

ปัญญาประดิษฐ์ทางการแพทย์ Artificial intelligence in medicine

กฤช โกยวานิชย์

Krit Koyvanich

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

Kasetsart University, Bangkhen Campus

E-mail: netnuanyai@gmail.com

บทคัดย่อ

แพทย์ผู้เชี่ยวชาญทางคลินิกในปัจจุบันจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมากเพื่อประกอบการวินิจฉัย ตั้งแต่อาการหรือความผิดปกติของผู้ป่วย ข้อมูลชีวเคมีประเภทต่าง ๆ จากห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงภาพถ่ายทางรังสีวิทยา ข้อมูลแต่ละชนิดจำเป็นต้องมีการประเมินและกำหนดแนวทางเฉพาะทางพยาธิวิทยา การใช้ประโยชน์จากปัญญาประดิษฐ์เพื่อสนับสนุนกระบวนการปฏิบัติงานและเพื่อหลีกเลี่ยงการวินิจฉัยที่ผิดพลาด โดยอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบปรับตัวสามารถจัดการข้อมูลทางการแพทย์ประเภทต่าง ๆ และสามารถบูรณาการให้เข้ากับผลลัพธ์ที่จัดหมวดหมู่ไว้แล้วได้เป็นอย่างดี บทความนี้ทำการสำรวจเทคนิคความเชี่ยวชาญด้านปัญญาประดิษฐ์ทุกสาขาทางการแพทย์ พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมเป็นที่นิยมใช้มาก รวมถึงการอภิปรายการทำงานโดยสรุปของปัญญาประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียมและการทบทวนเทคนิคปัญญาประดิษฐ์อื่น ๆ เช่น ระบบ fuzzy expert การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ และระบบอัจฉริยะแบบไฮบริด ล้วนถูกนำมาใช้กับสถานการณ์ทางคลินิกที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, โครงข่ายประสาทเทียม, การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ

Abstract

Today's clinical specialists need to use a large amount of data to support their diagnosis, ranging from patient symptoms or abnormalities, various types of biochemical data from laboratories, and radiological images. Each type of data requires specific assessment and pathological guidelines. The use of artificial intelligence to support the workflow and avoid misdiagnosis, where adaptive learning algorithms can handle different types of medical data and integrate them well with pre-categorized results, is needed. This article surveys AI expertise techniques across all medical fields, with artificial neural networks being the most popular. A brief discussion of AI related to artificial neural networks is also provided, and a review of other AI techniques, such as fuzzy expert systems, evolutionary computing, and hybrid intelligent systems, are all applied to different clinical scenarios.

Keywords: Artificial Intelligence, Neural Networks, Evolutionally Computation

1. บทนำ

ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เป็นหนึ่งในสาขาของวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมที่เกี่ยวกับความเข้าใจเชิงคำนวณของสิ่งที่เรียกว่าพฤติกรรมอัจฉริยะ รวมถึงการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถแสดงพฤติกรรมได้^[1] งานของ AI ส่วนใหญ่ในยุคปัจจุบันได้รับแนวคิดจากอริสโตเติลที่พยายามสร้างการคิดที่ถูกต้องหรือเรียกว่า “ตรรกะ” ผ่านการให้เหตุผลเชิงนิรนัย นอกจากนี้

การศึกษาในยุคหลังเกี่ยวกับการทำงานด้านจิตเจ้านั้นช่วยสร้างการคิดเชิงตรรกะร่วมสมัย ระบบปัญญาประดิษฐ์จัดเป็นโปรแกรมที่ฝังอยู่ในคอมพิวเตอร์ที่ทำงานในลักษณะดูเหมือนฉลาดคล้ายมนุษย์ ความแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์กับเทคโนโลยีในด้านสุขภาพแบบดั้งเดิมคือความสามารถในการรวบรวมข้อมูล ประมวลผล และให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนแก่ผู้ใช้ปลายทาง AI จะกระทำการต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาผ่านอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องจักร (machine learning) และการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) โดยอัลกอริทึมดังกล่าวสามารถจดจำรูปแบบของพฤติกรรมและสามารถสร้างตรรกะเป็นของตนเองได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่เป็นประโยชน์และสามารถทำนายผลได้ แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องจักรต้องอาศัยการเรียนรู้จากการนำเข้าข้อมูลจำนวนมาก อัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์มีลักษณะต่างจากมนุษย์อยู่ 2 ลักษณะคือ 1) อัลกอริทึมเป็นตัวอักษร กล่าวคือ เมื่อกำหนดเป้าหมาย อัลกอริทึมจะเรียนรู้จากข้อมูลที่นำเข้าไประหว่างนั้นและสามารถเข้าใจได้เฉพาะส่วนที่ถูกกำหนดให้ปฏิบัติ 2) อัลกอริทึมบางชนิดมีลักษณะเป็นกล่องดำ กล่าวคืออัลกอริทึมดังกล่าวสามารถพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำ แต่ไม่มีคำอธิบายถึงตรรกะเบื้องหลังการตัดสินใจ เปิดเผยเฉพาะข้อมูลที่นำเข้าข้อมูลสุดท้ายที่ส่งออกมาและประเภทของอัลกอริทึมที่ใช้^[2]

เป้าหมายหลักของแอปพลิเคชัน AI ที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพคือการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการป้องกันโรคและเทคนิคการรักษากับผลลัพธ์การรักษาที่เกิดขึ้นผู้ป่วย^[3] การนำโปรแกรม AI มาใช้ในทางปฏิบัติ เช่น กระบวนการวินิจฉัย การพัฒนาโปรโตคอลการรักษา การพัฒนายา การให้ยาเฉพาะบุคคล รวมถึงการเฝ้าติดตามและเฝ้าดูแลผู้ป่วย นอกจากนี้อัลกอริทึม AI ยังคงสามารถวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากจากบันทึกสุขภาพอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้สำหรับการป้องกันและวินิจฉัยโรค ในปัจจุบันความท้าทายของการแพทย์เกี่ยวข้องกับการได้มาซึ่งข้อมูลที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์และการใช้ความรู้เป็นจำนวนมากที่จำเป็นในการแก้ปัญหาทางคลินิกที่ซับซ้อน การพัฒนาปัญญาประดิษฐ์ทางการแพทย์นั้นเกี่ยวข้องกับการพัฒนาโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์เพื่อช่วยเหลือแพทย์ในการวินิจฉัย การตัดสินใจเลือกวิธีการรักษาและการพยากรณ์ผลการรักษา โปรแกรมต่าง ๆ เหล่านี้ได้รับการออกแบบให้สนับสนุนการทำงานประจำวันของบุคลากรทางการแพทย์ และช่วยเหลืองานที่ต้องอาศัยการจัดการข้อมูลและความรู้ต่าง ๆ เช่น ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ระบบ fuzzy อัจฉริยะ การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ และระบบอัจฉริยะแบบไฮบริด

