



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัย

ต้นแบบระบบกล้องถ่ายภาพและฉายภาพเส้นเลือดดำ
(A Prototype of Vein Imaging and Projection System)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัย

ต้นแบบระบบกล้องถ่ายภาพและฉายภาพเส้นเลือดดำ (A Prototype of Vein Imaging and Projection System)

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. พนมศักดิ์ มีมนต์
สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิพล พองแก้ว
สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2568

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับเงินอุดหนุนจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566



บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบช่วยระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำ (Vein Finder) โดยประยุกต์ใช้แสงใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared: NIR) ร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิทัลและการฉายภาพแบบเรียลไทม์ เพื่อสนับสนุนการเจาะเลือดในกลุ่มผู้ป่วยที่หลอดเลือดดำมองเห็นได้ยาก เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ หรือผู้ที่มีภาวะหลอดเลือดลึก ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง NIR ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร กล้อง Basler ที่มีความไวต่อแสงในช่วง NIR ซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพที่พัฒนาโดยใช้ภาษา Python และโปรเจกเตอร์สำหรับฉายภาพหลอดเลือดซ้อนกลับลงบนผิวหนังของผู้ป่วยในตำแหน่งจริง

ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถตรวจจับหลอดเลือดดำได้ผิวหนังได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบภาพจากกล้องทั่วไปกับกล้อง NIR ซึ่งให้ความเปรียบต่างระหว่างหลอดเลือดกับเนื้อเยื่อรอบข้างได้ดีกว่า กระบวนการประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มความชัดเจนของหลอดเลือดอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถแสดงผลภาพได้แบบเรียลไทม์ อุปกรณ์ต้นแบบมีขนาดกะทัดรัด เคลื่อนย้ายสะดวก และใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการนำเข้าเครื่องจากต่างประเทศมากกว่า 50% นอกจากนี้ ยังมีการให้นักศึกษาระดับปริญญาโทมีส่วนร่วมในโครงการ เพื่อเสริมสร้างองค์ความรู้และทักษะด้านการออกแบบระบบแสงในห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้มีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงในหน่วยบริการทางการแพทย์ระดับชุมชนหรือภาคสนาม และเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาต่อยอดสู่ระบบอัจฉริยะในอนาคต โดยเฉพาะเมื่อผสานร่วมกับเทคโนโลยี AI หรือการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการใช้งานทางคลินิกอย่างยั่งยืน

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

This research aimed to develop a prototype system for visualizing subcutaneous veins using near-infrared (NIR) light in conjunction with digital image processing and real-time projection technologies. The system was designed to support venipuncture procedures in patients with difficult-to-locate veins, such as children, elderly individuals, or those with deep or narrow veins. The developed prototype consists of an NIR light source at a wavelength of 850 nm, a Basler camera sensitive to the NIR range, Python-based image processing software, and a projector that overlays the processed vein images onto the patient's skin in real time.

Experimental results demonstrated that the system can accurately detect veins beneath the skin, with significantly improved visibility when compared to standard visible-light imaging. The applied image processing techniques enhanced contrast and defined vein patterns more clearly, making them suitable for medical guidance during blood draws. The prototype device is compact, portable, and cost-effective, achieving more than a 50% reduction in production cost compared to imported commercial devices. Additionally, one master's-level student was directly involved in the research, gaining practical skills and knowledge in optical system design and biomedical engineering.

This study contributes a practical foundation for developing affordable and effective vein visualization systems for community healthcare services or mobile medical units. Moreover, the findings provide a basis for future enhancements using artificial intelligence (AI) and machine learning to further improve clinical usability and intelligent decision-making in medical imaging applications.

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 กรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2. ทฤษฎี แนวคิด การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
3.1 การถ่ายภาพด้วยแสงใกล้อินฟราเรด (NIR Imaging).....	15
3.2 การติดตั้งระบบ (System Setup).....	16
3.3 ระบบตรวจจับหลอดเลือดดำ (Vein Detection System)	17
3.3.1 การเก็บข้อมูลภาพ (Image Acquisition).....	18
3.3.2 การเลือกบริเวณที่สนใจ (ROI Selection)	18
3.3.3 การเพิ่มคุณภาพภาพ (Image Enhancement)	19
3.3.4 การแปลงภาพไบนารีแบบปรับตัว (Adaptive Thresholding).....	19
3.3.5 การดำเนินการทางสัณฐานวิทยา (Kernel Morphology)	20
บทที่ 4. ผลการศึกษา.....	21
4.1 ต้นแบบระบบถ่ายภาพ.....	21
4.2 การพัฒนาโปรแกรม Python เพื่อการประมวลผลข้อมูล.....	21
4.3 การสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยรวม	23
4.4 การทดลองถ่ายภาพ.....	24
บทที่ 5. สรุปผลการวิจัย.....	30
5.1 อภิปรายผลงานวิจัย	30

5.2	สรุปผลงานวิจัย.....	31
5.3	ผลผลิตของงานวิจัย	32
5.4	การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม.....	33
	บรรณานุกรม	35



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งเส้นเลือดที่ต้องการถ่ายภาพ.....	5
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างภาพ การค้นหาหลอดเลือดดำระยะใกล้ด้วย Near-Infrared Vein Finder	13
รูปที่ 2.2 การตรวจจับเส้นเลือดดำที่บริเวณต่างๆ.....	14
รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบ NIR imaging	15
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงโครงสร้างของต้นแบบโดยรวม	16
รูปที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของระบบ (a) กล้อง Basler Ace (b) เลนส์กล้อง Basler (c) โฟลาริเซอร์.....	17
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบการตรวจจับหลอดเลือดดำ.....	18
รูปที่ 4.1 ต้นแบบเครื่องมือ Vein Detection	21
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบต้นแบบ	22
รูปที่ 4.3 ลำดับการทำงานของเครื่องต้นแบบ	22
รูปที่ 4.4 การตรวจสอบ FOV ของเครื่องต้นแบบ Vein Finder	23
รูปที่ 4.5 การคำนวณหา Sampling Resolution.....	24
รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์การแสดงผลภาพจากกล้องสามแบบ — กล้องธรรมดา (ซ้าย), กล้อง Basler (กลาง), และภาพ ภายใต้แสงอินฟราเรด (ขวา)	25
รูปที่ 4.7 รูปภาพของหลอดเลือดดำในขั้นตอน Segmentation	26
รูปที่ 4.8 ข้อมูล Gray Scale Histogram ของภาพถ่ายหลอดเลือดดำ	26
รูปที่ 4.9 สมการ Adaptive Thresholding.....	27
รูปที่ 4.10 แถบ Contrast แสดง Channels ของ Gray Scale Histogram.....	27
รูปที่ 4.2 ภาพที่ได้จากกล้อง Basler (ซ้าย) และภาพที่ผ่านการประมวลผลเพื่อแยกหลอดเลือด (ขวา)	28

บทที่ 1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การวินิจฉัยทางการแพทย์มีความสำคัญอย่างมากในขั้นตอนการรักษาทางการแพทย์ ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการต่างๆหลายขั้นตอน เพื่อช่วยเหลือในการเลือกวิธีการรักษา หนึ่งในนั้นคือการทดสอบองค์ประกอบของเลือด โดยการเจาะตัวอย่างเลือดออกมาทดสอบด้วยกระบวนการต่างๆ ซึ่งวิธีการปกติในการเก็บตัวอย่างเลือด จะใช้สายรัดบริเวณต้นแขนและตรวจสอบหาตำแหน่งของหลอดเลือดดำก่อนจะทำการเชื่อมต่อท่อเข้ากับหลอดเลือดดำของผู้ป่วยโดยตรง เพื่อเก็บเลือดและวินิจฉัยองค์ประกอบต่างๆของเลือด ความยากง่ายในการเจาะเลือดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ ขนาดและความตื้นลึกของเส้นเลือดในแต่ละบุคคล โรคประจำตัว รวมถึงประสบการณ์ของพนักงานที่ทำหน้าที่เจาะเลือดเอง ซึ่งบ่อยครั้งที่พบข้อจำกัดในการระบุตำแหน่งของเส้นเลือดดำด้วยตาเปล่า ทำให้ต้องเจาะมากกว่าหนึ่งครั้ง หรืออาจจะไม่สามารถเจาะเลือดได้เลยในบางกรณี เนื่องจากหลอดเลือดดำมีขนาดเล็กมากและมีตำแหน่งลึกลงไปภายใต้ชั้นกล้ามเนื้อพอสสมควร นำมาซึ่งปัญหาระหว่างขั้นตอนการใช้เครื่องมือเจาะเก็บตัวอย่างเลือด ซึ่งก่อให้เกิดความวิตกกังวล ความไม่สบายใจ บาดแผลบนกล้ามเนื้อและกระดูก ซึ่งเกิดขึ้นบ่อยในผู้ป่วยวัยเด็ก ดังนั้นบุคลากรทางการแพทย์ที่ปฏิบัติหน้าที่ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเลือดจำเป็นต้องมีความรู้และความชำนาญพอสสมควร เพราะถ้าเกิดข้อผิดพลาดระหว่างดำเนินการในขั้นตอน อาจส่งผลทำให้เกิดปัญหาหลายๆอย่างตามมา

ในปัจจุบันจึงเริ่มมีการพัฒนาเทคโนโลยีการถ่ายภาพและฉายภาพเส้นเลือดดำเพื่ออำนวยความสะดวก ลดระยะเวลาและลดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำในการเจาะเลือดของเจ้าหน้าที่ ทั้งยังช่วยลดความวิตกกังวลของผู้ป่วย เครื่องมือ Vein Finder โดยใช้แสง Near-infrared (NIR) เพื่อตรวจสอบหาตำแหน่งของหลอดเลือดดำบนกล้ามเนื้อแขน เป็นหนึ่งในทางเลือกที่นิยมมาปรับใช้ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ เนื่องจากมีความแม่นยำที่ถูกต้องและสามารถช่วยเหลือในขั้นตอนการทำงานของบุคลากรทางการแพทย์ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีดังกล่าวยังอยู่ในระหว่างการพัฒนา มีใช้งานแล้วในต่างประเทศ แต่ยังไม่แพร่หลายในไทย อันเนื่องมาจากราคานำเข้าเทคโนโลยีนี้ต่อเครื่องที่ค่อนข้างสูงอยู่มาก อ้างอิงจากการประเมินราคาตลาดโลกปี 2565 เทคโนโลยี Vein finder ซึ่งประยุกต์ใช้เทคนิค NIR จะมีราคาเริ่มต้นที่ 4500 US dollar หรือประมาณ 157,860 บาท สำหรับเครื่องมือรุ่นสามารถพกพา จนถึงราคา 27,000 US dollar หรือประมาณ 947,160 บาท สำหรับเครื่องมือรุ่นติดตั้งในห้องปฏิบัติการ

ในโครงการนี้ ทีมวิจัยจะมุ่งเน้นพัฒนาต้นแบบภาคสนามของเครื่อง Vein Finder โดยเน้นการออกแบบระบบให้มีขนาดกะทัดรัด เคลื่อนย้ายได้ง่าย และมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศกว่าเท่าตัว

ซึ่งอุปกรณ์ต้นแบบจะประกอบไปด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรดที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Near infrared light-emitting diodes, NIR-LED), เทคนิคการตรวจจับแสงอินฟราเรด (Infrared-sensitive camera), เทคนิคการประมวลผลข้อมูลภาพ (Image Processing) และเทคนิคการสร้างจำลองภาพเสมือนของหลอดเลือดดำเพื่อฉายทับลงไปบนกล้ามเนื้อแขนในบริเวณที่ต้องการเจาะเลือด โดยคาดหวังว่าต้นแบบและวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบหาตำแหน่งของหลอดเลือดดำและการวินิจฉัยทางการแพทย์ได้อย่างสะดวกและแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาต้นแบบต้นแบบระบบกล้องถ่ายภาพและฉายภาพเส้นเลือดดำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาและระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำบนบริเวณกล้ามเนื้อแขน

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ในขั้นตอนค้นหาตำแหน่งของหลอดเลือดดำบนกล้ามเนื้อแขน วิธีที่นิยมใช้จนถึงปัจจุบันคือการใช้สายรัดบริเวณต้นแขนเพื่อตรวจสอบตำแหน่งของหลอดเลือดดำและทำการเชื่อมต่อท่อเข้ากับหลอดเลือดดำของผู้ป่วยเพื่อทำการเก็บตัวอย่างเลือด ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ได้ดีในคนปกติหรือผู้ป่วยบางกลุ่มที่สามารถมองเห็นเส้นเลือดดำได้ชัดเจนและไม่มีภาวะแทรกซ้อนจากการใช้สายรัดต้นแขน ซึ่งปัจจุบันในการเก็บตัวอย่างเลือดอย่างมีประสิทธิภาพและประสบความสำเร็จอย่างแม่นยำนั้น จำเป็นต้องใช้ความรู้และความชำนาญของบุคลากรทางการแพทย์เป็นหลัก ซึ่งขั้นตอนนี้นับว่าเป็นขั้นตอนแรกๆที่มีความสำคัญต่อการวินิจฉัยทางการแพทย์เป็นอย่างมาก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาต้นแบบเครื่องช่วยระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำ (Vein Finder) สำหรับการใช้งานภาคสนาม โดยมีขอบเขตของการดำเนินงานดังนี้:

1. ด้านฮาร์ดแวร์

พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบขนาดกะทัดรัดที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงใกล้อินฟราเรด (NIR-LED), กล้องตรวจจับแสงอินฟราเรด และหน่วยแสดงผลภาพในรูปแบบฉายทับบนผิวหนังจริง

2. ด้านซอฟต์แวร์

พัฒนาและปรับแต่งอัลกอริทึมการประมวลผลภาพเพื่อระบุและแสดงตำแหน่งของหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคนิค Image Processing พื้นฐานและการแสดงผลแบบ Augmented Reality (AR)

3. ข้อจำกัดของการวิจัย

การวิจัยจะไม่ครอบคลุมการทดลองในผู้ป่วยจริงในโรงพยาบาล และไม่รวมถึงการพัฒนาเชิงอุตสาหกรรม หรือการรับรองมาตรฐานทางการแพทย์ในเชิงพาณิชย์

1.5 กรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย

กรอบแนวความคิดของงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแสงใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared, NIR) ร่วมกับระบบการประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อช่วยในการระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำอย่างแม่นยำ โดยมีแนวทางการดำเนินงานหลักดังนี้:

- **ปัญหาที่พบในปัจจุบัน**

การเจาะเลือดเพื่อเก็บตัวอย่างในผู้ป่วยบางกลุ่ม เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ หรือผู้ที่มีหลอดเลือดขนาดเล็ก มักประสบปัญหาในการมองเห็นหลอดเลือดด้วยตาเปล่า ส่งผลให้เกิดการเจาะหลายครั้ง ซึ่งสร้างความวิตกกังวลและความเจ็บปวดให้แก่ผู้ป่วย รวมถึงเพิ่มภาระของบุคลากรทางการแพทย์

- **แนวทางการแก้ไข้ปัญหา**

พัฒนาอุปกรณ์ Vein Finder ขนาดเล็กที่สามารถใช้งานภาคสนาม โดยใช้แสง NIR ซึ่งสามารถทะลุผ่านเนื้อเยื่อและทำให้หลอดเลือดดำปรากฏชัดเจนกว่าสภาพแสงปกติ ร่วมกับกล้องตรวจจับแสงอินฟราเรดและซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพเพื่อสร้างภาพเสมือนของหลอดเลือดและฉายกลับลงบนผิวหนัง

- **องค์ประกอบของระบบต้นแบบ**

1. แหล่งกำเนิดแสง NIR-LED
2. กล้อง Infrared-sensitive
3. หน่วยประมวลผลภาพและซอฟต์แวร์สำหรับแสดงภาพหลอดเลือด
4. หน่วยฉายภาพหรือจอแสดงผลที่แสดงตำแหน่งหลอดเลือดแบบเรียลไทม์

- **ผลที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ต้นแบบ Vein Finder ที่สามารถผลิตในประเทศด้วยต้นทุนต่ำกว่าการนำเข้า
2. ระบบที่ใช้งานง่ายและแม่นยำ ช่วยลดความผิดพลาดในการเจาะเลือด
3. ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมและการรับรองมาตรฐานทางการแพทย์ในอนาคต

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การพัฒนาเทคโนโลยีนี้ขึ้นภายในประเทศ คาดว่าจะสามารถลดต้นทุนการนำเข้าเทคโนโลยีได้ในอนาคต ทั้งยังสามารถบำรุงรักษาเครื่องได้เองภายในประเทศ ไม่เกิดปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ตามมาเหมือนอุปกรณ์นำเข้าอื่นๆ ทั้งยังสามารถเพิ่มจำนวนเครื่องให้เพียงพอกับใช้งานในทุกพื้นที่ของประเทศ อันจะช่วยเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงเทคโนโลยีแก่บุคคลทั่วไปได้อย่างเท่าเทียมมากขึ้น โดยเครื่องต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้นนี้ คาดว่าจะสามารถประโยชน์ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเลือด โดยเฉพาะในกรณีของผู้ป่วยที่การระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำได้ยาก หรือไม่สามารถระบุได้เลย โดยคาดว่าจะสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำ ในกรณีที่มีมองเห็นได้ยากโดยตาเปล่า ทั้งยังคาดว่า สามารถประยุกต์ในงานวิจัยทางการแพทย์ด้านต่างๆ ได้อีกด้วย อาทิ โรคขาดน้ำ เบาหวาน ความดัน การวิเคราะห์การตอบสนองของสมอง

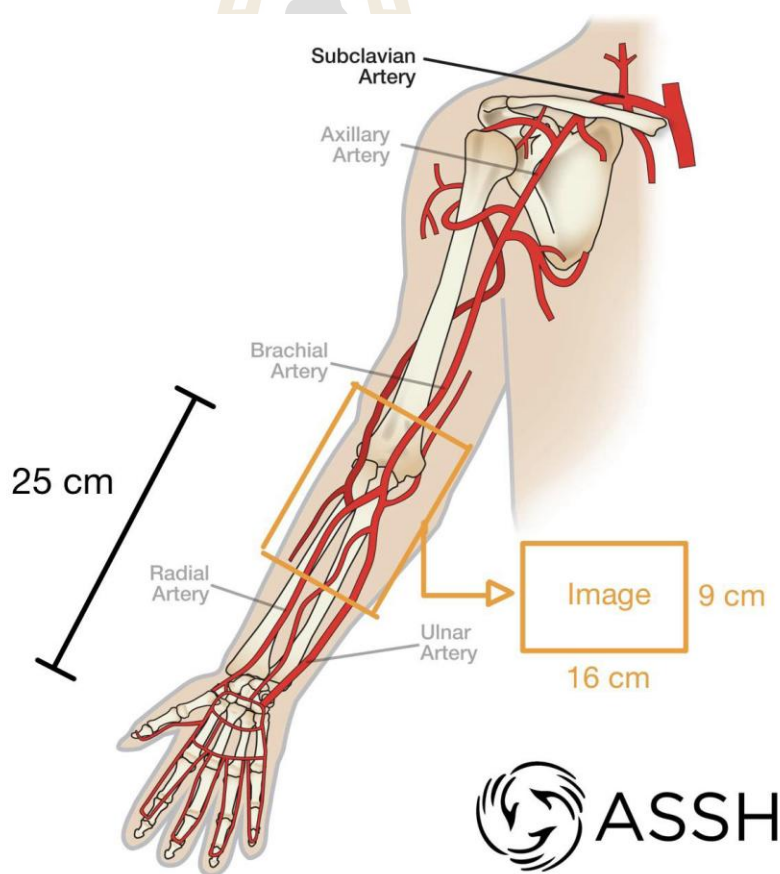


บทที่ 2. ทฤษฎี แนวคิด การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องมือช่วยระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำ (Vein Finder) โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

2.1 กายวิภาคศาสตร์และสรีรวิทยาของหลอดเลือดดำ (Vein Anatomy and Physiology)

หลอดเลือดดำมีบทบาทสำคัญในระบบไหลเวียนโลหิตของร่างกาย โดยมีลักษณะเฉพาะและหน้าที่ที่แตกต่างจากหลอดเลือดแดงอย่างชัดเจน โดยทั่วไปหลอดเลือดดำจะมีผนังบางกว่าหลอดเลือดแดง มีความยืดหยุ่นสูง และมีลิ้น (venous valves) อยู่ภายในเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนกลับ ลักษณะทางกายวิภาคเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการดำเนินการทางการแพทย์ต่างๆ เช่น การเจาะเลือด การให้สารน้ำ หรือการฉีดยาเข้าสู่ระบบหลอดเลือดดำ (intravenous administration)



รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งเส้นเลือดที่ต้องการถ่ายภาพ

จากการศึกษาของ Kachlik และคณะ (2010) ที่ได้สำรวจโครงสร้างทางกายวิภาคของหลอดเลือดดำบริเวณต้นแขนและข้อพับแขน พบว่าหลอดเลือดดำที่นิยมใช้ในการเจาะเลือดส่วนใหญ่ ได้แก่ Median cubital vein, Cephalic vein และ Basilic vein โดย Median cubital vein เป็นหลอดเลือดที่พบเห็นได้บ่อยและมีขนาดใหญ่พอสมควรในผู้ใหญ่ จึงเป็นตำแหน่งหลักที่บุคลากรทางการแพทย์เลือกใช้ในการเจาะเลือด อย่างไรก็ตาม การศึกษายังชี้ให้เห็นว่าความแปรปรวนของตำแหน่งและขนาดหลอดเลือดดำในแต่ละบุคคลส่งผลโดยตรงต่อระดับความยากง่ายในการเจาะเลือด

นอกจากนี้ Moore และ Dalley (2017) ระบุว่าความเข้าใจในลักษณะทางสรีรวิทยาของหลอดเลือดดำมีความสำคัญอย่างยิ่งในการป้องกันความผิดพลาดและลดภาวะแทรกซ้อนจากการเจาะเลือด เช่น การเจาะผิดตำแหน่ง การเกิดรอยฟกช้ำ (hematoma) หรือการบาดเจ็บต่อเนื้อเยื่อข้างเคียง โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยที่มีหลอดเลือดดำขนาดเล็กหรืออยู่ลึกจากผิวหนัง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ หรือผู้ที่มีโรคประจำตัวต่างๆ

งานวิจัยของ Yammine และ Eric (2017) ได้วิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับรูปแบบและการแปรปรวนของหลอดเลือดดำที่ตำแหน่งข้อพับแขน (antecubital fossa) ในประชากรทั่วไป พบว่า Median cubital vein มีอัตราการพบสูงสุดถึง 60–70% แต่ก็พบหลอดเลือดดำที่แตกต่างไปจากปกติ (variations) ได้อีกหลายรูปแบบ เช่น การมีเส้นเลือดดำที่แยกออกจากกันเป็นสองหรือสามเส้น (duplication หรือ triplication) หรือมีหลอดเลือดดำที่เชื่อมต่อกันในลักษณะที่ผิดปกติ ซึ่งความแปรปรวนดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อการประสบความสำเร็จในการเจาะเลือด

ในขณะที่ Snelling และคณะ (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางกายวิภาคของลิ้นในหลอดเลือดดำ (venous valves) และชี้ให้เห็นว่า ลิ้นในหลอดเลือดดำมีผลต่อการไหลเวียนโลหิตอย่างมาก โดยเฉพาะในการป้องกันเลือดไหลย้อนกลับและช่วยในการส่งเลือดกลับสู่หัวใจ นอกจากนี้ยังพบว่าการเจาะเลือดบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งของลิ้นหลอดเลือดดำ อาจเพิ่มความเสี่ยงต่อภาวะแทรกซ้อน เช่น การอักเสบ (phlebitis) หรือการเกิดลิ่มเลือด (thrombosis) ได้ง่ายกว่าตำแหน่งอื่นๆ

การศึกษาข้างต้นเน้นย้ำถึงความสำคัญของการมีความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับกายวิภาคและสรีรวิทยาของหลอดเลือดดำ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเจาะเลือด ลดภาวะแทรกซ้อน และเพิ่มความปลอดภัยในการรักษาทางการแพทย์

2.2 หลักการถ่ายภาพด้วยแสงใกล้อินฟราเรดทางการแพทย์ (Near-Infrared Imaging: NIR Imaging)

การถ่ายภาพด้วยแสงใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared Imaging: NIR Imaging) เป็นเทคนิคทางแสงที่ใช้แสงในช่วงคลื่น 700–950 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ถัดจากขอบเขตที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ (visible spectrum)

และมีความสามารถในการทะลุผ่านเนื้อเยื่ออ่อนของร่างกายได้ดีกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า เช่น แสงสีแดง หรือแสงขาวธรรมดา

แสงใกล้อินฟราเรดสามารถทะลุผ่านชั้นหนังกำพร้าและหนังแท้ได้ในระดับที่เพียงพอสำหรับการแสดงภาพของโครงสร้างหลอดเลือดดำใต้ผิวหนัง โดยเฉพาะฮีโมโกลบินชนิด deoxyhemoglobin ในหลอดเลือดดำจะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าบริเวณเนื้อเยื่อรอบข้าง ทำให้หลอดเลือดดำปรากฏเป็นส่วนที่มีความเข้มของแสงต่ำกว่าภาพโดยรวม (ดูเหมือนสีเข้ม) บนภาพที่ได้จากกล้องตรวจจับ NIR

กลไกพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วย NIR ประกอบด้วย 2 รูปแบบหลัก ได้แก่:

1. การสะท้อนกลับของแสง (Reflectance-Based NIR Imaging)

แหล่งกำเนิดแสงจะฉายแสง NIR ไปยังพื้นผิวของผิวหนัง แสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยเนื้อเยื่อและหลอดเลือด ขณะที่ส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมายังตัวตรวจจับภาพ เช่น กล้อง CMOS หรือ CCD ที่ไวต่อช่วงคลื่น NIR โดยภาพที่ได้จะแสดงบริเวณหลอดเลือดเป็นโซนสีเข้ม เนื่องจากการดูดกลืนแสงมาก

2. การส่องผ่านแสง (Transillumination Imaging)

แสง NIR ถูกฉายจากด้านหนึ่งของอวัยวะ (เช่น นิ้วมือ) แล้วตรวจจับแสงที่ทะลุผ่านมายังอีกด้าน เทคนิคนี้มักใช้กับส่วนของร่างกายที่บางหรือโปร่งแสง เช่น นิ้วมือหรือใบหู และสามารถให้ภาพที่มีความคมชัดของหลอดเลือดในลักษณะแตกแขนงได้ชัดเจน

การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ของ NIR Imaging

ในทางคลินิก NIR Imaging ได้ถูกนำไปใช้ในหลายด้าน เช่น:

- **การระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำ (Vein Visualization):**

ใช้ในเครื่อง Vein Finder เพื่อช่วยให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถเจาะเลือดได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในผู้ป่วยเด็ก ผู้สูงอายุ หรือผู้ที่มีหลอดเลือดฝงลึก

- **การตรวจสอบการไหลเวียนของเลือด (Blood Perfusion Imaging):**

สำหรับผู้ป่วยเบาหวานหรือแผลเบาหวานที่ปลายเท้า NIR สามารถใช้ติดตามความสามารถในการไหลเวียนของเลือดในบริเวณแผล

- **การประเมินเนื้อเยื่อสมองหรือกล้ามเนื้อ (Functional NIR Spectroscopy – fNIRS):**

ใช้ในการศึกษาการทำงานของสมองโดยไม่ต้องผ่าตัดหรือรบกวนร่างกาย

ข้อดีของ NIR Imaging

- ไม่ต้องสัมผัสผิวหนังโดยตรง (non-contact)
- ปลอดภัยต่อร่างกายเพราะใช้แสงในระดับพลังงานต่ำ
- สามารถแสดงภาพได้แบบเรียลไทม์
- ใช้งานง่ายและไม่ต้องใช้สารเคมีหรือสารเรืองแสงช่วย

Chen et al. (2018) ได้พัฒนาอุปกรณ์ Vein Detection โดยใช้กล้อง CMOS และแหล่งกำเนิดแสง NIR ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร พบว่าระบบสามารถตรวจจับหลอดเลือดดำได้อย่างแม่นยำในระดับความลึกประมาณ 3–5 มิลลิเมตร จากผิวหนัง ซึ่งเป็นระยะที่ตรงกับตำแหน่งหลอดเลือดดำส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเจาะเลือด

Lam et al. (2020) ศึกษาการใช้ NIR Imaging ในผู้ป่วยที่มีโรคอ้วนและพบว่าประสิทธิภาพของการมองเห็นหลอดเลือดด้วยเทคโนโลยีนี้ดีกว่าการมองด้วยตาเปล่าในทุกกลุ่ม BMI โดยเฉพาะในผู้ที่มีค่าดัชนีมวลกายมากกว่า 30

Xu et al. (2022) ทดลองใช้อุปกรณ์ NIR แบบพกพาร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลภาพแบบ Deep Learning เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุหลอดเลือดดำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถลดเวลาในการเจาะเลือดลงเฉลี่ย 35% ต่อราย และลดอัตราการเจาะผิดพลาดได้อย่างมีนัยสำคัญ

2.3 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing)

การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) เป็นกระบวนการที่ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์และอัลกอริธึมคอมพิวเตอร์ในการแปลงภาพดิจิทัลที่ได้จากกล้องหรืออุปกรณ์ตรวจจับภาพ ให้สามารถแสดงผลหรือวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในงานทางการแพทย์ เช่น การตรวจจับหลอดเลือดดำ (vein detection) การประมวลผลภาพช่วยให้สามารถเพิ่มคุณภาพภาพ แยกแยะโครงสร้างทางกายวิภาค และเน้นบริเวณที่ต้องการให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการสนับสนุนการวินิจฉัยและการปฏิบัติงานของบุคลากรทางการแพทย์

การประมวลผลภาพดิจิทัลคือการนำข้อมูลภาพที่ได้จากอุปกรณ์ดิจิทัลมาวิเคราะห์เพื่อเพิ่มคุณภาพและดึงข้อมูลที่จำเป็น โดยเทคนิคหลักที่นำมาใช้ประกอบด้วย

- **Image Enhancement** เช่น Histogram Equalization และ Contrast Stretching เพื่อเพิ่มความคมชัดของภาพ
- **Edge Detection** เช่นวิธี Canny หรือ Sobel เพื่อหาขอบของหลอดเลือดดำ

- **Image Segmentation** เช่น Thresholding หรือ Machine Learning เพื่อแยกหลอดเลือดดำออกจากเนื้อเยื่อโดยรอบ

เทคนิคเหล่านี้จำเป็นอย่างยิ่งต่อการสร้างซอฟต์แวร์ที่ช่วยระบุหลอดเลือดดำอย่างมีประสิทธิภาพ Zhou et al. (2019) พัฒนาอัลกอริธึม vein enhancement โดยใช้ Adaptive Histogram Equalization และ Morphological Operations ในระบบ vein imaging ที่ใช้ในห้องฉุกเฉิน พบว่าสามารถเพิ่มค่าความคมชัดของหลอดเลือด (Vein Contrast Index) ได้กว่า 40% เทียบกับภาพต้นฉบับ

Nguyen & Lee (2021) ศึกษาการใช้ Deep Learning ร่วมกับ Adaptive Thresholding ในการแยกหลอดเลือดจากภาพ NIR ในผู้ป่วยสูงอายุ พบว่าการผสมผสานวิธีดั้งเดิมกับเทคนิคสมัยใหม่ช่วยลด False Positives ได้อย่างชัดเจน Park et al. (2022) ใช้ Median Filtering และ Gaussian Blurring เพื่อลด noise ในภาพ NIR vein imaging แล้วจึงใช้ CNN วิเคราะห์ต่อ พบว่า preprocessing มีผลอย่างมากต่อความแม่นยำของโมเดล AI

2.4 เทคโนโลยีภาพเสมือนเสริม (Augmented Reality: AR) ในงานการแพทย์

เทคโนโลยีภาพเสมือนเสริม หรือที่เรียกกันว่า **Augmented Reality (AR)** คือเทคโนโลยีที่ผสมผสานข้อมูลเสมือน เช่น ภาพสามมิติ ข้อความ หรือกราฟิก เข้ากับภาพจากโลกจริงในลักษณะเรียลไทม์ โดยผู้ใช้งานสามารถมองเห็นสภาพแวดล้อมจริงพร้อมข้อมูลเสริมผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น สมาร์ทโฟน แว่นตา AR หรือโปรเจกเตอร์ เทคโนโลยี AR แตกต่างจากเทคโนโลยี Virtual Reality (VR) ที่สร้างโลกเสมือนทั้งหมดขึ้นมา เพราะ AR จะช่วยเสริมข้อมูลที่สัมพันธ์กับบริบทจริงโดยตรง ไม่แยกออกจากโลกภายนอกอย่างสิ้นเชิง การประยุกต์ใช้ AR ในงานด้านการแพทย์ได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะในด้านการฝึกอบรมทางคลินิก การผ่าตัดด้วยระบบนำทาง การให้ข้อมูลทางกายวิภาคแก่ผู้ป่วย และที่สำคัญคือ การช่วยระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำในขั้นตอนการเจาะเลือด

การใช้ AR ในระบบ Vein Finder นั้น อาศัยกล้องอินฟราเรดในการจับภาพโครงสร้างหลอดเลือดใต้ผิวหนัง ซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า จากนั้นภาพจะถูกประมวลผลด้วยเทคนิคประมวลผลภาพ เช่น การแปลงภาพระดับสีเทา การ threshold และการประมวลผลทางสัญญาณวิทยา เพื่อให้ได้ภาพของหลอดเลือดดำอย่างชัดเจน หลังจากนั้นระบบจะสร้างภาพจำลองของหลอดเลือดในรูปแบบดิจิทัล และฉายภาพนั้นกลับลงบนผิวหนังในตำแหน่งที่ตรงกับหลอดเลือดจริงผ่านโปรเจกเตอร์ ทำให้เจ้าหน้าที่สามารถเจาะเลือดได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ลดจำนวนครั้งที่ต้องเจาะซ้ำ ลดความวิตกกังวลของผู้ป่วย และเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีหลอดเลือดฝงลึก เด็ก หรือผู้สูงอายุ

มีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ AR ในงานด้านนี้ เช่น งานของ Das และคณะ (2021) ที่พัฒนาระบบ AR สำหรับช่วยแสดงภาพหลอดเลือดดำบนแขนผู้ป่วยโดยตรง ผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์สามารถเพิ่มความแม่นยำในการเจาะเลือด และลดระยะเวลาในการเตรียมการได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Yamamoto และคณะ (2019) ได้ทำการทดลองระบบฉายภาพหลอดเลือดจริงในคลินิก และพบว่าผู้ป่วยมีความพึงพอใจสูงขึ้น และรู้สึกเจ็บน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน นอกจากนี้ Chaudhary และ Wang (2020) ยังได้พัฒนาแอปพลิเคชัน AR สำหรับการฝึกอบรมนักศึกษาแพทย์ โดยใช้ภาพหลอดเลือดจำลองที่แสดงบนแขนเทียม ทำให้ผู้เรียนมีความมั่นใจและแม่นยำในการฝึกปฏิบัติมากขึ้น

2.5 งานศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related Studies and Research)

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจจับและระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำ (Vein Detection) โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยีภาพอินฟราเรด (Infrared Imaging) ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing) และเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเจาะเลือดและการรักษาทางการแพทย์อย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างงานวิจัยที่น่าสนใจมีดังนี้:

Juric และคณะ (2019) ศึกษาการใช้แสงใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared: NIR) ในการช่วยระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำบริเวณแขนของผู้ป่วยในห้องฉุกเฉิน พบว่าเทคนิคนี้ช่วยให้สามารถลดระยะเวลาและจำนวนครั้งในการเจาะเลือดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มอัตราความสำเร็จในการเจาะเลือดมากกว่า 80% เมื่อเทียบกับการเจาะเลือดแบบปกติ นอกจากนี้ยังช่วยลดความวิตกกังวลของผู้ป่วยอีกด้วย

Liu และคณะ (2020) ได้พัฒนาเครื่อง Vein Finder ขนาดพกพาโดยใช้กล้อง CMOS และเทคนิค Image Processing ในการจำแนกหลอดเลือดดำ ซึ่งการทดลองในกลุ่มผู้ป่วย 50 รายที่มีลักษณะหลอดเลือดดำที่แตกต่างกัน พบว่าความแม่นยำในการระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำสูงถึง 92.5% และมีการตอบสนองต่อผู้ป่วยในแง่บวกต่อประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ช่วยลดความรู้สึกเจ็บปวดและการเจาะเลือดซ้ำหลายครั้ง

Das และคณะ (2021) ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Augmented Reality (AR) ร่วมกับระบบตรวจจับภาพ NIR โดยระบบจะฉายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ลงบนผิวหนังผู้ป่วย ผลการศึกษาระบุว่าการใช้ AR ช่วยลดข้อผิดพลาดในการเจาะเลือดได้ถึง 30% และยังสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมเจาะเลือดลงได้เฉลี่ย 40 วินาทีต่อผู้ป่วยหนึ่งราย รวมทั้งยังลดระดับความวิตกกังวลในกลุ่มผู้ป่วยเด็กและผู้สูงอายุได้อย่างมีนัยสำคัญ

Alfano และคณะ (2022) พัฒนาระบบตรวจจับหลอดเลือดดำแบบไม่สัมผัส (Non-contact Vein Detection) โดยใช้กล้องอินฟราเรดร่วมกับเทคนิค Adaptive Histogram Equalization และ Morphological Filtering เพื่อเพิ่มคุณภาพภาพหลอดเลือดดำ ผลจากการทดลองในผู้ป่วยจริงจำนวน 60 ราย พบว่าระบบมีความแม่นยำในการแสดงตำแหน่งหลอดเลือดสูงกว่า 95% ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการเจาะผิดตำแหน่ง และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานกับผู้ป่วยที่มีภาวะหลอดเลือดเปราะหรือหลอดเลือดดำขนาดเล็ก

Chen และคณะ (2022) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการตรวจจับหลอดเลือดดำต่างๆ เช่น NIR Imaging, Ultrasound-guided และ Traditional palpation โดยผลการศึกษาพบว่า NIR Imaging เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในกลุ่มผู้ป่วยที่มีปัจจัยเสี่ยงต่อการเจาะเลือดที่ลำบาก เช่น โรคอ้วน โรคเบาหวาน และผู้สูงอายุ ซึ่งวิธี NIR Imaging มีอัตราความสำเร็จในการเจาะเลือดสูงถึง 90% ในขณะที่วิธี Ultrasound-guided มีอัตราความสำเร็จอยู่ที่ 80% และวิธีแบบ Traditional palpation มีอัตราความสำเร็จอยู่ที่ 70% เท่านั้น

Tsai และคณะ (2023) พัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับหลอดเลือดดำที่ผสมผสานเทคโนโลยี NIR และ AR โดยมีการประยุกต์ใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เพื่อช่วยวิเคราะห์ภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ อุปกรณ์ดังกล่าวได้รับการทดสอบในโรงพยาบาลกว่า 10 แห่ง โดยพบว่ามีความแม่นยำสูงถึง 97% และสามารถลดระยะเวลาในการเตรียมการเจาะเลือดได้ถึง 50% เมื่อเทียบกับการใช้อุปกรณ์รุ่นก่อนหน้าที่ไม่ได้ใช้ AI ช่วยวิเคราะห์

จากงานวิจัยข้างต้น พบว่าเทคโนโลยี NIR Imaging ร่วมกับ Image Processing และ AR มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ทางการแพทย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับตำแหน่งหลอดเลือดดำ รวมถึงช่วยลดปัญหาและข้อจำกัดที่พบจากการใช้วิธีการเจาะเลือดแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้ยังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศไทย เนื่องจากมีต้นทุนที่สูงและต้องพึ่งพาการนำเข้าเป็นหลัก ดังนั้นงานวิจัยปัจจุบันจึงมีเป้าหมายในการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำ สามารถผลิตและใช้งานได้จริงในบริบทของไทย เพื่อช่วยให้โรงพยาบาลและสถานพยาบาลในชุมชนสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเพิ่มคุณภาพการรักษายาบาลได้อย่างทั่วถึง

2.6 ข้อจำกัดและปัญหาของวิธีการเก็บตัวอย่างเลือดแบบปัจจุบันที่ใช้สายรัดแขน (Conventional Tourniquet Method)

ในปัจจุบัน วิธีการเก็บตัวอย่างเลือดที่แพร่หลายที่สุดในสถานพยาบาลทั่วไปคือการใช้สายรัดต้นแขน (Tourniquet) เพื่อสร้างแรงดันและทำให้หลอดเลือดดำโป่งขึ้นอย่างชั่วคราว จากนั้นเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์จะทำการดูดด้วยตาเปล่าและการคลำเพื่อระบุตำแหน่งหลอดเลือดก่อนจะทำการเจาะเลือดโดยตรง วิธีนี้แม้จะเป็นมาตรฐานที่ใช้มาอย่างยาวนาน แต่ก็มีข้อจำกัดและความท้าทายหลายประการ โดยเฉพาะในผู้ป่วยบางกลุ่ม เช่น

เด็ก ผู้สูงอายุ ผู้ที่มีภาวะขาดน้ำ (dehydration) หรือผู้ที่มีโรคประจำตัวเรื้อรังอย่างโรคอ้วน หรือภาวะหลอดเลือดดำบกพร่อง (chronic venous insufficiency) ซึ่งมักมีลักษณะหลอดเลือดดำที่มองเห็นยาก มีขนาดเล็ก หรืออยู่ลึกลงไปใต้ชั้นกล้ามเนื้อ

หนึ่งในปัญหาสำคัญของวิธีนี้คือความไม่แม่นยำในการระบุตำแหน่งหลอดเลือด โดยเฉพาะเมื่อใช้เพียงสายตาและการคลำ ซึ่งอาจทำให้เกิดการเจาะผิดพลาด บาดเจ็บต่อเนื้อเยื่อข้างเคียง เกิดรอยฟกช้ำ (hematoma) หรือเจาะหลายครั้ง (multiple attempts) ส่งผลต่อความไม่สบายใจของผู้ป่วย และอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อภาวะแทรกซ้อน เช่น การติดเชื้อหรือการเกิดลิ่มเลือดในหลอดเลือดดำ นอกจากนี้ การใช้สายรัดที่แน่นหรือทิ้งไว้นานเกินไปอาจกระตุ้นให้เกิดการรัดตัวของหลอดเลือด (vasoconstriction) และทำให้การไหลเวียนของเลือดเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อความแม่นยำของผลตรวจทางห้องปฏิบัติการ

จากรายงานการศึกษาทางคลินิกหลายชิ้น พบว่าอัตราการเจาะเลือดไม่สำเร็จในการพยายามครั้งแรก (first-attempt failure) อาจสูงถึง 20–30% โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีหลอดเลือดไม่เด่นชัด ซึ่งนอกจากจะกระทบต่อคุณภาพการดูแลรักษาแล้ว ยังเพิ่มภาระงานและความเครียดแก่บุคลากรทางการแพทย์อีกด้วย งานวิจัยของ Infusion Nurses Society (INS, 2020) ยังชี้ให้เห็นว่าการพึ่งพาเพียงการใช้สายรัดแขนในการเจาะเลือด อาจไม่เพียงพอในสถานการณ์ที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น การให้สารน้ำทางหลอดเลือดดำในผู้ป่วยวิกฤต

นอกจากนี้ การใช้สายรัดแขนยังอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของตัวอย่างเลือด โดยการรัดที่นานเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะ hemoconcentration ซึ่งทำให้ผลการตรวจเลือด เช่น ค่าความเข้มข้นของเซลล์เม็ดเลือด หรือค่าอิเล็กโทรไลต์ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง ทำให้การวินิจฉัยคลาดเคลื่อนได้

ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถเข้ามาทดแทนหรือสนับสนุนการเจาะเลือดแบบเดิมให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเทคโนโลยีการถ่ายภาพหลอดเลือด เช่น Near-Infrared Vein Imaging หรือระบบ AR-based Vein Finder ซึ่งสามารถลดความผิดพลาดในการเจาะเลือด และเพิ่มความปลอดภัยและความสะดวกสบายให้แก่ผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์อย่างเป็นรูปธรรม

2.7 หลักการทำงานของเทคโนโลยี Vein Finder ด้วยแสง NIR

เทคโนโลยี Vein Finder ที่ใช้แสงใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared: NIR) เป็นระบบถ่ายภาพที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อตรวจจับและแสดงตำแหน่งของหลอดเลือดดำใต้ผิวหนังอย่างแม่นยำ โดยเฉพาะในกรณีที่หลอดเลือดมีขนาดเล็กหรืออยู่ลึก ทำให้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การใช้แสง NIR ช่วยให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถมองเห็นโครงสร้างหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์โดยไม่ต้องพึ่งการคลำหาหลอดเลือดแบบเดิม ซึ่งมักมีข้อจำกัดในผู้ป่วยบางกลุ่ม เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ หรือผู้ที่มีภาวะหลอดเลือดดำฝก

หลักการทำงานของเทคโนโลยี Vein Finder ด้วยแสง NIR เริ่มจากการฉายแสง NIR ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 750–950 นาโนเมตร ลงบนผิวหนังของผู้ป่วย แสงในช่วงนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทะลุผ่านชั้นหนังกำพร้าและหนังแท้ได้ดี แต่จะถูกดูดกลืนอย่างมีนัยสำคัญโดยฮีโมโกลบินในเลือด โดยเฉพาะ deoxyhemoglobin ซึ่งพบได้มากในหลอดเลือดดำ เมื่อแสง NIR สะท้อนกลับจากชั้นใต้ผิวหนัง กล้องที่ไวต่อแสง NIR (เช่น กล้อง CMOS หรือ CCD ที่ปรับแต่งมาโดยเฉพาะ) จะตรวจจับภาพสะท้อนนั้น และสร้างภาพของหลอดเลือดดำในลักษณะที่มีความเข้มแสงแตกต่างจากเนื้อเยื่อโดยรอบ โดยหลอดเลือดดำจะปรากฏเป็นเส้นสีเข้มกว่าบริเวณอื่น

ระบบ Vein Finder ส่วนใหญ่ใช้หลักการสร้างภาพแบบ Reflectance Imaging โดยวางกล้องและแหล่งกำเนิดแสงไว้ด้านเดียวกัน เพื่อให้สามารถตรวจจับแสงที่สะท้อนกลับจากผิวหนังได้โดยตรง ในบางกรณีอาจมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Transillumination โดยส่องแสงทะลุผ่านชั้นส่วนของร่างกาย เช่น นิ้ว หรือมือ แล้วเก็บภาพจากอีกด้านหนึ่ง ซึ่งให้ความคมชัดของหลอดเลือดในลักษณะแตกแขนงที่ชัดเจนขึ้น

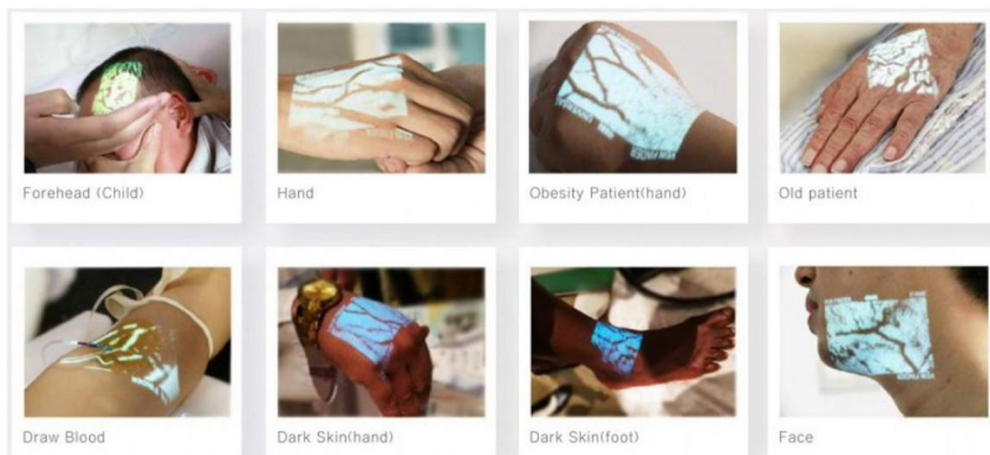
หลังจากได้ภาพดิบจากกล้องแล้ว ระบบจะทำการประมวลผลภาพด้วยเทคนิคทางดิจิทัล เช่น การเพิ่มความเปรียบต่าง (contrast enhancement), การกรองสัญญาณรบกวน (noise filtering), การแปลงภาพเป็นไบนารี (thresholding), และการปรับขนาดหรือลบฉากหลัง (segmentation and morphological processing) เพื่อให้ภาพหลอดเลือดชัดเจนที่สุด จากนั้นภาพหลอดเลือดดำที่ผ่านการประมวลผลจะถูกแสดงผลผ่านหน้าจอหรือในกรณีของระบบที่พัฒนาเทคโนโลยี AR ก็จะมีการฉายภาพซ้อนกลับลงบนผิวหนังผู้ป่วยในตำแหน่งที่ตรงกับหลอดเลือดจริง



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างภาพ การค้นหาหลอดเลือดดำระยะใกล้ด้วย Near-Infrared Vein Finder

นอกจากความสามารถในการช่วยเหลือในขั้นตอนการเจาะเลือด เทคโนโลยีนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการให้สารน้ำ การฉีดยา หรือการตรวจวินิจฉัยหลอดเลือดดำที่ผิดปกติได้อีกด้วย ข้อดีสำคัญของ Vein Finder ด้วยแสง NIR คือความปลอดภัย ไม่รุกราน (non-invasive) และไม่มีการใช้รังสีที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับผู้ป่วยหลากหลายกลุ่มโดยไม่ก่อให้เกิดอาการไม่สบาย

ตัวอย่างการใช้งานในทางคลินิกแสดงให้เห็นว่า การใช้เทคโนโลยีนี้สามารถลดจำนวนครั้งในการเจาะเลือด ลดเวลาในการค้นหาหลอดเลือด และลดภาวะแทรกซ้อนจากการเจาะผิดพลาดได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในสถานการณ์ฉุกเฉินที่ต้องดำเนินการอย่างรวดเร็วและแม่นยำ



รูปที่ 2.3 การตรวจจับเส้นเลือดดำที่บริเวณต่างๆ

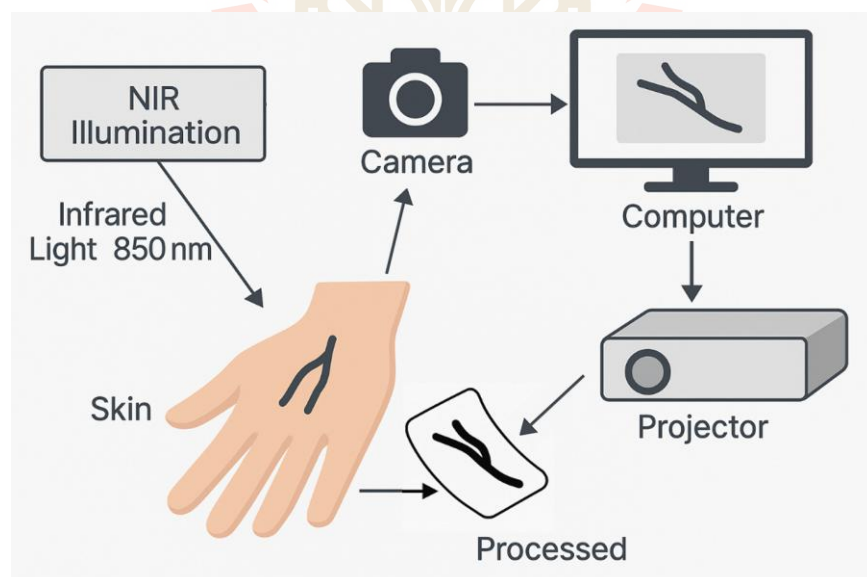
แหล่งที่มา <https://www.rehabmart.com/product/veinsight-vs500-nearinfrared-vein-finder-49088.html>

บทที่ 3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การถ่ายภาพด้วยแสงใกล้อินฟราเรด (NIR Imaging)

การถ่ายภาพด้วยแสงอินฟราเรดนั้นใช้หลักการอาศัยคุณสมบัติของรังสีอินฟราเรดและการสะท้อนกลับของแสง การแสดงภาพของหลอดเลือดดำให้ชัดเจนจะเกิดขึ้นได้เมื่อส่องแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นเฉพาะเท่านั้น หากไม่ได้ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสม แสงจะไม่สามารถทะลุผ่านชั้นผิวหนังเข้าไปยังหลอดเลือดดำที่อยู่ลึกลงไปเพื่อสะท้อนกลับมาได้ การถ่ายภาพด้วยแสงใกล้อินฟราเรด (NIR) เป็นวิธีการที่ใช้იმემจากแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 700-950 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่ตามนุษย์และกล้องถ่ายภาพปกติไม่สามารถมองเห็นได้

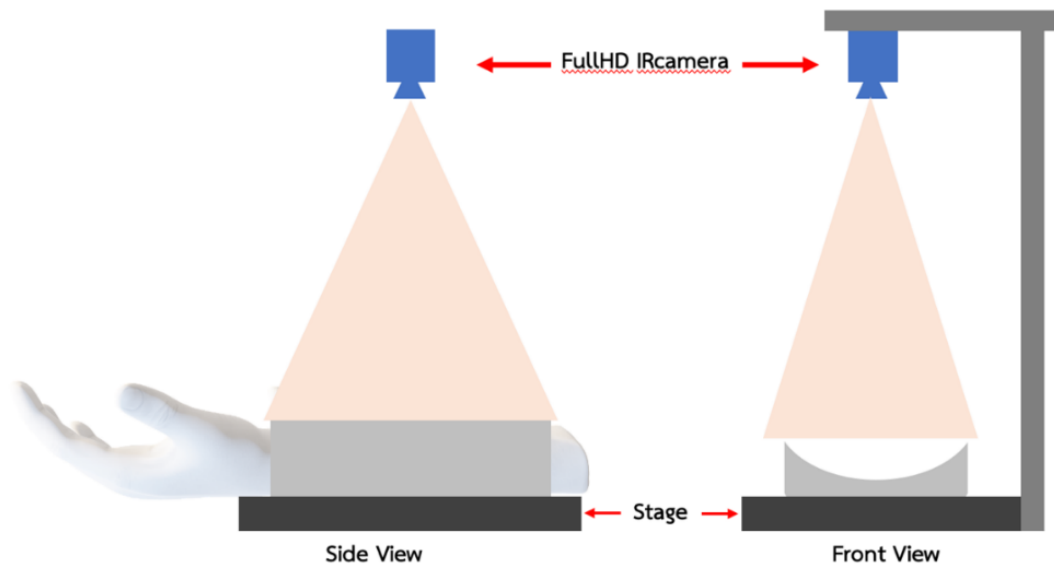
อุปกรณ์ดังกล่าวทำงานโดยการฉายแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นประมาณ 850 นาโนเมตร ลงบนผิวหนัง จากนั้นกล้องจะเก็บภาพของบริเวณที่ถูกส่องด้วยแสงอินฟราเรด โดยบริเวณหลอดเลือดดำจะมีลักษณะสีเข้มกว่าบริเวณเนื้อเยื่อโดยรอบ ภาพที่ได้จะถูกส่งไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ แล้วฉายกลับลงบนผิวหนังในตำแหน่งเดิมที่ถ่ายภาพไว้



รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบ NIR imaging

3.2 การติดตั้งระบบ (System Setup)

ระบบที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (mini-PC) พร้อมกล้อง Basler Ace เพื่อใช้ในการบันทึกภาพ ประมวลผล และจัดเก็บข้อมูล โดยบริเวณที่สนใจศึกษา (Region of Interest: ROI) คือบริเวณปลายแขน (forearm) ในขั้นตอนการบันทึกภาพ จะรักษาระยะห่างระหว่างกล้องกับบริเวณแขนไว้ที่ประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ความละเอียดภาพที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงโครงสร้างของต้นแบบโดยรวม

พื้นที่ ROI จะถูกส่องสว่างด้วยแสงใกล้อินฟราเรด (NIR) ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร โดยแหล่งกำเนิดแสง NIR และกล้องถูกติดตั้งไว้เคียงข้างกัน เพื่อให้การส่องสว่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นภาพหลุดเลือดดำที่ผ่านการประมวลผลแล้วจะถูกฉายกลับไปยังตำแหน่ง ROI โดยใช้โปรเจกเตอร์ยี่ห้อ KODAK

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีรายละเอียดดังนี้:

- กล้อง: Basler ace acA1920-150um
- เลนส์กล้อง: Basler Lens C23-1620-5M-P
- โพลาริเซอร์: LPVISE100-A Ø1" Linear Polarizer
- แผ่นกรองแสง: FBH850-10 Hard-Coated Bandpass Filter
- โปรเจกเตอร์: KODAK LUMA 400 Portable Smart Projector



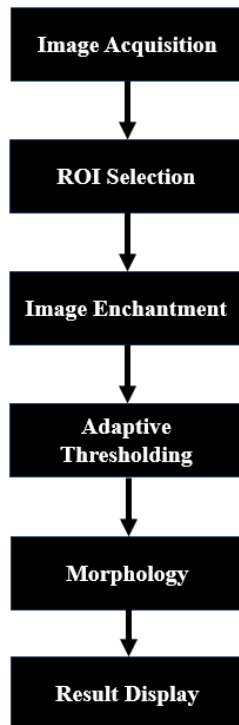
รูปที่ 3.3 ข้อมูลจำเพาะของระบบ (a) กล้อง Basler Ace (b) เลนส์กล้อง Basler (c) โพลาริเซออร์ (d) แผ่นกรองแสงแบนด์พาส (f) โปรเจกเตอร์ KODAK

3.3 ระบบตรวจจับหลอดเลือดดำ (Vein Detection System)

ขั้นตอนแรกของการตรวจจับหลอดเลือดดำคือ การเก็บภาพ (Image acquisition) ซึ่งจำเป็นต้องมีระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างกล้องกับบริเวณเป้าหมาย (ROI) รวมถึงการให้แสงสว่างที่เพียงพอ จากนั้นจะทำการเลือกบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านกระบวนการกำหนดขอบเขตภาพ (Masking) โดยใช้วิธี Global thresholding สร้างหน้ากาก (mask) จากภาพสีที่ถูกแปลงเป็นภาพระดับสีเทา (grayscale) ก่อนแล้วจึงนำไปประมวลผลต่อไป

ขั้นตอนต่อมาคือ การเพิ่มคุณภาพภาพ (Image enhancement) โดยเป็นขั้นตอนที่ปรับปรุงรายละเอียดที่ถูกซ่อนอยู่หรือเน้นจุดที่สนใจเป็นพิเศษ ทำให้ภาพมีคุณภาพเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละภาพ จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอน Thresholding ซึ่งเป็นการเปลี่ยนภาพระดับสีเทาให้กลายเป็นภาพไบนารี (binary image) โดย Adaptive thresholding จะช่วยแยกบริเวณที่เป็นหลอดเลือดดำให้ปรากฏชัดเจนเป็นพื้นที่สว่าง (ค่าเป็น 1) ส่วนพื้นหลังเป็นพื้นที่มืด (ค่าเป็น 0) และแสดงภาพที่ได้ ออกบนจอคอมพิวเตอร์

ต่อจากนั้นจะใช้ กระบวนการทางสัณฐานวิทยา (Morphological operations) เพื่อลดสัญญาณรบกวน และกำจัดจุดรบกวนขนาดเล็กที่ไม่ต้องการออกจากภาพ ท้ายที่สุด ภาพที่ผ่านการประมวลผลทั้งหมดแล้วจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของเฟรมภาพ และแสดงผลออกมาสู่ผู้ใช้งาน



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงระบบการตรวจจับหลอดเลือดดำ

3.3.1 การเก็บข้อมูลภาพ (Image Acquisition)

กระบวนการเริ่มต้นจากการบันทึกวิดีโอเพื่อให้เห็นโครงสร้างหลอดเลือดดำอย่างชัดเจน จากนั้นจึงทำการแยกส่วนภาพ (Segmentation) เพื่อแยกพื้นที่ที่สนใจ (Region of Interest: ROI) ออกมา ก่อนจะเข้าสู่ขั้นตอนเพิ่มคุณภาพของภาพหลอดเลือดดำ โดยขั้นตอนทั้งหมดนี้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Python ร่วมกับไลบรารี pypylon

3.3.2 การเลือกบริเวณที่สนใจ (ROI Selection)

ขั้นตอนนี้ใช้เทคนิคการตัดส่วนภาพ (Cropping Segmentation) โดยใช้อัลกอริทึมที่แยกพื้นหลังและพื้นที่หลอดเลือดดำออกจากกัน หลังจากนั้นจะทำการปรับขนาดภาพให้มีความละเอียดที่ 1920×1080 พิกเซล เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปเพิ่มคุณภาพภาพในขั้นตอนต่อไป

3.3.3 การเพิ่มคุณภาพภาพ (Image Enhancement)

มีการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพหลายขั้นตอนเพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพหลุดเล็ดดำ โดยเริ่มจากการแปลงภาพจากระบบสี RGB เป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale) ด้วยสูตรดังต่อไปนี้:

$$\text{Grayscale (Y)} = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$$

หลังจากนั้นจึงใช้ฟิลเตอร์มัธยฐาน (Median filter) ซึ่งเป็นการปรับปรุงภาพโดยการตรวจสอบค่าพิกเซลที่อยู่รอบๆ ภายในกรอบที่กำหนด และแทนที่ค่าพิกเซลเดิมด้วยค่ามัธยฐาน (median) ของพิกเซลในกรอบนั้น ขั้นตอนนี้จะช่วยเน้นโครงสร้างของหลุดเล็ดดำและลดสัญญาณรบกวนในภาพ โดยสามารถแสดงทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้:

$$y_{ij} = \text{med}(\{x_{uv} \mid x_{uv} \in N_{ij}\})$$

โดยที่ y_{ij} คือค่าพิกเซลใหม่ที่ตำแหน่ง (i, j) และ N_{ij} คือกลุ่มพิกเซลข้างเคียงที่อยู่รอบพิกเซลนั้น

3.3.4 การแปลงภาพไปนารีแบบปรับตัว (Adaptive Thresholding)

กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการใช้เทคนิคการปรับความเปรียบต่างแบบปรับตัวชนิดจำกัด (Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization: CLAHE) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มความเปรียบต่างเฉพาะพื้นที่ (Local Contrast) ภายในภาพ วิธีนี้จะช่วยให้หลุดเล็ดดำปรากฏชัดเจนขึ้น โดยที่ไม่เพิ่มสัญญาณรบกวนมากเกินไปในบริเวณที่มีความเข้มภาพสม่ำเสมอ

อัลกอริทึม CLAHE ที่นำมาใช้ในงานนี้มีขั้นตอนดังนี้:

1) แบ่งภาพออกเป็นช่องย่อย (Divide the Image into Tiles):

แบ่งภาพออกเป็นบล็อกขนาดเล็ก 5×5 พิกเซล ที่ไม่มีการซ้อนทับ เพื่อเพิ่มความเปรียบต่างของแต่ละพื้นที่แยกกัน

2) คำนวณฮิสโตแกรม (Compute Histograms):

คำนวณฮิสโตแกรมของค่าความเข้มพิกเซลสำหรับแต่ละบล็อกย่อยที่แบ่งไว้

3) กำหนดขีดจำกัดการตัดแต่ง (Set Clipping Limits):

กำหนดขีดจำกัด (Clipping Limit, B) สำหรับควบคุมระดับความเปรียบต่างที่เพิ่มขึ้น โดยให้ขอบเขตสูงสุดของค่าฮิสโตแกรมเป็น $\text{top} = B$ และขอบเขตล่างสุดเริ่มที่ $\text{bottom} = 0$

4) การประมวลผลแต่ละบล็อก (Process Each Tile):

สำหรับแต่ละบล็อก จะคำนวณค่า S ซึ่งแสดงถึงจำนวนค่าฮิสโตแกรมทั้งหมดที่สูงกว่าค่ากลาง เบื้องต้น (middle) และนำค่าส่วนเกินนี้มาแจกแจงใหม่ เพื่อป้องกันการเพิ่มความเบี่ยงเบนที่มากเกินไป

5) **หาค่าขีดจำกัดที่เหมาะสม (Binary Search):**

ทำซ้ำขั้นตอนโดยวนลูป จนกว่าความแตกต่างระหว่างค่า top และ bottom จะน้อยกว่า 1 โดยคำนวณค่า middle จากค่าเฉลี่ยระหว่าง top และ bottom

6) **ปรับขีดจำกัดตามค่าส่วนเกิน (Adjust Threshold):**

ถ้าค่าส่วนเกิน (S) สูงกว่าขอบเขตที่ยอมรับได้ คือ $(B - middle) \times R$ แสดงว่าค่า middle ต่ำเกินไป จึงปรับเพิ่มค่าโดยกำหนด $top = middle$ แต่หากต่ำเกินไปก็กำหนด $bottom = middle$

3.3.5 การดำเนินการทางสัณฐานวิทยา (Kernel Morphology)

Morphology เป็นเทคนิคที่ใช้ปรับแต่งโครงสร้างของภาพระดับสีเทาด้วยเมทริกซ์ขนาดเล็กที่เรียกว่า Kernel วิธีนี้เหมาะสำหรับการลดสัญญาณรบกวน แยกวัตถุ หรือเน้นขอบเขต ในระบบตรวจจับหลอดเลือดดำ การดำเนินการทางสัณฐานวิทยาจะช่วยปรับปรุงภาพหลอดเลือดที่ถูกแยกออกมาให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งการดำเนินการทางสัณฐานวิทยาหลักๆ ได้แก่:

