สูตรหลักที่ใช้คำนวณขาโก่งผิดรูป เมื่อแผ่นการเจริญเติบโตเสียหายไปบางส่วน เนื้อกระดูกแข็งจะเข้ามาเกาะตรงจุดที่พัง เกิดเป็นสะพานกระดูกทำหน้าที่ล็อกฝั่งนั้นไว้ไม่ให้โต แต่ฝั่งที่เหลือยังโตต่อ ผลคือกระดูกจะบิดโก่งเป็นมุมเอียง

อัตราการโก่งงอของกระดูกคำนวณได้จาก Geometric Tethering Model

$$\Delta\theta = \frac{G_{undamaged}}{d}$$

$\Delta\theta$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมโก่งงอต่อปี

$G_{undamaged}$ = อัตราการเจริญเติบโตตามธรรมชาติของแผ่นกระดูกฝั่งที่ยังเหลือรอด หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อปี

d = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสะพานกระดูก ไปจนถึงขอบนอกสุดของแผ่นกระดูกฝั่งที่ยังโตอยู่

ยิ่งสะพานกระดูกอยู่ชิดขอบข้างใดข้างหนึ่ง และแผ่นกระดูกฝั่งที่เหลืออยู่กว้าง อัตราการโก่งงอ จะยิ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขาจะโก่งชัดเจนในเวลาไม่กี่ปี

****อ้างอิง กฎ *Hueter-Volkmann* และชีวกลศาสตร์ ***

1. **Stokes, I. A. (2002).** Mechanical effects on skeletal growth. *Journal of Musculoskeletal Neuronal Interactions, 2*(3), 277-280.
2. **Villemure, I., & Stokes, I. A. (2009).** Growth plate mechanics and mechanobiology. A review of the mechanobiological modeling of bone growth. *Journal of Biomechanics, 42*(12), 1793-1803.

2. สูตรคำนวณทิศทางการโตตามแรงกด

กระดูกคนเราจะโตตามแรงกดที่มากระทำ ถ้าฝั่งไหนโดนกดหนัก ๆ จะโตช้า ฝั่งไหนโล่ง ๆ จะโตเร็ว เป็นสาเหตุที่ทำให้ขาที่เริ่มโก่ง ยิ่งโก่งหนักขึ้นเรื่อย ๆ ใช้ Hueter-Volkmann Law ในการคำนวณ

$$G = G_0(1 - \beta \cdot \sigma)$$

G = อัตราการเจริญเติบโตของกระดูกในพิกัดนั้น ๆ

G_0 = อัตราการเจริญเติบโตพื้นฐานตามอายุและเพศของเด็ก

σ = แรงกดทางกลศาสตร์ในจุดนั้น ๆ หรือ Mechanical Stress หากเป็น Compression ค่าจะเป็นบวก ทำให้กระดูกโตช้าลง แต่ถ้าเป็นTension ค่าจะเป็นลบ ทำให้กระดูกโตเร็วขึ้น

β = ค่าความไวต่อแรงกระตุ้นทางชีวภาพของเด็กแต่ละคน

****อ้างอิงการคำนวณระยะเวลาเติบโต และแกนกระดูก ***

1. **Paley, D., Bhave, A., Herzenberg, J. E., & Bowen, J. R. (2000).** Multiplier method for predicting limb-length discrepancy. The Journal of Bone & Joint Surgery, 82(10), 1432-46.
2. **Paley, D. (2002).** Principles of Deformity Correction. Springer Science & Business Media. (Textbook เล่มนี้ใช้อ้างอิงตัวแปร Mechanical Axis Deviation และ Joint Line Orientation Angle)

3. ตัวแปรที่ต้องป้อนให้โมเดล AI เพื่อที่จะทำนายว่ากระดูกเข่าเด็กจะโตแบบไหน โก่งไหม หรือขาสั้นข้างยาวข้างเท่าไหร่ ระบบจะรับค่าตัวแปรจากภาพถ่ายรังสี

ตัวแปรด้านรอยโรค

1. **Physeal Bar Area** (A_{bar}) = ขนาดพื้นที่ของสะพานกระดูกที่เสียหาย คิดเป็น % เช่น 70% ถ้าน้อยกว่า 50% หมออาจจะผ่าตัดแซะออกได้ แต่ถ้าเกิน 50% มีแนวโน้มโก่งหรือหยุดโตสูงมาก
2. **Physeal Bar Location** (X_{bar}, Y_{bar}) = พิกัดของจุดที่เสียหายบนแผ่นกระดูก

ถ้าอยู่ตรงกลาง ขาจะไม่โก่ง แต่กระดูกจะหยุดโตทำให้ขาสั้นข้างยาวข้าง

ถ้าอยู่ขอบด้านข้าง ขาจะบิดโก่งแน่นอน ถ้าโก่งเข้าในเป็นขาฉิ่งหรือโก่งออกนอกเป็นขาโก่ง

ตัวแปรด้านชีวกลศาสตร์

1. **Mechanical Axis Deviation** แนวเส้นตรงจากหัวสะโพกผ่านกลางเข่าลงไปที่ข้อเท้า ถ้ารอยโรคทำให้แนวเส้นนี้เลี้ยวเบน แรงกด จะลงที่เข่าไม่เท่ากันซ้ายขวา ทำให้เกิดการเร่งมุมโก่งตามกฎ Hueter-Volkmann
2. **Joint Line Orientation Angle** มุมเอียงของผิวข้อต่อเข่าเมื่อเทียบกับแกนขา

ตัวแปรด้านชีววิทยา

1. **Growth Remaining** ระยะเวลาที่เหลือก่อนที่แผ่นเจริญเติบโตจะปิดตัวลงตามธรรมชาติ ผู้ชายเฉลี่ยปิดที่อายุ 16 ปี ผู้หญิง 14 ปี คำนวณร่วมกับ Paley Multiplier Method เพื่อดูว่าเด็กเหลือโควต้าความสูงอีกกี่เซนติเมตร ยิ่งเหลือเวลามาก แต่แผ่นเสียหายเยอะ ขาก็จะยิ่งโก่งรุนแรงกว่าเด็กที่แผ่นใกล้จะปิดแล้ว

****อ้างอิงขนาดสะพานกระดูก *50%* และ *Geometric Tethering****

Peterson, H. A. (1984). Partial growth plate arrest and its treatment. Journal of Pediatric Orthopedics, 4(2), 246-258. งานวิจัยเรื่องการประเมินพื้นที่ % ของสะพานกระดูก และพิกัด Location ว่าส่งผลต่อการโก่งอย่างไร

Herring, J. A. (2020). Tachdjian's Pediatric Orthopaedics: From the Texas Scottish Rite Hospital for Children (6th ed.). Elsevier.

4. การแปลงหน่วยภาพ X-ray

ในทางปฏิบัติทางการแพทย์ ภาพ X-ray ดิจิทัลจะถูกเก็บในฟอร์แมต DICOM ซึ่งภายในไฟล์จะมี Metadata ซ่อนอยู่ หนึ่งในนั้นคือค่า Pixel Spacing ที่บอกว่า 1 พิกเซลในภาพ เทียบเท่ากับระยะทางจริงกี่มิลลิเมตร

$$d_{mm} = d_{px} \times S_{pixel}$$

d_{mm} = ระยะห่างจริงบนกระดูก หน่วยมิลลิเมตร ที่จะนำไปใส่ในสมการ Geometric Tethering

d_{px} = จำนวนพิกเซลที่โมเดล Computer Vision วัดความยาวของจุดที่เสียหายได้บนภาพ

S_{pixel} = ค่าความกว้างของพิกเซล ดึงจาก DICOM Tag (0028, 0030)

****อ้างอิงการแปลงหน่วยภาพ *X-ray* ****

1. **DICOM Standard NEMA PS3.3** Information Object Definitions (Section C.7.6.2 - Image Plane Module)

5. การใช้อายุกระดูก คำนวณการเติบโตที่เหลืออยู่

วิธีการคำนวณส่วนต่างความยาวขาที่ได้ผลดีที่สุดคือ Paley's Multiplier Method แต่เคล็ดลับคือ ห้ามใช้ อายุจริง เด็ดขาด ต้องดึงค่า อายุกระดูก (Bone Age - Age_{BA}) มาเป็นตัวแปรในการเปิดตารางหาค่าตัวคูณ

สูตรสมการพยากรณ์ความยาว

$$L_{remaining} = L_{current} \times (M_{BA} - 1)$$

$L_{remaining}$ = ความยาวกระดูกส่วนที่จะโตเพิ่มขึ้น (มิลลิเมตร)

$L_{current}$ = ความยาวกระดูกเข่า ณ ปัจจุบัน

M_{BA} = ค่าตัวคูณที่ต้องอ้างอิงจาก อายุกระดูก (Age_{BA}) เท่านั้น หากเด็กอายุ 10 ขวบ แต่อายุกระดูก 12 ขวบ ต้องใช้ค่า M ของเด็กอายุ 12 ขวบ

****อ้างอิงการคำนวณการเติบโตที่เหลืออยู่ ****

1. *Paley, D., et al. (2000).* Multiplier method for predicting limb-length discrepancy. The Journal of Bone & Joint Surgery. โมเดลเราจะปรับเทียบให้ใช้ Bone Age ประเมินค่า Multiplier เพื่อลด Error จากภาวะเติบโตช้าหรือเร็วกว่าเกณฑ์

6. การผสานสมการคณิตศาสตร์เข้ากับ AI

สถาปัตยกรรมที่ทำคือ Physics-Informed Machine Learning หรือ Rule-based AI คือการไม่ปล่อยให้ AI เดาสุ่มแต่ใช้สมการกลศาสตร์เขียนครอบไว้เป็นกฎ ใน Data Pipeline

แนวทางการเขียนอธิบายโครงสร้าง

ระบบใช้สถาปัตยกรรมแบบ Neuro-Symbolic AI โดยแบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วน

1. **Neural Network (Vision)** ทำหน้าที่สกัด Feature $(Area\%, Location)$ จากภาพ X-ray
2. **Symbolic Logic (Math Engine)** นำค่าที่สกัดได้ มาคำนวณผ่านสมการ Geometric Tethering และ Paley's Multiplier เบื้องหลัง Pipeline ก่อนส่งผลลัพธ์ ขึ้นแสดงบน Dashboard

****อ้างอิง ****

1. *Karniadakis, G. E., et al. (2021).* Physics-informed machine learning. Nature Reviews Physics, 3(6), 422-440. ใช้อ้างอิงสนับสนุนการผนวกกฎทางฟิสิกส์และชีวกลศาสตร์เข้ากับกระบวนการเรียนรู้ของ Data Pipeline ช่วยเพิ่มความแม่นยำและทำให้ผลลัพธ์สามารถอธิบายได้ทางการแพทย์

อ้างอิงกลไกพยาธิสภาพของกระดูกจากคัมภีร์หลัก Tachdjian's Pediatric Orthopaedic**s** ผนวกข้อมูลผลข้างเคียงของยาจากฐานข้อมูลเภสัชวิทยาสากล และวารสารทางการแพทย์ชั้นนำ เช่น JCEM, Pediatrics

6.คำนวณค่า BMI

ระบบรับค่า น้ำหนัก และ ส่วนสูงจากหมอ แล้วนำมาเข้าสูตรพื้นฐานก่อน

$$BMI = \frac{Weight}{(Height/100)^2}$$

AI ดึงค่าพารามิเตอร์ Lookup L, M, S

ระบบหลังบ้านจะเอา เพศ และ อายุ ของเด็ก ไปค้นหาในฐานข้อมูลตาราง Excel ของ WHO เพื่อดึงตัวเลข 3 ตัวออกมา เข้าสมการ LMS

$$Z = \frac{(\frac{BMI}{M})^L - 1}{L \cdot S}$$

L **= ค่าความเบ้ของเส้นโค้ง**

M **= ค่ามัธยฐาน**

S **= ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน**

36% of SH 1 fractures
58% in SH 2 fractures
49% in SH 3 fractures
64% in SH 4 fractures