2. เครือข่ายระบบประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN)

ANN เป็นเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในวงการแพทย์^[4] โดยเป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงคำนวณที่ได้รับแรงบันดาลใจจากระบบประสาทในทางสรีระวิทยา ประกอบด้วยเครือข่ายหน่วยประมวลผลของคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงเชื่อมต่อกันคล้ายระบบประสาท ซึ่งมีความสามารถในการคำนวณ ประมวลผล และการทบทวนองค์ความรู้แบบคู่ขนานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความน่าสนใจของการใช้ AI ในทางการแพทย์ที่เห็นได้ชัดจากคุณสมบัติความสามารถเรียนรู้ตัวอย่างทางร่องรอยเดิม การวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น การจัดการข้อมูลที่ไม่แม่นยำ และการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองของข้อมูลที่เป็นอิสระกัน เป็นต้น

2.1 คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

เครือข่ายประสาทเทียมเป็นการรวมตัวกันของชุดเซลล์ประสาท หรือ node ที่จัดเรียงกันเป็นชั้น โดยแต่ละเซลล์ประสาทในชั้นมีการเชื่อมต่อกับเซลล์อื่น ๆ ในชั้นถัดไปผ่านการเชื่อมต่อที่มีค่าน้ำหนัก (w_{ij}) แสดงถึงเส้นตรงเชื่อมเซลล์ประสาทชั้น i ใดกับเซลล์ประสาทชั้นถัดไปในชั้น j โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมมีจุดเริ่มต้นชั้นการป้อนข้อมูลและถัดมาเป็นชั้นกลางมีอย่างน้อยหนึ่งชั้น และชั้นแสดงผล แสดงดังรูปที่ 1 โดยจำนวนเซลล์ประสาทในชั้นและจำนวนชั้น

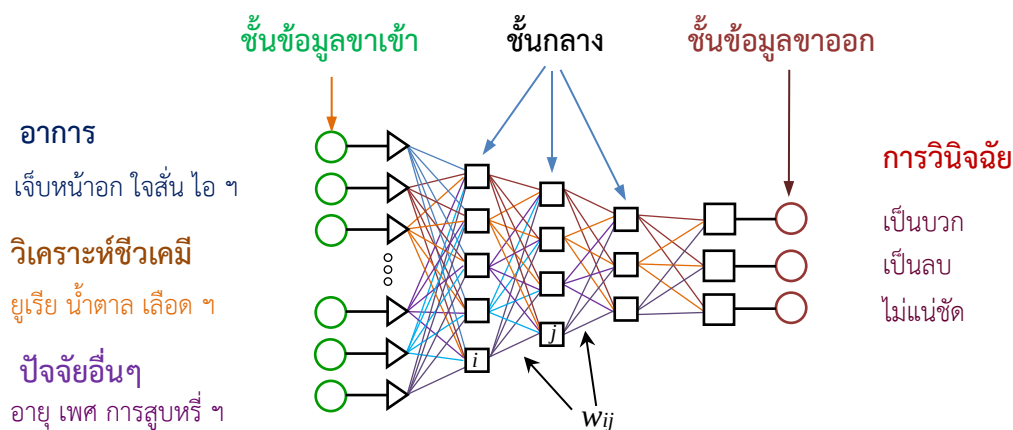
เซลล์ประสาทนั้นขึ้นกับความซับซ้อนของระบบที่ต้องการจะศึกษา ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายระบบประสาทเทียมเพื่อให้ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงมีความสำคัญ

เมื่อเซลล์ประสาทชั้นการป้อนข้อมูลรับข้อมูลและส่งผ่านไปยังเซลล์ประสาทชั้นกลางผ่านการเชื่อมต่อที่มีค่าน้ำหนัก ในขั้นตอนนี้ข้อมูลจะได้รับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์และผลลัพธ์จะถูกถ่ายโอนไปยังเซลล์ประสาทในชั้นถัดไป โดยเซลล์ประสาทในชั้นสุดท้ายจะแสดงผลลัพธ์ของเครือข่าย พิจารณาการประมวลผลข้อมูล (x_i) มีขั้นตอนดังนี้ (1) คำนวณผลรวมระดับของข้อมูลและค่าไบอัส (θ_j) แสดงดังสมการ (1) [5]

$$net_j = \sum_{i=1}^m x_i \times w_{ij} + \theta_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) แปลงผลรวมระดับข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชันส่งผ่านทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม และ (3) ส่งผ่านผลข้อมูลที่ประมวลผลแล้วไปยังเซลล์ประสาทชั้นถัดไป ปัจจุบันนี้มีฟังก์ชันส่งผ่านหลายชนิด [6] ตัวอย่างของฟังก์ชันส่งผ่านที่เป็นที่นิยมใช้เรียกว่า sigmoid แสดงดังสมการ (2)

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2)$$



รูปที่ 1 รายละเอียดโครงสร้าง ANN ที่ใช้ในการวินิจฉัยประกอบด้วยข้อมูลขาเข้าและขาออก

