สรุปทั้งโปรเจกต์ Exoskeleton Arm Physics Simulator

Generated from repository artifacts in C:\Exoskeleton on 2026-07-09.
เอกสารนี้สรุปทั้งมุม simulation software, ผลการทดลอง, แนวทาง mechanical design, และสถานะของงานที่พร้อมต่อยอด.

Key takeaway: โปรเจกต์นี้พิสูจน์ได้แล้วใน simulation ว่า force amplification แบบ gain = 1.0 สามารถทำให้ payload 5 kg รู้สึกใกล้ 2.5 kg ได้ แต่ความปลอดภัยของระบบขึ้นกับการแยก human torque ออกจาก motor torque อย่างชัดเจน.

ขอบเขตงาน	simulation-first prototype สำหรับ แขน exoskeleton ช่วยยกของ
เป้าหมายแรก	ทำให้ payload 5 kg ให้รู้สึกใกล้ 2.5 kg ผ่าน force amplification
ฐานโค้ด	Python modules 7 ไฟล์, scripts 5 ไฟล์, tests 2 ไฟล์, docs 4 ไฟล์, models 2 ไฟล์
หลักฐานหลัก	README, reports/full report, mechanical design spec, product blueprint, MuJoCo model, และ CSV summaries

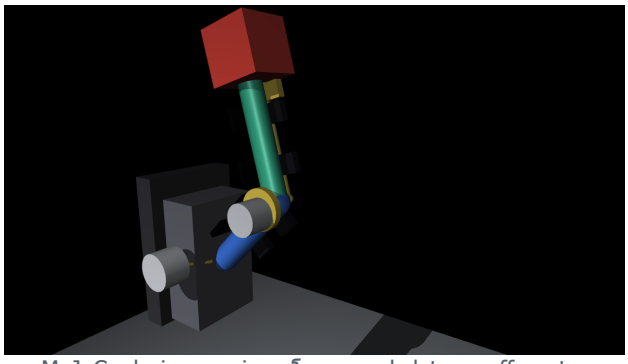
Executive Summary

- แกนของโปรเจกต์ คือ แบบจำลองแขนสองท่อน 2D และแบบจำลอง 3D บน MuJoCo เพื่อวิเคราะห์ torque ที่หัวไหล่และข้อศอกก่อนสร้าง hardware จริง
- มี controller หลัก 2 แบบ คือ gravity compensation และ force amplification โดยแบบหลังเป็นคำตอบตรงต่อโจทย์ 5 kg ให้รู้สึกใกล้ 2.5 kg
- ผลที่สำคัญที่สุด คือ sensor mode แบบ human_only ทำงานได้ตามเป้า แต่ sensor mode แบบ combined ทำให้เกิด positive feedback และ motor saturation
- repo ไม่ได้มีแค่ code simulation แต่มี blueprint ระดับ product, mechanical layout v0.1, literature review, preview images, และ test suite สำหรับ physics กับ assets

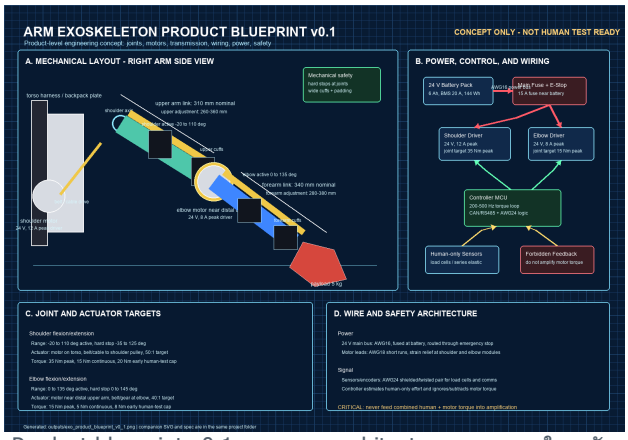
1. ระบบที่มีอยู่ในโปรเจกต์

- exosim/arm.py นิยาม rigid-body dynamics ของแขน 2 ข้อต่อ พร้อม mass matrix, coriolis, gravity, damping และ step integrator
- exosim/controllers.py มี logic ของ gravity assist, human tracking, และ force amplification พร้อม motor limits และ response lag
- exosim/mujoco_simulate.py แยก human torque กับ motor torque ชัดเจนใน 3D simulation และคำนวณ summary metrics อัตโนมัติ
- scripts/ ใช้รันชุดทดลองหลัก เช่น assist sweep, force amplification sweep, sensor feedback comparison, และ 3D sensor comparison
- docs/ และ reports/ เก็บความหมายเชิงวิศวกรรม ไม่ใช่แค่บันทึกผล ทำให้โปรเจกต์นี้มีทั้ง implementation และ product direction อยู่ใน repo เดียวกัน

ภาพตัวอย่างของระบบและทิศทาง product



MuJoCo design preview: โครง exoskeleton, cuff, motor housing, และ payload



Product blueprint v0.1: ภาพรวม architecture ของระบบในระดับ product engineering

สิ่งที่โปรเจกต์นี้ตอบได้แล้ว

- ต้องใช้ joint torque เท่าไรในการยก payload ที่กำหนด
- assist ratio หรือ amplification gain เปลี่ยนภาระของมนุษย์อย่างไร
- motor lag และ sensor mode ส่งผลต่อ stability และ tracking error มากแค่ไหน
- ถ้าจะต่อไปสู่ hardware ควรวาง shoulder motor, elbow motor, cuff, battery, และ safety loop อย่างไรในระดับ concept engineering

2. ผลการทดลองที่ควรรู้

ผลด้านล่างดึงมาจาก CSV summaries ใน repo โดยตรง
เพื่อให้สรุปนี้อ้างอิงตัวเลขเดียวกับงานทดลองจริง.

Experiment	Observation
Gravity assist sweep	peak human shoulder ลดจาก 23.30 Nm ที assist 0% เหลือ 5.31 Nm ที assist 80%
Force amplification	gain 1.0 ให้ peak human shoulder = 11.65 Nm, peak motor shoulder = 11.65 Nm, felt payload = 2.50
Interpretation	ในกรณี ideal sensor ระบบแบ่งภาระระหว่างคนกับมอเตอร์ได้ใกล้ 50/50 ตามโจทย์ตั้งต้น

ตารางสรุป sensor feedback risk ใน 2D

Mode	Lag	Peak motor shoulder	Max shoulder error	Meaning
human_only	0 ms	11.65 Nm	0.47 deg	ทำงานตามเป้าหมาย
human_only	80 ms	13.06 Nm	1.92 deg	ยังพอคุมได้ แต่ช่วยช้าลง
combined	0 ms	80.00 Nm	12.07 deg	เริ่มเกิด positive feedback
combined	80 ms	80.00 Nm	58.77 deg	feedback รุนแรงขึ้นมาก

ตารางสรุป pattern เดียวกันใน 3D
MuJoCo

Mode	Lag	Peak motor shoulder	Saturation	Max shoulder error
human_only	0 ms	14.48 Nm	0.00%	4.29 deg
combined	0 ms	80.00 Nm	31.61%	12.15 deg
combined	80 ms	80.00 Nm	6.32%	31.12 deg

- ข้อค้นพบที่แข็งแรงที่สุดของโปรเจกต์ คือ ปัญหาไม่ได้อยู่แค่ว่า motor แรงพอหรือไม่ แต่ sensor กำลังวัด human torque ที่แท้จริงหรือเปล่า
- เมื่ออ่านแรงรวมของคนกับมอเตอร์ ระบบจะช่วยเกิน และชน shoulder limit 80 Nm ทั้งใน 2D และ 3D
- เพราะผล 2D กับ 3D ให้ pattern ตรงกัน จึงมีน้ำหนักว่า failure mode นี้เป็นปัญหาเชิงระบบ ไม่ใช่ artifact จากซิมแบบใดแบบหนึ่ง

