

การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมการเคลื่อนที่อัตโนมัติของรถไถสำหรับ ควบคุมการติดตามเส้น

The Application of Autonomous Steering System of Tractor for Path Tracking Control

วิชา อูปรักข์^{1*} ประชา บุญยวานิชกุล¹ มนุศักดิ์ จานทอง²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ถนนรังสิต-นครนายก ออกรังสิต นครนายก 26112

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ธัญบุรี ปทุมธานี 12110

*Corresponding author: E-mail: kra_dinglug_o@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลอัลกอริทึมของระบบควบคุมการเคลื่อนที่อัตโนมัติของรถไถที่ใช้ในการควบคุมการติดตามเส้น โดยในเบื้องต้นต้องวิเคราะห์ลักษณะของรถไถว่ามีรูปแบบการเคลื่อนที่อย่างไร เช่น มีระบบขับเคลื่อน และการบังคับเลี้ยวเช่นใด เพื่อทำการสร้างสมการทางพลศาสตร์สำหรับรถไถในลำดับต่อไป และเนื่องจากการควบคุมรถไถให้วิ่งตามเส้นได้นั้นต้องมีปัจจัยสำคัญอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น กระบวนการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ (Part Trajectory) ซึ่งเปรียบเสมือนการสร้างถนนในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้รถไถเคลื่อนไปตามเส้นทางที่กำหนด ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยให้รถไถเคลื่อนที่ไปได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ ระบบควบคุมซึ่งทำหน้าที่เสมือนผู้ขับขีรถไถ โดยระบบหนึ่งที่น่าสนใจในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถคือ ระบบฟัซซี ลอจิก (Fuzzy Logic Control) สำหรับคุณสมบัติที่ดีของระบบนี้คือ การมีเหตุผลเชิงตรรกะซึ่งสอดคล้องกับตรรกะทางความคิดของมนุษย์ โดยโครงสร้างของระบบฟัซซีสามารถทำความเข้าใจสถานการณ์ด้วยการตีความในรูปแบบ If-Then และสามารถตัดสินใจในสถานการณ์ที่คลุมเครือได้ มิใช่พิจารณาว่าผิดหรือถูกเพียงสองสถานะเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบฟัซซี ลอจิก ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างของกฎและตัวแปรต่าง ๆ ในตัวระบบได้เอง จึงมีการนำระบบควบคุมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ด้วยการจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) และการอุปมาความรู้เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ โดยการนำระบบนี้มาผสมผสานกับระบบควบคุมแบบฟัซซี ลอจิก ซึ่งเรียกว่าระบบ อนุमानินิวโรฟัซซี (Neuro-Fuzzy System) และเป็นระบบที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถให้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ฟัซซีลอจิก โครงข่ายประสาทเทียม การติดตามเส้น สมการพลศาสตร์ รถไถ

ABSTRACT

This article discusses the algorithm of autonomous steering with path-tracking system of tractor. And therefore, the characteristics of steering is analyzed in order to design dynamic equation. Regarding tractor's path tracking control, there are various significant factors related such as the creation process of path trajectory which is similar to variety forms of road for tractor to reach the regulated path. Another factor for effective autonomous steering is controlling system which is similar to tractor driver. One of the

system applied for steering control is Fuzzy Logic System. Advantage characteristics of the system is its logical reasoning which is consistent with human's logical decision. The system possesses an ability to understand a circumstance by if-then translation and to decide among ambiguous situation which is not only yes or no consideration. However, learning process of Fuzzy Logic System cannot modify the structure of rules and variables by itself. Therefore, another controlling system called Neural Network is applied. Neural Network possesses an ability to learn by pattern recognition and by inductive thinking in the same way as human does. Fuzzy Logic System and Neural Network are fused to be Neuro-Fuzzy System which is applied for a better effective autonomous steering of tractor studied.

Keyword: Fuzzy logic, Neural network, Path tracking, Dynamic equation, Tractor

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม โดยประชากรไม่น้อยกว่าสามสิบล้านคนของประเทศมีอาชีพทางการเกษตร ซึ่งการทำเกษตรกรรมในอดีตใช้แรงงานมนุษย์และสัตว์เป็นหลัก แต่เนื่องด้วยความต้องการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้มากขึ้น ประกอบกับความต้องการลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้น้อยลง จึงทำให้เกษตรกรหันมาอาศัยเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการผลิตได้แก่ เครื่องจักรกลซึ่งมีประโยชน์อย่างมหาศาลในการเพิ่มผลผลิต รวมทั้งช่วยประหยัดเวลา และแรงงานในการผลิตได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม เกษตรกรไม่สามารถหลีกเลี่ยงภาระค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดจากการใช้เครื่องจักรกลนั้น ๆ ได้ เช่น ราคาเครื่องที่แพง หรือค่าเช่าที่สูง ค่าเชื้อเพลิง ค่าซ่อมบำรุง และที่สำคัญคือค่าจ้างแรงงานผู้ควบคุมเครื่องจักรกล ซึ่งเมื่อคิดคำนวณแล้ว พบว่าเป็นอัตราส่วนประมาณร้อยละสิบห้าของค่าใช้จ่ายในการทำเกษตรทั้งหมด [1-4] ปัญหาค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ทำให้เกษตรกรต้องแบกรับภาระการลงทุนเพิ่มขึ้นอย่างไม่น่าจะเป็น

การช่วยเกษตรกรเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานควบคุมเครื่องจักรนี้ ได้มีการนำเทคโนโลยีการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้ โดยการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อควบคุมรถไถสำหรับการวิ่งติดตามเส้น ซึ่งในต่างประเทศได้มีการวิจัยด้วยการนำเอาระบบควบคุมแบบ ฟัซซี ลอจิก (Fuzzy Logic Control) มาประยุกต์ใช้กับยานพาหนะต่างๆ ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของระบบควบคุมแบบฟัซซี ลอจิก คือการ