2.2 เครือข่ายการเรียนรู้

ขั้นตอนการเรียนรู้ผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยผู้ใช้งานในขั้นตอนตอนสุดท้ายทำให้ อัลกอริทึมมีการทำงานคล้ายกล่องดำที่ได้รับข้อมูลขาเข้า m ตัวและมีเวกเตอร์ขาออก n ตัว โดยทั่วไปหลักการทำงานของ เครือข่ายจะเรียนรู้จากชุดข้อมูลตัวอย่างจากฐานข้อมูลการเรียนรู้ แสดงดังรูป 2 โดยชุดข้อมูลตัวอย่างจะอยู่ในรูปแบบ เวกเตอร์ขาเข้า ($X_{in} = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$) และเวกเตอร์ขาออก ($Y_{in} = y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}$) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการเรียนรู้คือการ ประเมินค่าฟังก์ชัน f ที่มีค่าอยู่ระหว่างค่า X_{in} และ Y_{in} โดยใช้สมการ (3)

$$Y_{i,n} = f(X_{i,n}) \quad (3)$$

สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นจากการปรับค่าน้ำหนักการเชื่อมต่อ (w_{ij}) ซ้ำ ๆ ตามเงื่อนไขคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ที่เรียกว่า อัลกอริทึมการเรียนรู้ การเปลี่ยนค่าน้ำหนักใช้วิธีลาดชันสุดเพื่อลดค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมมีค่าลดลงโดยใช้ค่าต่ำสุดเป็นเกณฑ์เพื่อหยุดการเรียนรู้ หนึ่งฟังก์ชันที่นิยมใช้บ่อยคือฟังก์ชันผลรวมของเศษเหลือ แสดงดังสมการ (4)

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_{ij}^*)^2 \quad (4)$$

เมื่อ y_{ij} และ y_{ij}^* คือข้อมูลขาออกและข้อมูลขาออกจากเครือข่ายของเวกเตอร์จากชั้น j ที่สอดคล้องกับเวกเตอร์ขาเข้าในชั้น i การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของข้อมูลปัจจุบันของชั้นที่ระบุแสดงดังสมการ (5)

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{dE}{dw_{ij}} \quad (5)$$

เมื่อ η คือค่าคงตัวจำนวนบวกเรียกว่าอัตราการเรียนรู้ มีการเพิ่มพจน์เข้าในสมการเพื่อหลีกเลี่ยงค่าต่ำสุดและปรับปรุงให้เรียนรู้ได้เร็วขึ้น สมการ (5) จะกลายเป็น

$$\Delta w_{ij}^k = -\eta \frac{dE}{dw_{ij}} + \mu \Delta w_{ij}^{k-1} \quad (6)$$

เมื่อ μ คือเทอมโมเมนตัม และ Δw_{ij}^{k-1} คือการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก w_{ij} ในรอบการเรียนรู้ที่ $k-1$ โดยอัตราการเรียนรู้จะควบคุมอัตราการเรียนรู้เปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตามค่าที่เปลี่ยนไป และโมเมนตัมทำหน้าที่เป็นตัวปรับสภาพเสถียรโดยพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักก่อนหน้า

รหัสผู้ป่วย	ข้อมูลทางการแพทย์					การวินิจฉัย
1	ข้อมูล _{1,1}	...	ข้อมูล _{1,i}	...	ข้อมูล _{1,m}	ค่าบวก
2	ข้อมูล _{2,1}	...	ข้อมูล _{2,i}	...	ข้อมูล _{2,m}	ค่าบวก
...	...	...	...	...	...	...
k	ข้อมูล _{k,1}	...	ข้อมูล _{k,i}	...	ข้อมูล _{k,m}	ค่าลบ
...	...	...	...	...	...	...
n	ข้อมูล _{n,1}	...	ข้อมูล _{n,i}	...	ข้อมูล _{n,i}	ค่าลบ

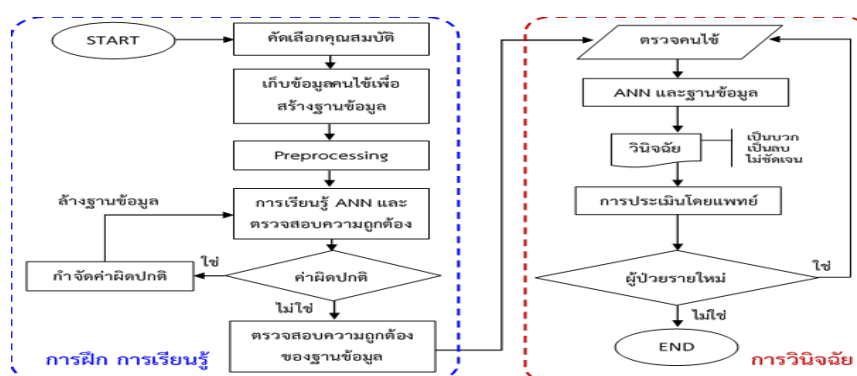
รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงสร้างฐานข้อมูลการเรียนรู้ แต่ละแถวแสดงข้อมูลคนไข้แตกต่างกัน ข้อมูล k, i แสดงถึงข้อมูลการแพทย์ลำดับที่ i ของคนไข้ลำดับที่ k

2.3 โครงสร้างการเรียนรู้ของฐานข้อมูล

เครือข่ายจำเป็นต้องเรียนรู้จากฐานข้อมูลที่เหมาะสม โดยปกติแล้วอยู่ในรูปแบบของข้อมูลตารางหรือเมตริกที่เกี่ยวข้องกับผู้ป่วยได้ที่ได้รับการวินิจฉัยเกี่ยวกับโรคบางอย่างที่เป็นที่รู้จักอยู่แล้ว ซึ่งจะแสดงค่าการวินิจฉัยเป็นบวกหรือเป็นลบ แต่ละแถวของเมตริกซ์แสดงถึงผู้ป่วย 1 ราย สมาชิกแถวแรกของข้อมูลคือข้อมูลทางการแพทย์ และสมาชิก n ตัวสุดท้ายแสดงผลลัพธ์การวินิจฉัย ในหน่วยของคำว่า “ข้อมูลทางการแพทย์” แสดงถึง สภาวะชีวิตเคมี นิวเคลียร์แม่เหล็กเรโซแนนซ์ (NMR) ข้อมูลห้องปฏิบัติการ อาการและข้อมูลอื่นๆจากแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ ตัวอย่างของเมตริกซ์การเรียนรู้ที่มีตัวแปรขาออกหนึ่งตัว ($n=1$) อาจมีค่าที่เป็นไปได้ 2 ค่า คือ ค่าบวกและค่าลบ แสดงดังรูปที่ 1