3. ทิศทาง mechanical และ product

- โปรเจกต์มี design direction ชัดเจนแล้ว: single-arm lateral frame, shoulder motor อยู่ที torso or backpack side plate, elbow motor อยู่ใกล้ข้อศอกบนต้นแขน
- เอกสาร mechanical design v0.1 และ product blueprint v0.1 ระบุขนาดหลัก ช่วงปรับ anthropometry, torque targets, power system, wiring, cuff layout และ safety loop เบืองต้นไว้ครบ
- build order ทีเอกสารเสนอมีเหตุผลดี: เรีมจาก elbow-only bench rig ก่อน แล้วค่อยไป wearable elbow, shoulder transmission bench, และ full single-arm prototype
- literature review ด้าน fly-by-wire เพีมกรอบคิดเรือง intent estimation, envelope protection, degraded modes, และ iron-bird style testing ก่อนใช้งานจริง

Design area	Current direction in repo
Actuation	shoulder remote drive ที torso และ elbow actuator ใกล้ข้อศอก
Sensor architecture	ต้องแยก human-only effort และห้ามใช้ combined effort เป็น feedback ตรง
Safety	mechanical hard stops, software torque limit, torque rate limit, emergency stop, watchdog
Prototype order	elbow-only bench first, then low-payload wearable tests

4. ข้อจำกัดของงานปัจจุบัน

- ยังไม่มี hardware จริง, sensor จริง, หรือ human subject testing ดังนันทุกข้อสรุปในตอนนียังเป็น simulation evidence
- แบบจำลองยังเน้น shoulder and elbow flexion ในระนาบยกของเป็นหลัก และยังไม่ใช่ upper-limb biomechanics ทีครบทุก DOF
- controller ยังเป็น baseline control law ไม่ใช่ production-grade human-robot interaction control เช่น impedance or admittance control ทีสมบูรณ์
- ยังขาด noise, backlash, compliance, contact pressure, fatigue, thermal curves และ fault injections ทีละเอียดกว่านี

5. งานถัดไปทีมี impact สูง

- ทำ sensor separation experiment ให้ชัด ว่าใน hardware จะวัด human-only effort ด้วย load cell, series elastic sensing, หรือ torque observer แบบใด
- ต่อยอด 3D simulator ด้วย noise, latency, torque rate limits, current limits, และ failure modes ที realistic ขึน
- เรีม bench prototype แบบ elbow-only เพือพิสูจน์ force amplification โดยไม่เสียงกับ shoulder alignment ตังแต่แรก
- เพีม safe modes ตามแนวคิด Arm-by-Wire เช่น assist_normal, assist_limited, safe_damping, passive, และ fault_lockout

6. ไฟล์ที่ควรเปิดต่อจาก PDF นี้

- README.md
- reports/exoskeleton_arm_simulation_full_report_2026-07-03.th.md
- docs/mechanical_design_v0_1.th.md
- docs/product_engineering_blueprint_v0_1.th.md
- docs/fly_by_wire_literature_review_2026-07-03.th.md
- exosim/arm.py, exosim/controllers.py, exosim/mujoco_simulate.py
- outputs/assist_sweep_summary.csv, outputs/force_amp_sweep_summary.csv, outputs/sensor_feedback_summary.csv, outputs/sensor_feedback_3d_summary.csv

Bottom line: โปรเจกต์นี้เลยช่วง proof-of-concept แบบไอเดียลอย ๆ ไปแล้ว เพราะมีทั้งแบบจำลองทางฟิสิกส์, ชุดทดลอง, เอกสาร design, และผลลัพธ์ที่ชี้จุดเสียงเชิงระบบชัดเจน แต่ยังอยู่ก่อนขั้น wearable hardware validation และ safety proof.

Verification note: local unittest run on 2026-07-09 passed 13/13 tests.