากราคาที่ประหยัดและสะดวกต่อการใช้งาน ตลอดจนสมรรถนะก็สูงขึ้นตลอดเวลา จากรุ่น 8 บิท มาเป็น 16 บิท และ 32 บิทในปัจจุบัน ฉะนั้นถ้ามีการวิจัยและพัฒนาการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ก็จะทำให้เป็นประโยชน์ต่อการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมไปใช้ประโยชน์แก่หน่วยงานและบุคคลต่างๆ มากขึ้น ทั้งในหน่วยงานของรัฐและเอกชน

ใน พ.ศ. 2529 ผู้เขียนและคณะที่ร่วมวิจัยจึงได้ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิท (ปัจจุบันผลงานสามารถปรับปรุงไปใช้เครื่อง 32 บิทได้) ที่ใช้เอ็มเอสดอส (MS-DOS) เป็นระบบปฏิบัติการทำการวิจัยและพัฒนาขั้นตอน วิธีและซอฟท์แวร์เพื่อให้สามารถทำงานต่อไปนี้ได้

ก. สามารถถ่ายข้อมูลจากซีซีทีเทปลงสู่แผ่นบันทึก (diskette) ทั้งหมด 5.25 นิ้ว และ 8 นิ้วได้

ข. สามารถแสดงภาพถ่ายดาวเทียมได้ โดยใช้วิธีสีเทียม (false color) และวิธีแพ-เร็ลเล็ลไพพ์ (parallelpiped method)

การถ่ายข้อมูลจากซีซีเทปลงสู่แผ่นบันทึกนั้นได้ใช้วิธีศึกษาและปรับปรุงจากที่หน่วยอื่นเคยรายงานไว้แล้ว เช่น ศูนย์ข้อมูลทรัพยากรพิภพ (EROS Data Center เรียกย่อๆ ว่า EEC) สหรัฐอเมริกา และศูนย์เทคโนโลยีการสำรวจทรัพยากร (Remote Sensing Technology Center เรียกย่อๆ ว่า RESTEC) ประเทศญี่ปุ่นเป็นสำคัญ ผลงานที่ผู้เขียนและคณะร่วมวิจัยพัฒนาได้มีข้อได้เปรียบกว่าทั้งสองหน่วยงาน ดังนี้

(i) มีรูปแบบและการจัดเรียงข้อมูล 3 ลักษณะให้เลือกมากกว่า คือ

(1) BSO Format (Band Sequential)

(2) BIL Format (Band Interleaved by Line)

(3) BIP Format (Band Interleaved by Pixel)

(ii) แผ่นบันทึกมี 2 ขนาดคือ

(1) 5.25 นิ้ว

(2) 8 นิ้ว (ปัจจุบันสามารถปรับปรุงลง 3.50 นิ้วได้)

(iii)ขนาดของข้อมูลดาวเทียมมิได้ถูกจำกัดขนาดเช่นเดียวกัน EROS Center (ขนาด 240 x 256 pixels) หรือ RESTEC (ขนาด 400 x 512 pixels) ขนาดของข้อมูลดาวเทียมสามารถขยายได้ตามความต้องการ และความจุของแผ่นบันทึกหรือจานบันทึกแบบแข็ง (Hard Disk) ของผู้ใช้ข้อมูลต่างๆ เช่น ขนาด 512 x 512 pixels, ขนาด 1024 x 1024 pixels เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันจานบันทึกแบบแข็งของไมโครคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาความสามารถเก็บข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น

(iv) สามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูลในพื้นที่กว้างใหญ่ตามขนาดของข้อมูลดาวเทียมและความจุของจานบันทึกแบบแข็ง ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเวลาไม่ต้องทำการวิเคราะห์หลายครั้งในพื้นที่กว้างใหญ่ และก่อเกิดประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ต่อไป

สำหรับการจำแนกวัตถุนั้น นอกจากจะใช้วิธีแพเร็ลเล็ลไพพ์แล้วยังได้ใช้วิธีสีเทียมโดยกำหนดให้แต่ละช่วงคลื่นความถี่ซึ่งมี 4 ช่วง และเมื่อนำมาซ้อนกันจะทำให้จำแนกวัตถุปรากฏแก่สายตาได้ อันเป็นวิธีที่รวดเร็วไม่ต้องใช้การคำนวณ แต่แน่ละความแม่นยำจะสู้วิธีที่ใช้คณิตศาสตร์ไม่ได้

สรุป

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ความรู้เรื่องฟิสิกส์ทำให้มนุษย์ค้นพบทรานซิสเตอร์และวงจรรวม อันเป็นกลไกอิเล็กทรอนิกส์ที่นำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์มีประโยชน์มหาศาล หากมนุษย์รู้จักใช้ในทางที่สร้างสรรค์ การประมวลสัญญาณดิจิตัลเป็นวิทยาการที่ใช้คอมพิวเตอร์เพื่อหาความหมายของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในโลกนี้ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอยู่ในรูปของพลังงานที่สามารถเปลี่ยนเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป้อนเข้าสู่คอมพิวเตอร์ซึ่งมีซอฟท์แวร์คณิตศาสตร์ช่วยในการคำนวณ หน่วยพื้นฐาน หนึ่งในระบบประมวลสัญญาณดิจิตัล คือ วงจรกรองดิจิตัล ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่กรองสัญญาณให้สะอาดแล้ว ยังทำหน้าที่คำนวณเพื่อประยุกต์ในงานต่างๆ ที่สำคัญคือ การประยุกต์ใช้เอกซเรย์คอมพิวเตอร์และการประมวลภาพถ่ายจากดาวเทียม เป็นต้น การประยุกต์เหล่านี้ล้วนแล้วแต่นำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ลึกซึ้งและกว้างไกล เพื่อรักษาชีวิตมนุษย์และทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างมหัศจรรย์

คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์เป็นวิชาที่มีผลกระทบต่อชีวิตมนุษย์สูงมาก ดังเราจะได้พบเห็นอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ทั้งที่อยู่ในบ้านเรือนสำนักงานและโรงงาน ตลอดจนระยะหลังได้วิวัฒนาการให้มีขนาดเล็กจนสามารถพกพาติดตัวแต่ละบุคคลได้ ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile telephone) ที่ใส่กระเป๋าเสื้อได้ ไมโครคอมพิวเตอร์ที่ย่อส่วนจากขนาดตั้งโต๊ะมาจนขนาดเล็กเท่าฝ่ามือ (palm-top microcomputer) มีการวิเคราะห์และรายงานว่าสังคมมนุษย์เริ่มจากสังคมเกษตรกรรมแล้วเปลี่ยนเป็นสังคมอุตสาหกรรม และกำลังเข้าสู่สังคมสารสนเทศ (information society) เทคโนโลยีพื้นฐานมาจากอิเล็กทรอนิกส์ทั้งคู่

ในช่วงระยะแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2530-2534) ประเทศไทยมีอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจที่สูงมาก เฉลี่ยร้อยละ 10.4 ต่อปี และในปี พ.ศ. 2535 ก็อยู่ในอัตราประมาณร้อยละ 7-8 ซึ่งก็นับว่ายังสูงอยู่เมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ หากเราทำการวิเคราะห์ก็จะพบว่ามีสาเหตุมาจากการที่ประเทศไทยส่งสินค้าออกมากอันดับแรกคือ สิ่งทอ และอันดับที่สองคือชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่นใน พ.ศ. 2534 ประเทศไทยส่งสินค้าออก 11 อันดับแรกมูลค่า 366,145.9 ล้านบาท เป็นสิ่งทอ 86,622 ล้านบาท และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ 72,214.8 ล้านบาท สิ่งที่ทุกคนต้องทำความเข้าใจว่าบรรดาโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่ผลิตสินค้าออกไปจำหน่ายทั่วโลกนั้น ล้วนแต่เป็นโรงงานที่เคลื่อนย้ายมาจากต่างประเทศเพื่ออาศัยแรงงานราคาต่ำและโควต้าการส่งออกเป็นสำคัญ ปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายของโรงงานอุตสาหกรรมมีมานาน กล่าวคือ เริ่มจากยุโรปแล้วเคลื่อนไปสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ประเทศอุตสาหกรรมใหม่ (เกาหลีใต้ ไต้หวัน ฮ่องกง และสิงคโปร์) ขณะนี้เคลื่อนมาที่ไทย และต่อไปจะเคลื่อนไปประเทศอื่นที่ค่าแรงงานต่ำกว่าอันได้แก่ จีนและเวียดนาม เป็นต้น ฉะนั้น สิ่งที่ประเทศไทยต้องตระหนักคือ ต่อไปเราจะทำอุตสาหกรรมโดยอาศัยแรงงานราคาถูกอีกไม่ได้ เพราะค่าแรงสูงขึ้นทุกวัน และปัญหาการกีดกันทางการค้าระหว่างประเทศจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ทางออกก็คือต้องเตรียมตัวผลิตสินค้าที่มีมูลค่าเพิ่มทางเทคโนโลยีมากขึ้นตามลำดับ และสิ่งที่รัฐบาลต้องทำโดยเร่งด่วนคือสนับสนุนให้มีการวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีให้มากขึ้นในแต่ละปี ทั้งนี้มิใช่แต่เงินเพื่อทำวิจัยและพัฒนาเท่านั้น แต่จะหมายถึงการมีโครงสร้างพื้นฐานที่เอื้ออำนวยต่อการวิจัยและพัฒนา การปรับปรุงโครงสร้างมหาวิทยาลัยให้ทัดเทียมมหาวิทยาลัยในประเทศที่เจริญแล้ว การวิจัยและพัฒนาที่สัมพันธ์กับเศรษฐกิจและพาณิชย์ โครงสร้างภาษีและสิทธิพิเศษที่จูงใจให้ภาคเอกชนลงทุนเพื่อการวิจัยและพัฒนามากขึ้น