2.4 ขั้นตอนพื้นฐานในการวินิจฉัยทางการแพทย์ด้วย ANN

ขั้นตอนการทำงานของการทำงานของ ANN ที่เกิดขึ้นจากสถานการณ์คลินิกแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นภาพรวมของขั้นตอนพื้นฐานในการใช้งาน ANN เพื่อการวินิจฉัยทางการแพทย์ เมื่อเครือข่ายได้รับข้อมูลเพื่อคาดการณ์และวินิจฉัยโรคบางชนิดโดยระบุโรคเป้าหมายแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเลือกตัวชี้วัดอย่างถูกต้อง เช่น อาการ การทดสอบทางห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่จะให้ข้อมูลที่จำเป็นในการแยกแยะภาวะสุขภาพที่แตกต่างกันของผู้ป่วยซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี การใช้เครื่องมือหรือเทคนิคทางเคมีช่วยลดปัจจัยที่ให้อาการซ้ำซ้อนหรือปัจจัยปัจจัยที่ส่งผลต่อสัญญาณรบกวน ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงจำเป็นต้องเลือกเครื่องมือหรือเทคนิคที่เหมาะสม แล้วจึงสร้างฐานข้อมูล ตรวจสอบความถูกต้อง และกำจัดค่าที่ผิดปกติหรือค่าที่ไม่เกี่ยวข้อง ภายหลังการเรียนรู้และตรวจสอบความถูกต้องแล้ว สามารถใช้เครือข่ายทำนายและวินิจฉัยโรคได้ในทางปฏิบัติ ขั้นตอนสุดท้ายการทำนายและวินิจฉัยจะได้รับการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทางคลินิก



รูปที่ 3 แผนภาพขั้นตอนพื้นฐานในการวินิจฉัยทางการแพทย์โดยใช้ ANN โดยการสร้างฐานข้อมูลการเรียนรู้ (ซ้าย/น้ำเงิน) และการนำไปใช้ในการวินิจฉัยโรค (ขวา/แดง)

ในปัจจุบันมีแอปพลิเคชันของ ANN ให้เลือกใช้มากมายหลากหลาย ล้วนมีความสามารถในการจำแนกและจดจำรูปแบบได้อย่างแม่นยำและดึงดูดนักวิจัยให้นำรูปแบบเหล่านี้มาใช้ในการแก้ปัญหาทางคลินิกหลายประเภท ในขณะที่การวินิจฉัย การรักษา และทำนายผลการรักษาในสถานการณ์ทางคลินิกรูปแบบต่าง ๆ ขึ้นกับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรจำนวนมากทางคลินิก ชีววิทยา และ พยาธิวิทยา จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ ภายหลังต่อมาระบบเครือข่าย ANN ได้รับการยอมรับและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในเกือบทุกสาขาที่เกี่ยวข้องกับทางการแพทย์

2.5 ภาพรวมการใช้ระบบประสาทเทียมทางการแพทย์

2.5.1 ด้านการวินิจฉัย (Diagnosis)

ได้มีการนำ ANN มาใช้ในการวินิจฉัยทางคลินิกโดยใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายด้านรังสีวิทยาและพยาธิวิทยาเชิงแสง การแปรผลจากข้อมูลรวมถึงการวิเคราะห์รูปแบบคลื่นที่วัดค่าได้ Stamey และคณะได้พัฒนาอัลกอริทึมการจำแนกประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมที่เรียกว่า ProstAsure ซึ่งสามารถจำแนกต่อมลูกหมากที่เป็นมะเร็งได้ แบบจำลองดังกล่าวได้รับการตรวจสอบพบว่ามีความแม่นยำในการวินิจฉัย 90% ความไว 81% และความจำเพาะเจาะจงด้านการวินิจฉัย 92% [7] นอกจากนี้ยังมีการนำ ANN มาประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการผ่าตัด เช่น อาการปวดท้องและไส้ติ่งอักเสบ [8] นิ่วในท่อน้ำดี [9] โรคต่อหีน [10] และ อาการปวดหลัง [11] ในส่วนการวินิจฉัยด้านเซลล์และเนื้อเยื่อวิทยาได้มีการพัฒนา PEPNET ซึ่งเป็นระบบคัดกรองอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อช่วยเหลือนักเซลล์วิทยาในการตรวจคัดกรองโรคมะเร็งปากมดลูก และอัลกอริทึมอื่น ๆ เพื่อช่วยคัดกรองมะเร็งเต้านม [12] กระเพาะ

อาหาร^[13] ไทรอยด์^[14] เซลล์เยื่อในช่องปาก^[15] เซลล์กระเพาะปัสสาวะ^[16] เยื่อหุ้มปอด^[17] ซึ่งไม่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์แตกต่างกันไป ในส่วนรังสีวิทยานั้นแพทย์สามารถวินิจฉัยข้อมูลได้จากภาพถ่ายโดยตรงหรือบุคคลากรทางการแพทย์สามารถวินิจฉัยการเกิดโรคผ่านระบบเครือข่ายประสาทเทียมจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายหรือข้อมูลอื่นๆ เช่น ภาพถ่ายรังสี^[18] อัลตราซาวด์^[19] CT scan^[20] MRI^[21] หรือ การสแกนด้วยรังสีไอโซโทป^[22]

ความสามารถในการจดจำรูปแบบของ ANN ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์คลื่นรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงการแปลความหมาย ECGs เพื่อวินิจฉัยโรคกล้ามเนื้อหัวใจตาย^[23] ภาวะหัวใจห้องบนผิดปกติ^[24] และการเต้นผิดจังหวะของหัวใจ^[25] การวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าความถี่สูง (EEG) โดยอาศัยโครงข่ายประสาทเพื่อประยุกต์ใช้วินิจฉัยการเกิดโรคลมบ้าหมู^[26] และความผิดปกติของการนอนหลับ^[27] นอกจากนี้ยังมีกระบวนการเรียนรู้ของ ANA เพื่อใช้วิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าหัวใจ (EMG)^[28] doppler ของคลื่นอัลตราซาวด์^[29] และรูปแบบการไหลเวียนของโลหิตในกรณีของผู้ป่วยที่ต้องการการดูแลเป็นพิเศษ^[30]

