บทที่ 5

การวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าหัวใจ

รูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจในแต่ละรูปคลื่นจะประกอบไปด้วยข้อมูลสำคัญที่จะสามารถบ่งบอกถึงศักยภาพการทำงานของหัวใจของตัวผู้ป่วยได้ ดังเช่นอัตราการเต้นของหัวใจก็สามารถหาได้จากรูปคลื่นได้ โดยวิเคราะห์จากการตรวจจับรูปคลื่นหัวใจหลายๆคลื่นรวมกัน โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาอัตราการเต้นของหัวใจ เราจะเลือกการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่สามารถแยกแยะออกมาวิเคราะห์ได้ง่ายที่สุดจากรูปคลื่นแต่ละคลื่น

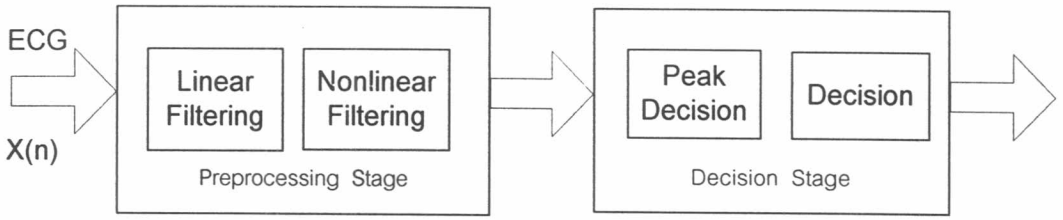
ปัญหาที่ยากต่อมาในการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS เนื่องจากว่าคลื่นไฟฟ้าหัวใจเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อาจเป็นด้วยปัญหาทางกายภาพหรือสัญญาณรบกวนที่สอดแสรกเข้ามา เป็นผลให้สัญญาณยากต่อการตรวจจับ ดังนั้นวิธีที่จะสามารถตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS ได้ดีนั้น ควรจะสามารถแยกแยะสัญญาณรบกวนและมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้เป็นอย่างดี

โดยทั่วๆไปการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS เริ่มต้นด้วยการกรองสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจด้วย การกรองความถี่ช่วงผ่าน จากนั้นก็ปรับปรุงสัญญาณให้ง่ายต่อการตรวจจับยอดคลื่น สุดท้ายอาศัยกฎการตัดสินใจ (Decision Rule) ในการพิจารณาตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS

5.1 หลักการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS

ซอฟต์แวร์ตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS ได้มีการวิจัย คิดค้นและพัฒนามามากกว่า 30 ปี ช่วงปีต้นๆของการวิจัยและพัฒนาจะสนใจในส่วนอัลกอริทึมการคำนวณ โดยพยายามให้มีการคำนวณซับซ้อนน้อยลง แต่ในปัจจุบันจะสนใจอัลกอริทึมที่มีศักยภาพในการตรวจจับได้อย่างถูกต้องเป็นประเด็นหลัก

โครงสร้างอัลกอริทึมตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS มีมากมายที่ถูกเสนอนำมาศึกษาโครงสร้างและพัฒนาตามรูปที่ 5.1 แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนก่อนกระบวนการหรือส่วนตรวจจับลักษณะสัญญาณ รวมทั้งการกรองความถี่เชิงเส้นและไม่เชิงเส้นกับอีกส่วนหนึ่ง คือ ส่วนการตัดสินใจในการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้นโดยส่วนนี้อาศัยกฎพื้นฐานรวมทั้งความรู้ประสบการณ์ของผู้วิจัยช่วยในการวิเคราะห์



รูปที่ 5.1 โครงสร้างทั่วๆไปของการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS

อัลกอริทึมหลักๆส่วนใหญ่จะเป็นไปตามโครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 5.1 การวิจัยและพัฒนาจะมุ่งตรงไปที่ 2 ส่วนหลัก โดยจะนำเทคนิคทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณต่างๆมาประยุกต์ใช้ เช่น ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม เวฟเล็ตทรานฟอร์ม ดิจิตอลฟิวเตอร์แบบต่างๆ การประยุกต์สัญญาณแทนด้วยสมการของคณิตศาสตร์ หลักทางสถิติ นิวรอลเน็ตเวิร์ก ฟัซซี่ลอจิก และอื่นๆ โดยแต่ละวิธีจะให้ผลคำนวณและ การวิเคราะห์ที่ถูกต้องแตกต่างกันไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้คุณสมบัติของการแปลงเวฟเล็ตในการคำนวณและวิเคราะห์ โดยเลือกการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ใช้ฟังก์ชันมูลฐานของเวฟเล็ตตระกูล Daubechies มีค่า NVM เป็น 4 ประยุกต์ใช้ Mallat (มอล์แลต) อัลกอริทึม ในการคำนวณการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย และใช้วิธีการหาตำแหน่ง QRS ด้วยวิธี หา Modulus Maxima (หาคู่สัญญาณ ที่มีค่ามากสุดทั้งบวกและลบ) และหา Zero-crossing points (จุดตัดศูนย์) ของสัญญาณที่ถูกแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วยดังจะกล่าวต่อไป