การวิจัยและพัฒนาในประเทศไทยเท่าที่ผ่านมาจะอยู่ในมหาวิทยาลัยแทบทั้งสิ้น เพราะมหาวิทยาลัยเป็นแห่งเดียวของประเทศไทยที่มีมันสมองและเสรีภาพทางวิชาการมากที่สุด ใน

อดีตจนปัจจุบันเรามีนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์ที่มีผลงานเทียบเท่าต่างประเทศ แต่น่าเสียดายที่มีจำนวนน้อยเกินไป ทั้งนี้เพราะบรรดานักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์เหล่านี้ทำงานเพราะใจรักและมีความสุขกับงาน และผลงานวิจัยที่ได้รับโดยแท้จริงเท่านั้น ประเทศไทยเราโดยเฉพาะมหาวิทยาลัยยังขาดกลไกการสร้างนักวิจัยอาชีพ ปราศจากสิ่งจูงใจเชิงลาภและยศที่ได้มาตรฐานสากล การตอบแทนต่ำกว่าวิชาชีพอื่นในภาคเอกชน เพราะฉะนั้นเป็นประเด็นสำคัญที่ทุกคนที่อยากให้ประเทศไทยแข่งขันกับประเทศอื่นได้ ต้องตระหนักและเร่งให้มีมาตรการทั้งเชิงนโยบายและปฏิบัติ เพื่อเพิ่มจำนวนนักวิจัยให้มากกว่าปัจจุบันอีกหลายเท่าตัว

ผู้เขียนอดไม่ได้ที่อยากจะแสดงความเห็นเรื่องการวิจัยและพัฒนาพื้นฐานและประยุกต์ซึ่งเชื่อว่าสำคัญทั้งคู่และมีความผูกพันซึ่งกันและกัน หากถามคนสหรัฐอเมริกา เขาจะภูมิใจว่าสหรัฐอเมริกามีนักวิจัยที่ค้นพบปรากฏการณ์ใหม่ๆ ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีบ่อยที่สุดมากที่สุด โดยอาจจะวัดจากจำนวนผู้ที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากที่สุด แต่หากถามคนญี่ปุ่นเขาก็คงจะตอบว่าคนญี่ปุ่นได้รับรางวัลโนเบลน้อยมากเมื่อเทียบกับคนสหรัฐ แต่คนญี่ปุ่นก็พบการประดิษฐ์สินค้าแนวใหม่เป็นที่พอใจของผู้ซื้อทั่วโลก จนมีสถานภาพทางเศรษฐกิจที่นำหน้าประเทศอื่น ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจึงมีรูปแบบแตกต่างกันได้ ทำอย่างไรประเทศไทยเราจะทำงานวิจัยและพัฒนาซึ่งเป็นประโยชน์ต่อมวลมนุษย์ และขณะเดียวกันได้ทั้งลาภและยศทั้งในระดับประเทศ องค์กรและบุคคล