2.5.2) การพยากรณ์โรค Prognosis

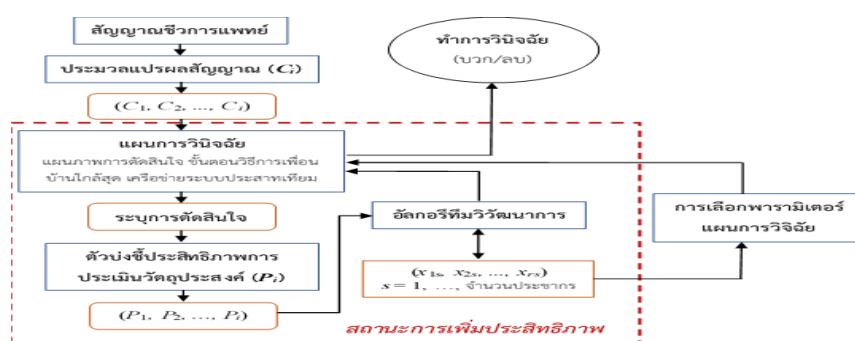
การพยากรณ์โรคมีความสำคัญอย่างยิ่งในการวางแผนการรักษาและการติดตามผลการรักษาที่เหมาะสม การระบุผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงอย่างแม่นยำอาจส่งเสริมการรักษาเชิงรุกที่กำหนดเป้าหมายได้ ซึ่งอาจช่วยรักษาโรคและยืดอายุขัยได้ ระบบ ANN มีความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลของโรคระยะเริ่มที่มีความซับซ้อนซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น ระบบโครงข่ายประสาทสามารถทำนายโอกาสรอดชีวิตในผู้ป่วยมะเร็งเต้านมและมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้^[31,32] ANN ยังแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการพยากรณ์ผลลัพธ์การเกิดโรคในผู้ป่วยโรคระยะเริ่มในลำไส้ใหญ่และทวารหนักได้ดีกว่าการทำนายของที่ปรึกษาศัลยแพทย์^[33] โดยทั่วไปเครือข่าย ANN มีความสามารถในการเรียนรู้ข้อมูลเฉพาะทำให้สามารถทำนายผลลัพธ์การเกิดโรคกับผู้ป่วยนอกกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ป้อนข้อมูลได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังมีการใช้ ANN เพื่อทำนายผลการเกิดโรคระยะเริ่มในปอด และมะเร็งในต่อมลูกหมาก

3. ระบบ Fuzzy expert

Fuzzy logic เป็นศาสตร์แห่งการให้เหตุผล การคิด และการอนุมาน ว่าสรรพสิ่งทุกอย่างที่มีอยู่ รับรู้ได้ ใช้อยู่ และปรากฏในโลกแห่งความเป็นจริงล้วนมีระดับ เปรียบเทียบได้กับสีขาว/สีดำ หรือตรรกะทั่วไปคือถูกและผิด กระบวนการ fuzzy logic จะสร้างการรับรู้ว่าเป็นจริงนั้น ๆ ทั่วไปส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างขั้วทั้งสองด้านของสีขาวและสีดำ หรืออยู่ในเขตสีเทาที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งคล้ายกับข้อมูลทางการแพทย์ซึ่งอยู่ในโดเมนที่มีความต่อเนื่องและข้อมูลมีความไม่ชัดเจนโดยตัวเอง ดังนั้น Fuzzy logic คือวิธีการจัดการข้อมูลที่มีความกำกวมและด้วยเหตุนี้จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ ในปี 1969 Zadeh ได้รวบรวมและใช้แนวคิดกระบวนการ fuzzy ใช้ในการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพโดยระบุไว้ว่า “ขอบเขตการประยุกต์ใช้ทฤษฎีนี้ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับกรณีของการวินิจฉัยทางการแพทย์และการนิยามในทางระบบชีววิทยา”^[34] ระบบ fuzzy expert มีโครงสร้างแบบจำลองในลักษณะชุดคำสั่ง “if - then” เทคนิค fuzzy logic ถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์อย่างแพร่หลายหลายด้าน Schneider และคณะแสดงให้เห็นว่า fuzzy logic ทำงานได้ดีกว่าการวิเคราะห์ลอจิสติกถดถอยแบบหลายส่วนในการวินิจฉัยมะเร็งปอดโดยอาศัยจากโปรไฟล์เนื้องอก^[35] ในทำนองเดียวกันการประยุกต์ใช้ fuzzy logic เพื่อวินิจฉัยโรคมะเร็งในเม็ดเลือดขาวเฉียบพลัน^[36] มะเร็งเต้านม^[37] และมะเร็งตับอ่อน^[38] นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดลักษณะภาพถ่ายทรวงอก^[39] อัลตราซาวด์^[40] และ CT scan ของโรคตับ^[41] และ ภาพ MRI ของเนื้องอกในสมอง^[42] นอกจากนี้ยังมีการใช้ Fuzzy logic เพื่อทำนายโอกาสการรอดชีวิตของผู้ป่วยมะเร็งเต้านม ในส่วนของส่วนควบคุม fuzzy ออกแบบมาเพื่อควบคุมการบริหารจัดการยาขยายหลอดเลือดเพื่อควบคุมความดันโลหิตในระหว่างการผ่าตัด^[43] นอกจากนี้ยังใช้สำหรับการให้ยาสลบในท้องผ่าตัด^[44]

4. การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ

การคำนวณเชิงวิวัฒนาการเป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียกเทคนิคการคำนวณชนิดต่าง ๆ บนพื้นฐานของกระบวนการวิวัฒนาการตามธรรมชาติที่เลียนแบบกฎการคัดเลือกโดยธรรมชาติและการอยู่รอดของผู้ที่เหมาะสมที่สุดของการแก้ปัญหาในโลกแห่งความเป็นจริง โดยรูปแบบการคำนวณเชิงวิวัฒนาการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในทางการแพทย์คือ “อัลกอริทึมทางพันธุกรรม” เสนอโดย John Holland ในปี 1975 ^[45] โดยจัดระดับการค้นหาแบบสุ่มและการเพิ่มประสิทธิภาพอัลกอริทึมเลียนแบบวิวัฒนาการทางชีวภาพที่มีอยู่ในธรรมชาติ มีหลักการทำงานคือสร้างผลเฉลยแบบสุ่มของปัญหามาจำนวนหนึ่ง จากนั้นจำนวนประชากรผลเฉลยของปัญหามีวิวัฒนาการจากรุ่นหนึ่งถ่ายทอดสู่รุ่นต่อไป จนกระทั่งมาถึงผลเฉลยที่น่าพอใจในการแก้ปัญหา โดยผลเฉลยที่ดีที่สุดดังกล่าวจะถูกเพิ่มเข้ามาในประชากรในขณะที่ผลเฉลยที่ด้อยกว่าจะถูกตัดออกไป กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นซ้ำไปซ้ำมาจนกระทั่ง ได้คำตอบที่ดีขึ้น มีการปรับปรุงซ้ำๆ การอยู่รอด และได้ผลเฉลยใหม่ในที่สุด รูปที่ 4 แสดงสถานะการเพิ่มประสิทธิภาพในการวินิจฉัยโดยพิจารณาจากค่าที่ดีที่สุดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการวินิจฉัยจากการเรียนรู้ฐานข้อมูลที่มีค่าผลลัพธ์การวินิจฉัยเป็นบวกหรือลบ ผลการประเมินผลค่าที่วินิจฉัยแล้วจะถูกเปรียบเทียบกับค่าก่อนหน้า แล้วทำซ้ำเป็นวนรอบจนได้ผลการวินิจฉัยที่ดีที่สุด ^[46]



รูปที่ 4 การเลือกคุณลักษณะที่จะทำการวินิจฉัยโดยใช้อัลกอริทึมวิวัฒนาการ

การตัดสินใจทางการแพทย์ส่วนใหญ่มาจากการค้นหาคำตอบในวงหรือบริเวณกว้างและมีความซับซ้อน ตัวอย่างเช่น นักเซลล์วิทยาการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อตัดสินใจว่าเซลล์เหล่านั้นเป็นมะเร็งหรือไม่ โดยเริ่มจากตรวจในบริเวณของเซลล์ที่สามารถดำเนินการวินิจฉัยได้อย่างถูกต้อง จากนั้นนำอัลกอริทึมทางพันธุกรรมมาใช้ประโยชน์จากกลไกวิวัฒนาการของธรรมชาติเพื่อการค้นหามีประสิทธิภาพในพื้นที่ที่กำหนด แล้วจึงทำการวินิจฉัย สร้างภาพถ่าย/ภาพจำลองทางการแพทย์หรือประมวลผล/ตรวจจับสัญญาณ วางกำหนดการและแผนการรักษาต่อไป มีการนำหลักการอัลกอริทึมทางพันธุกรรมไปใช้ทำนายผลลัพธ์ในการรักษากับผู้ป่วยในภาวะวิกฤต ผู้ป่วยมะเร็งปอด ^[47] มะเร็งผิวหนัง ^[48] การตอบสนองต่อวาร์ฟาริน ^[49] และยังใช้อัลกอริทึมดังกล่าวมาใช้วิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ภาพเมมโมแกรมของ microcalcification ^[50] และภาพ MRI ในบริเวณที่เกิดเนื้องอกในสมองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพกลยุทธ์ที่ใช้รักษา ^[51] รวมถึงการวิเคราะห์ภาพถ่ายคอมพิวเตอร์ 2 มิติ เพื่อวินิจฉัยเนื้องอกมะเร็ง ^[52]

5. ระบบอัจฉริยะไฮบริด

เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ AI แต่ละชนิดต่างก็มีข้อดีข้อด้อยในตัวเอง โดยระบบประสาทเทียมส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการเรียนรู้ ระบบ fuzzy logic เกี่ยวข้องกับความไม่แม่นยำ และการคำนวณเชิงวิวัฒนาการนั้นสัมพันธ์กับการเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการค้นหา ดังนั้นระบบอัจฉริยะไฮบริดจึงเป็นการรวมเอาข้อดีต่าง ๆ ของเทคโนโลยีดังกล่าวมารวมไว้ด้วยกันและสามารถทำงานเสริมกันได้ การทำงานร่วมกันช่วยสนับสนุนระบบไฮบริดด้านสามัญสำนึก ดึงเอาองค์ความรู้ออกจากข้อมูลดิบ สามารถใช้กลไกการให้เหตุผลเหมือนมนุษย์ สามารถจัดการกับความไม่แน่นอนและความไม่ชัดเจนได้ รวมถึงเรียนรู้ที่จะปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จักหรือปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว ระบบไฮบริดอัจฉริยะที่นิยมใช้มีอยู่หลากหลายประเภท เช่น ANN สำหรับการออกแบบระบบ fuzzy / อัลกอริทึมทางพันธุกรรมสำหรับเรียนรู้อัตโนมัติ และ การสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายระบบประสาทเทียม และได้มีการนำระบบอัจฉริยะไฮบริดไปใช้งานทางคลินิกอย่างหลากหลาย เช่น การวินิจฉัยบริเวณการเกิดมะเร็งเต้านม^[54] การวิเคราะห์การเกิดหินปูนจากภาพถ่ายเมมโมแกรม^[55] การวินิจฉัยโรคหลอดเลือดหัวใจในตับ^[56] และการควบคุมความลึกของการดมยาสลบ^[57]