5.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกับการแปลงเวฟเล็ต

จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด (Sharp variation point) เป็นลักษณะที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณที่ขณะใดขณะหนึ่ง (Transient signal) หรือสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ โดยทั่วๆไป การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของข้อมูลสัญญาณ จะระบุจุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดของข้อมูล การแปลงเวฟเล็ตมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการหาจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยทั่วไปแล้วในทางคณิตศาสตร์ ลักษณะเฉพาะของจุดเหล่านี้สามารถจำแนกได้ด้วยค่า Lipchitz exponent และทฤษฎีของการแปลงเวฟเล็ตสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าค่า Lipchitz exponent สามารถคำนวณได้จากค่ามอดูลัสสูงสุดของการแปลงเวฟเล็ตในทุกระดับของการแปลงเวฟเล็ต

5.2.1 การหาอนุพันธ์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตใน 1 มิติ

(1) คุณสมบัติทั่วไป

กำหนดให้ฟังก์ชั่น $\psi_{2^j}(x)$ แทนการขยาย (dilation) ของฟังก์ชั่น $\psi(x)$ ด้วยแฟคเตอร์ของ 2^j

$$\psi_{2^j}(x) = \frac{1}{2^j}\psi(\frac{x}{2^j}) \tag{5.1}$$

การแปลงเวฟเล็ตของฟังก์ชั่น $f(x)$ ที่ระดับการแปลงสัญญาณ 2^j และที่ตำแหน่ง x สามารถเขียนในรูปผลคูณของการคอนโวลูชั่น ได้ดังนี้

$$W_{2^j} f(x) = f * \psi_{2^j}(x) \tag{5.2}$$

เรียกว่าลำดับการแปลงเวฟเล็ตของฟังก์ชั่น

$$\left(W_{2^j} f(x)\right)_{j\in Z} \tag{5.3}$$

การแปลงฟูเรียร์ของ $W_{2^j} f(x)$ คือ

$$\hat{W}_{2^j} f(x) = \hat{f}(w)\hat{\psi}(x) \tag{5.4}$$

จะได้ว่า $$\sum_{j=-\infty}^{\infty}\left|\hat{\psi}\left(2^j\omega\right)\right|^2 = 1 \tag{5.5}$$

ดังนั้นการขยายของฟังก์ชั่น $\hat{\psi}(\omega)$ ด้วยแฟคเตอร์ของระดับของการแปลงสัญญาณ $(2^j)_{j\in Z}$ จะครอบคลุมความถี่ทั้งหมดและสามารถสร้างฟังก์ชั่น $f(x)$ กลับคืนมาได้จากการแปลงเวฟเล็ตของฟังก์ชั่นนั้นๆ รูปที่ 5.2 ก) และ 5.2 ข) แสดงตัวอย่างของสัญญาณและการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณที่เป็นลำดับ ถ้าสัญญาณต้นแบบมีลักษณะไม่ต่อเนื่องจำนวน N ค่าจะใช้การคำนวณในการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณ จำนวน $O\left(N\log(N)\right)$ ครั้ง การสร้างสัญญาณกลับคืนมาจากการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณเดิมต้องใช้การคำนวณเท่ากับ $O\left(N\log(N)\right)$ ครั้ง เช่นเดียวกัน