มีเหตุผลเชิงตรรกะ และการตัดสินใจในสถานการณ์ที่คลุมเครือ โดยจะออกมาในรูปของดีกรีความถูกหรือผิด ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติอยู่แล้ว แต่เนื่องจากฟัซซี ลอจิก ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างของกฎและตัวแปรต่างๆ ในตัวระบบ [8] จึงได้มีการนำระบบควบคุมอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ การจดจำแบบรูป (Pattern Recognition) และการอุปมาความรู้เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ [14] มาผสมผสานเข้ากับฟัซซี ลอจิก เกิดเป็นระบบอนุมานนิวโรฟัซซี (Neuro-Fuzzy System) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้เป็นระบบควบคุมรถไถให้ทำงานโดยอัตโนมัติ

อย่างไรก็ตาม การควบคุมรถไถสำหรับการวิ่งติดตามเส้นนั้น ประกอบไปด้วยส่วนของกระบวนการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับรถไถ (Part Trajectory) โดยงานวิจัยนี้ใช้การสร้างสมการเส้นตรงและเส้นโค้งขึ้นมาในระบบพิกัด (Coordinate System) แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกันภายใต้เงื่อนไขของเวลาเพื่อให้ได้เส้นทางการวิ่งของรถไถที่ต้องการ [30], [32], [34] นอกจากนี้ ยังมีการสร้างสมการทางพลศาสตร์ของรถไถที่ถูกจัดให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง และนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ภายใต้เงื่อนไขข้อบังคับ (Constrain) ในการขับเคลื่อนที่แท้จริงของรถไถนั้นๆ [23-25] รวมทั้งยังมีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมการเคลื่อนที่อัตโนมัติของรถไถสำหรับควบคุม

การติดตามเส้นทาง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับยานพาหนะอื่นๆได้อีกหลายแบบ

2. เนื้อหา

2.1 ระบบควบคุมแบบ พีไอดี (PID Controller)

คอนโทรลเลอร์แบบ PID ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ คอนโทรลเลอร์ และ PID ส่วนของคอนโทรลเลอร์ คืออุปกรณ์ในการควบคุมระบบตามที่ต้องการ โดยมีการตั้งค่าที่ต้องการไว้ (Set Point) และนำมาเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ต้องการจากการทำงานของระบบ (Process Variable) เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาด (Error) แล้วนำค่าความผิดพลาดนั้นมาทำการปรับแต่งค่าเอาต์พุต (Out Put) เพื่อลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ในส่วนของ PID ซึ่งย่อมาจาก Proportional-Integral-Derivative นั้น แบ่งเป็น 3 เทอมที่นำมารวมกันเพื่อให้ได้เป็นเอาต์พุต ดังสมการที่ 1

$$output = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (1)$$

โดยที่

1) Proportional (P) คือการเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของค่า Error ปัจจุบัน ซึ่งค่า P_{out} สามารถคำนวณได้โดยการนำค่า Error มาคูณกับค่าคงที่ K_p ดังสมการที่ 2

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2)$$

โดยที่ค่า K_p ที่สูง จะเป็นผลให้ค่าเอาต์พุตมากขึ้นตาม หากค่า K_p มากเกินไป ระบบอาจไม่เสถียรได้ในทางตรงข้าม หากค่า K_p น้อยเกินไปอาจทำให้ระบบตอบสนองช้าเกินไป [5]

2) Integral (I) เป็นอัตราส่วนของค่า Error สะสมในหนึ่งช่วงเวลา (ปัจจุบันย้อนไปในอดีต) ค่า I_{out} เกิดจากผลคูณของค่าคงที่ K_I กับผลรวมของ $e(t)$ ซึ่งเป็นค่าสะสมของ Error ดังสมการที่ 3

$$I_{out} + \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

โดยเทอม Integral เมื่อใช้ร่วมกับเทอม Proportional จะช่วยเร่งให้ระบบวิ่งเข้าหาค่าเป้าหมายที่ต้องการเร็วขึ้น และช่วยลด Error ที่เกิดจากการใช้เทอม Proportional เพียงอย่างเดียว

3) Derivative (D) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error ในโปรเซสสนั้น คำนวณได้โดยความชัน (Slope) ของกราฟ Error vs Time ซึ่งก็คืออนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเทียบกับเวลา และคูณค่าความชันนี้กับ ค่าคงที่ K_D ก็จะได้ เทอม Derivative ดังสมการที่ 4

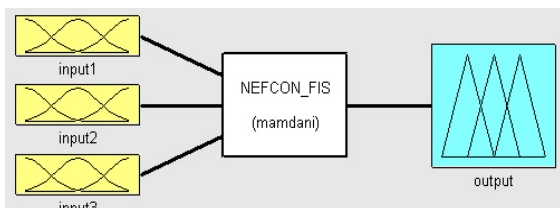
$$D_{out} = K_D \frac{de}{dt}(t) \quad (4)$$

โดยที่เทอม Derivative จะช่วยดึงเอาต์พุตจากคอนโทรลเลอร์ให้ช้าลง ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเมื่อผลลัพธ์กระบวนการเข้าใกล้ค่าที่ต้องการ ฉะนั้นเทอม Derivative จึงช่วยลดอาการกระเพื่อมของสัญญาณ (Overshoot) ซึ่งเกิดจากเทอม Integral และช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยรวม อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบ พีไอดี ที่มีหน้าที่ควบคุมเสถียรภาพของระบบยังมีข้อจำกัด คือไม่สามารถปรับค่าคงที่ได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากคอนโทรลเลอร์ PID เป็นแบบลิเนียร์ (Linear) ซึ่งบางครั้งอาจต้องมีการปรับค่าคงที่ตามเวลาหรือใช้คอนโทรลเลอร์แบบ ฟัซซี ลอจิกแทน [6-7]