6. สรุป

เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (AI) จำนวนมากสามารถใช้แก้ปัญหาที่หลากหลายทางคลินิกได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ยังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร เนื่องจากทัศนคติและความเชื่อมั่นต่อเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในการวินิจฉัยของแพทย์ผู้ปฏิบัติงานทางคลินิก แต่สามารถยืนยันผลเพิ่มเติมได้จากผลการทดสอบชีวเคมีและภาพถ่ายทางรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ นักวิจัยยังคงต้องมีการค้นคว้าเพิ่มเติมเพื่อสร้างหลักฐานยืนยันว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงในการปฏิบัติงานทางคลินิก และยังต้องทำการศึกษาแบบสุ่มจากกลุ่มตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพของระบบ AI สำหรับการใช้งานทางการแพทย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในศตวรรษที่ 21 มีหลักฐานที่น่าเชื่อว่า AI มีบทบาทช่วยเหลือแพทย์ในการส่งมอบหรือส่งต่อการดูแลสุขภาพในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากแต่คว่ายังมีข้อสงสัยเพียงเล็กน้อยว่าเทคนิคเหล่านี้จะช่วยเพิ่มและเสริมสร้าง “ความฉลาดทางการแพทย์” ให้แพทย์ได้ในอนาคตได้หรือไม่.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shapiro SC. Artificial intelligence. In: Shapiro SC. (ed) *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, vol. 1, 2nd edn. New York: Wiley, 1992.
- [2] Luca M, Kleinberg J, Mullainathan S (January–February 2016). "Algorithms Need Managers, Too". *Harvard Business Review*. Retrieved 2018-10-08.
- [3] Coiera E (1997). *Guide to medical informatics, the Internet and telemedicine*. Chapman & Hall, Ltd.
- [4] Steimann F. On the use and usefulness of fuzzy sets in medical AI. *Artif Intell Med* 2001; **21**: 131–7.
- [5] Amato F., López A., Peña-Méndez E.M., Vaňhara P., Hampl A., Havel J. (2013) Artificial neural networks in medical diagnosis, *J Appl Biomed*. 11: 47–58.
- [6] Zupan J, Gasteiger J. *Neural networks in chemistry and drug design*. Wiley VCH, Weinheim, 380 p. 1999.
- [7] Stamey TA, Barnhill SD, Zang Z. Effectiveness of ProstAsure™ in detecting prostate cancer (PCa) and benign prostatic hyperplasia (BPH) in men age 50 and older. *J Urol* 1996; 155: 436A.

- [8] Pesonen E, Ohmann C, Eskelinen M, Juhola M. Diagnosis of acute appendicitis in two databases. Evaluation of different neighborhoods with an LVQ neural network. *Methods Inf Med* 1998; 37: 59–63.
- [9] Golub R, Cantu Jr R, Tan M. The prediction of common bile duct stones using a neural network. *J Am Coll Surg* 1998; 187: 584–90.
- [10] Henson DB, Spenceley SE, Bull DR. Artificial neural network analysis of noisy visual field data in glaucoma. *Artif Intell Med* 1997; 10: 99–113.
- [11] Bounds DG, Lloyd PJ, Mathew BG. A comparison of neural network and other pattern recognition approaches to the diagnosis of low back disorders. *Neural Networks* 1990; 3: 583–91.
- [12] Downs J, Harrison RF, Kennedy RL, Cross SS. Application of the fuzzy ARTMAP neural network model to medical pattern classification tasks. *Artif Intell Med* 1996; 8: 403–28.
- [13] Karakitsos P, Stergiou EB, Pouliakis A, Tzivras M, Archimandritis A, Liossi AI et al. Potential of the back propagation neural network in the discrimination of benign from malignant gastric cells. *Anal Quant Cytol Histol* 1996; 18: 245–50.
- [14] Karakitsos P, Cochand-Priollet B, Guillausseau PJ, Pouliakis A. Potential of the back propagation neural network in the morphologic examination of thyroid lesions. *Anal Quant Cytol Histol* 1996; 18: 495–500.
- [15] Brickley MR, Cowpe JG, Shepherd JP. Performance of a computer simulated neural network trained to categorise normal, premalignant and malignant oral smears. *J Oral Pathol Med* 1996; 25: 424–8.
- [16] Hurst RE, Bonner RB, Ashenayi K, Veltri RW, Hemstreet 3rd GP. Neural net-based identification of cells expressing the p300 tumor-related antigen using fluorescence image analysis. *Cytometry* 1997; 27: 36–42.
- [17] Truong H, Morimoto R, Walts AE, Erler B, Marchevsky A. Neural networks as an aid in the diagnosis of lymphocyte-rich effusions. *Anal Quant Cytol Histol* 1995; 17: 48–54.
- [18] Ashizawa K, Ishida T, MacMahon H, Vyborny CJ, Katsuragawa S, Doi K. Artificial neural networks in chest radiography: application to the differential diagnosis of interstitial lung disease. *Acad Radiol* 1999; 6: 2–9.
- [19] Tailor A, Jurkovic D, Bourne TH, Collins WP, Campbell S. Sonographic prediction of malignancy in adnexal masses using an artificial neural network. *Br J Obstet Gynaecol* 1999; 106: 21–30.
- [20] Matsuki Y, Nakamura K, Watanabe H, Aoki T, Nakata H, Katsuragawa S et al. Usefulness of an artificial neural network for differentiating benign from malignant pulmonary nodules on high-resolution CT: evaluation with receiver operating characteristic analysis. *Am J Roentgenol* 2002; 178: 657–63.
- [21] Lucht R, Delorme S, Brix G. Neural network-based segmentation of dynamic MR mammographic images. *Magn Reson Imaging* 2002; 20: 147–54.
- [22] Fisher RE, Scott JA, Palmer EL. Neural networks in ventilation-perfusion imaging. *Radiology* 1996; 198: 699–706.