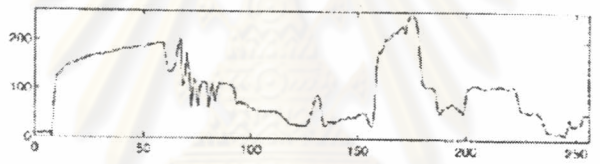
ฟังก์ชั่นเวฟเล็ต $\psi(x)$ บางฟังก์ชั่นจะมีค่าสูงสุดของการแปลงเวฟเล็ตเช่นเดียวกับจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของสัญญาณ ถ้ากำหนดให้ $\theta(x)$ เป็นฟังก์ชั่นของความราบเรียบ (Smoothing function) กำหนดให้ $\psi(x)$ เป็นอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของ ฟังก์ชั่น $\theta(x)$

$$\psi(x) = \frac{d\theta(x)}{dx} \tag{5.6}$$

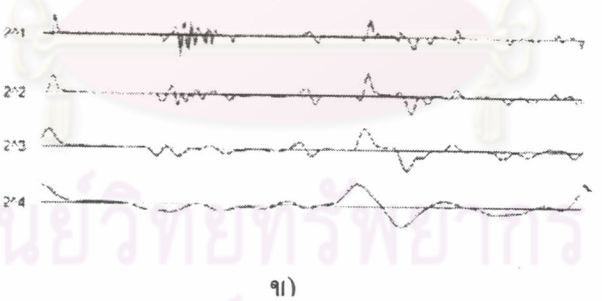
กำหนดให้ $\theta_{2^j}(x) = \frac{1}{2^j}\theta\left(\frac{x}{2^j}\right)$ การแปลงเวฟเล็ตที่ระดับของการแปลงสัญญาณ 2^j หาได้จาก

$$
\begin{aligned}
W_{2^j} f(x) &= f * \psi_{2^j}(x) \\
&= f * \left(2^j \frac{d\theta_{2^j}}{dx} \right)(x) \\
&= 2^j \frac{d}{dx}\left(f * \theta_{2^j} \right)(x)
\end{aligned}
\tag{5.7}
$$

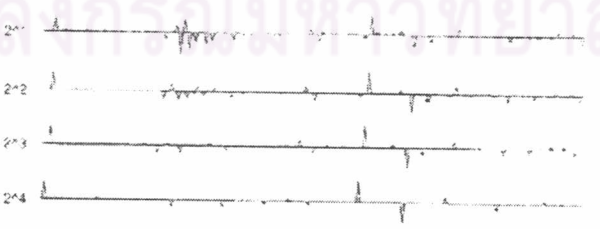
การแปลงเวฟเล็ต $W_{2^j} f(x)$ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับอนุพันธ์อันดับ 1 ของฟังก์ชั่น $f(x)$ ที่ถูกทำให้เรียบด้วย $\theta_{2^j}(x)$ ดังนั้นแอมปลิจูดสูงสุดของการแปลงเวฟเล็ต $\left|W_{2^j} f(x)\right|$ สัมพันธ์กับค่าสูงสุดของฟังก์ชั่น $f * \theta_{2^j}(x)$ นั่นคือจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่ระดับการแปลงสัญญาณ 2^j ตัวอย่างการหาค่าสูงสุดของการแปลงเวฟเล็ตแสดงดังรูปที่ 5.2 ค) ค่าสูงสุดของการแปลงเวฟเล็ตจะระบุตำแหน่งของจุดที่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของสัญญาณแต่ละระดับของการแปลงที่แตกต่างกัน รูปที่5.3 แสดงตัวอย่างลักษณะของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจกับผลของการแปลงเวฟเล็ต 4 ระดับ



ก)