2.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซี ลอจิก (Fuzzy Logic)

ฟัซซี ลอจิก (Fuzzy Logic) คือรูปแบบหนึ่งของตรรกศาสตร์ที่นำเอาบูลีน ลอจิก (Boolean Logic) ที่ใช้ในการนิยามเหตุการณ์หรือสถานการณ์ที่ไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน โดยความสำคัญของการใช้ฟัซซี ลอจิกอยู่ที่การให้เหตุผล หรือการระบุค่าโดยอาศัยสามัญสำนึกของคนเรา ซึ่งส่วนใหญ่มักเกิดจากปัญหาที่มีความซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเวลาขับรถแล้วพบทางโค้ง ผู้ขับต้องคิดว่าควรจะหมุนพวงมาลัยไปทางไหน ช้ายหรือขวา และหมุนไปกี่รอบ หรือถ้าพบทางตัน ควรเหยียบเบรคหรือไม่ อย่างไร เป็นต้น จะเห็นได้ว่า สิ่งเหล่านี้เรียนรู้ได้จากประสบการณ์ซึ่งแต่ละคนมีและรู้สึกต่อเหตุการณ์นั้นๆ แตกต่างกันไป [7] สำหรับการที่จะนำตรรกะความคิดเหล่านี้เข้าไปใช้กับระบบต่าง ๆ ที่เรา

ต้องการนั้น จำเป็นต้องมีการรวบรวมข้อมูล และ ออกแบบกฎความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาท์พุตที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปแบบ ถ้า-แล้ว (If-Then) เช่น ถ้ามุมล้อ (θ) เปรียบเทียบกับถนน (α) มีค่าเป็นศูนย์องศา ดังนั้นมอเตอร์บังคับเลี้ยวไม่ต้องหมุน (Zero) หรือถ้ามุมล้อ (θ) เปรียบเทียบกับถนน (α) มีค่าเป็นลบเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์บังคับเลี้ยวต้องหมุนไปทางซ้ายเล็กน้อย (Negative Small) ในทางกลับกัน ถ้ามุมล้อ (θ) เปรียบเทียบกับถนน (α) มีค่าเป็นสี่สิบองศา ดังนั้นมอเตอร์บังคับเลี้ยวต้องหมุนไปทางขวามาก (Positive Large) และเมื่อเรานำข้อมูลของ θ และ α มารวมกัน ดังในรูปที่ 1 ก็จะทำให้ได้ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันทั้งหมด ดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 การรวมตัวกันของอินพุต θ และ α

ตารางที่ 1 เป็นตารางเงื่อนไขของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

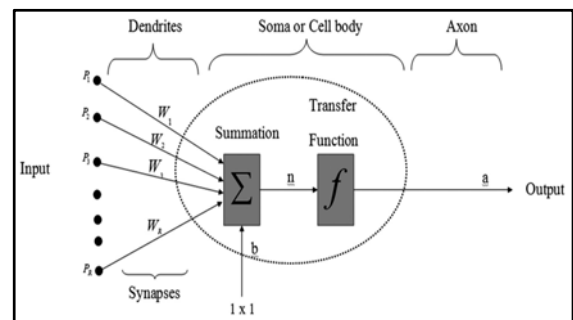
d_{c_k} \ c_k	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

จากนั้นระบบฟัซซี่จะทำหน้าที่ประมวลผลและตัดสินใจตามเงื่อนไขที่สร้างขึ้นมา และเข้าสู่ขั้นที่เรียกว่า "ดีฟัซซี่" (Defuzzi) โดยผลของกฎพื้นฐานจะถูกแปลงกลับไปเป็นค่าเอาท์พุตจริง ผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จะถูกประมวลเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบฟัซซี่มีข้อดีคือมีความสามารถในการตัดสินใจได้เองโดยมีตรรกะในความคิดที่คล้ายมนุษย์ อย่างไรก็ตาม ระบบฟัซซี่ยังมีจุดด้อยตรงที่ไม่มีการบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่ง

โครงสร้างของกฎและตัวแปรต่าง ๆ ในตัวระบบเอง โดยโครงสร้างของระบบจะถูกกำหนดขึ้นโดยผู้ออกแบบเงื่อนไข เช่น ถ้ามีการสร้างเงื่อนไขให้รถวิ่งไปตามเส้นทางเองได้ แต่เมื่อพบสิ่งกีดขวาง ระบบฟัซซี่จะไม่สามารถรับรู้ได้เนื่องจากผู้ออกแบบไม่ได้กำหนดเกี่ยวกับสิ่งกีดขวางไว้ในเงื่อนไขของฟัซซี่นั่นเอง [8-12]

2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network)

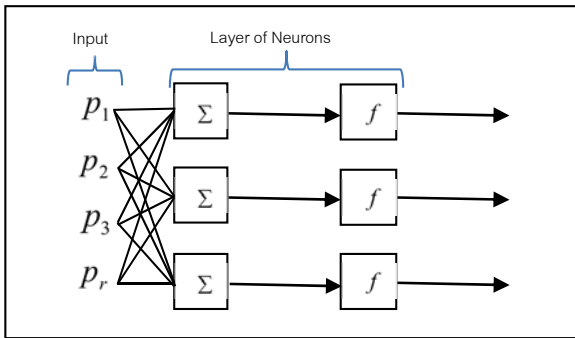
โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยหลักการการทำงานของระบบประสาททางชีววิทยา และเป็นวิทยาการที่พยายามเลียนแบบการทำงานของระบบประสาทหรือสมองมนุษย์เพื่อใช้ประโยชน์ในการพยากรณ์หรือคาดคะเนเหตุการณ์จากข้อมูลที่มีอยู่ โดยอาศัยโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย input ซึ่งเปรียบเสมือน "เดนไดรต์" (Dendrite) ในสมองของมนุษย์ แล้วส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผล (Processing Element) หรือนิวรอนซึ่งมีเป็นจำนวนมาก โดยในการเชื่อมต่อระหว่างนิวรอนจะใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer Function, f) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight, w) และค่าไบแอส (Bias, b) เป็นเครื่องมือในการจำลองคุณสมบัติของระบบประสาทเพื่อที่จะส่งข้อมูลออกมาเป็น output ที่เปรียบเสมือน "แอกซอน" (Axon) ในสมองมนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 2



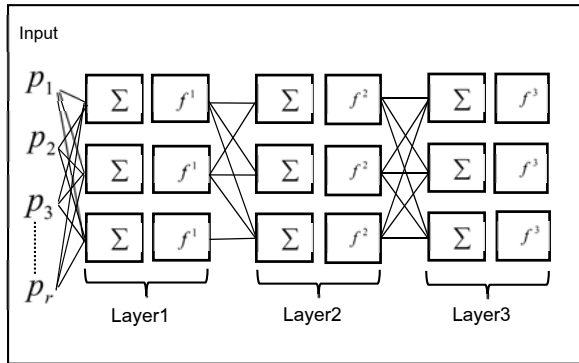
รูปที่ 2 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3(a) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3(b) ซึ่งโครงสร้างจะประกอบขึ้นจากการจัดเรียงตัวกันของนิวรอนตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับชั้นอินพุต) โดยที่ข้อมูลจากชั้นอินพุตจะถูก

คำนวณ และส่งผ่านทางฟังก์ชันการถ่ายโอนจากชั้น
ซ่อนไปยังชั้นแสดงผล โดยอาศัยหลักการของกระบวนการ
การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่า
ย้อนกลับ คือการเปลี่ยนแปลงของค่าถ่วงน้ำหนัก และ
ค่าไบแอสในแต่ละการเชื่อมต่อเพื่อปรับผลลัพธ์ของ
แบบจำลองให้ใกล้เคียงกับค่าความจริงมากที่สุด
[13-17]



รูปที่ 3(a) โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3(b) โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

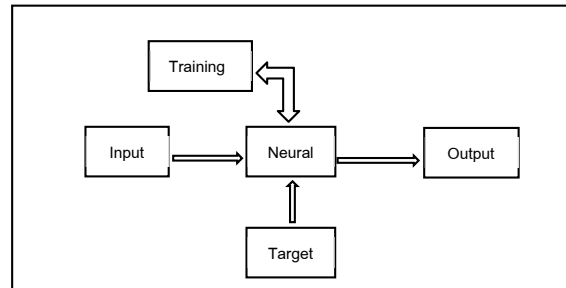
โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับมี
ลักษณะการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เพราะมีกระบวนการ
ทำงานที่แน่นอน 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอน ได้แก่
ข้อมูลป้อนเข้า (Input) และผลลัพธ์ที่ต้องการ (Output)
2. ระบุจำนวนชั้น (Layer) และจำนวนนิวรอน
(Neuron) เพื่อสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับ
การฝึกสอน
3. ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม
โดยใช้ข้อมูลที่เตรียมในขั้นตอนที่ 1 และโครงสร้างของ
โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

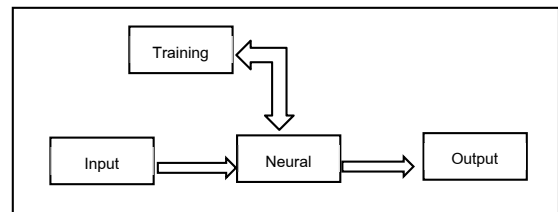
4. นำข้อมูลชุดใหม่ที่ไม่เคยได้รับการฝึกสอน
มาทำการทดสอบ (Simulation)

ในส่วนของทฤษฎีการเรียนรู้สำหรับ Neural Network
แบ่งเป็น 2 วิธี ดังนี้

1. การเรียนแบบมีการสอน (Supervised
Learning) เป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบ
เพื่อให้วงจรช่วยปรับตัว โดยชุดข้อมูลที่ใช้สอนวงจรช่วย
จะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าวงจรช่วยให้คำตอบที่
ถูกต้องหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูก วงจรช่วยจะปรับตัวเอง
เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น (เปรียบเทียบกับคน เหมือนกับ
การสอนนักเรียนโดยมีครูผู้สอนคอยแนะนำ) ดังแสดง
ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงการเรียนรู้แบบมีการสอน
Supervised Learning



รูปที่ 5 แสดงการเรียนรู้แบบไม่มีการสอน
Unsupervised Learning

2. การเรียนแบบไม่มีการสอน (Unsupervised
Learning) เป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ วงจรช่วยจะ
จัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล
ผลลัพธ์ที่ได้ คือวงจรช่วยจะสามารถจัดหมวดหมู่ของ
ข้อมูลได้ เช่น การที่เราสามารถแยกแยะพันธุ์พืช พันธุ์
สัตว์ ตามลักษณะรูปร่างของมันได้เอง โดยไม่มีใครสอน
ดังแสดงในรูปที่ 5

จากคุณสมบัติของระบบควบคุมแบบนิวรอน จะเห็นได้ว่ามีจุดเด่นอยู่ที่ความสามารถในการจดจำ และเมื่อพบเห็นสิ่งที่ไม่เคยเรียนรู้มาก่อนก็สามารถอนุมานได้ว่าสิ่งนั้นคืออะไร อย่างไรก็ตาม ยังคงพบข้อเสียตรงที่ไม่สามารถอธิบายเหตุผลของการตัดสินใจนั้นได้ จากข้อดีและข้อเสียของระบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงได้มีการนำข้อดีของการควบคุมแต่ละระบบมาผสมผสานเข้าด้วยกันเป็นระบบโครงข่ายเทียมแบบฟัซซี หรือนิวโรฟัซซี [18-19] ซึ่งคาดว่าจะนำมาใช้เพื่อควบคุมรถไถให้ทำงานโดยอัตโนมัติ

2.4 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี (Neuro-Fuzzy System)

ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟัซซีเป็นการนำข้อดีของแต่ละระบบมารวมกัน และขจัดข้อจำกัดของระบบนั้น ๆ ออกไป สำหรับระบบนิวโรฟัซซีที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems, ANFIS) [20] โดยมีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นกรณีที่มีข้อมูลนำเข้า 2 ตัว คือ x_1 และ x_2 และมีข้อมูลออกเพียงตัวเดียว คือ y โดยมีกฎฟัซซีแบบจำนวน 2 กฎที่แสดงในรูปแบบสมการดังนี้

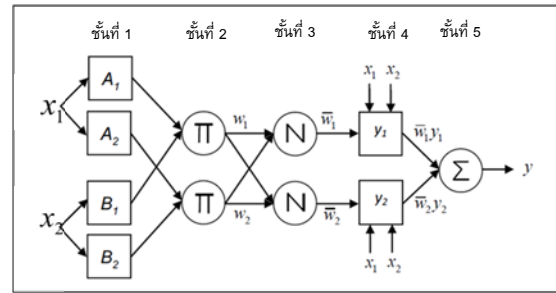
กฎข้อที่ 1: ถ้า x_1 คือ A_1 และ x_2 คือ B_1 จะได้

$$y_1 = p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1 \quad (5)$$

กฎข้อที่ 2: ถ้า x_1 คือ A_2 และ x_2 คือ B_2 จะได้

$$y_2 = p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2 \quad (6)$$

โดยที่ A_1, A_2, B_1 และ B_2 เป็นฟัซซีเซตของพจน์ภาษา เช่น เล็ก กลาง ใหญ่ ส่วน p_1, p_2, q_1, q_2, r_1 และ r_2 เป็นพารามิเตอร์ของข้อตามกฎฟัซซี โหนดรูปสี่เหลี่ยมแสดงถึงโหนดที่มีพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ ในขณะที่โหนดรูปวงกลมแสดงถึงโหนดที่ไม่สามารถปรับค่าของพารามิเตอร์ได้



รูปที่ 6 โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้

สำหรับโครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ แบ่งออกเป็น 5 ชั้น ได้แก่

ชั้นที่ 1 ทำหน้าที่แปลงข้อมูลนำเข้าเป็นค่าฟัซซีโดยการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก อาจเป็นฟังก์ชันรูประฆังคว่ำหรือฟังก์ชันอื่นๆ ที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู และโหนดในชั้นนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยม แสดงว่าค่าพารามิเตอร์สามารถปรับค่าได้ ซึ่งพารามิเตอร์ในโหนดนี้

ชั้นที่ 2 ทำหน้าที่คูณสัญญาณที่ส่งมาจากชั้นที่ 1 เข้าด้วยกันโดยใช้ T-norm Operator และส่งออกไปยังชั้นที่ 3 ซึ่งจำนวนโหนดในชั้นนี้จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของกฎฟัซซีและสัญญาณที่ส่งออกไป (W) เป็น Firing Strength ของกฎแต่ละข้อ โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้

ชั้นที่ 3 ทำหน้าที่ปรับค่า Firing Strength ให้มีผลรวมจากกฎทุกข้อมีค่าเป็นหนึ่ง โดยการหารค่า Firing Strength ด้วยผลรวมของ Firing Strength จากกฎทุกข้อ ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า Normalized Firing Strength (\bar{W}) โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้

ชั้นที่ 4 ทำหน้าที่คำนวณผลลัพธ์จากข้อตามของกฎฟัซซี โดยได้ผลลัพธ์อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\bar{W}_i = (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (7)$$

สำหรับกฎข้อที่ i โหนดในชั้นนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงว่าพารามิเตอร์ของโหนดนี้ ($q_i r_i$ และ r_i) สามารถปรับค่าได้ พารามิเตอร์เหล่านี้เรียกว่าพารามิเตอร์ของข้อตาม (Consequent Parameters)

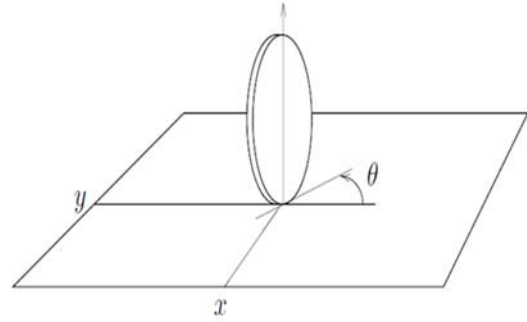
ชั้นที่ 5 ทำหน้าที่รวมสัญญาณจากทุกโหนดของชั้นที่ 4 เข้าด้วยกัน โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้

การใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ในการพยากรณ์เริ่มได้รับความนิยมนมากขึ้นในยุคปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติในการเรียนรู้และการใช้เหตุผล ทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดที่ผู้ใช้พึงระวังคือ เรื่องของเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ โดยผู้ใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้จะต้องตระหนักถึงปัญหาด้านระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งจะทวีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อใช้กับระบบที่มีพฤติกรรมแบบ Non-linear Dynamic Behaviors เนื่องจาก ระบบดังกล่าวมีกฎฟัซซีแบบ ถ้า-แล้ว เป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการเรียนรู้นานขึ้น [21-22]

2.5 การสร้างสมการของรถไถ (Vehicle Modeling)

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของรถไถนั้น (Vehicle Model) เป็นการประยุกต์ใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ ในการสร้างแบบจำลองของส่วนต่างๆ ที่สำคัญเพื่อจะทำให้รถไถขับเคลื่อนและเลี้ยวได้อย่างแม่นยำ ซึ่งต้องมีความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เป็นองค์ประกอบ เช่น ระยะกว้าง X ยาว ของฐานล้อ มุมของล้อบังคับเลี้ยว ระบบขับเคลื่อนของรถไถ (ขับเคลื่อนล้อหน้า-หลัง) [23]

โดยลองนึกภาพง่ายๆ เมื่อก้าวถึงล้อรถเพียงหนึ่งล้อ (Unicycle) ตั้งอยู่บนพิกัด XYZ (Coordinate) ดังแสดงในรูปที่ 7

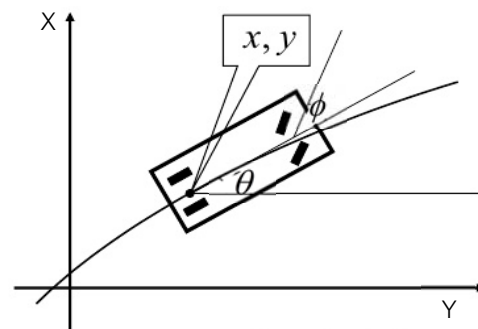


รูปที่ 7 unicycle ที่ตั้งอยู่บนพิกัด XYZ

จากรูปที่ 7 กำหนดให้ v_1 คือความเร็วเชิงเส้น และ v_2 คือความเร็วเชิงมุม โดยกำหนดค่าเวกเตอร์ (vector) ให้อยู่ในรูปตัวแปรที่สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 8

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2 \quad (8)$$

จากสมการที่ 8 เรียกได้ว่าเป็นสมการคิเนมาติกส์ของล้อรถหนึ่งล้อ (Kinematic of Unicycle) และเมื่อมองในภาพรวมทั้งสี่ล้อก็จะได้ คิเนมาติกส์ของรถไถทั้งคัน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปด้านบนของรถไถที่ตั้งอยู่บนพิกัด XYZ

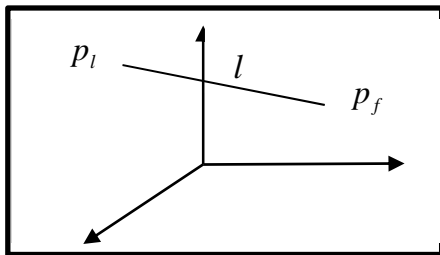
จากรูปที่ 8 ลองนึกภาพเมื่อรถเคลื่อนที่ และเลี้ยวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง (Distance) และมุมเลี้ยว (Heading) ซึ่งสามารถกำหนดสมการการเคลื่อนที่ของตัวรถไถ [24-25] ได้ดังสมการที่ 9 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \tan \phi \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

จากสมการที่ 9 นั้น เป็นคิเนเมติกส์ของรถไถ (Vehicle Modeling) โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมล้อ (Yaw) กับองศาเลี้ยว รวมไปถึงระยะทางที่รถไถเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับพิกัด XYZ ซึ่งตัวสมการคิเนเมติกส์ของรถไถนี้ [26-29] จะส่งเอาที่พิกัดในรูปแบบสัญญาณป้อนกลับ เพื่อนำข้อมูลของตำแหน่งและระยะทางส่งไปในส่วนของระบบควบคุมเพื่อทำการปรับองศาของล้อให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการ

2.6 เส้นทางการเคลื่อนที่ (Trajectory)

การที่จะทำให้อรถไถเริ่มต้นวิ่งและจบลงในเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการนั้น จะต้องสร้างเส้นตรงที่เชื่อมต่อด้วยจุดผ่านขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 รูปการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในพิกัด XYZ

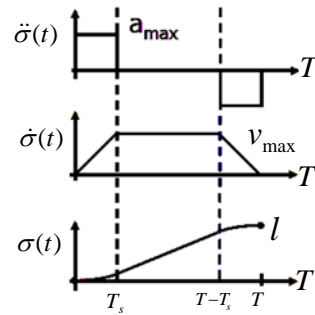
รูปที่ 9 คือรูปการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในพิกัด XYZ โดยมีการกำหนดให้อรถไถเริ่มต้นวิ่งที่จุด p_i และหยุดวิ่งที่จุด p_f โดยที่สมการของเส้นตรงนั้นประกอบด้วยสมการหลัก (Part Parameter) ดังแสดงในสมการที่ 10

$$p_s = p_i + s(p_f - p_i) \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 ค่า s นั้นเป็นอัตราส่วนของตำแหน่งกับระยะทางที่รถไถ วิ่งดังแสดงในสมการที่ 11

$$s = \frac{\sigma}{L} \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 σ ทำหน้าที่คล้ายกับลักษณะการเคลื่อนที่ในในฟังก์ชันของเวลา $\sigma(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 10



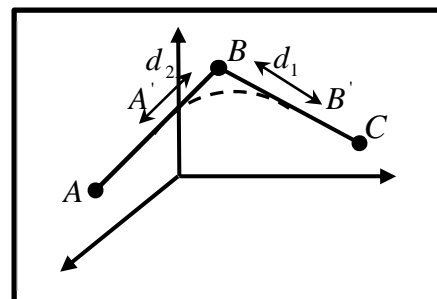
รูปที่ 10 รูปการเคลื่อนที่ในในฟังก์ชันของเวลา

จากรูปที่ 10 เราสามารถพิจารณาใช้สมการได้ตามเงื่อนไขของเวลา ดังแสดงในรูปที่ 11

$$\sigma = \begin{cases} a_{\max} t^2 / 2 & t \in [0, T_s] \\ v_{\max} t - \frac{v_{\max}^2}{2a_{\max}} & t \in [T_s, T-T_s] \\ -a_{\max} (t-T)^2 / 2 + v_{\max} T - \frac{v_{\max}^2}{a_{\max}} & t \in [T-T_s, T] \end{cases}$$

รูปที่ 11 รูปสมการลักษณะการเคลื่อนที่ในช่วงเวลา (t)

จากที่กล่าวมานั้นเป็นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง และเมื่อต้องการให้อรถไถวิ่งเป็นเส้นโค้งจะต้องทำการประมาณค่า (Interpolate) เส้นตรงที่เชื่อมต่อกันซึ่งจะทำให้เกิดเป็นเส้นโค้งขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 รูปเส้นโค้งที่เกิดจากการเชื่อมต่อโดยเส้นตรง

จากรูปที่ 12 กำหนดให้ความเร็วในโค้งของรถไถที่มีสมการหลักในการสร้างเส้นโค้ง ดังสมการที่ 12

$$p(t) = A' + v_1 K_{AB} t + \frac{t^2}{2} \Delta t (v_2 K_{bc} - v_1 k_{AB}) \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 ค่า K_{AB} และ K_{BC} นั้นเป็น
เวกเตอร์ และ Δt คือผลต่างของเวลาซึ่งแสดงดัง
สมการที่ 13-15

$$\frac{B - A}{\|B - A\|} = K_{AB} \quad (13)$$

$$\frac{C - B}{\|C - B\|} = K_{BC} \quad (14)$$

$$\Delta t = \frac{2 d_1}{v_1} \quad (15)$$

สมการที่ 13-15 เป็นส่วนประกอบของสมการ
เส้นโค้งหลัก และเมื่อนำสมการเส้นทางการเคลื่อนที่ทั้ง
แบบเส้นตรงและเส้นโค้งมาต่อกัน ก็จะได้เส้นทางการ
เคลื่อนที่ของรถไถในระบบพิกัด XYZ ที่ต้องการ
[31] , [33]

3. สรุป

จากการค้นคว้าวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่
การพัฒนาการรถไถธรรมดาให้เป็นรถไถอัตโนมัติแบบไร้
คนขับได้นั้น องค์ประกอบหลักที่จะทำให้ประสบ
ผลสำเร็จคือ การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับรถไถ
ซึ่งเปรียบเสมือนการสร้างถนนสำหรับรถไถ โดยการ
สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของตัวรถไถ และระบบ
ควบคุมรถไถซึ่งทำหน้าที่เสมือนคนขับ และเป็นส่วน
สำคัญที่จะทำให้การติดตามเส้นของรถไถมี
ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น สำหรับระบบควบคุมรถไถ
พบว่าการควบคุมแบบระบบอนุमानนิวโรพีซซีเป็น
วิธีการที่มีประสิทธิภาพ และตรงกับจุดประสงค์ของการ
วิจัยมากกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากตัวระบบสามารถ
เรียนรู้และตัดสินใจกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ด้วยตัวเอง

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชวมงคล

ชัยบุรี ที่อำนวยความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์
ในการค้นหาข้อมูลประกอบการเขียนบทความนี้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุขใจ ตอนปัญญา. *ต้นทุนและผลตอบแทนในการลงทุนปลูกข้าวของเกษตรกรหมู่ 5 ตำบลหัวตอง อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร. สาขาวิชาบริหารธุรกิจ. มหาวิทยาลัยราชวมงคลชัยบุรี, (2554).*
- [2] ปานทิพย์ แสนสง. *การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนในการลงทุนปลูกข้าวของเกษตรกรเขตพื้นที่ จังหวัดนครสวรรค์ ปี 2555. สาขาวิชาบริหารธุรกิจ. มหาวิทยาลัยเจ้าพระยา, (2555).*
- [3] ปรารงค์ ภาคพานิช. *การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนการทํานาปรังของเกษตรกรในเขตอำเภอพาน จังหวัดเชียงราย. สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, (2555).*
- [4] สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. *การแข่งขันรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, (2555).*
- [5] กัปตัน เตียวตระกูล. "ทบทวนความรู้คอนโทรลเลอร์แบบ PID". *วารสารกรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ. ปีที่ 15 (ฉบับที่ 16): หน้า 52-56,*
- [6] สุชาติ จันทรจรมานิตย์. *Principles of Feedback Control & PID Controller. เอกสารงานสอนเรื่อง Control Systems คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต. กรุงเทพฯ: ราชวมงคลชัยบุรี.*
- [7] Van T. Huynh, Ryan N. Smith., "A Nonlinear PI and Backstepping-based Controller for Tractor-Steerable Trailers Influenced by Slip". *IEEE International Conference on Robotics and Automation. May 2012. Saint Paul, Minnesota, USA, 14-18 (2012).*
- [8] Ying Shen, Zhu, and E.Mao, "Double-Fuzzy Kalman Filter Based on GPS/IMU/MV Sensor Fusion for Tractor Autonomous Guidance". *Proceedings of the IEEE International Conference. 2007.*

