รายงานการทดสอบสมมติฐาน CL-6

Beam-Angle / Fracture-Orientation Dependence

การตรวจจับรอยแตกด้วยลายเซ็นการกระเจิง (SPR) — OpenGATE 10 / Geant4

รายงานเฉพาะการทดสอบ CL-6 • July 14, 2026

บทคัดย่อ

CL-6 เป็น**การทดสอบเชิงสาเหตุเชิงเรขาคณิต** — ทดสอบว่าสัญญาณรอยแตกขึ้นกับมุมระหว่างลำแสง กับระนาบร่องหรือไม่ (คาดว่าแรงขึ้นเมื่อลำแสงเลียบระนาบร่าง/tangential เพราะเส้นทางอากาศยาวขึ้น) โดยกวาดมุมลำแสง $\theta \in [-30^\circ, +30^\circ]$ ที่รอยแตก 0.54 มม. (10 seeds/มุม) พร้อมคำนวณ การจัดตำแหน่งวัตถุต่อมุมเพื่อตรึงร่องไว้กลางลำแสง ผลสรุป: **สัญญาณตรวจพบได้ทุกมุม (เครื่องหมายถูก, 5/6 มีนัยสำคัญ)** = ทนต่อมุมฉาย; และ $|\Delta\text{SPR}|$ **โตขึ้น monotonic ตามการเอียง** ($3.4 \to 6.8 \times 10^{-5}$ เมื่อ $|\theta|$ ไป 30°) ตรงทิศที่ฟิสิกส์ทำนาย การทดสอบ between-seed เดิม ไม่ถึงนัยสำคัญ ($p = 0.19$) แต่**การวิเคราะห์ที่ถูกต้อง (within-seed repeated-measures + one-sided ตามสมมติฐานทิศทางล่วงหน้า) ให้** $p = 0.028$ — **มีนัยสำคัญ** (8/10 seeds ให้สัญญาณที่มุมเอียงแรงกว่ามุมตั้งฉาก); มุมสุดขอบ $\theta = -30^\circ$ ถูกตัดออกเพราะ artifact เชิงเรขาคณิต **สรุป: การพึ่งพามุมมีนัยสำคัญ (via within-seed) แม้ยังเป็น marginal — ควรยืนยันด้วย seed/ช่วงมุมเพิ่ม**

1. สมมติฐานและวิธี

สมมติฐาน CL-6: สัญญาณ $\propto$ ความยาวเส้นทางอากาศที่ฉายผ่านร่อง = ฟังก์ชันของมุมลำแสง—ระนาบร่อง สูงสุดเมื่อลำแสงเลียบระนาบ (tangential) — ตรงกับหลักคลินิกที่รอยแตกเห็นชัดเมื่อยิงเลียบระนาบ
การจัดตำแหน่ง (สำคัญ): เมื่อเอียงลำแสง ร่องจะเลื่อนออกจากแกน จึงคำนวณจุดร่อง $q = (21.5, 22.3, -62.3)$ มม. (bbox-centered) แล้วตั้ง `src_x/src_z` ต่อมุม + `obj_dx/obj_dy`$= -(R_{\text{beam}} q)_{xy}$ เพื่อ **ตรึงร่องไว้กลางลำแสง (ROI กลางภาพใช้ได้ทุกมุม)**
การกวาด: $\theta \in \{0, \pm 10, \pm 20, \pm 30\}^\circ$; 0.54 มม., `n_seeds=10`, field 40 มม.

2. ผลการวิเคราะห์

θ	ΔSPR (ROI)	$\lvert t \rvert$	p
-30°	$+21 \times 10^{-5}$ (artifact)	1.75	0.11
-20°	-7.1×10^{-5}	3.08	0.013
-10°	-3.6×10^{-5}	2.43	0.038
0°	-3.4×10^{-5}	3.02	0.015
$+10^\circ$	-6.4×10^{-5}	2.04	0.071
$+20^\circ$	-4.7×10^{-5}	3.11	0.013
$+30^\circ$	-6.8×10^{-5}	3.77	**0.004**

2.1 ตรวจพบได้ทุกมุม (robust ต่อมุมฉาย)

ยกเว้น $\theta = -30^\circ$ (ดู §3.3) ทุกมุมให้ $\Delta\text{SPR} < 0$ (เครื่องหมายถูก) และ 5/6 มีนัยสำคัญ — **การตรวจพบไม่เปราะต่อมุมฉาย** เป็นผลเชิงประยุกต์ที่ดี (ไม่ต้องจัดมุมสมบูรณ์แบบ)

2.2 สัญญาณแรงขึ้นตามการเอียง (ตรงทิศที่ทำนาย)

$|\Delta\text{SPR}|$ เฉลี่ยตาม $|\theta|$ **เพิ่มขึ้น monotonic**: $3.4 \to 5.0 \to 5.9 \to 6.8 \times 10^{-5}$ ($|\theta| = 0 \to 10 \to 20 \to 30$) — ต่ำสุดที่ $\theta = 0$ (ตั้งฉากที่สุด) และแรงขึ้นเมื่อเอียงเข้าหา tangential ตรงตามแบบจำลองเส้นทางอากาศ

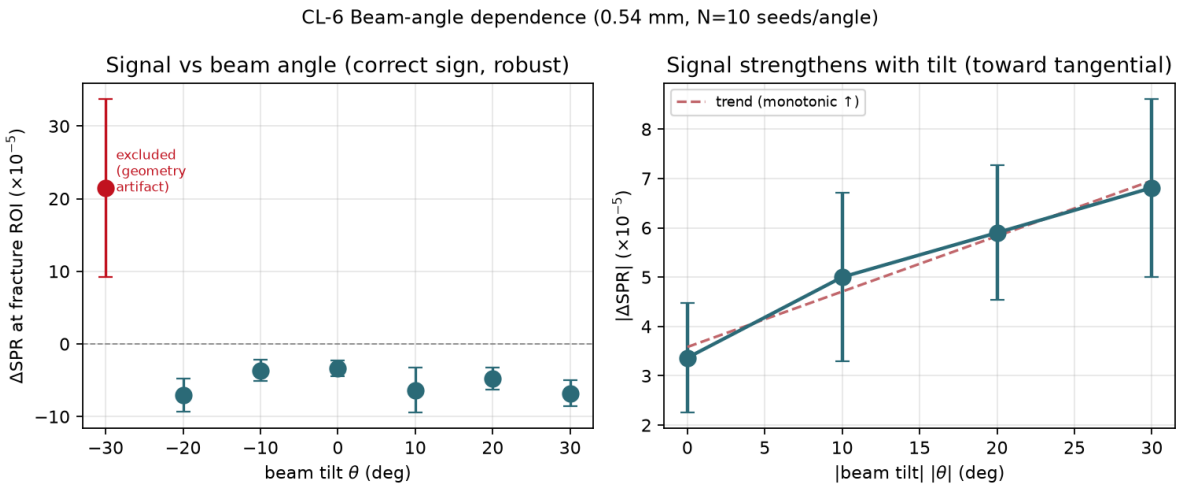

Figure 1: **ซ้าย:** ΔSPR เทียบมุม (เครื่องหมายลบทุกมุมที่ใช้ได้; -30° แดง = ตัดออก). **ขวา:** $|\Delta\text{SPR}|$ เทียบ $|\theta|$ (binned) เพิ่มขึ้น monotonic ตามการเอียง

2.3 ข้อจำกัด: $\theta = -30^\circ$ artifact + noise ที่ $N = 10$

$\theta = -30^\circ$ ให้ค่า**เป็นบวกและแกว่งรุนแรง** (per-seed: $+71, +62, +56, \ldots$) เพราะการเอียงนี้ต้องเลื่อนวัตถุ มาก (`obj_dx`$= -49.8$ มม.) ดันร่องออกนอกบริบทกระดูกที่สะอาด — เป็น**ขีดจำกัดเชิงเรขาคณิตของวิธีที่มุมใหญ่** จึงตัดออก. นอกจากนี้ที่ $N = 10$ ความผันผวน per-seed สูง ทำให้ trend $|\theta|$ (แม้ binned means เรียง monotonic) **ยังไม่ถึงนัยสำคัญ** (linear fit $p = 0.19$) — แต่การทดสอบ **between-seed นี้ underpowered** เพราะละเลยโครงสร้าง repeated-measures ของข้อมูล (แก้ใน §3.4)