1. Opening (Erosion):

ลดจุดรบกวนเล็กๆ และจุดสีขาวที่แยกออกมาโดดๆ โดยยังรักษาโครงสร้างหลักของหลอดเลือดไว้

2. Closing (Dilation):

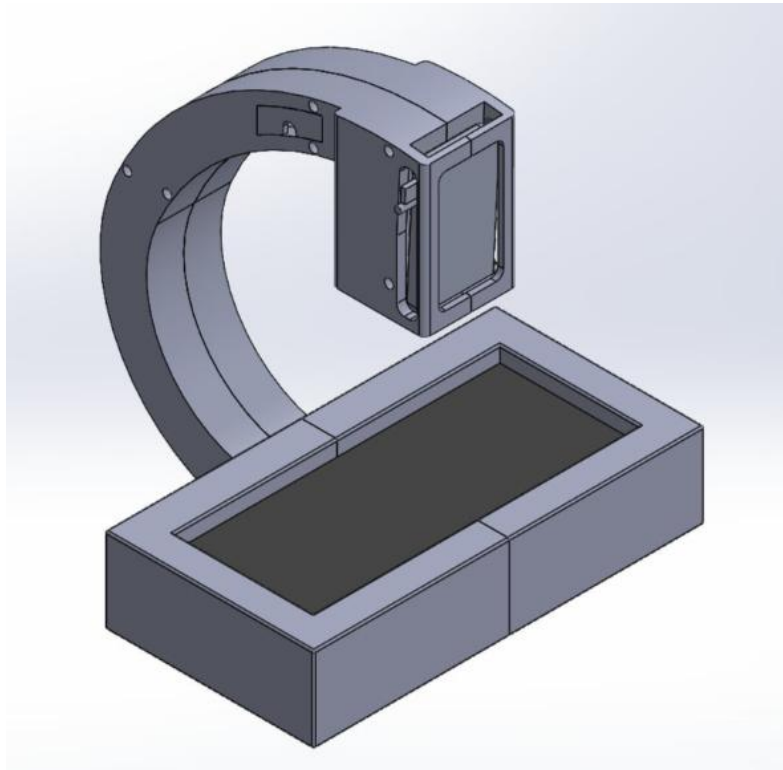
เติมเต็มช่องว่างเล็กๆ ภายในหลอดเลือดดำ และเชื่อมต่อเส้นเลือดที่แตกหักให้สมบูรณ์ขึ้น

3. Morphological Gradient:

เน้นขอบและรูปร่างของหลอดเลือดดำ ทำให้ขอบของหลอดเลือดดำแสดงผลได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

บทที่ 4. ผลการศึกษา

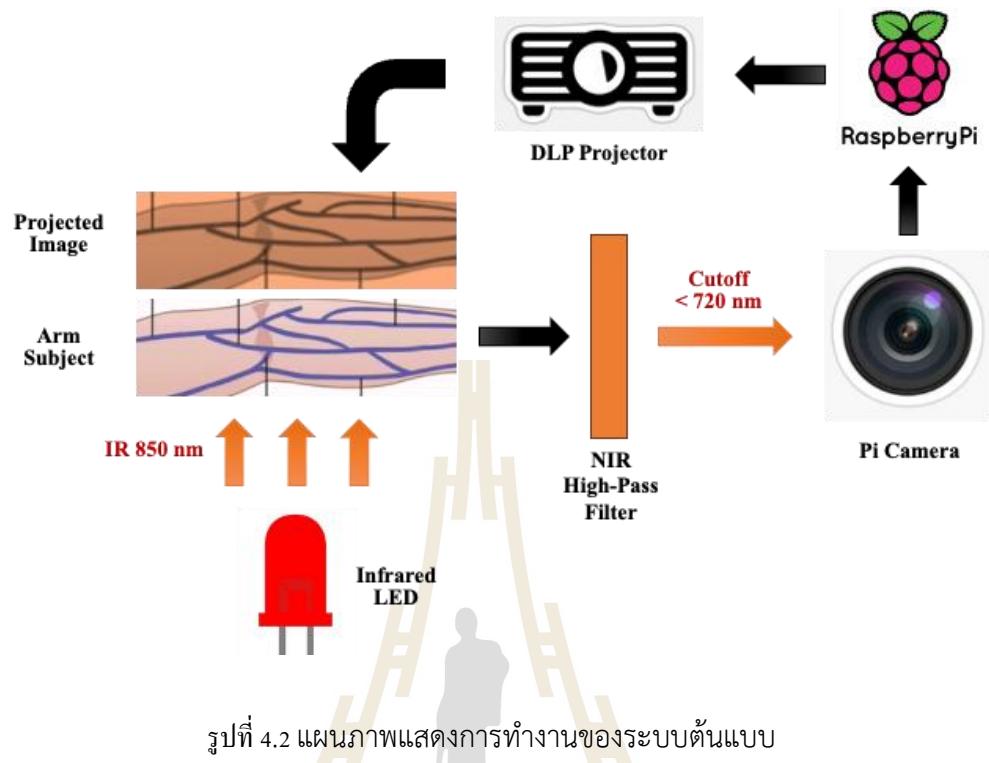
4.1 ต้นแบบระบบถ่ายภาพ



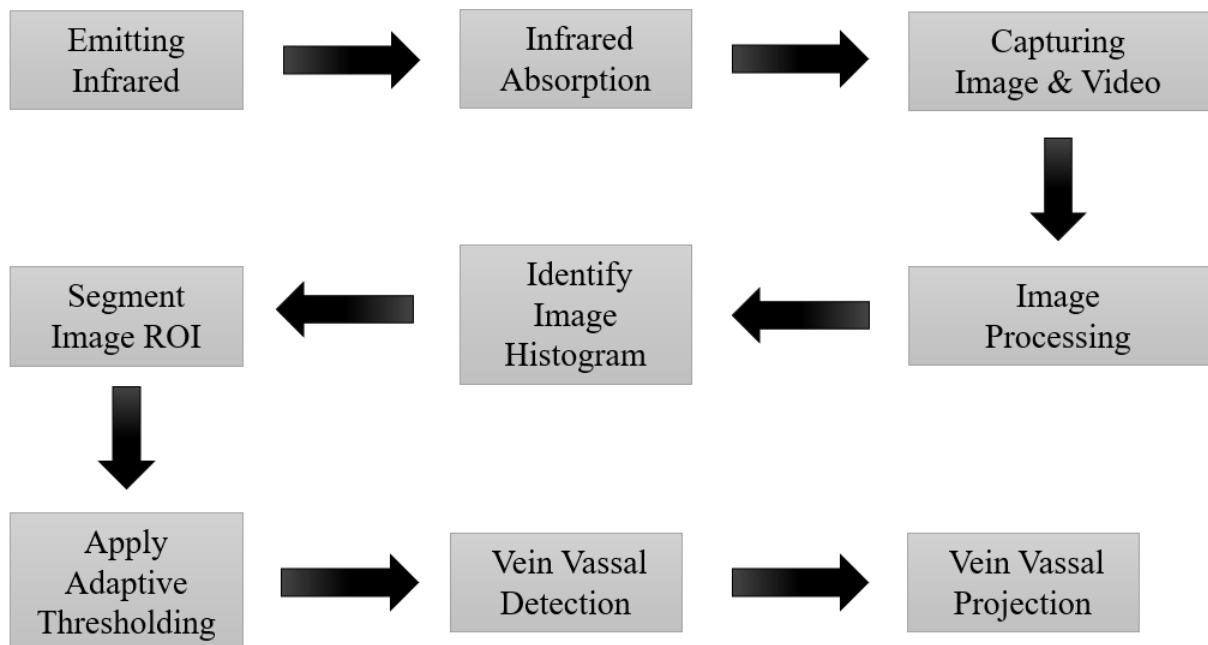
รูปที่ 4.1 ต้นแบบเครื่องมือ Vein Detection

4.2 การพัฒนาโปรแกรม Python เพื่อการประมวลผลข้อมูล

เมื่อเก็บข้อมูลภาพ Contrast เสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Imaging Processing ซึ่งประกอบด้วย การเลือกขอบเขตภาพ (Segmentation), การตรวจหาตำแหน่งของหลอดเลือดดำ (Detection) และการระบุตำแหน่งบนผิวหนัง (Projection) โดยกระบวนการทั้งหมดดำเนินการด้วยหน่วยประมวลผล CPU



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบต้นแบบ



รูปที่ 4.3 ลำดับการทำงานของเครื่องต้นแบบ

4.3 การสอบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยรวม

หลังจากพัฒนาต้นแบบเครื่องมือ Vein Detection เสร็จสมบูรณ์ ทีมวิจัยได้ทำการทดลองเก็บข้อมูล โดยถ่ายภาพหลอดเลือดดำบนต้นแขน ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการ Imaging Processing และวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบต้นแบบ ดังนี้

- 1) **Field of View (FOV)** คือขนาดพื้นที่บนต้นแขนที่ระบบสามารถถ่ายภาพและฉายภาพกลับไปได้ คำนวณจากคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพ โดยเซ็นเซอร์ของกล้องมีขนาดพิกเซล $1.4 \mu\text{m}$ ระยะห่างของเลนส์ใกล้ตา 5 mm และระยะห่างของเลนส์ใกล้วัตถุ 200 mm ซึ่งใช้สมการ:

$$\text{Focal Length} \times \text{FOV} = \text{Sensor pixels} \times \text{Working distance}$$

เมื่อนำค่ามาแทนในสมการ จะได้

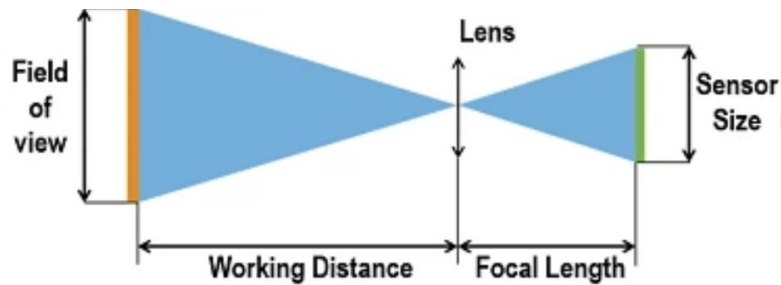
$$\text{FOV} = \frac{(1.4 \times 10^{-6}) \times (200 \times 10^{-3})}{50 \times 10^{-3}}$$

ผลลัพธ์คือ 150 mm x 100 mm



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบ FOV ของเครื่องต้นแบบ Vein Finder

- 2) **Sampling Resolution** คือระยะห่างที่น้อยที่สุดที่กล้องสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพิกเซลของกล้อง ระยะห่างของเลนส์ใกล้ตาและเลนส์ใกล้วัตถุ รวมถึงขนาดของภาพที่ปรากฏบนวัตถุ (FOV)



รูปที่ 4.5 การคำนวณหา Sampling Resolution

โดยใช้สมการ

$$\text{Sampling Resolution} = \frac{\text{FOV}}{\text{Number of Sensor Pixels}}$$

สามารถคำนวณค่า Sampling Resolution ของระบบต้นแบบได้ดังนี้

$$\frac{100 \text{ mm}}{1080 \text{ pixels}} \approx 0.1 \text{ mm}$$

ดังนั้น ระยะห่างที่น้อยที่สุดที่กล้องสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุได้คือ 0.1 mm

4.4 การทดลองถ่ายภาพ

จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนเริ่มต้นของระบบตรวจจับหลอดเลือดดำ ซึ่งเริ่มจากการถ่ายภาพบริเวณแขนเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้า ภาพด้านซ้ายเป็นภาพต้นฉบับที่ถ่ายด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (visible light) ซึ่งยังไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างของหลอดเลือดดำได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมีความเปรียบต่างระหว่างหลอดเลือดกับเนื้อเยื่อรอบข้างต่ำ ส่วนภาพตรงกลางที่ได้จากกล้อง Basler แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการมองเห็นหลอดเลือดดีขึ้น และภาพทางด้านขวา ซึ่งถ่ายภายใต้แสงอินฟราเรดใกล้ (NIR) ที่สามารถทะลุผ่านผิวหนังพบว่าหลอดเลือดดำปรากฏชัดเจนในลักษณะเป็นลายเข้ม เนื่องจากแสงอินฟราเรดถูกดูดกลืนมากโดยฮีโมโกลบินในหลอดเลือด

จากการทดลองเก็บตัวอย่างภาพ พบว่าสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง กล้องธรรมดา และ กล้อง ELP Infrared Camera ได้อย่างชัดเจน โดยภาพทั้งสามมีขนาด 15 × 12 cm โดย

- ภาพด้านซ้าย: ถ่ายด้วยกล้องธรรมดา

- ภาพตรงกลาง: ถ่ายด้วยกล้อง ELP Infrared Camera
- ภาพด้านขวา: ถ่ายด้วย ELP Infrared Camera ขณะฉายแสงอินฟราเรด

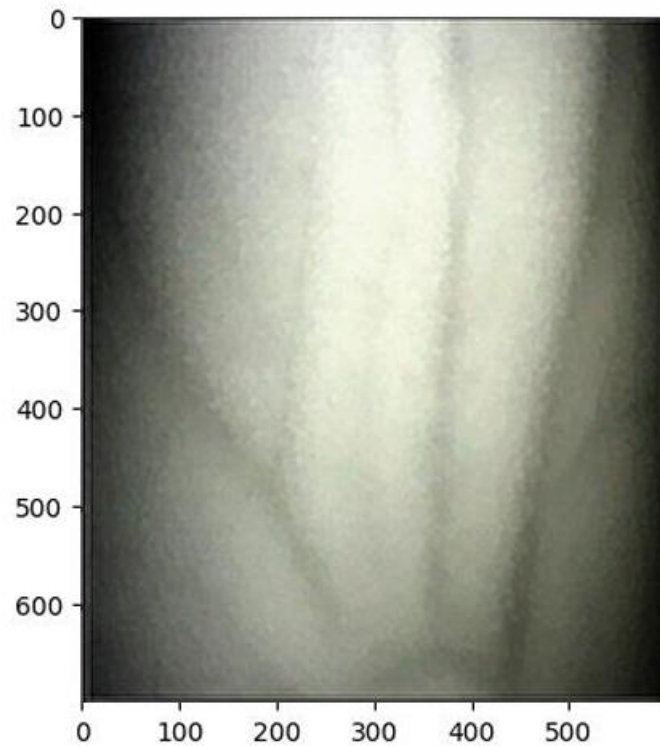
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Vein Detection สามารถช่วยระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำได้อย่างแม่นยำและชัดเจนกว่าการสังเกตด้วยตาเปล่า



รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์การแสดงผลภาพจากกล้องสามแบบ — กล้องธรรมดา (ซ้าย), กล้อง Basler (กลาง), และภาพภายใต้แสงอินฟราเรด (ขวา)

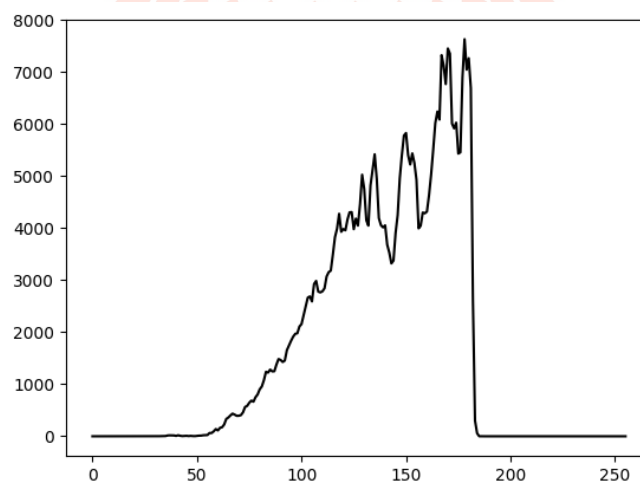
ผลลัพธ์นี้เน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้แสงอินฟราเรดในการเพิ่มความสามารถในการมองเห็นหลอดเลือด และเป็นพื้นฐานสำคัญในการประมวลผลภาพต่อไป เพื่อทำการแยกและระบุหลอดเลือดออกจากเนื้อเยื่อโดยรอบ

หลังจากเก็บข้อมูลภาพเสร็จแล้ว ข้อมูลจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Imaging Processing โดยเริ่มจากการเลือกขอบเขตภาพ (Segmentation) เพื่อตรวจหาตำแหน่งของหลอดเลือดดำและตัดส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยภาพที่ใช้มีขนาด 7.5×5.5 cm



รูปที่ 4.7 รูปภาพของหลอดเลือดดำในขั้นตอน Segmentation

จากนั้น ทีมวิจัยได้ดึงข้อมูล Histogram ของภาพถ่ายเพื่อศึกษาค่าแถบสี Contrast ของหลอดเลือดดำ และกล้ามเนื้อโดยรอบ ซึ่งให้ผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 ข้อมูล Gray Scale Histogram ของภาพถ่ายหลอดเลือดดำ

จากข้อมูล Histogram พบว่าภาพถ่ายหลอดเลือดดำมีค่า Gray Scale อยู่ในช่วง 50 - 170 จากนั้นจึงนำข้อมูลส่วนนี้ไปพัฒนาอัลกอริทึม Adaptive Threshold โดยแบ่งแถบสี Contrast เป็น 10 Channels แต่ละช่องบรรจุข้อมูลภาพจำนวน 12 ค่า

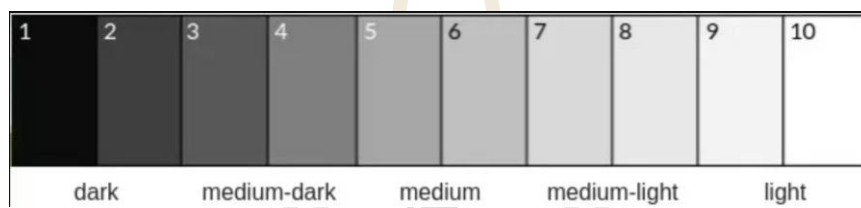
- **THRESH_BINARY**

$$dst(x, y) = \begin{cases} \text{maxValue} & \text{if } src(x, y) > T(x, y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- **THRESH_BINARY_INV**

$$dst(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } src(x, y) > T(x, y) \\ \text{maxValue} & \text{otherwise} \end{cases}$$

รูปที่ 4.9 สมการ Adaptive Thresholding



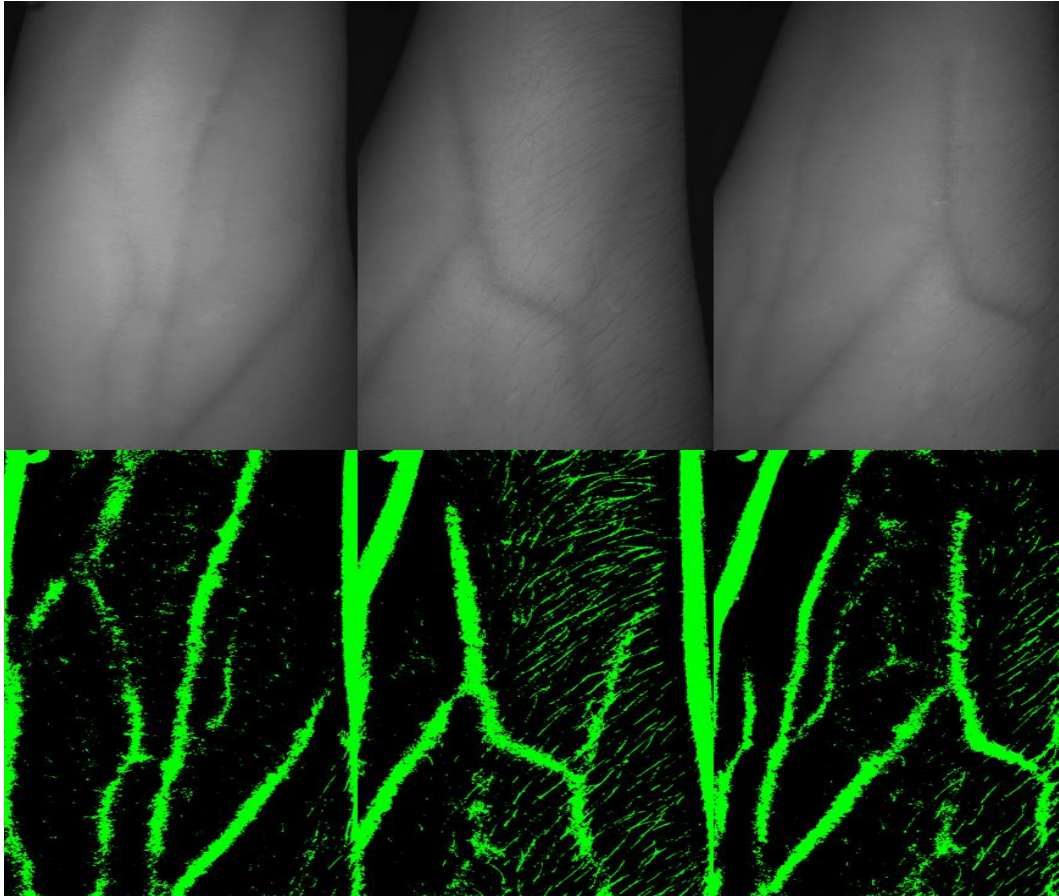
รูปที่ 4.10 แถบ Contrast แสดง Channels ของ Gray Scale Histogram

จากการตรวจสอบข้อมูลในแต่ละ Channel และพิจารณาพื้นที่ที่แสดง Contrast ของหลอดเลือดดำ พบว่า Channel 3 (ค่าระหว่าง Gray Scale 74 - 86) เป็นช่องที่สามารถตรวจจับหลอดเลือดดำได้ดีที่สุด



รูปภาพที่ 13 Contrast ของหลอดเลือดดำบนต้นแขน

จากนั้น ได้ทำการเปรียบเทียบภาพ Contrast ของหลอดเลือดดำกับภาพต้นแบบเพื่อประเมินความแม่นยำในการตรวจจับตำแหน่งของหลอดเลือดดำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Vein Detection สามารถระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำ 3 ตำแหน่งหลัก ได้แก่ Cephalic vein โดยสามารถระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำ Cephalic vein ได้อย่างแม่นยำประมาณ 90% เมื่อเทียบกับข้อมูลภาพต้นแบบ



รูปที่ 4.11 ภาพที่ได้จากกล้อง Basler (ซ้าย) และภาพที่ผ่านการประมวลผลเพื่อแยกหลอดเลือด (ขวา)

จากการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าการประมวลผลภาพสามารถช่วยเพิ่มความเด่นชัดของหลอดเลือดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในภาพต้นฉบับนั้นลวดลายของหลอดเลือดยังค่อนข้างเลือนราง แต่เมื่อผ่านขั้นตอนการประมวลผล เช่น การเพิ่มความเปรียบต่าง การทำ threshold และการปรับสัณฐาน (morphological operations) พบว่าโครงสร้างของหลอดเลือดชัดเจนขึ้นมาก และแสดงผลในรูปแบบของลวดลายสีเขียวสว่าง ทำให้สามารถแยกแยะตำแหน่งหลอดเลือดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานทางการแพทย์ เช่น การนำทางการเจาะเลือด หรือการศึกษาารูปแบบของหลอดเลือด

รังสีอินฟราเรดใกล้ (NIR) สามารถทะลุผ่านเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ลึกประมาณ 3–5 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับหลอดเลือด ในการทดลองนี้ ได้มีการเน้นพื้นที่บริเวณปลายแขน (forearm) เพื่อให้เห็นหลอดเลือดได้ชัดเจนมากขึ้น ทั้งนี้ ความสามารถในการทะลุผ่านสามารถเพิ่มได้โดยการใช้แสงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการดูดกลืนและทะลุผ่านของแสงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเนื้อเยื่อและเลือด เช่น น้ำ, oxyhemoglobin และ deoxyhemoglobin โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร ซึ่งถือว่ามี การดูดกลืนน้ำต่ำ จึงสามารถถูกดูดกลืนโดยหลอดเลือดได้ดี และช่วยเพิ่มความสามารถในการมองเห็นหลอดเลือดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



บทที่ 5. สรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลงานวิจัย

จากผลการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการพัฒนาระบบต้นแบบ Vein Finder โดยอาศัยหลักการของแสงใกล้อินฟราเรด (NIR) สามารถตรวจจับและแสดงตำแหน่งหลอดเลือดดำใต้ผิวหนังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาพที่ได้จากการใช้กล้อง Basler ที่ไวต่อช่วงคลื่น 850 นาโนเมตร แสดงให้เห็นถึงลักษณะของหลอดเลือดดำที่ชัดเจน และต่อเนื่องมากกว่าภาพที่ถ่ายด้วยแสงปกติ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของแสง NIR ที่สามารถทะลุทะลวงชั้นผิวหนังได้ในระดับลึกประมาณ 3–5 มิลลิเมตร และถูกดูดกลืนอย่างมีนัยสำคัญโดยฮีโมโกลบินในหลอดเลือด ส่งผลให้บริเวณที่มีหลอดเลือดปรากฏเป็นแถบเข้มชัดเจน แตกต่างจากเนื้อเยื่อโดยรอบ

เมื่อเปรียบเทียบภาพก่อนและหลังการประมวลผล พบว่าเทคนิคการประมวลผลภาพ เช่น การปรับระดับความเปรียบต่าง การแปลงเป็นภาพไบนารี และการประมวลผลเชิงสัญญาณวิทยา สามารถช่วยแยกหลอดเลือดจากพื้นหลังได้อย่างชัดเจน เพิ่มความต่อเนื่องของโครงสร้างหลอดเลือด และลดจุดรบกวนที่ไม่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ผลลัพธ์จากภาพที่ผ่านการประมวลผลสามารถนำไปแสดงผลผ่านระบบฉายภาพแบบเรียลไทม์ เพื่อระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำบนผิวหนังของผู้ป่วยได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อขั้นตอนการเจาะเลือดหรือการให้สารน้ำทางหลอดเลือดดำ

งานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลงานของ Das et al. (2021) และ Xu et al. (2022) ที่แสดงให้เห็นว่าการผสานเทคโนโลยี NIR Imaging เข้ากับระบบประมวลผลภาพและการแสดงผลแบบ AR ช่วยลดความผิดพลาดในการเจาะเลือด เพิ่มความพึงพอใจของผู้ป่วย และลดภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยที่มีหลอดเลือดมองเห็นยาก เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ หรือผู้ป่วยโรคอ้วน

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่พบในระหว่างการพัฒนาต้นแบบ ได้แก่ การจัดวางมุมกล้องและแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องมีความแม่นยำเพื่อป้องกันการเกิดเงา (shadow artifact) หรือความไม่สม่ำเสมอของแสง อีกทั้งการแสดงผลในสภาวะแสงภายนอกที่หลากหลายยังเป็นความท้าทายที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมในเวอร์ชันต่อไปของระบบต้นแบบ เพื่อให้สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างมั่นใจมากยิ่งขึ้น

5.2 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบช่วยระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำ (Vein Finder) โดยประยุกต์ใช้แสงใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared; NIR) ร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิทัล เพื่อสนับสนุนการเจาะเลือดในผู้ป่วยกลุ่มที่มีหลอดเลือดมองเห็นยาก ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง NIR ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร กล้อง Basler ที่ไวต่อแสง NIR ระบบควบคุมและประมวลผลภาพผ่านโปรแกรม Python และโปรเจกเตอร์ที่ใช้สำหรับฉายภาพหลอดเลือดกลับลงบนผิวหนังในตำแหน่งจริง

ผลการดำเนินงานพบว่าระบบสามารถตรวจจับหลอดเลือดดำได้ผิวหนังได้อย่างแม่นยำ โดยภาพที่ได้จากกล้อง Basler ภายใต้แสง NIR แสดงโครงสร้างหลอดเลือดที่ชัดเจนกว่าภาพจากกล้องปกติอย่างชัดเจน หลังจากผ่านกระบวนการประมวลผลภาพ ได้แก่ การปรับความเปรียบต่าง การ threshold และการประมวลผลทางสัญญาณวิทยา ทำให้สามารถแยกหลอดเลือดดำออกจากเนื้อเยื่อพื้นหลังได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ภาพผลลัพธ์ถูกฉายกลับบนแขนผู้ป่วยในตำแหน่งเดียวกันแบบเรียลไทม์ เพื่อช่วยให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถเจาะเลือดได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ลดจำนวนครั้งในการเจาะผิด ลดภาวะแทรกซ้อน และลดความวิตกกังวลของผู้ป่วย

ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะกะทัดรัด เคลื่อนย้ายสะดวก ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าระบบเชิงพาณิชย์จากต่างประเทศ และสามารถนำไปใช้งานในระดับชุมชนหรือหน่วยแพทย์ภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงถือเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีการแพทย์ที่มีความแม่นยำ ใช้งานง่าย และสามารถเข้าถึงได้ในบริบทของประเทศไทย

ลิงค์วิดีโอแสดงการทำงานของต้นแบบ: <https://youtu.be/2SsYKd5XdH8?si=0XeCjytK3Sy-O612>



5.3 ผลผลิตของงานวิจัย

จากการวิจัยและพัฒนาระบบ Vein Finder ด้วยเทคโนโลยีแสงใกล้อินฟราเรด (NIR) งานวิจัยนี้ได้สร้างผลผลิตที่สำคัญในหลายด้าน ได้แก่:

1. ต้นแบบเครื่อง Vein Finder

ได้พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบที่ประกอบด้วยระบบฉายแสง NIR กล้องตรวจจับเฉพาะทาง ระบบประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์ และโปรเจกเตอร์ฉายภาพซ้อนบนผิวหนัง โดยสามารถใช้งานได้จริงภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุม และสามารถต่อยอดสู่การใช้งานภาคสนามหรือในสถานพยาบาลระดับปฐมภูมิได้

2. ซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพหลอดเลือดอัตโนมัติ

สร้างชุดโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพดิจิทัลที่สามารถปรับความเปรียบต่าง แยกวัตถุ (segmentation) และระบุตำแหน่งของหลอดเลือดอย่างแม่นยำ รองรับการประมวลผลแบบเฟรมต่อเฟรม (frame-by-frame) และฉายภาพผลลัพธ์แบบเรียลไทม์

3. การพัฒนากำลังคน

ส่งเสริมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติแก่นักศึกษาระดับปริญญาโท จำนวน 1 คน ซึ่งได้มีส่วนร่วมอย่างใกล้ชิดในการออกแบบระบบเชิงแสง การประกอบอุปกรณ์ทดลอง และการเขียนชุดคำสั่งประมวลผลภาพ โดยนักศึกษาได้รับการฝึกฝนทั้งด้านทฤษฎีและภาคปฏิบัติในห้องปฏิบัติการ ทำให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้ด้านออปติกชีวภาพ การประยุกต์เทคโนโลยีเซนเซอร์ภาพ และการใช้เครื่องมือวิศวกรรมซอฟต์แวร์ขั้นพื้นฐานสำหรับระบบภาพทางการแพทย์ ซึ่งถือเป็นผลผลิตทางการศึกษาที่มีคุณค่าต่อการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ในสาขาเทคโนโลยีการแพทย์และวิศวกรรมแสง

4. องค์ความรู้ด้านการประยุกต์เทคโนโลยี NIR และ AR

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์และประยุกต์องค์ความรู้จากสาขาออปติกชีวภาพ (biophotonics), การประมวลผลภาพดิจิทัล และเทคโนโลยีภาพเสมือนเสริม (Augmented Reality) มาสู่การแก้ไขปัญหาเชิงคลินิกได้อย่างเป็นรูปธรรม

5. บทความวิจัยและการนำเสนอวิชาการ

ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ได้นำไปจัดทำบทความทางวิชาการ และเตรียมนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ ระดับชาติ/นานาชาติ ตลอดจนเผยแพร่ในวารสารวิจัยเพื่อประโยชน์แก่ชุมชนวิชาการและภาคสุขภาพต่อไป

5.4 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

แม้ระบบ Vein Finder ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะสามารถแสดงผลตำแหน่งหลอดเลือดดำได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ แต่เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางคลินิกหรือภาคสนามอย่างครอบคลุมมากขึ้น จึงมีแนวทางการวิจัยเพิ่มเติมที่ควรพิจารณาในอนาคตดังต่อไปนี้:

1. การพัฒนาให้รองรับสภาพแสงหลากหลาย:

ปัจจุบันการแสดงผลของระบบยังขึ้นอยู่กับสภาพแสงแวดล้อมภายนอก ดังนั้นจึงควรศึกษาการใช้เทคโนโลยีปรับแสงอัตโนมัติ หรือการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบฉายภาพภายใต้แสงรบกวน เพื่อให้สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงที่มีความสว่างหลากหลาย เช่น ห้องฉุกเฉิน หรือพื้นที่กลางแจ้ง

2. การเสริมระบบด้วยเทคโนโลยี AI:

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยเฉพาะ Deep Learning เข้ามาช่วยในการแยกแยะและติดตามเส้นเลือดในเชิงอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุหลอดเลือดและสามารถประเมินคุณภาพหลอดเลือดหรือสภาพทางพยาธิวิทยาเบื้องต้นได้

3. แนวทางต้นแบบสำหรับอุปกรณ์การแพทย์ราคาประหยัด:

ช่วยวางแผนทางสำหรับการผลิตและประกอบอุปกรณ์ช่วยการรักษาในประเทศ ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศเกินกว่า 50% ซึ่งเหมาะสำหรับโรงพยาบาลชุมชน หน่วยเคลื่อนที่ และพื้นที่ทรัพยากรจำกัด

4. การทดสอบทางคลินิกในกลุ่มผู้ป่วยจริง:

ควรมีการศึกษานำร่องในกลุ่มผู้ป่วยที่มีลักษณะหลอดเลือดยากต่อการเจาะ เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ ผู้ป่วยเรื้อรัง หรือผู้ที่มีค่าดัชนีมวลกายสูง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบภายใต้สถานการณ์จริงและนำผลลัพธ์ไปใช้ปรับปรุงระบบให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

6. การขยายผลในด้านการเรียนการสอน:

ผลงานวิจัยนี้ยังมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นชุดฝึกอบรมสำหรับนักศึกษาแพทย์ พยาบาล หรือบุคลากรทางสุขภาพ เพื่อฝึกทักษะด้านการเจาะเลือด และเรียนรู้การใช้งานเทคโนโลยีการแพทย์แบบใหม่ภายใต้สภาพจำลองที่ปลอดภัย



บรรณานุกรม

- Alfano, C., Meola, A., & Brancati, N. (2022). Non-contact vein detection system using near-infrared imaging and adaptive histogram equalization. *Biomedical Optics Express*, 13(2), 956-968. <https://doi.org/10.1364/BOE.444125>
- Carr, P. J., Rippey, J. C. R., Cooke, M. L., Trevenen, M., Higgins, N. S., & Rickard, C. M. (2016). Development of the Difficult Intravenous Access (DIVA) tool for adult patients: A prospective observational study. *BMJ Open*, 6(12), e012625. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-012625>
- Chaudhary, R., & Wang, H. (2020). AR-based interactive training system for venipuncture simulation. *Journal of Biomedical Education*, 2020, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2020/9781426>
- Chen, Y., Lee, S., & Huang, W. (2022). Comparative analysis of vein detection techniques: NIR imaging, ultrasound-guided, and traditional palpation methods. *Journal of Clinical Nursing*, 31(7–8), 1002–1011. <https://doi.org/10.1111/jocn.16045>
- Chen, Y., Zhang, J., & Zhao, L. (2018). Development of a near-infrared vein detection device using 850 nm illumination and CMOS sensor. *Journal of Biomedical Optics*, 23(4), 045001. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.4.045001>
- Das, S., Sharma, P., & Mukherjee, A. (2021). Augmented reality-based vein visualization system using near-infrared imaging for medical applications. *IEEE Access*, 9, 124532–124540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110478>
- Infusion Nurses Society. (2020). *Infusion therapy standards of practice* (8th ed.). *Journal of Infusion Nursing*, 43(1S), S1–S224. <https://doi.org/10.1097/NAN.0000000000000328>
- Kachlik, D., Pechacek, V., Baca, V., Musil, V., & Springer, O. (2010). The venous system of the cubital fossa: New information for clinical practice. *Annals of Anatomy–Anatomischer Anzeiger*, 192(1), 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2009.10.003>
- Lam, R. Y., Chan, C. Y., & Wong, K. L. (2020). Clinical assessment of near-infrared imaging for venipuncture in patients with high body mass index. *Medical Devices: Evidence and Research*, 13, 117–123. <https://doi.org/10.2147/MDER.S240129>

- Lippi, G., Salvagno, G. L., Montagnana, M., Brocco, G., & Guidi, G. C. (2005). Influence of the application of a tourniquet on clinical chemistry testing. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 43(8), 869–875. <https://doi.org/10.1515/CCLM.2005.150>
- Liu, J., Wang, Z., & Li, G. (2020). Portable vein finder system based on CMOS camera and image processing. *Sensors*, 20(15), 4212. <https://doi.org/10.3390/s20154212>
- McCall, R. E., & Tankersley, C. M. (2019). *Phlebotomy essentials* (7th ed.). Wolters Kluwer.
- Moore, K. L., & Dalley, A. F. (2017). *Clinically oriented anatomy* (8th ed.). Wolters Kluwer.
- Nguyen, T. T., & Lee, D. Y. (2021). Vein segmentation using hybrid adaptive thresholding and deep learning for NIR imaging. *Biomedical Signal Processing and Control*, 68, 102655. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102655>
- Park, S., Kim, J., & Han, Y. (2022). Enhancement and detection of veins in near-infrared images using image filtering and convolutional neural networks. *Journal of Imaging Science and Technology*, 66(3), 030401. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2022.66.3.030401>
- Smalley, C. M., & Brizendine, E. J. (2017). Difficult intravenous access: A growing problem for emergency medicine. *Journal of Emergency Medicine*, 53(4), 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2017.06.005>
- Snelling, S. R., Gerald, G. M., Ward, A., & Zhao, Y. (2017). Anatomy and physiology of venous valves and clinical implications. *Vascular Medicine*, 22(2), 175–185. <https://doi.org/10.1177/1358863X16686370>
- Tsai, H., Lin, K., & Wu, C. (2023). AI-assisted near-infrared and augmented reality system for enhanced vein detection in clinical settings. *Artificial Intelligence in Medicine*, 142, 102587. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2023.102587>
- Xu, H., Lin, Q., & Yu, S. (2022). Deep learning-assisted near-infrared imaging system for enhanced vein detection in outpatient care. *Biomedical Signal Processing and Control*, 71, 103131. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103131>
- Yamamoto, M., Hayashi, T., & Arai, Y. (2019). Clinical trial of AR projection vein imaging system for difficult venipuncture. *Healthcare Technology Letters*, 6(3), 105–109. <https://doi.org/10.1049/htl.2019.0027>

- Yammine, K., & Erić, M. (2017). Patterns of the superficial veins of the cubital fossa: A meta-analysis. *Phlebology*, 32(6), 403–414. <https://doi.org/10.1177/0268355516655670>
- Zhou, H., Wang, L., & Zhang, Y. (2019). Vein pattern enhancement using morphological operations and adaptive histogram equalization. *Healthcare Technology Letters*, 6(4), 110–115. <https://doi.org/10.1049/htl.2019.0030>