- [9] Lancaster and S.Abdul," Fuzzy Logic Controllers," *ISE2*, 1996.
- [10] พยุง มีสัจ. *FUZZY LOGIC*. คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, (2002).
- [11] D. Martín, D.M. Guinea, M.C. García-Alegre, E. Villanueva, and D. Guinea. *Fuzzy Steering Control Of a Hydraulic Tractor and Laser Perception in Obstacle Avoidance Strategies*. Industrial Automation Institute, Spanish Council for Scientific Research ESTYLF., (2010).
- [12] E.Kayacan, E.Kayacanand, O.Kaynak, W. Saeys and H.Ramon "Towards Agrobots: Trajectory Control of an Autonomous Tractor Using Type-2 Fuzzy LogicControllers," *IEEE/Asmetransactions on Mechatronics.*, vol. 20, no. 1, 2015.
- [13] สุธิดา ปรีชาเดช และ ชนะ รัชศิริ. "การพยากรณ์เวลาที่ใช้ในการขัดแผ่นซิลิคอนโดยโครงข่ายประสาทเทียม". *วิศวกรรมสารมก*. ปีที่ 24 (ฉบับที่ 77): 2554.
- [14] Alaska. " The Theory of Neural Networks "doi.nrct.go.th/?page=download_digital_file&bid=8289.
- [15] ปรีชัช วิสุทธิ์เมธากุล. *การทดสอบประสิทธิภาพของ Algorithm ต่างๆ ในการ train เพื่อลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ Neural Network*. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, (2548).
- [16] กฤษณะ สีพนมวัน, เบญจพร ลิ้มธรรมาภรณ์, และสถาพร ลักษณะเจริญ. "การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์สี่ขาโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทแบบย้อนกลับ" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, จังหวัดนครราชสีมา : 25-26, (2549).
- [17] สวัสดิ์ ยุคะลิ่ง. *การเปรียบเทียบการควบคุมความถี่-โพลของระบบไฟฟ้าเชื่อมโยงแบบใช้ตัวควบคุมพีซีลจิกและโครงข่ายประสาทเทียม*. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 2554.
- [18] ประเมศ อิงสุวรรณ และ สมชาติ จิรวินาทร. "การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาอุปติ มอลเพาเวอร์โพลาร์" *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. ปีที่ 18 (ฉบับที่ 2) : 2551.
- [19] วรณวิทย์ คล้ายบุญส่ง, และ สมชาย ปราการเจริญ. "การพยากรณ์กำลังคนที่ใช้ในการบำรุงรักษาซอฟต์แวร์ประเภท Web Based ด้วย Neural Network," *National Conference on Computing and Information Technology*, NCCIT. 5 (107) : 1-5, (2552).
- [20] สาวิตรี วงศ์ฤกษ์ดี และ ปัญญา สุนันท์แสงทอง. *ระบบควบคุมอัตโนมัติโดยใช้ระบบชาญฉลาด*. สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556.
- [21] นันทชัย กานตานันทะ. "การพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์เชิงสาเหตุ". *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*. ปีที่ 4 (ฉบับที่ 1), 2555.
- [22] สุรัชชัย จันทร์จรัส ชญานิน ชลหาญ และจිරนันท์ เข็มพันธ์. "การพยากรณ์ราคาหลักทรัพย์ด้วยวิธีการนิวโรฟัซซี" *วารสารวิทยาการจัดการ*, ปีที่ 30 (ฉบับที่ 2), 2556.
- [23] Eric N Moret. *Dynamic Modeling and Control of a Car-Like Robot*. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, (2003).
- [24] Romano M., R.Hurteau, O.Albouy, and B. Lesot "Experimental Stabilization of Tractor and Tractor-Trailer Like Vehicles," *Proceedings of the IEEE, International Symposium on Intelligent Control*, Vancouver, Canada, 2002.

- [25] Michael O'Connor, Thomas Bell, Gabriel Elkaim, and Bradford Parkinson. *Automatic Steering of Farm Vehicles Using GPS*. Stanford University. California, (2003).
- [26] Hee Chang M., HoonJe. W, Xiong-Zhe, HakJin-Kim, JungHun-Kim, Young Joo-Kim and JoongEup - Kye "Auto-Guidance System for Tillage Tractor," *International Conference on Control, Automation and Systems*, Kimdaejung Convention Center, ck2013.
- [27] Søren Hansen, Enis Bayramoglu, Jens Christian Andersen, Ole Ravn, and Nils Axel Andersen, *Derivative free Kalman filtering used for orchard navigation*. Electrical Engineering The Technical University of Denmark, (2004).
- [28] M.Egerstedt, X.Hu, and A.Stotky. *Control of Car-Like Robot Using a Dynamic Model*. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden, (1999).
- [29] R. Eaton, J. Katupitiya, K. W. Siew, and K. S. Dang. "Precision Guidance of Agricultural Tractors for Autonomous Farming," *IEEE International Systems Conference*, Montreal, Canada, (2008).
- [30] R. Solea and U. Nunes. "Trajectory Planning and Sliding-Mode Control Based Trajectory-Tracking for Cybercars," *Integrated Computer-aided Engineering*, Int. Journal, IOS Press, vol.14, 2007.
- [31] Alessandro De Luca. *Trajectory Planning in Cartesian Space*. Sapinza, Dipartimento Di Ingegneria. Universita di Roma, (1985).
- [32] C.Pradalier and K.Usher. "A Simple and Efficient Control Scheme to Reverse a Tractor-Trailer System on a Trajectory". *International Conference on Robotics and Automation*, (2007).
- [33] Alessandro De Luca. *Giuseppe Oriolo, "Feedback Control of a Nonholonomic Car-Like Robot*. La Sapienza, Dipartimento di Informatica e Sistemistica Universit'a di Roma, (2004).
- [34] Sanghyuk Park, John Deysty, and Jonathan P. Howz. *A New Nonlinear Guidance Logic for Trajectory Tracking*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, (2003).
- [35] R. Eaton, H. Pota, and J. Katupitiya. "Path tracking control of agricultural tractors with compensation for steering dynamics," *28th IEEE Conference on Decision and Control*, (2009).