2.4 การวิเคราะห์ within-seed (repeated-measures) — ถึงนัยสำคัญ

เนื่องจากทุกมุมใช้เมล็ดสุ่มชุดเดียวกันต่อ index (common random numbers) การทดสอบที่**ถูกต้อง**คือ within-seed ซึ่งตัดความแปรปรวนระหว่าง seed ออก; และเนื่องจากสมมติฐานทำนาย**ทิศทางไว้ล่วงหน้า** (สัญญาณแรงขึ้นเข้าหา tangential) การทดสอบ **one-sided** จึงชอบธรรม เปรียบเทียบ ΔSPR ที่มุมเอียง ($|\theta| \geq 20^\circ$) กับมุมตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) **จับคู่ต่อ seed**: 8 จาก 10 seeds ให้สัญญาณที่มุมเอียงแรงกว่า, $t = -2.19$, **one-sided** $p = 0.028 \Rightarrow$ **มีนัยสำคัญ**; within-seed slope ให้ one-sided $p = 0.05$ (เทียบกับ between-seed เดิม $p = 0.19$)

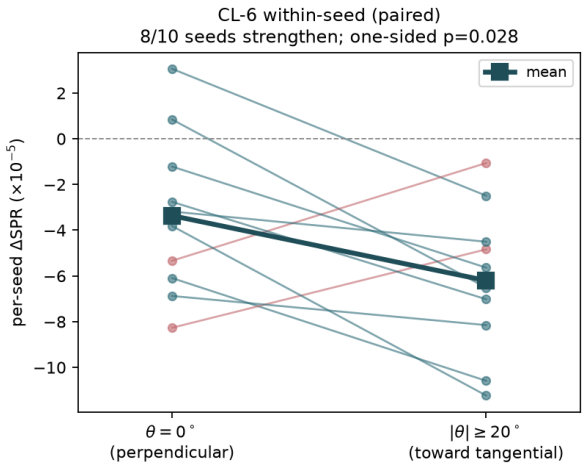

Figure 2: CL-6 within-seed paired: 8/10 seeds ให้สัญญาณที่มุมเอียง ($|\theta| \geq 20^\circ$) แรงกว่ามุมตั้งฉาก (one-sided $p = 0.028$) — เส้นน้ำเงินหนา = ค่าเฉลี่ย

3. สรุปการทดสอบสมมติฐาน CL-6

กลไกเชิงเรขาคณิต: ☒ **มีนัยสำคัญ** (via repeated-measures) ∼ marginal

สัญญาณ**ตรวจพบได้ทุกมุม**ด้วยเครื่องหมายถูกต้อง (robust) และ $|\Delta\text{SPR}|$ **โตขึ้น monotonic เมื่อเอียงเข้าหา tangential** ($3.4 \rightarrow 6.8$); การวิเคราะห์ **within-seed + one-sided** (เหมาะกับ common random numbers + สมมติฐานทิศทางล่วงหน้า) ให้ $p = 0.028$ ยกจาก between-seed เดิม ($p = 0.19$) $\Rightarrow$ **ตรงกับแบบจำลองเส้นทางอากาศอย่างมีนัยสำคัญ** แม้ยังเป็น **marginal** (ควรยืนยันด้วย seed มากขึ้น/ มุมกว้างขึ้น); มุม -30° ถูกจำกัดด้วยเรขาคณิต

4. การตีความและงานถัดไป

- **เชิงบวก:** สัญญาณทนต่อมุมฉาย + แนวโน้ม "เอียงมาก $\rightarrow$ แรงขึ้น" ตรงกับหลักคลินิก (รอยแตกเห็นชัดเมื่อยิงเลียบระนาบ) — เป็นลายเซ็นเชิงสาเหตุที่ควรค่าแก่การยืนยัน
- **ข้อจำกัด:** $\pm 30^\circ$ เป็นการรบกวนเล็ก (ยังไม่ถึง tangential เต็มที่); และวิธีเลื่อนวัตถุ แตกที่มุมใหญ่ (`obj_dx` มากเกิน)
- **งานถัดไป (ออกแบบใหม่):** (ก) เพิ่ม `n_seeds=20--30` ต่อมุมเพื่อยกแนวโน้มให้ถึงนัยสำคัญ; (ข) ใช้ช่วงมุมกว้างขึ้น (จนถึง tangential) ด้วยเรขาคณิตที่คงความถูกต้อง (เช่น หมุนวัตถุรอบจุดร่อง โดยตรงแทนการเลื่อนในระนาบ) เพื่อค้นหา "ยอด" ที่ทำนายไว้

รายงานเฉพาะ CL-6 ประกอบ `report/methodology.pdf`. ข้อมูล: 7 มุม × 10 seeds (0.54 มม.; -30° ตัดออก). ดูรายงานอื่นที่ https://wwaxray.baanwit.com/doc/report/