- [23] Heden B, Edenbrandt L, Haisty Jr WK, Pahlm O. Artificial neural networks for the electrocardiographic diagnosis of healed myocardial infarction. *Am J Cardiol* 1994; **74**: 5–8.
- [24] Yang TF, Devine B, Macfarlane PW. Artificial neural networks for the diagnosis of atrial fibrillation. *Med Biol Eng Comput* 1994; **32**: 615–9.
- [25] Dassen WR, Karthaus VL, Talmon JL, Mulleneers RG, Smeets JL, Wellens HJ. Evaluation of new self-learning techniques for the generation of criteria for differentiation of wide-QRS tachycardia in supraventricular tachycardia and ventricular tachycardia. *Clin Cardiol* 1995; **18**: 103–8.
- [26] Walczak S, Nowack WJ. An artificial neural network approach to diagnosing epilepsy using lateralized bursts of theta EEGs. *J Med Syst* 2001; **25**: 9–20.
- [27] Schaltenbrand N, Lengelle R, Toussaint M, Luthringer R, Carelli G, Jacqmin A *et al.* Sleep stage scoring using the neural network model: comparison between visual and automatic analysis in normal subjects and patients. *Sleep* 1996; **19**: 26–35.
- [28] Abel EW, Zacharia PC, Foster A. Neural network analysis of the EMG interference pattern. *Med Eng Phys* 1996; **18**: 12–7.
- [29] Smith JH, Graham J, Taylor RJ. The application of an artificial neural network to Doppler ultrasound waveforms for the classification of arterial disease. *Int J Clin Monit Comput* 1996; **13**: 85–91.
- [30] Spencer RG, Lessard CS, Davilla F, Etter B. Self-organising discovery, recognition and prediction of haemodynamic patterns in the intensive care unit. *Med Biol Eng Comput* 1997; **35**: 117–23.
- [31] Burke HB, Goodman PH, Rosen DB, Henson DE, Weinstein JN, Harrell Jr FE *et al.* Artificial neural networks improve the accuracy of cancer survival prediction. *Cancer* 1997; **79**: 857–62.
- [32] Burke HB, Hoang A, Iglehart JD, Marks JR. Predicting response to adjuvant and radiation therapy in patients with early stage breast carcinoma. *Cancer* 1998; **82**: 874–7.
- [33] Bottaci L, Drew PJ, Hartley JE, *et al.* Artificial neural networks applied to outcome prediction for colorectal cancer patients in separate institutions. *Lancet* 1997; **350**: 469–72.
- [34] Zadeh LA. Biological application of the theory of fuzzy sets and systems. In: *Proceedings of the International Symposium on Biocybernetics of the Central Nervous System*. Boston: Little Brown, 1969; 199–212.
- [35] Schneider J, Bitterlich N, velcovsky HG, Morr H, Katz N, Eigenbrodt E. Fuzzy-logic based tumor-marker profiles improved sensitivity in the diagnosis of lung cancer. *Int J Clin Oncol* 2002; **7**: 145–51.
- [36] Belacel N, Vincke P, Scheiff JM, Boulassel MR. Acute leukemia diagnosis aid using multicriteria fuzzy assignment methodology. *Comput Methods Programs Biomed* 2001; **64**: 145–51.
- [37] Sarkar M, Leong TY. Nonparametric techniques to extract fuzzy rules for breast cancer diagnosis problem. *Medinfo* 2001; **19**: 1394–8.

- [38] Halm U, Rohde N, Klapdor R, Reith HB, Thiede A, Etzrodt G *et al.* Improved sensitivity of fuzzy logic based tumor marker profiles for diagnosis of pancreatic carcinoma versus benign pancreatic disease. *Anticancer Res* 2000; **20**: 4957–60.
- [39] Koyama S, Obata Y, Shimamoto K, Ishigaki T, Ishii N, Isomoto Y *et al.* Breast ultrasonography: computer-aided diagnosis using fuzzy inference. *J Ultrasound Med* 1997; **16**: 665–72.
- [40] Badawi AM, Derbala AS, Youssef AM. Fuzzy logic algorithm for quantitative tissue characterization of diffuse liver diseases from ultrasound images. *Int J Med Inf* 1999; **55**: 135–47.
- [41] Klein HM, Eisele T, Klose KC, Stauss I, Brenner M, Ameling W *et al.* Pattern recognition system for focal liver lesions using ‘crisp’ and ‘fuzzy’ classifiers. *Invest Radiol* 1996; **31**: 6–10.
- [42] Fletcher-Heath LM, Hall LO, Goldgof DB, Murtagh FR. Automatic segmentation of non-enhancing brain tumors in magnetic resonance images. *Artif Intell Med* 2001; **21**: 43–63.
- [43] Ying H, McEachern M, Eddleman DW. Fuzzy control of mean arterial pressure in postsurgical patients with sodium nitroprusside infusion. *IEEE Trans Biomedical Eng* 1992; **39**: 1060–70.
- [44] Mason DG, Ross JJ, Edwards ND. Self-learning fuzzy control of atracurium-induced neuromuscular block during surgery. *Med Biol Engin Comput* 1997; **35**: 498–503.
- [45] Holland JH. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- [46] Toro F., Ros E., Mota S., Ortega J. Evolutionary Algorithms for Multiobjective and Multimodal Optimization of Diagnostic Schemes 2014; **53**(2): 178-189.
- [47] Jefferson MF, Pendleton N, Lucas SB, Horan MA. Comparison of a genetic algorithm neural network with logistic regression for predicting outcome after surgery for patients with nonsmall cell lung carcinoma. *Cancer* 1997; **79**: 1338–42.
- [48] Sierra B, Larranaga P. Predicting survival in malignant skin melanoma using Bayesian networks automatically induced by genetic algorithms. An empirical comparison between different approaches. *Artif Intell Med* 1998; **14**: 215–30.
- [49] Narayanan MN, Lucas SB. A genetic algorithm to improve a neural network to predict a patient’s response to warfarin. *Methods Inf Med* 1993; **32**: 55–8.
- [50] Chan HP, Sahiner B, Lam KL. Computerized analysis of mammography microcalcifications in morphological and texture feature spaces. *Med Phys* 1998; **25**: 2007–19.
- [52] Velthuizen RP, Hall LO, Clarke LP. Feature extraction for MRI segmentation. *J Neuroimaging* 1999; **9**: 85–90.
- [53] Handels H, Rop T, Kreusch J, Wolff HH, Poppl SJ. Feature selection for optimized skin tumor recognition using genetic algorithms. *Artif Intell Med* 1999; **16**: 283–97.
- [54] Pena-Reyes, Sipper M. A fuzzy-genetic approach to breast cancer diagnosis. *Artif Intell Med* 1999; **17**: 131–55.

- [55] Verma B, Zakos J. A computer-aided diagnosis system for digital mammograms based on fuzzy-neural and feature extraction techniques. *IEEE Trans Biomedical Eng* 2001; **5**: 46–54.
- [56] Sztandera LM, Goodenday LS, Cios KJ. A neuro-fuzzy algorithm for diagnosis of coronary artery stenosis. *Comput Biol Med* 1996; **26**: 97–111.
- [57] Allen R, Smith D. Neuro-fuzzy closed-loop control of depth of anesthesia. *Artif Intell Med* 2001; **21**: 185–91.