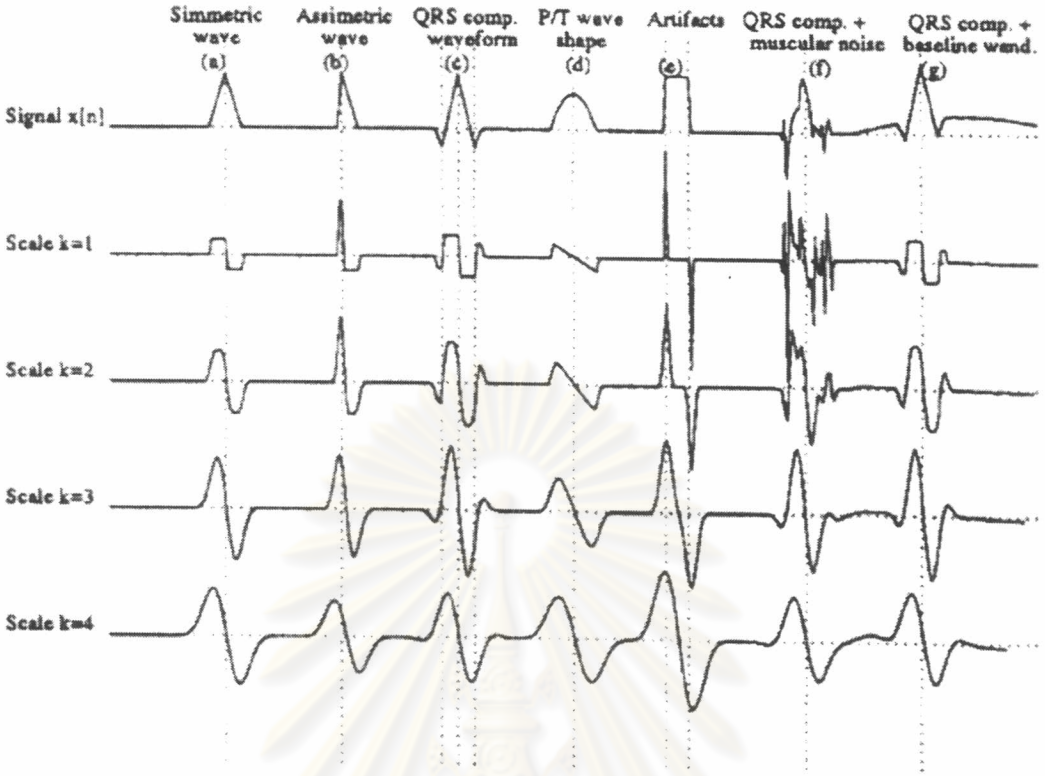
ข)



ค)

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการหาค่าสูงสุดของสัญญาณใน 1 มิติ ก) สัญญาณต้นแบบ ข) องค์ประกอบของสัญญาณที่ระดับการแปลง $1 \le j \le 4$ ค) แต่ละสเกล จะชี้ตำแหน่งค่าแอมปลิจูดสูงสุดของ ข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างลักษณะของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจกับผลของการแปลงเวฟเล็ต 4 ระดับ

(2) อัลกอริทึมของการแปลงเวฟเล็ตใน 1 มิติ

สมมติเวฟเล็ตฟังก์ชั่น $\psi(x)$ และ $H\{h_n\}_{n\in Z}$, $G\{g_n\}_{n\in Z}$ เป็นสัมประสิทธิ์ ของ ฟิลเตอร์ความถี่ต่ำ และสูงตามลำดับ

การแปลงเวฟเล็ต (Decomposition)

$$S_1^d f \rightarrow W_{2^{j+1}}^d f$$
$$\searrow \; S_{2^{j+1}}^d f$$

$j = 0$

While $(j < J)$

$W_{2^{j+1}}^d f = S_{2^j}^d f * G_j,$

$S_{2^{j+1}}^d f = S_{2^j}^d f * H_j,$

$j = j + 1.$

End of while

การแปลงกลับเวฟเล็ต(Reconstruction)

$$W_{2^{j+1}}^{d} f \rightarrow S_{1}^{d} f$$
$$S_{2^{j+1}}^{d} f \nearrow$$

$j = L$
While $(j > 0)$
$S_{2^{j-1}}^{d} f = W_{2^j}^{d} f * G_{j-1}, + S_{2^j}^{d} f * H_{j-1}$,
$j = j - 1.$
End of while

5.3 การพิจารณาและกฎการตัดสินใจ

เนื่องจากพลังงานเฉลี่ยส่วนใหญ่ขององค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS อยู่ระหว่าง 6-30 เฮิรตซ์ ดังนั้นจุดแรกที่จะพิจารณาคือเลือกสเกลช่วงความถี่ที่มีพลังงานเฉลี่ยส่วนใหญ่ขององค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS อยู่ สามารถคำนวณด้วยโปรแกรมแมทแลบ (Matlab) โดยขึ้นอยู่กับชนิดเวฟเล็ตที่เลือก ความถี่สุ่มตัวอย่าง และจำนวนสเกลช่วงความถี่ที่ต้องการ

การคำนวณ ใช้ เวฟเล็ต Daubechies-4 ความถี่สุ่มตัวอย่าง เท่ากับ 200 Hz และแปลงทั้งหมด 5 สเกลจะได้ค่าดังตาราง

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง สเกลช่วงความถี่กับค่าความถี่

Scale	Frequency [Hz]	Period [s]
$Wf(2^1,t)$	66.6667	0.0150
$Wf(2^2,t)$	33.3333	0.0300
$Wf(2^3,t)$	16.6667	0.0600
$Wf(2^4,t)$	8.3333	0.1200
$Wf(2^5,t)$	4.1667	0.2400

จากตาราง เราสามารถเลือกช่วงสเกลความถี่ ที่ $Wf(2^3,t)$ กับ $Wf(2^4,t)$ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเฉลี่ยส่วนใหญ่ขององค์ประกอบของรูปคลื่นส่วนQRS อยู่ แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพลังงานเฉลี่ยส่วนใหญ่จะอยู่ที่ $Wf(2^3,t)$ สำหรับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS ที่มีองค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่าปกติ พลังงานเฉลี่ยจะตกอยู่ที่ $Wf(2^2,t)$ มากกว่าที่ $Wf(2^3,t)$ และ สำหรับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS ที่มีองค์ประกอบความถี่ที่ต่ำกว่าปกติ พลังงานเฉลี่ยจะตกอยู่ที่ $Wf(2^4,t)$ มากกว่าที่ $Wf(2^3,t)$ ส่วนพลังงานอื่นๆที่ชั้นสเกลสูงกว่าพลังงาน

เฉลี่ยขององค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS จะลดลงในเวลาเดียวกัน แต่จะมีพลังงาน สัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น

กฎพื้นฐานสำหรับการพิจารณาและตัดสินใจสำหรับสัญญาณโดยทั่วไป (สำหรับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ยังไม่ได้แปลงเวฟเล็ต)

1. ละเลยค่าจุดยอดที่หาได้โดยมีระยะห่างน้อยกว่า 200 ms
2. จุดยอดของสัญญาณที่เกิดขึ้นต้องประกอบด้วยความชันที่เป็นบวกและลบ ถ้าไม่ใช่ถือว่าเป็น เบสไลน์ ชิฟท์(Baseline shift)
3. จุดยอดของสัญญาณที่เกิดขึ้น ถ้าเกิดขึ้นภายใน 360 ms กับจุดที่พบก่อนหน้านี้ ตรวจสอบค่าจุดยอดนี้ต้องมีขนาดแอมปลิจูดอย่างน้อยเป็นครึ่งหนึ่งของสัญญาณครั้งก่อน ถ้าไม่ถือว่าจุดยอดที่พบเป็นองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน T
4. จุดยอดที่มีขนาดแอมปลิจูดสูงกว่าค่าเริ่มต้น (Threshold)ถือว่า เป็นองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS นอกจากนี้ถือว่าเป็นสัญญาณรบกวน
5. ถ้าไม่สามารถตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRSได้ภายใน 1.5*ช่วงระยะห่างจากยอดถึงยอด และพบว่ามียอดคลื่นมีขนาดสูงกว่า ครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นในช่วงเวลาที่ตรวจจับนี้ซึ่งตามกระบวนการตรวจจับตรวจจับได้ว่าเป็นองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน T ให้ยอดคลื่นนั้นเป็นองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS

จากกฎพื้นฐานดังกล่าวข้างต้นนำมาเป็นพื้นฐานส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์และตัดสินใจในการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS ได้ในส่วนการวิเคราะห์ เป็นต้นว่าเกิดเจอสัญญาณรบกวนที่มีพลังงานใกล้เคียงกับพลังงานขององค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS ในช่วงชั้นพลังงานที่ตรวจสอบ จะสามารถแยกแยะองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS ออกจากสัญญาณรบกวนได้

5.3.1 ขั้นตอนหลักของอัลกอริทึมในการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS

1. คำนวณการแปลงเวฟเล็ต
2. คำนวณหาค่าเริ่มต้น (Threshold) ที่เหมาะสม
3. หาจุดที่เกิดคู่มากสุดทั้งบวกและลบ (Maximum-negative pair) ที่มีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้น
4. หาจุดที่ตัดศูนย์ (Zero- crossing point)ที่อยู่ระหว่างคู่มากสุดทั้งบวกลบ ใช้กฎการตัดสินใจช่วยในการพิจารณาว่าจุดที่หาได้ เป็นตำแหน่ง ยอดองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS หรือไม่

5. เก็บค่าตำแหน่งที่ได้เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการเต้นของหัวใจ และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์ต่อไป
6. แสดงผลการคำนวณ

5.3.2 ขั้นตอนหลักของอัลกอริทึมในการหาค่าความกว้างขององค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS

1. หาจุดที่เป็น จุดยอดของรูปคลื่น
2. ตรวจจับหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดขององค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS โดยอาศัยหลักการเดียวกับการตรวจจับองค์ประกอบของรูปคลื่นส่วน QRS
3. คำนวณหาค่าความกว้างและแสดงผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย