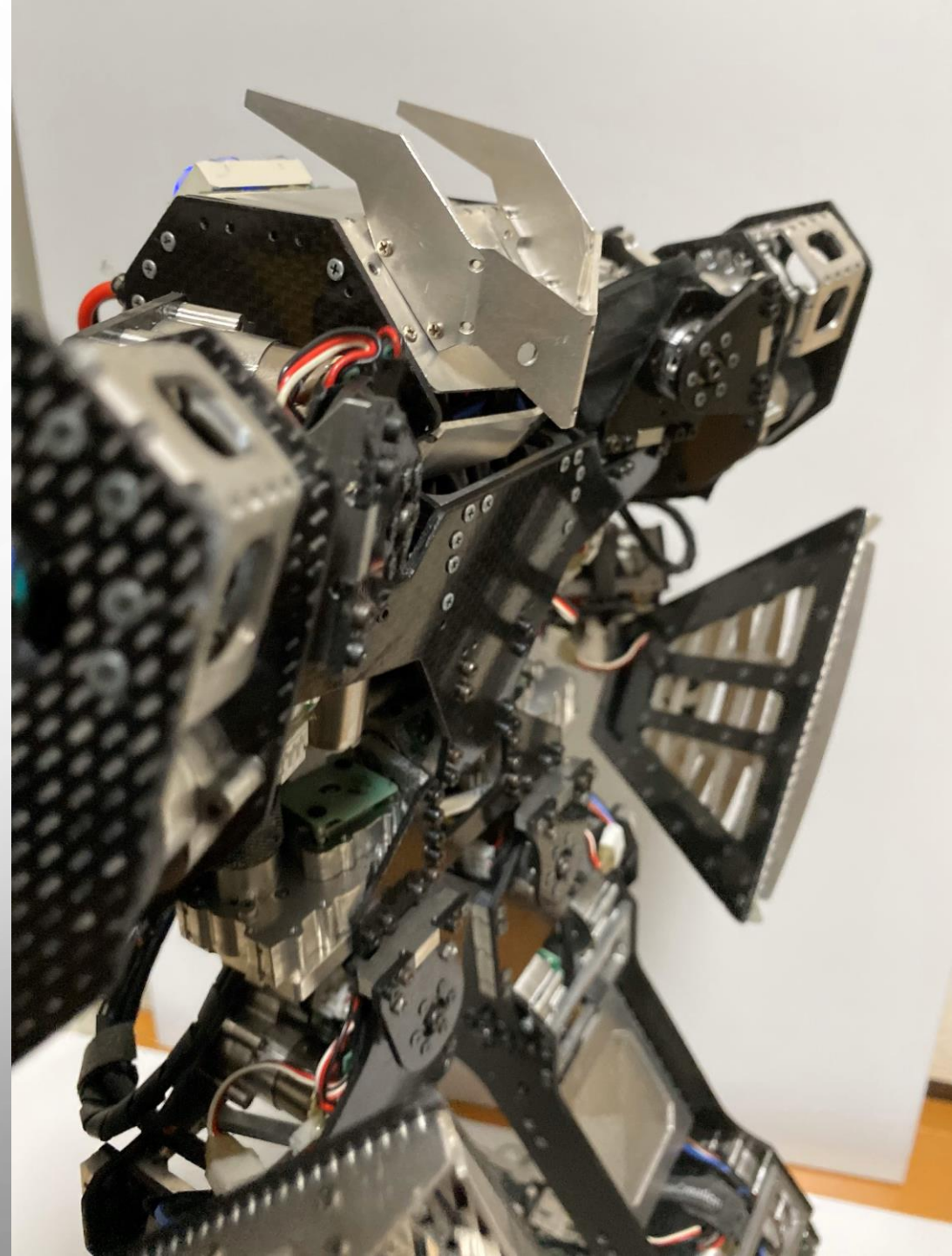


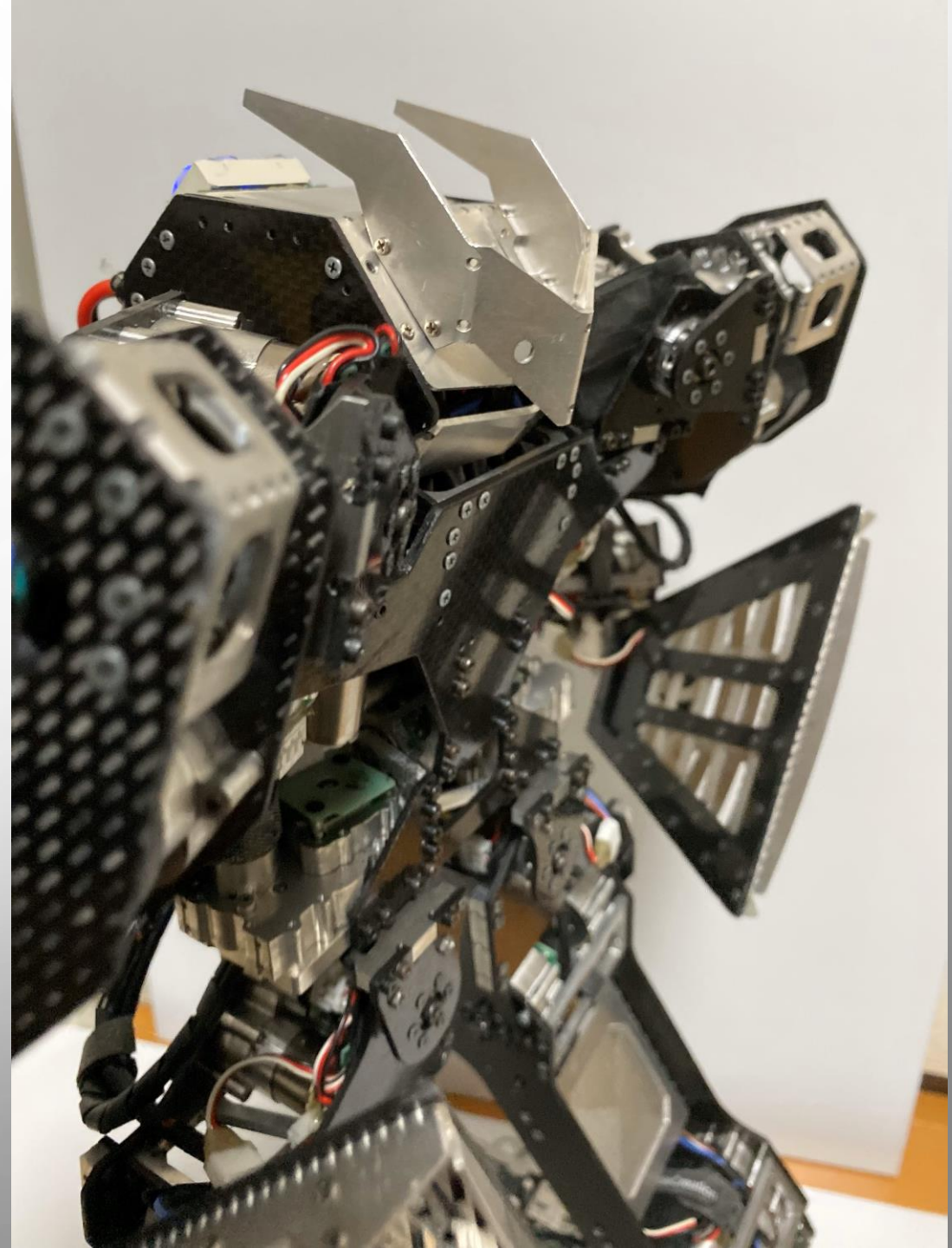
二足歩行ロボット製作の 流れとポイント

～“本当に作りたいもの”をカタチにするために～

2023/7/15 水野谷



自己紹介＋本日のテーマ



自己紹介

名前：水野谷 純平

- HN：カトジュン
- 重工メーカー勤務
- 立命館大学出身

ロボット活動歴

- 10年くらい
- 上位入賞経験はなし（最高成績ベスト8）
- 在学時はNHK大学ロボコンとかわロボも少し

得意分野

- メカ設計（リンク機構、軸受け、ギヤボックス）
- 加工（アルミ切削） モーション作成（歩行モーション）

ロボット製作歴と活動方針

➤ ROBO-ONE上位入賞

積極的に動き回って仕掛ける、頑丈な下半身+移動モーションの作りこみ

➤ バトル以外のこともできる

観客へアピール+自分が動かして飽きない

➤ 強いロボットを徹底的に真似する

オリジナリティより確実に動くものを

(先駆者様：クロムキッド、HammerHead、YOGOROZA、レグホーン、OmniZero、他多数)



2012～2013年

- KHR3ベースの改造機
- ROBO-ONE22th予選落ち



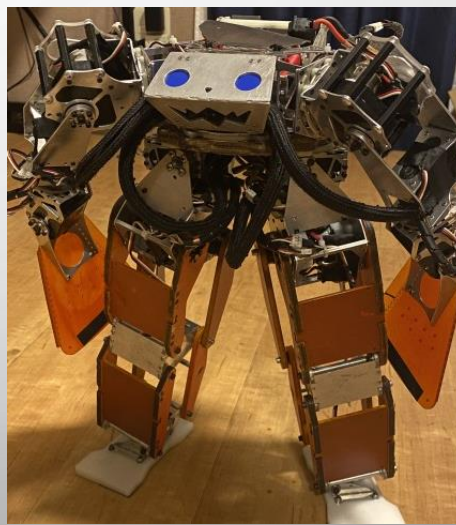
2014年前半

- ここから3kgクラス
- 24th ベスト8



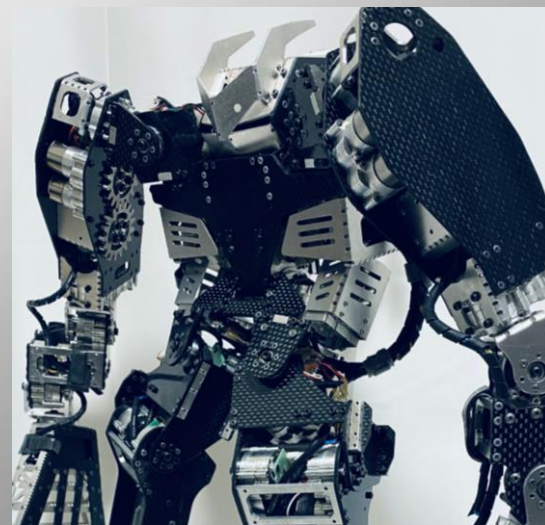
2014後期～2015年

- 1番強かった頃
- 26th ベスト8+予選1位



2018～2020年頃

- サーボ改造等、実験要素多め
- 36th 初戦敗退



2022年～

- 4kg級として再開発
- 41th 初戦敗退+MISUMI賞受賞

今日のテーマ



顧客が説明した要件



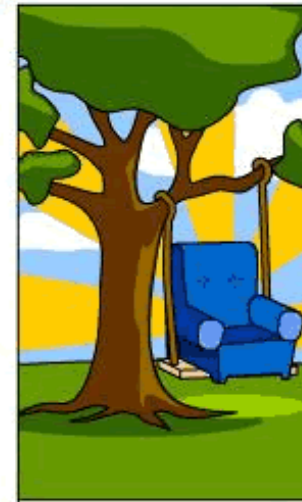
プロジェクトリーダーの理解



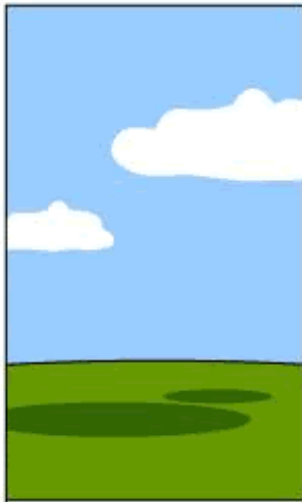
アナリストのデザイン



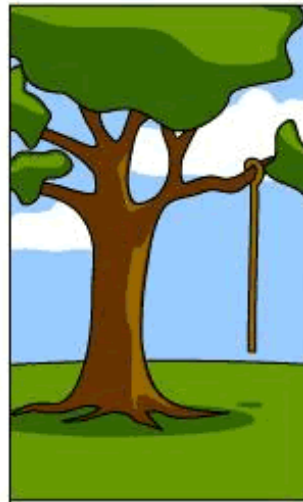
プログラマのコード



営業の表現、約束



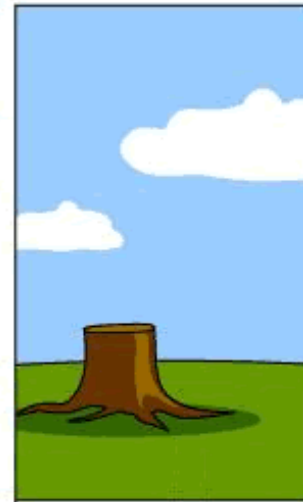
プロジェクトの書類



実装された運用



顧客への請求金額

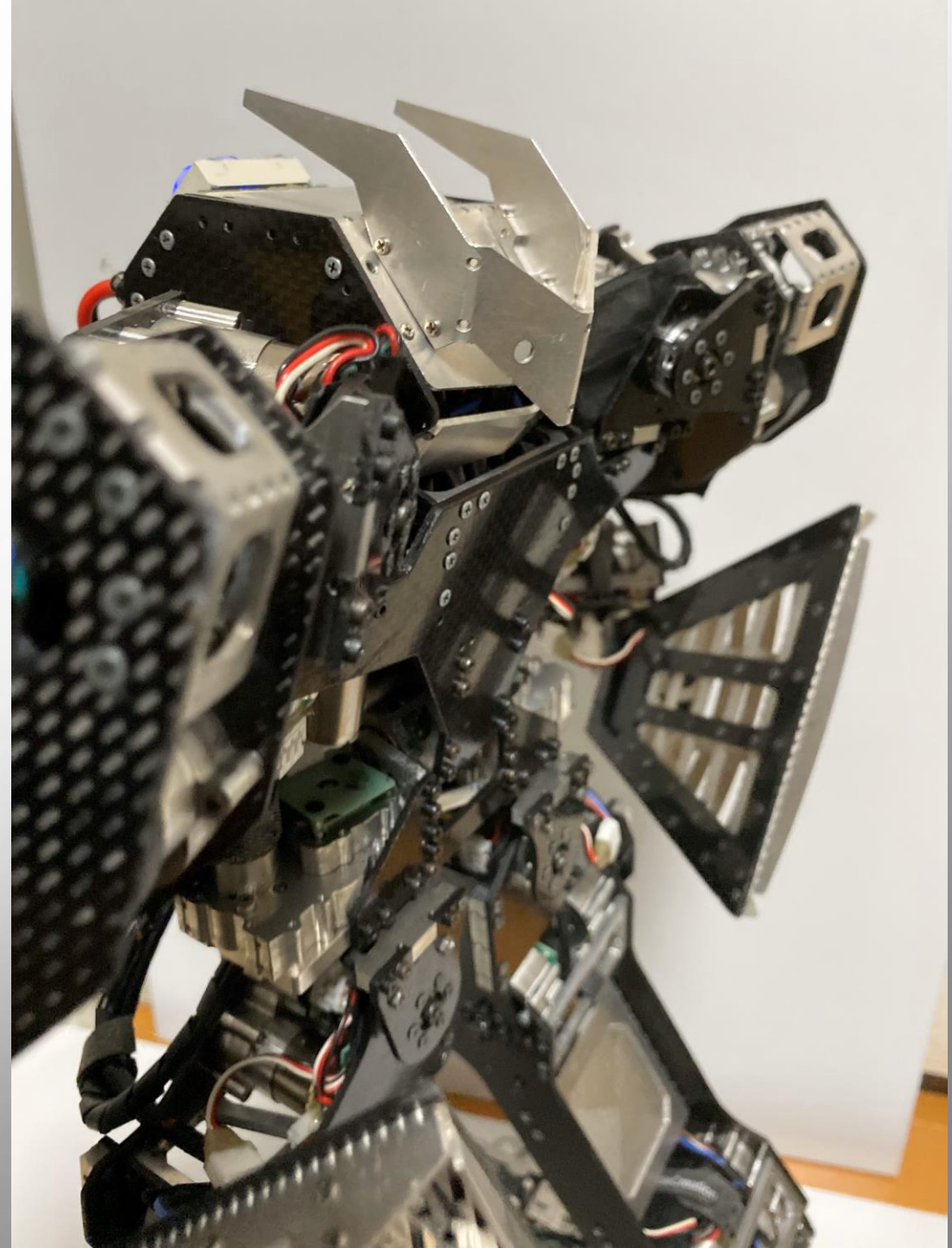


得られたサポート



顧客が本当に必要
だった物

Raptor-COLZA を例とした 設計手順とポイント



Raptor-COLZA について

スペック

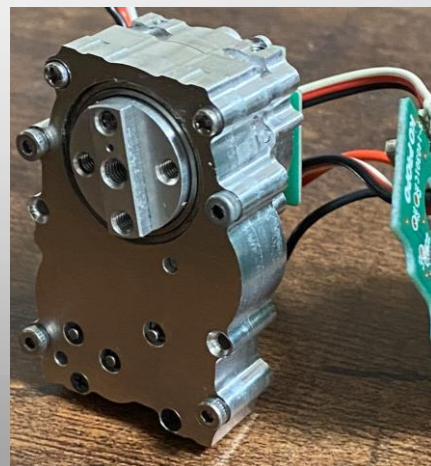
- 全長60cm 重量4kg
- 自由度数：24 総モーター数：36（ROBO-ONE時は25自由度37モーター）
- 使用サーボ： KRS-2552×2 KRS-4033×30 KRS-6003×4
（ KRS-2552以外は自作のギヤボックスに改造）

コンセプト、特徴：

限られた重量の中で**パワー**／**フレーム強度**／**自由度**を最大限両立

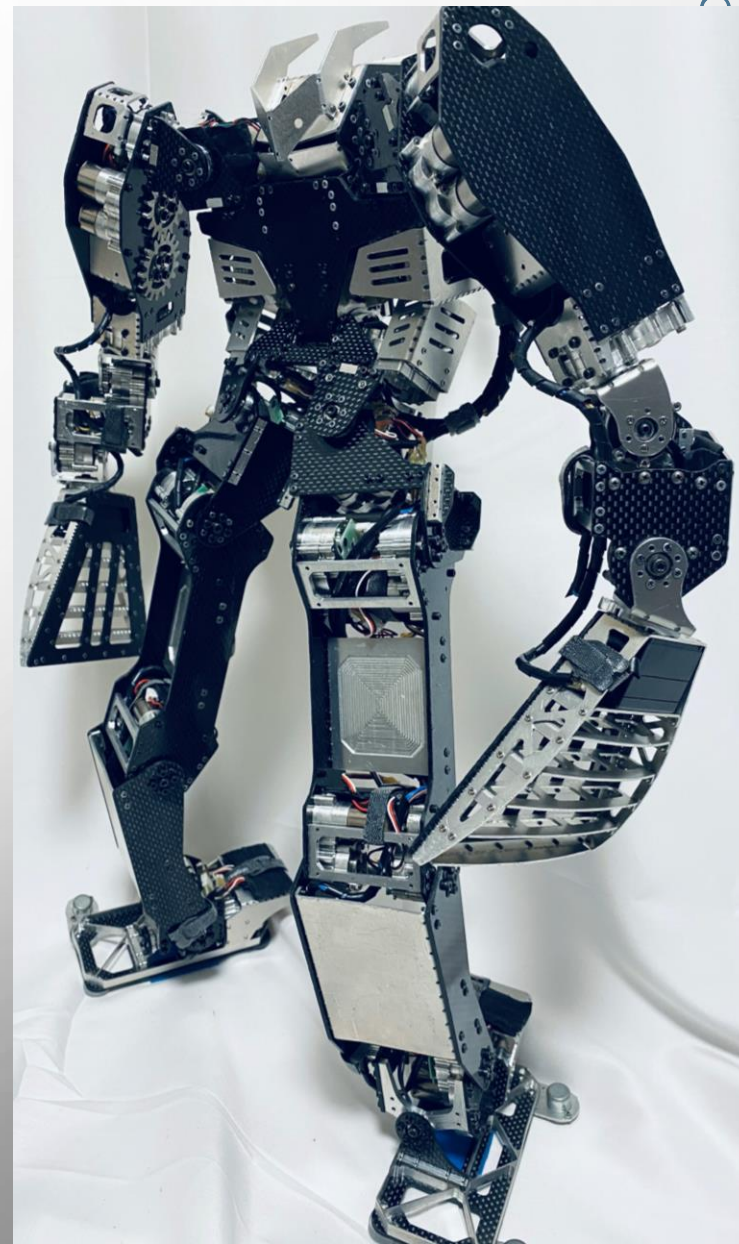
- **強度を確保しつつ徹底的な軽量化**

- サーボケース自作+CFRPフレーム
- **シンプルかつコンパクト**なフレーム構造
（干渉を無くなり**可動範囲**も増える）



- 浮いた重量をモーターにまわす

- 腕、脚ともに**6自由度**確保
- 全身ハイトルクサーボ+モーター並列化で**パワーアップ**



コンセプト検討

①“やりたいこと”をリストアップする

例：大会で入賞したい（仮想敵や戦い方まで考える）

××の技ができるロボット

好きな作品のキャラクターを再現

新しい技術（パーツ／機構／センサ／制御etc）のテスト

3DCAD、工作の練習

②どうやって実現するかを考える

- 先行事例の情報も集めて参考にする 大抵のことは既に誰かがやってる
- 必要な費用や時間をざっくり見積もる

③実現できそう＆最もやりたいことを1～2個選ぶ

- 一度に全部やろうとすると大概迷走する
- リソース（時間・お金、やる気）で実現可能なレベルに落とし込む

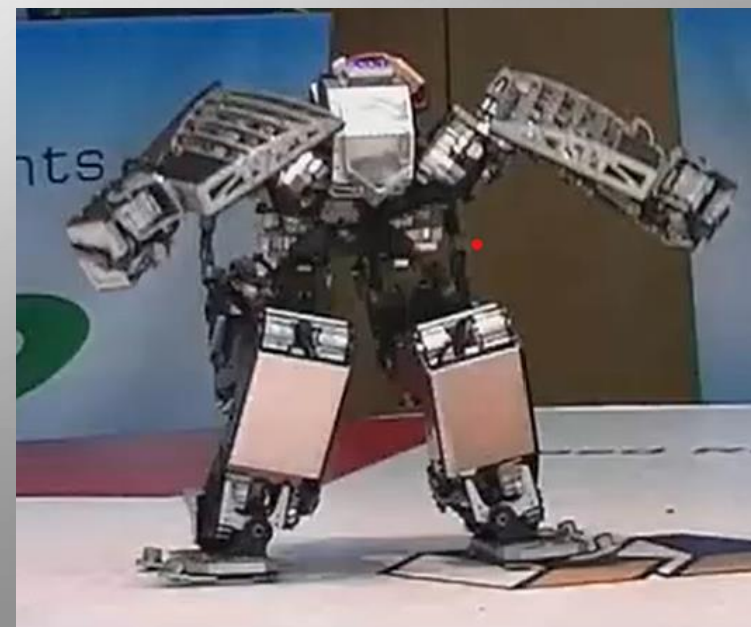
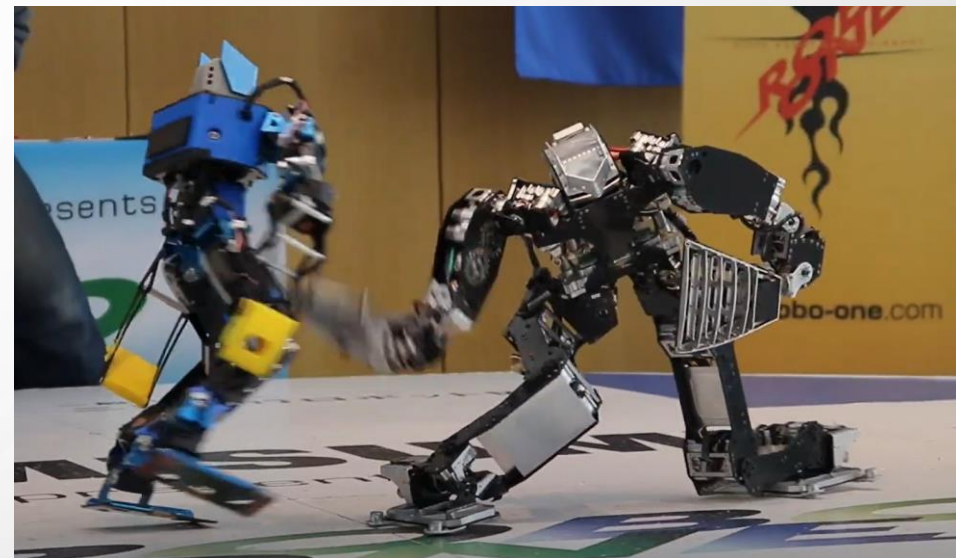
コンセプト検討：RAPTOR-COLZAの例

やりたいこと：

- バトルにも勝ちたい+いろんな動きをさせたい
- パワーと自由度の両立

ロボットの仕様：

- 自由度の実現：
腕／脚ともに6自由度+各関節の可動域を広く
- パワーの実現：ハイトルクサーボを並列化
- サーボ数が多すぎて重量規定に収まらない：
自作ケース+CFRPフレームで軽量化すれば解決



コンセプトの考え方のヒント

技術、モノづくり

機構／軸配置／構造の工夫 自動制御へチャレンジ

設計／加工／制御スキルの習得・向上

新しいアイデアを試す

新商品、パーツのテスト

他のロボットにない個性

ロボット性能向上の追求

外装、見た目のこだわり

動かしやすさ
操縦スタイルとの合致

観客を楽しませる一芸

大技を決める

ルールへの最適化

自分なりのカッコよさ／可愛さ

理想の戦い方

開発、メンテナンス時間の最小化
練習時間の確保

好きなアニメ／ゲーム／漫画の再現

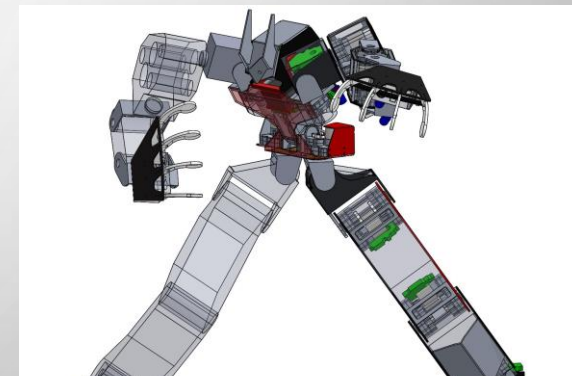
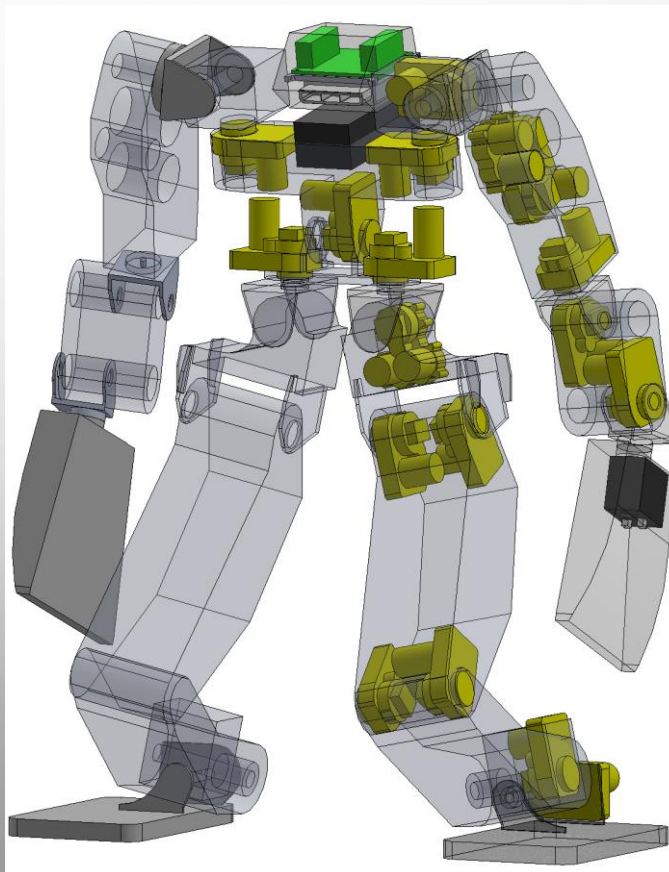
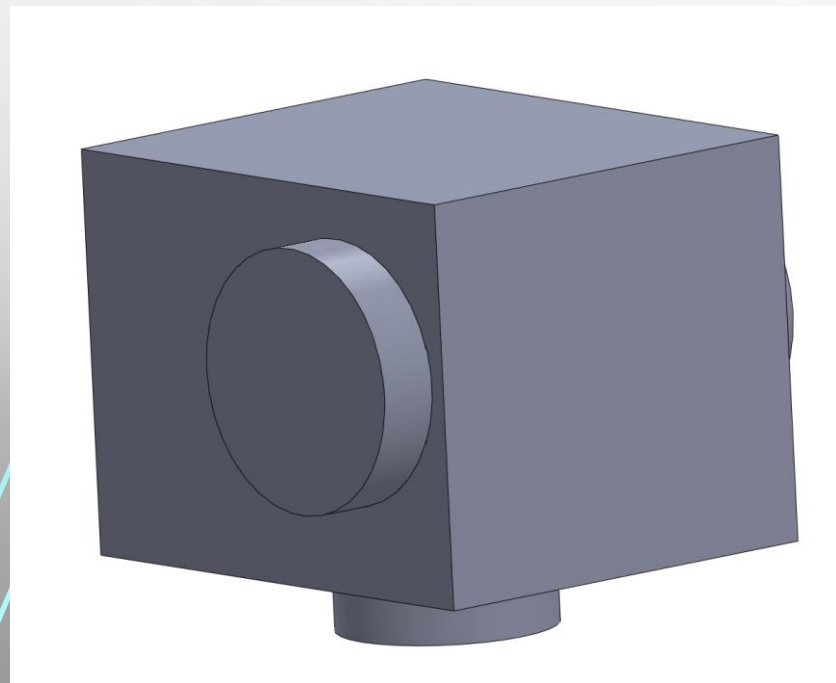
メタゲーム、流行の取入れと対策

作品
(自己表現、エンタメ)

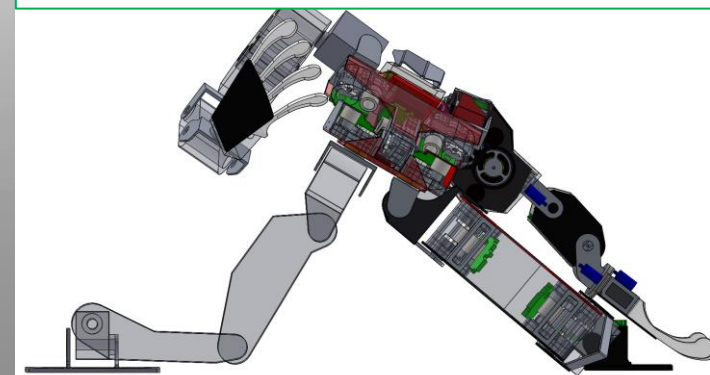
競技、ゲーム

基本設計（箱レベル）

- ラフなモデルを作って、中に主要部品（サーボ、制御ボード、バッテリー）を収める
- 姿勢を動かして、一番キツイ場所の寸法や可動域を検討
- プロポーションや重心位置が納得いくまで繰り返し検討
- できれば外装、配線、減速リンク等も大まかに決めておく（後回しになることも多い）



CAD上で関節を動かしながら、
プロポーションや干渉をチェック



基本設計（サーボの選定

主にサーボのトルクと重量から選定する

トルク：

- デカくて重いロボットほどトルクが必要
- ロボットの重量・サイズから、必要なトルクを見積もる
- または先に使うサーボを決めてから重量・サイズを合わせる

重量： サーボの合計重量がロボット総重量の45～50%くらいになる

他の選定要素：

耐久性：

- メカ（ギヤ、ケース）と回路（モーター／FET）の壊れにくさ
- 使ってみないと分からない。他ユーザーとの情報共有も重要。

スピード：

- 他の関節と連動するため、一か所だけ速くしても無意味なことも
- 軸配置や想定するモーションに応じて選ぶ

電力： 駆動電圧・電流はバッテリー選定と兼ね合い 消費電力大だと発熱も大きい

サイズ： ドール系など、見た目・デザイン重視の場合は重要

トルク計算

- 最もしんどい姿勢で計算
- **必要トルク[kg-cm] = ロボット重量[kg] × リンク長[cm] × マージン（安全率）**

マージンの目安：

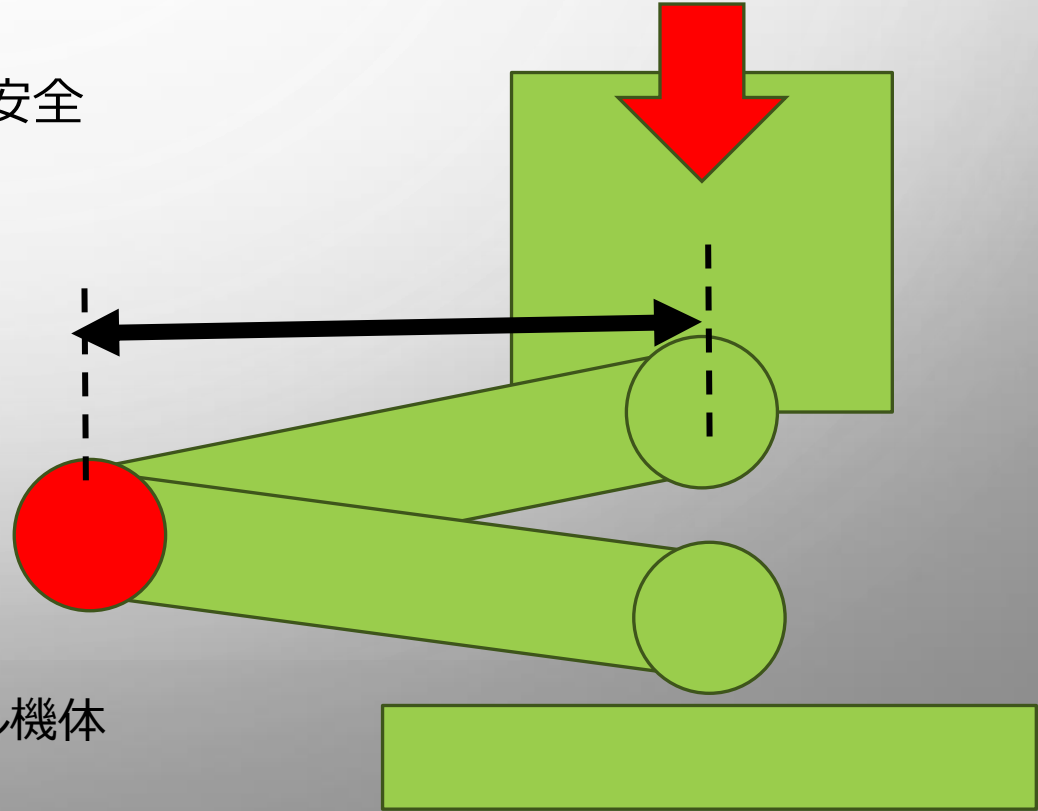
- バトル用： **1.4～1.6**
- ギリ歩ける： **1.1～1.2**
- 重いロボットは大きめにとったほうが安全

トルクが足りない場合…

- ロボットを軽く & 小さく
- 同じサーボを並列化 ⇒ n倍
- 減速してトルクを上げる ⇒ 2～3倍
- バネで補強 ⇒ ～1.3倍

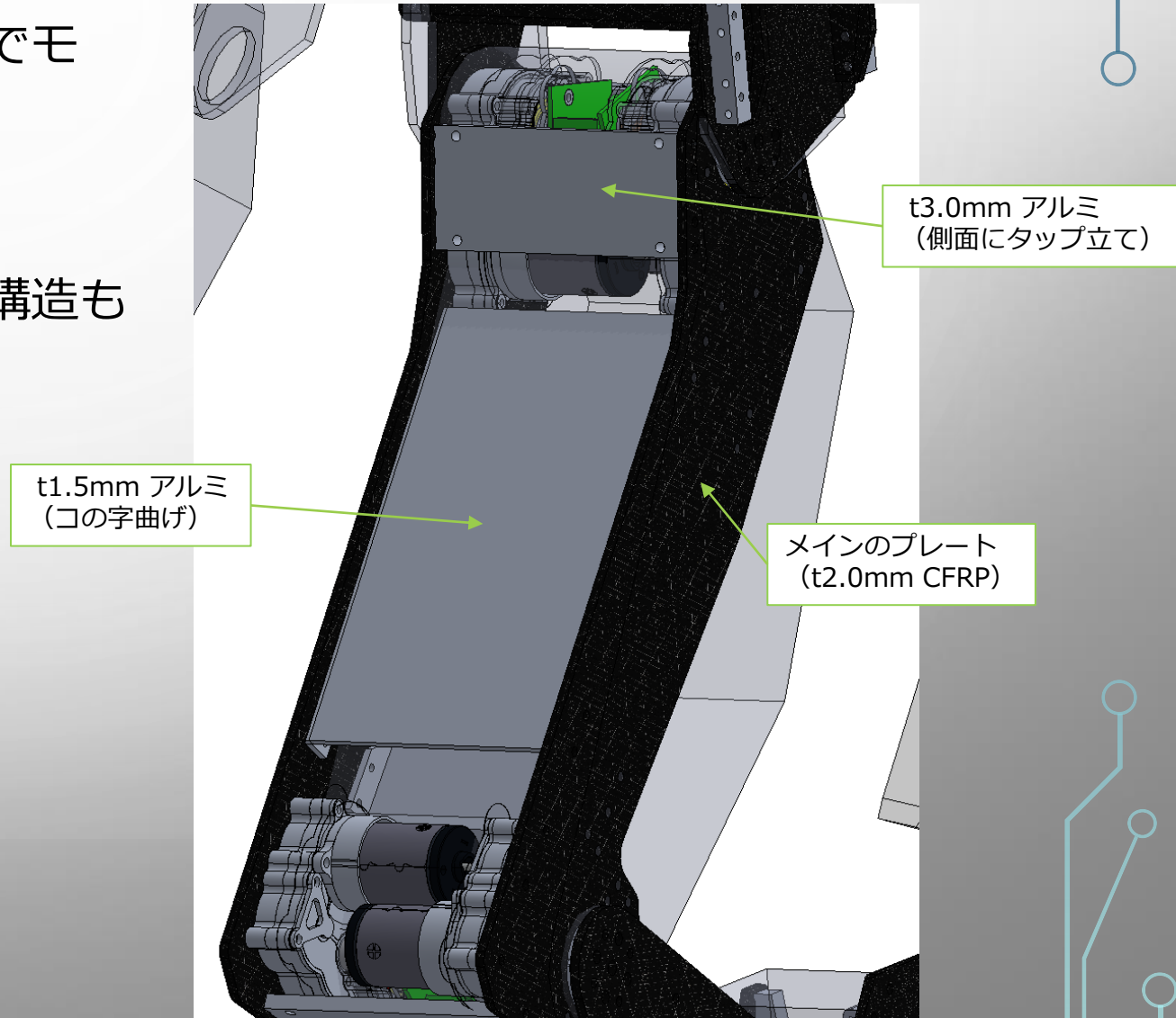
例：重量4kg、リンク長130mm、バトル機体

$$4[\text{kg}] \times 13[\text{cm}] \times 1.5 = 78[\text{kg-cm}]$$



設計（モジュールレベル）

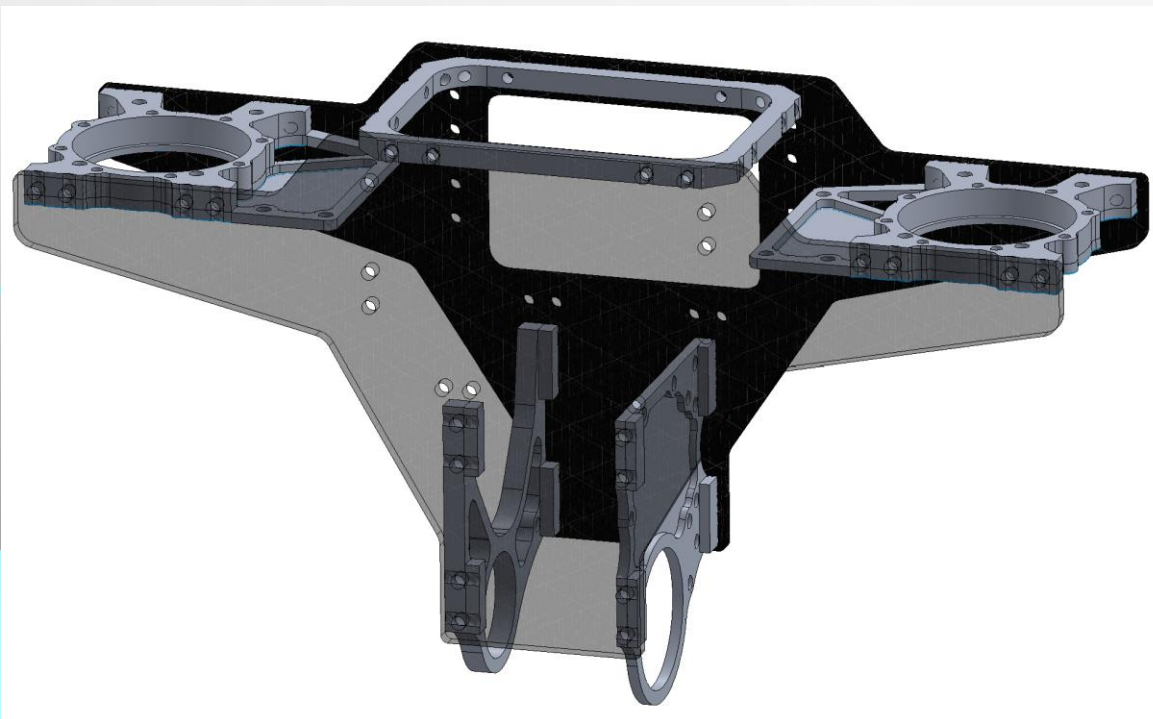
- 浮いていた部品同士をフレームで繋いでモジュールをつくる
- 材質と厚み、固定方法を決める
- モジュール同士の繋ぎ目（軸受け）の構造もここで検討



フレーム構造の基本

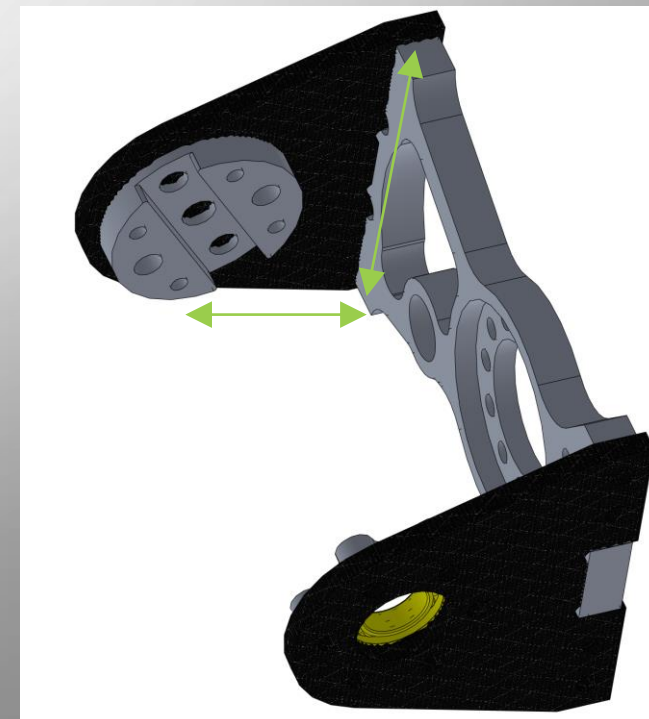
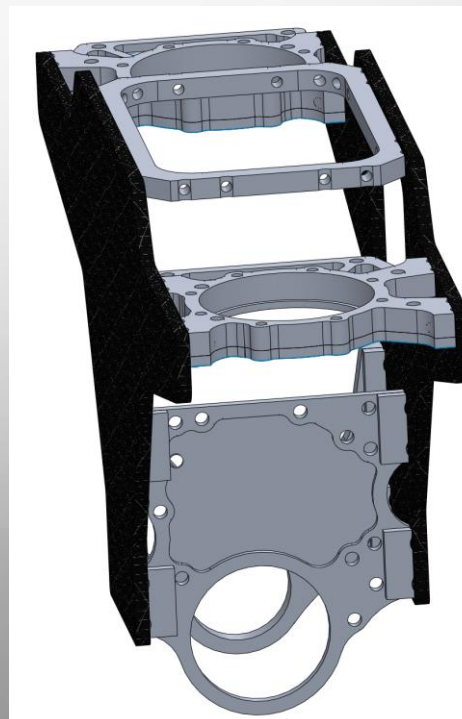
箱型フレーム

- 2枚の板（プレート）を梁（ビーム）で繋ぐ
- 梁はコの字板金、厚板ブロック、サーボケースなどを使う
- 梁は全周まんべんなく通すのがベスト
- 梁と梁の隙間をなくすと剛性高くできる
- 分厚いプレート単体でも箱とする場合も（足裏など）



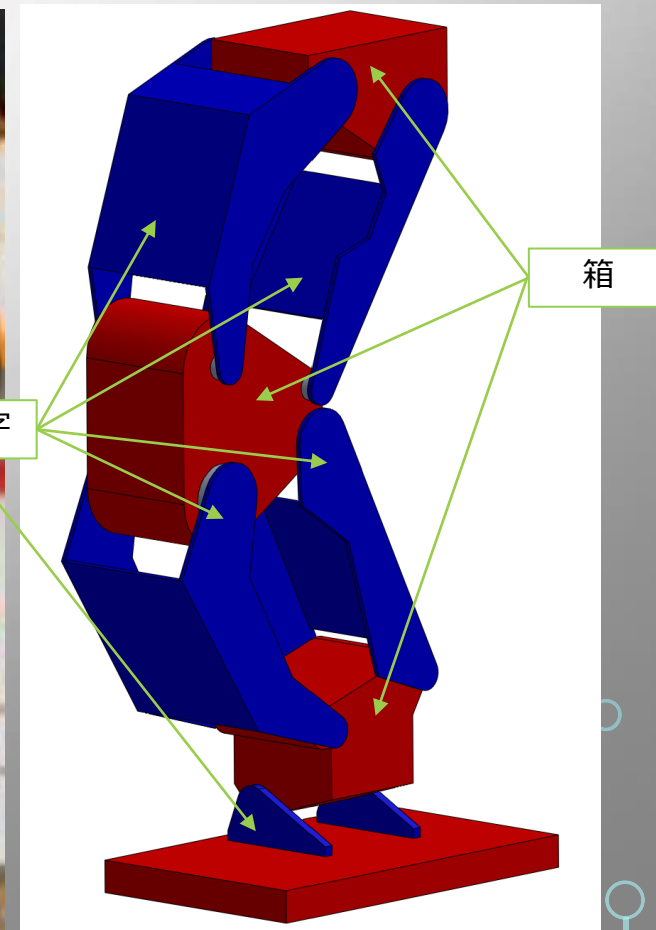
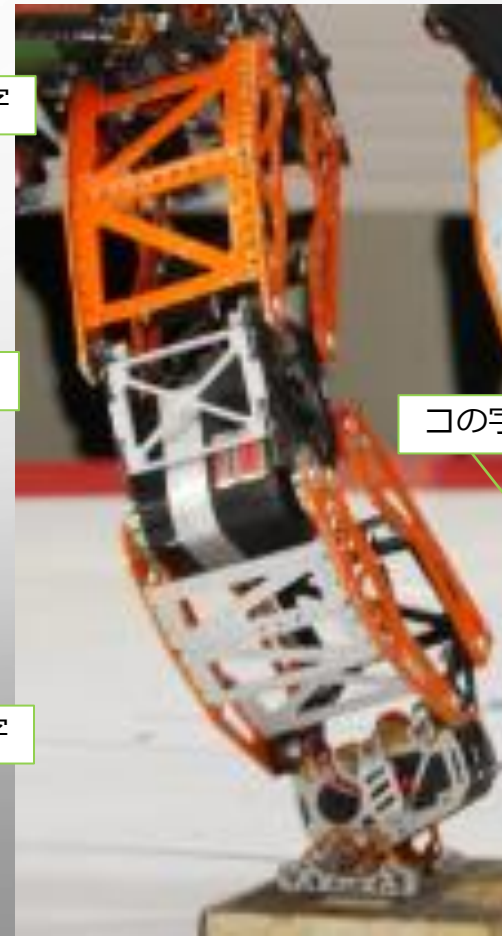
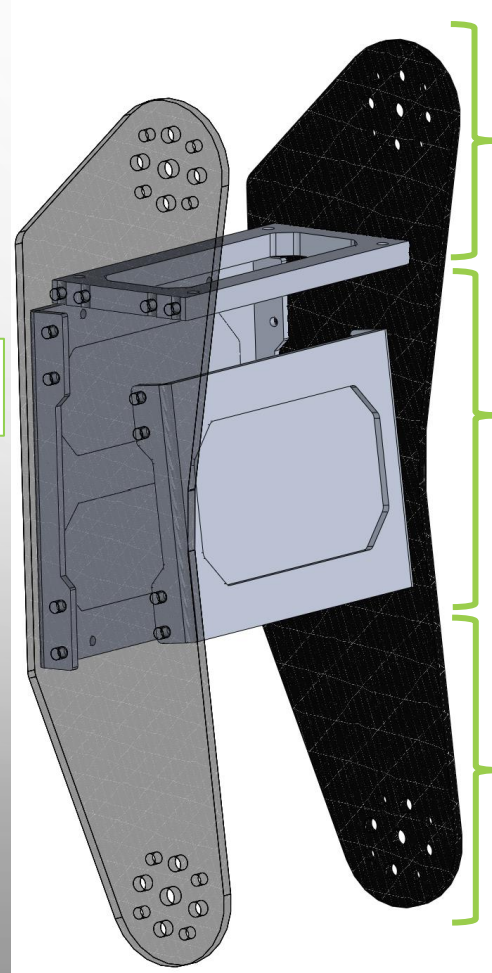
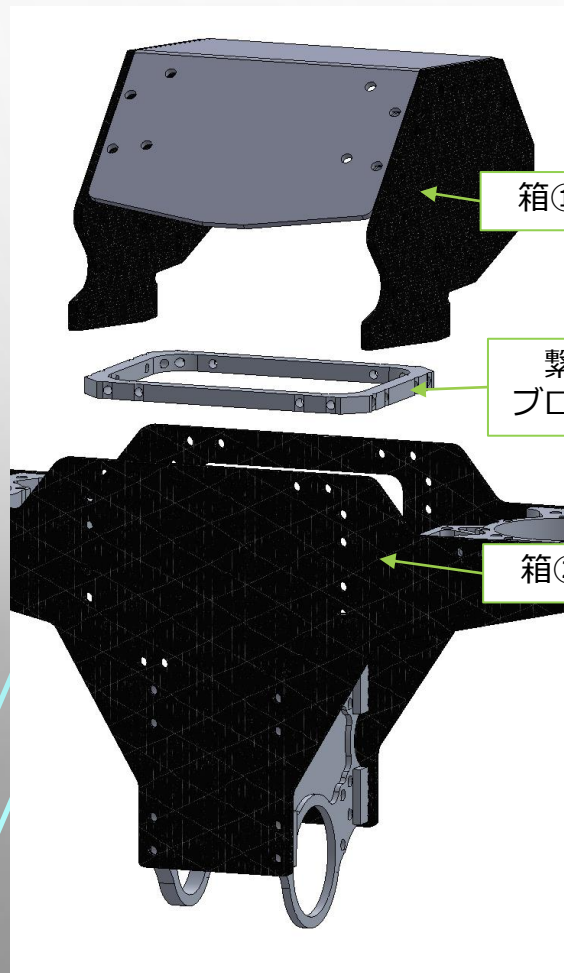
コの字フレーム

- 回転軸に取り付ける
- 出力側、反対側のプレートを梁で繋ぐ
- 梁の幅はできるだけ長く
- 回転軸と梁の距離を短くすると剛性UP



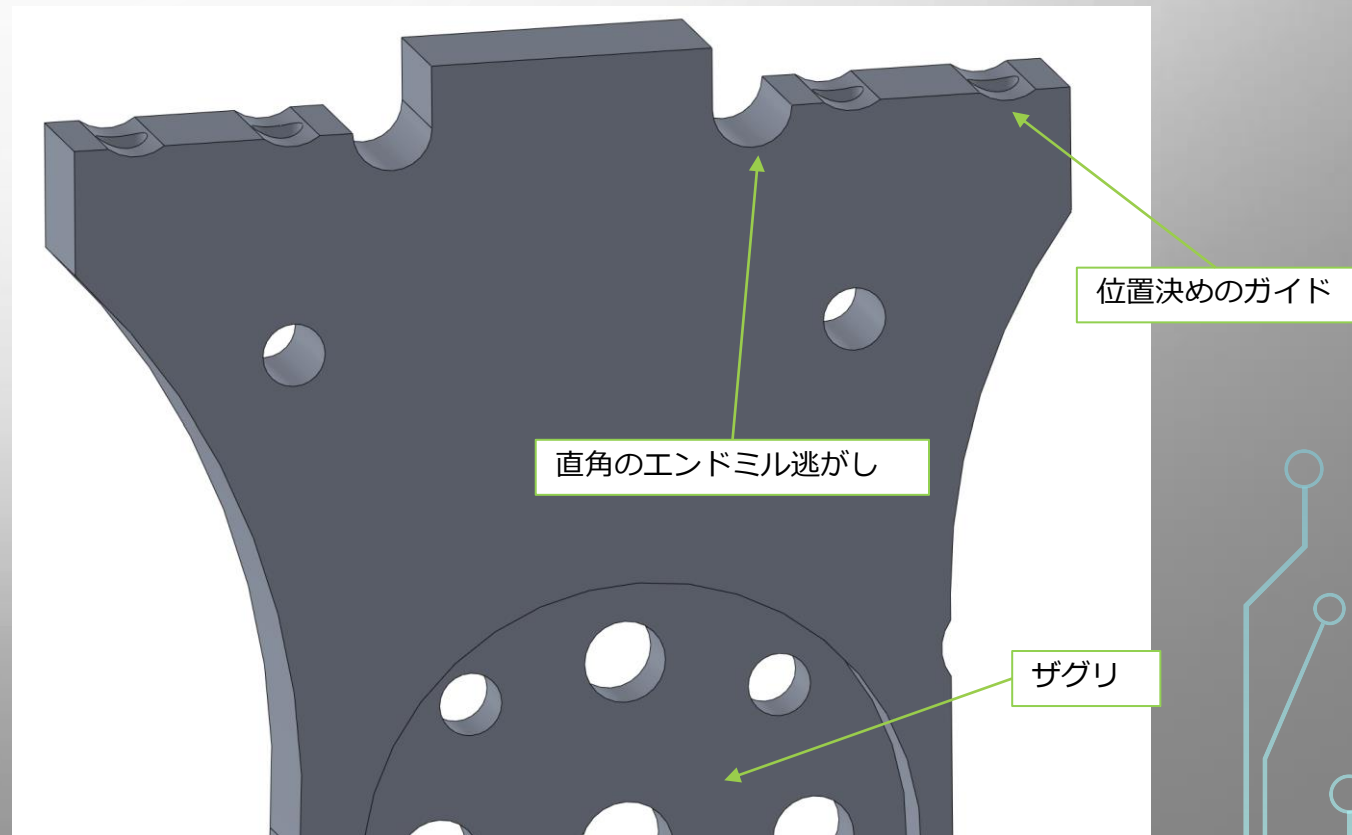
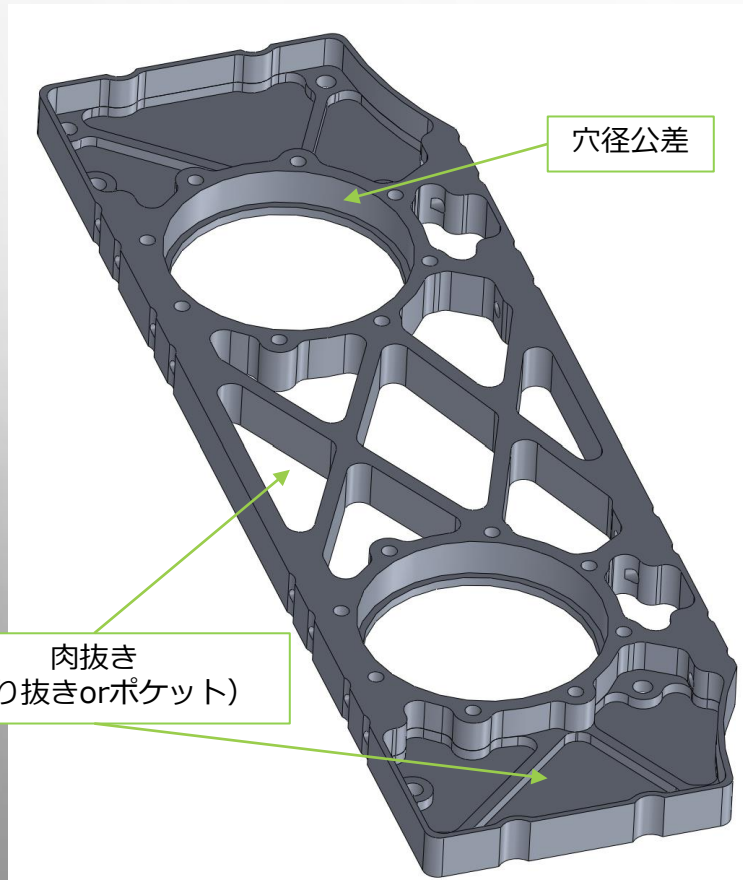
フレーム構造（応用編）

➤ 複雑な形状も、“箱型”と“コの字型”の組み合わせで作れる



詳細設計（パーツレベル）

- 外形や穴の位置等、パーツの最終形状をつくる
- 肉抜きもここで行う
- 加工や組み立ても考慮した形状



開発全体の流れ（ウォーターフォール型）



ウォーターフォール型：設計⇒製作⇒モーションと1工程ずつ進めていく

メリット：

- 残り作業時間が見積もりやすい
- まとめて作業するので効率がいい
- 何を作るか最初からハッキリ決まっている人向け

初めてのロボット作りにはオススメしない

- 設計が終わるまで後工程（加工やモーション作成）に進めない
- 設計ミスや仕様変更で後戻りが発生しやすい
- 手を動かしながら考える人には不向き

アジャイル型 (反復型) プロセスの例

- ユニット毎に設計、製作、テストを繰り返す
- 早い段階で加工やモーション作成に入れる
- 実際に動かしながら開発するので失敗しにくい
- 設計ミスや仕様変更に対応しやすい

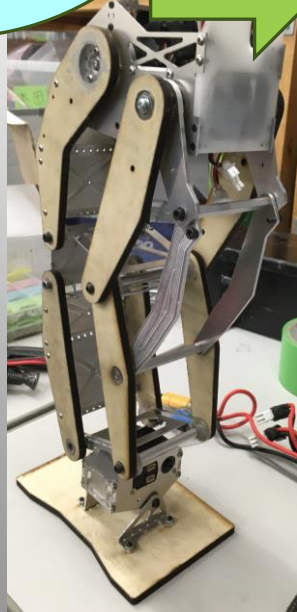
コンセプト検討 + 基本設計 (全身)

詳細設計
(片脚)

サイクル1
(片脚のみ)

動作テスト
(片脚屈伸)

加工 + 組立
(片脚)



詳細設計
(腰)

サイクル2
(下半身)

動作テスト
(歩行)

加工 + 組立
(腰)

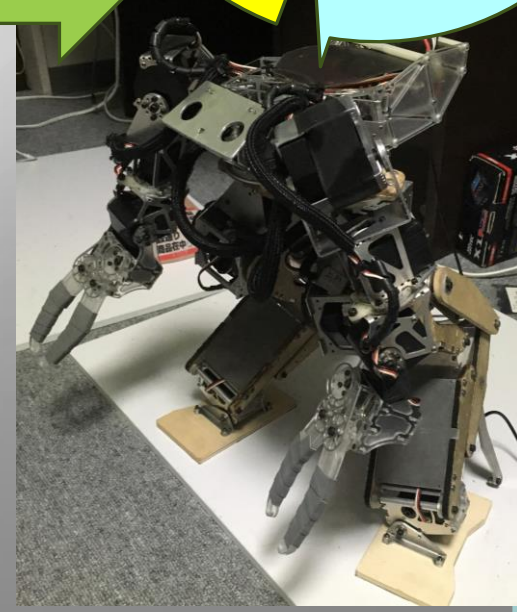


詳細設計
(胴体)

サイクル3
(胴体)

動作テスト
(自立)

加工 + 組立
(胴体)

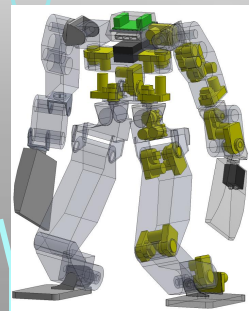


詳細設計
(腕)

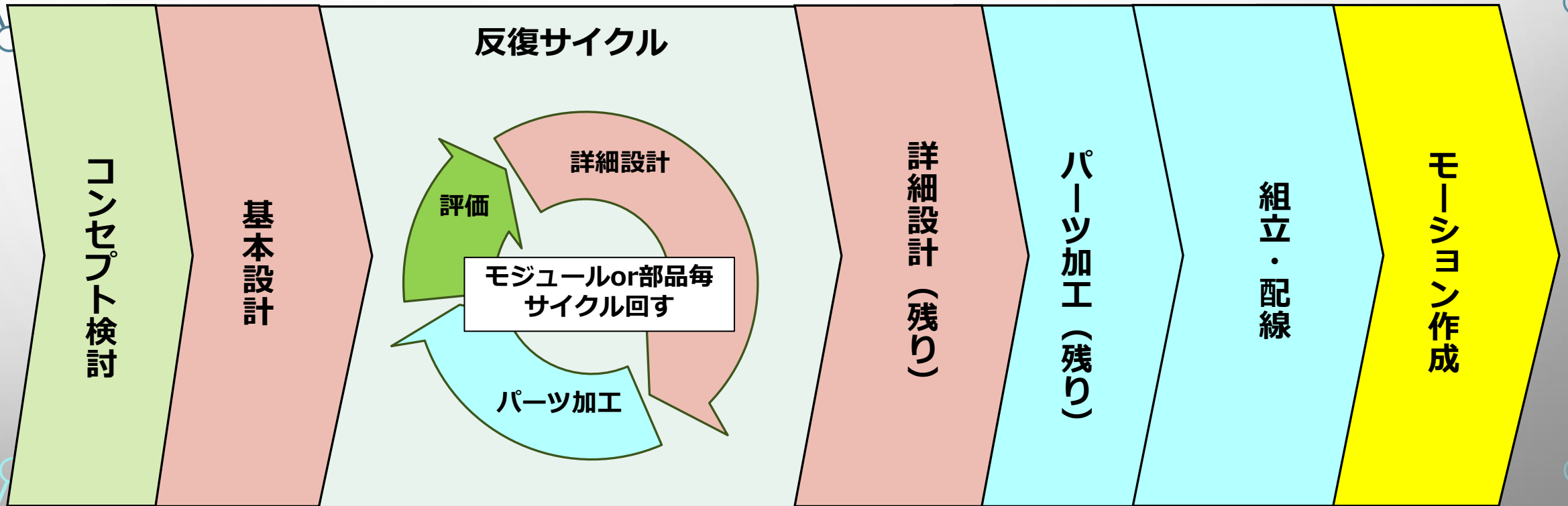
サイクル3
(腕)

動作テスト
(起上がり)

加工 + 組立
(腕)



複合型の設計プロセス



一部の工程でサイクルを回す、複合型プロセスで作ることが多い

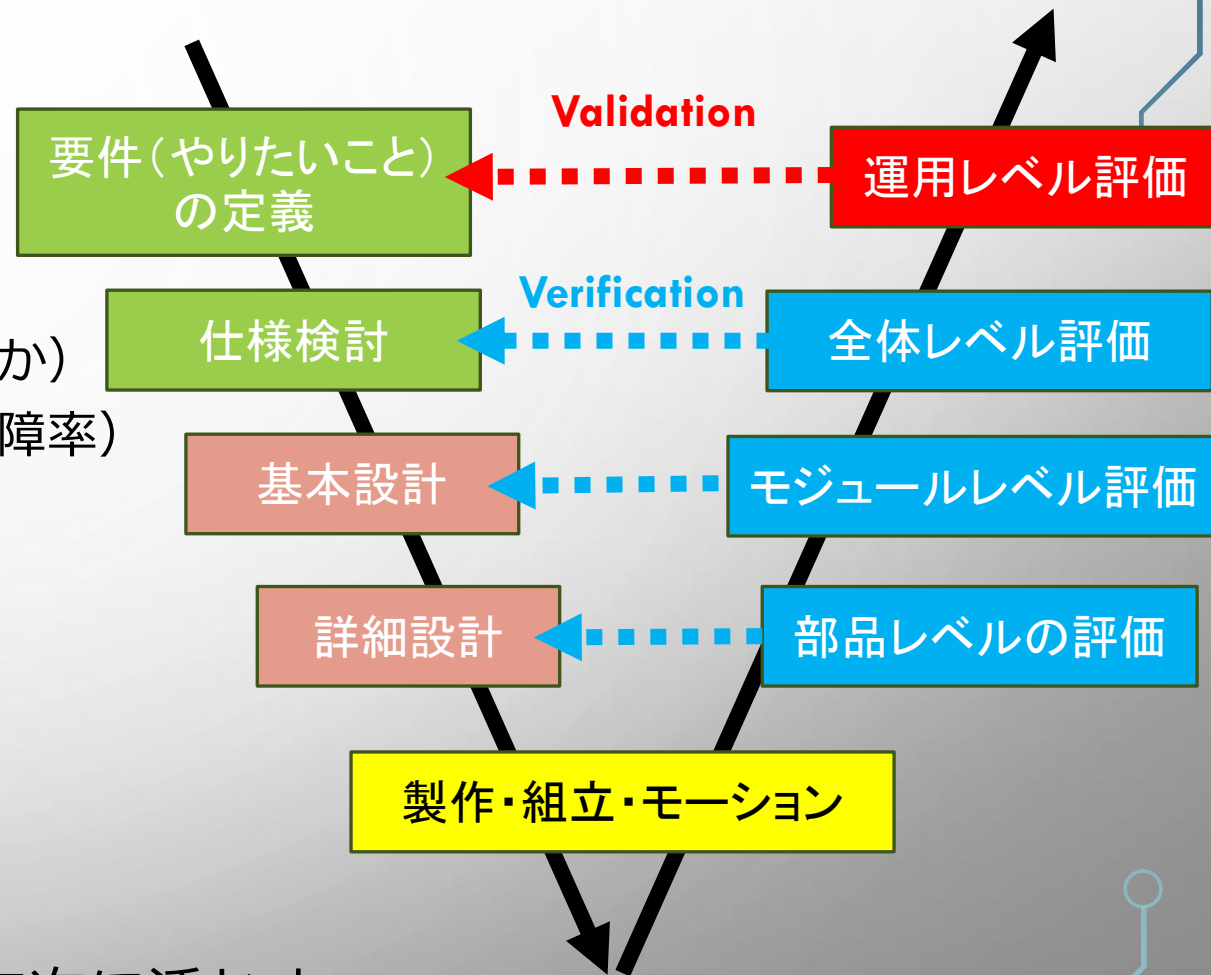
作ったロボットの評価 (V & V)

設計の検証 (Verification)

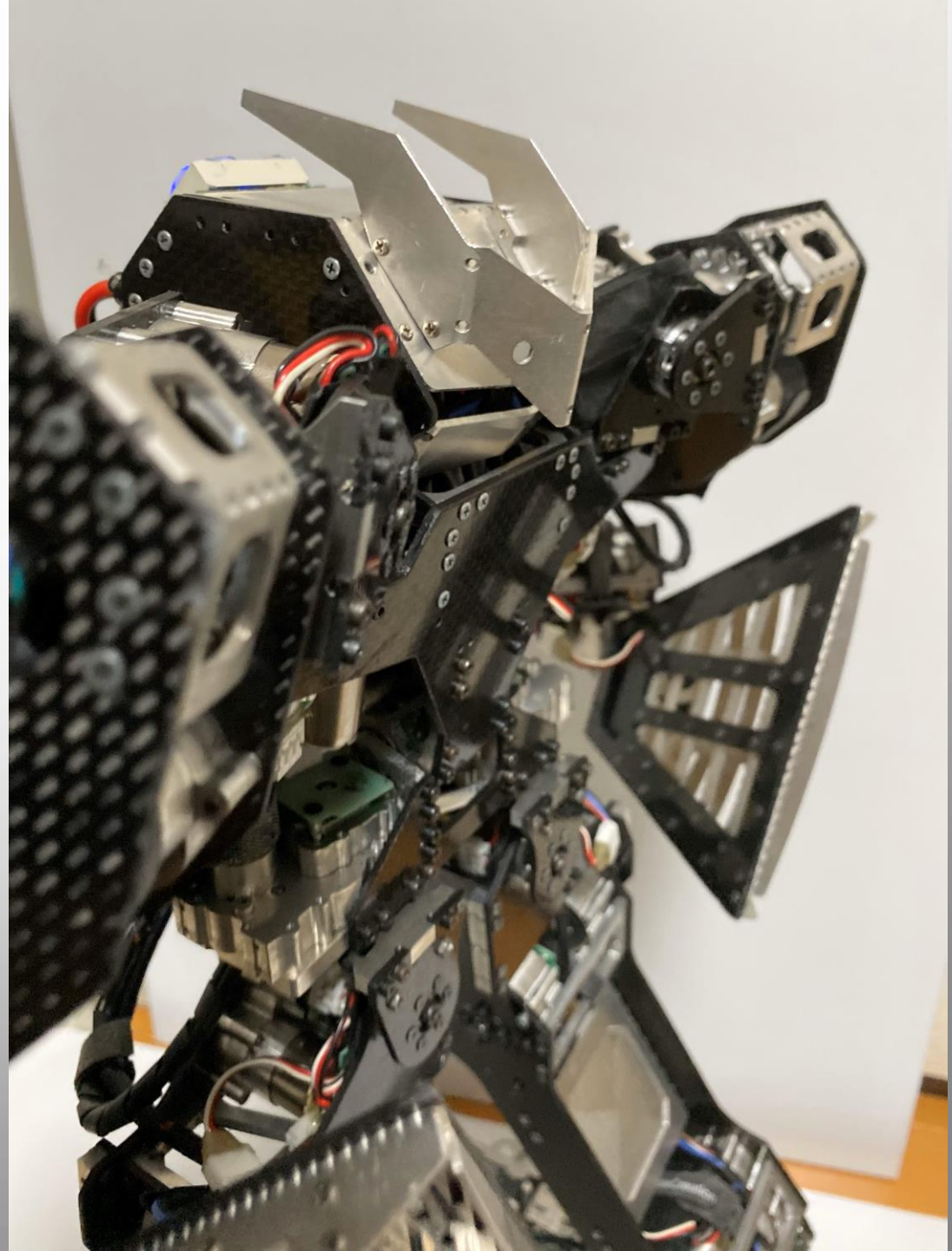
- 仕様、設計意図の通りに作れているか？
 - 部品レベル (加工性、強度、組立性)
 - モジュールレベル (剛性、関節がきれいに動くか)
 - 全体レベル (重量、重心、メンテナンス性、故障率)

妥当性の検証 (Validation)

- 商品開発の顧客満足度評価に近い
 - コンセプトや要求仕様は正しかったか検証
 - 最初に挙げた“やりたいこと”は達成できたか？
 - 不足機能or不要な機能はなかったか？
-
- 良かった点、改善すべき点をはっきりさせて次に活かす
 - 0点 or 100点はありえない、失敗作でもどこかに成功した要素があるはず
 - せっかく苦労して作ったのだから、作りっぱなしはもったいない！



おまけ、小ネタ色々



減速機構

メリット：トルクアップ、減速した分サーボ本体へのダメージが減る

位置決め精度を邪魔しないサーボセイバーとしても使える

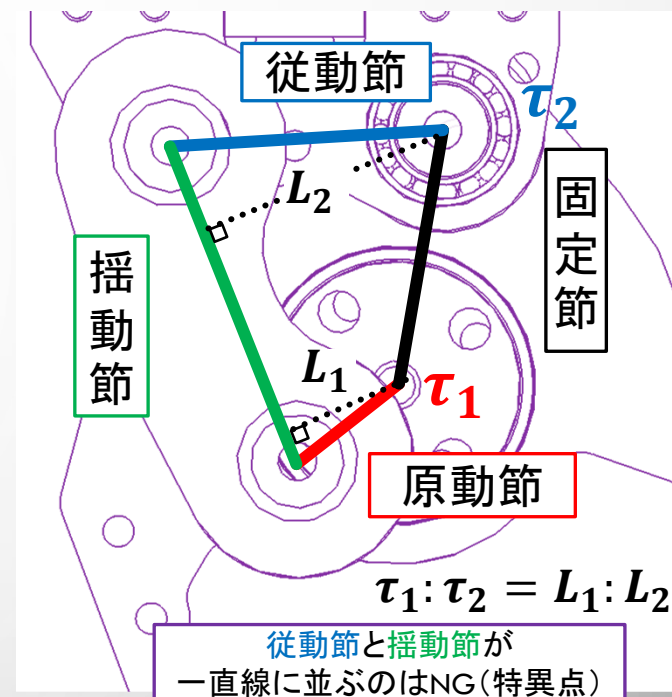
デメリット： スピードと可動域が減る

(可動範囲は90°程度で十分な場合も多く、デメリットになりにくい)

ギヤ

➤ メリット：機構がシンプル、減速比が常に一定、無限回転できる

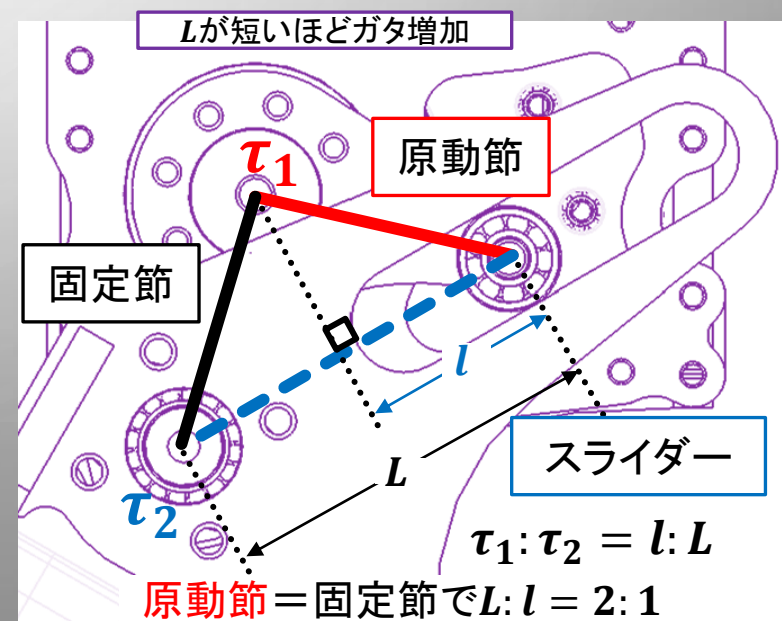
➤ デメリット：ギヤ歯の加工難しい、バックラッシュが増える



4節リンク (台形リンク)

➤ メリット：機構がコンパクト、ガタ小さい、加工が楽

➤ デメリット：速度比の変動大、設計時のパラメータが多い (4つ)



長穴減速 (スライダークランク)

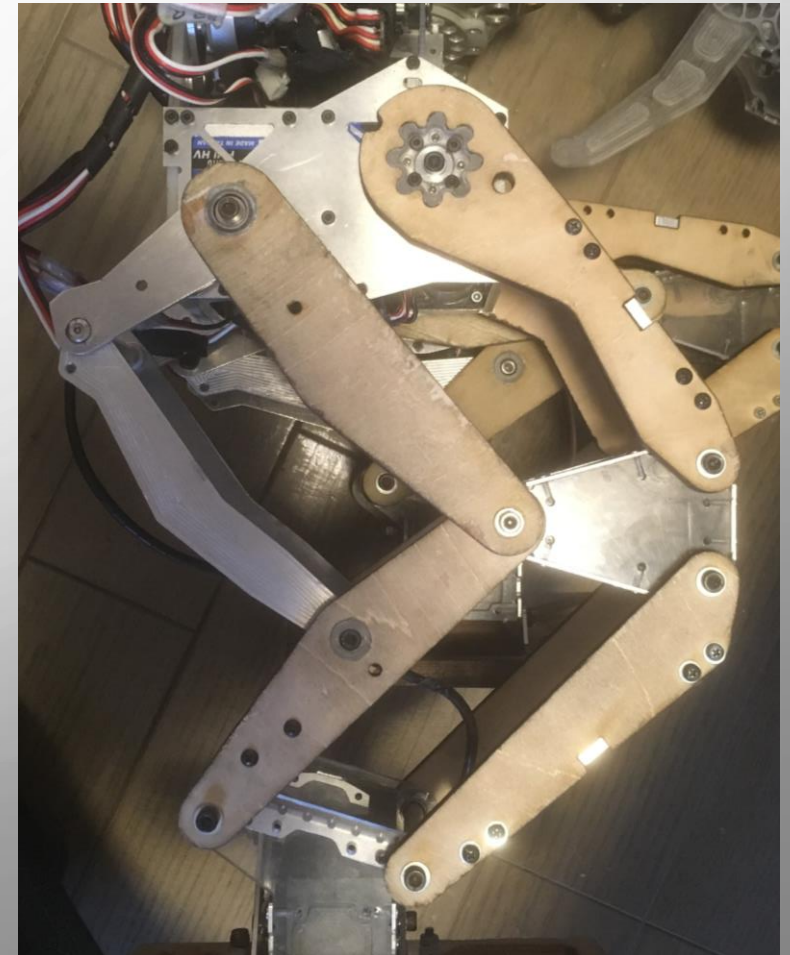
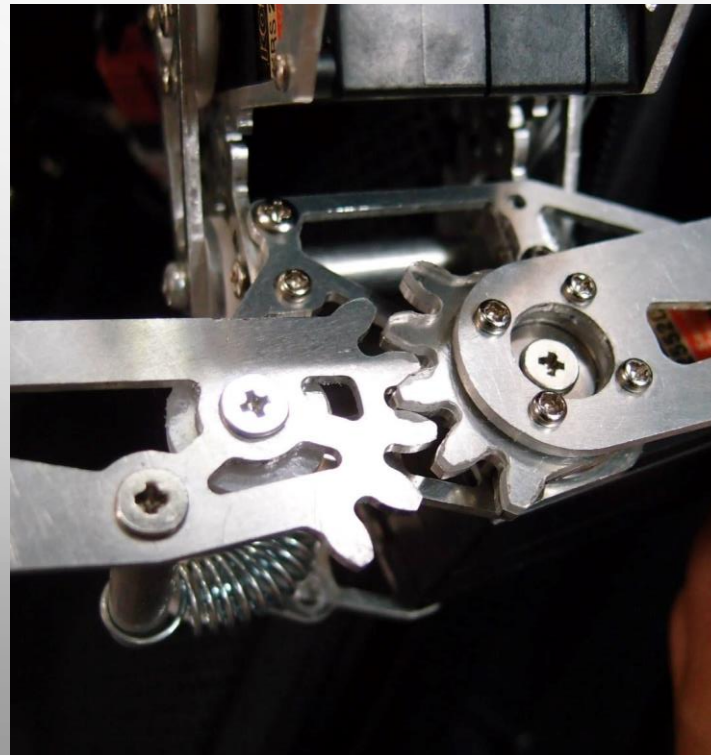
➤ メリット：一定の減速比 (2 : 1) が可能、壊れにくい

➤ デメリット：摺動部の摩耗によるガタ、スライダーが邪魔

➤ 上2つと比べて大きなデメリットがなく使いやすい

ギヤ／4 節リンクの活用法（一例）

- 複数の関節をサーボ 1 個で動かす
 - 複数サーボのトルクを 1 関節に集約
 - サーボと関節軸の位置を離す
 - 回転以外の動きに変換
 - 楕円軌道
 - 平行移動
 - 直線軌道
- など



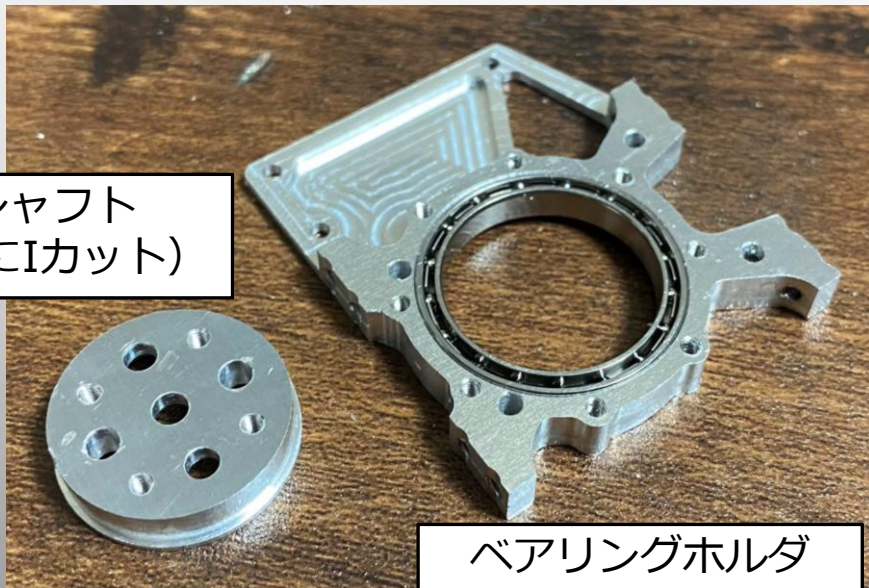
片持ち軸受け

コンセプト

- ラジアル、スラスト（引張、押込）の3方向を受ける
- 外径サイズをコンパクトに

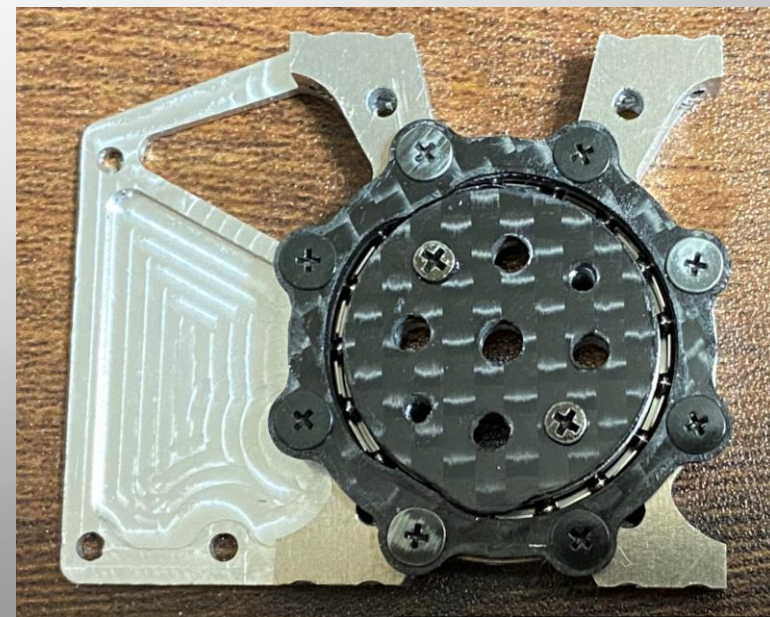


引張荷重によるケース破損



シャフト
(裏にIカット)

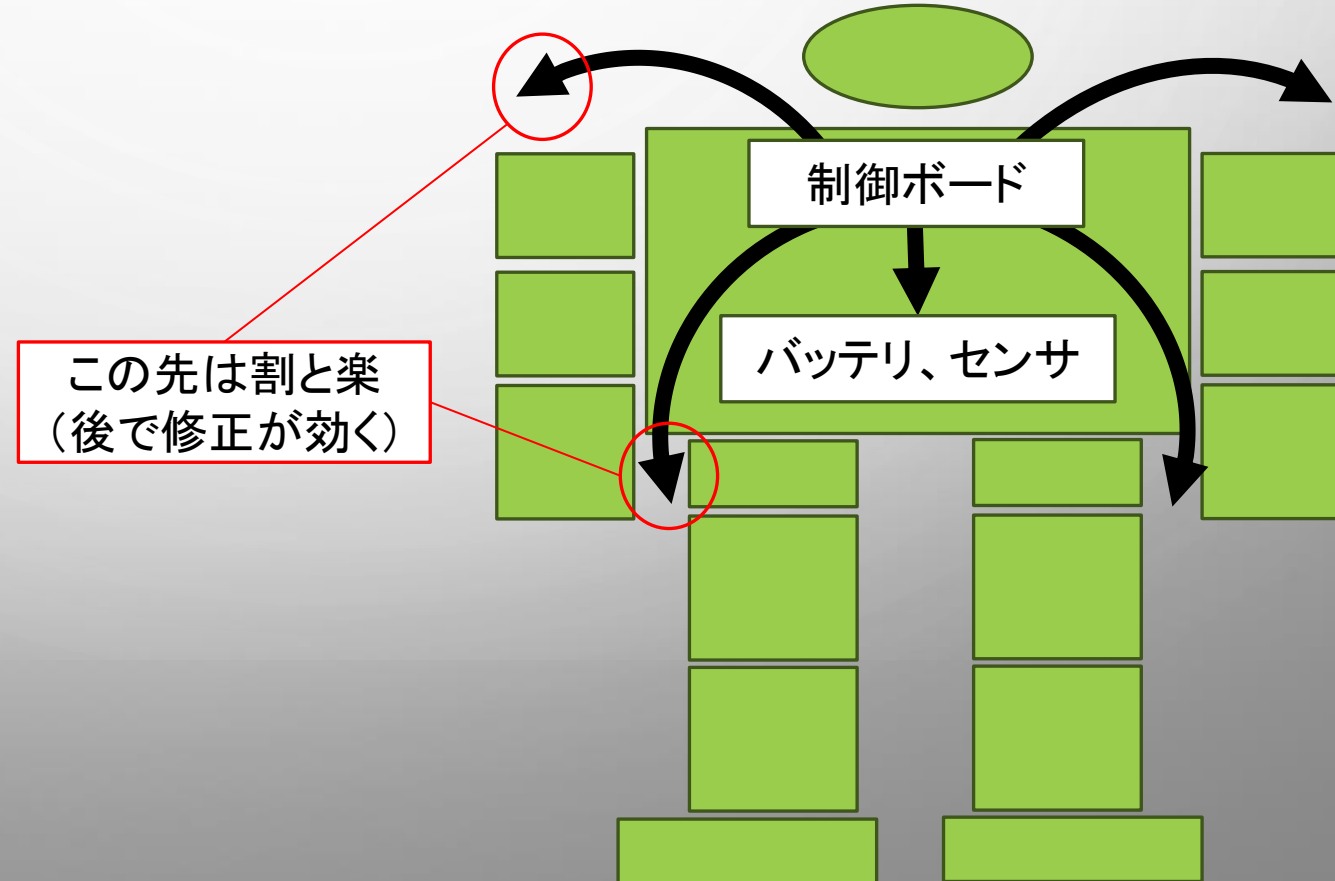
ベアリングホルダ



アウタ/インナ押え

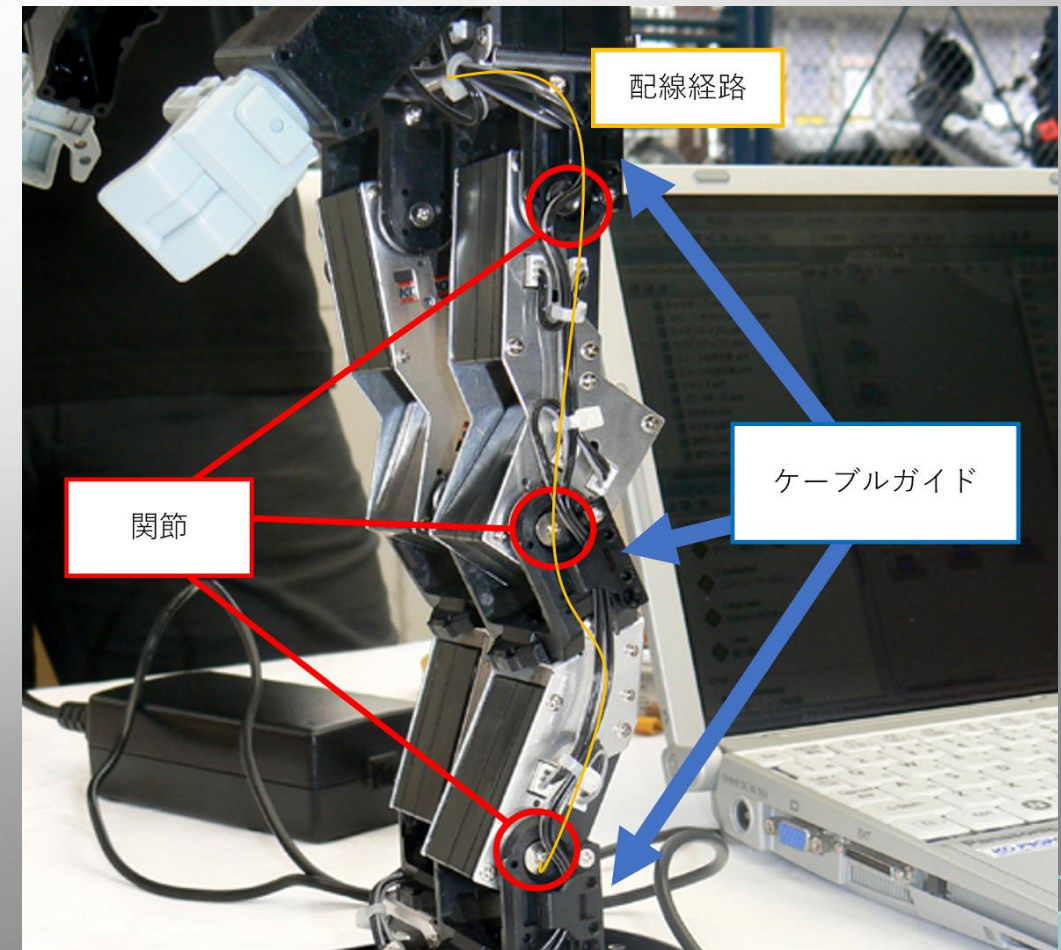
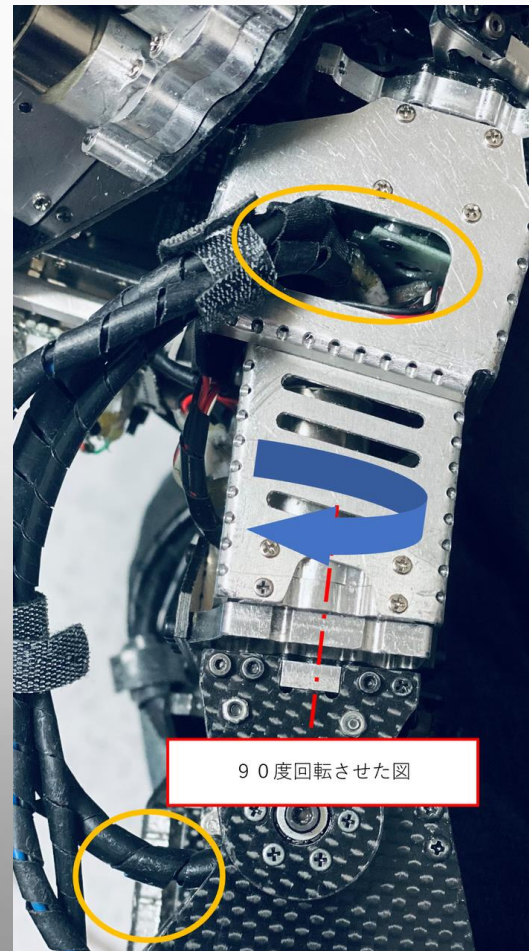
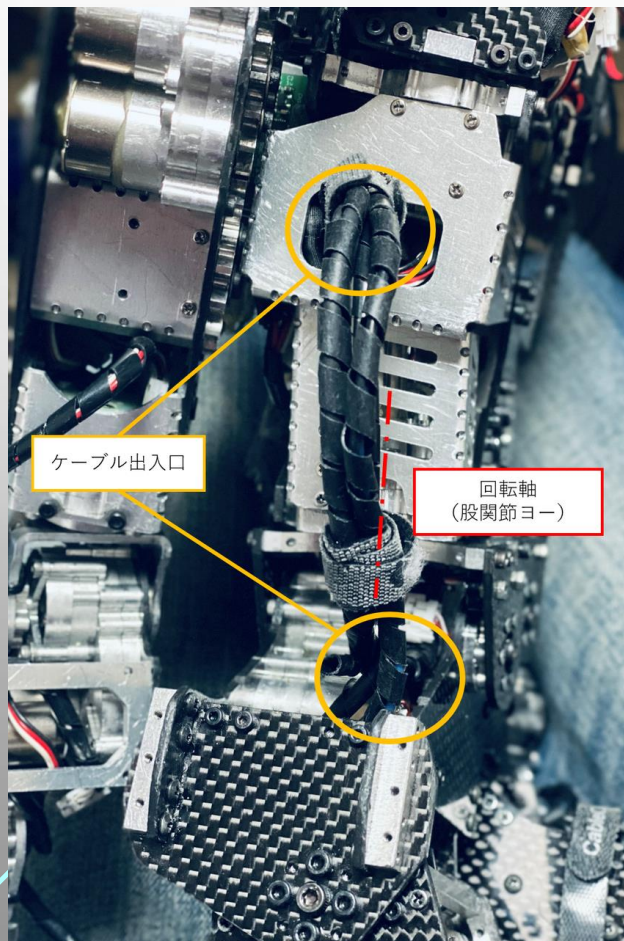
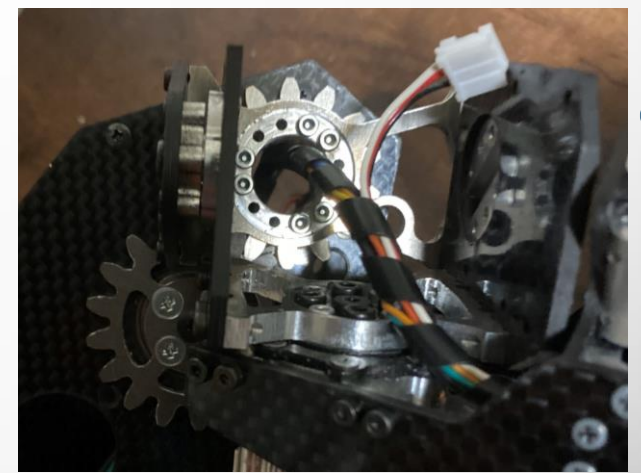
配線のコツ

- 胴体内部の配線経路が重要 可能なら胴体設計時に経路も検討
- ケーブル多い（手足、バッテリー、センサ）ため煩雑になりやすい
- 起点が汚いと全体が汚くなりがち



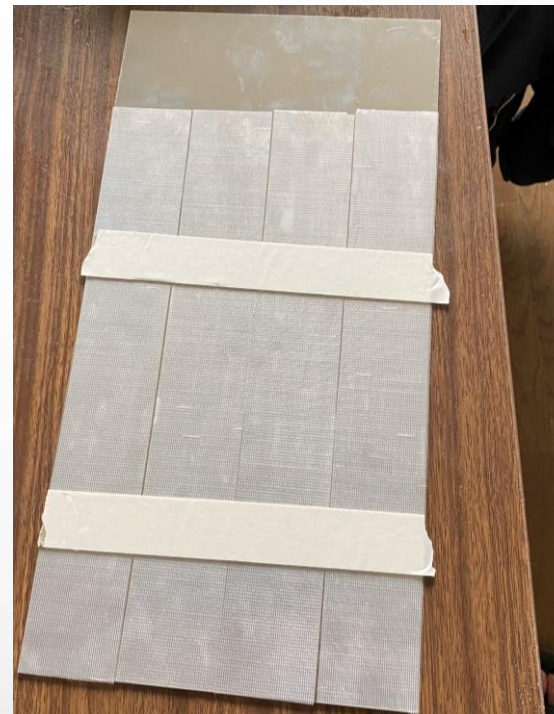
配線のコツ（可動部）

- 可動部は回転軸の近くを通す
- できれば回転軸上を通過させるか
- 片持ち部は軸内配線（サーボが邪魔なのでひと工夫必要）



CNCフライス加工のコツ

- 材料固定ははがせるタイプ（またはカーペット用）の両面テープで
- 加工エリア全体を養生テープ（部品が飛ばない+汚れにくい）
- 長時間加工はスピンドルモーターを冷却
- 切粉は詰まらないようファン（CNC nut fan）で飛ばす
- 小径穴はドリルで加工
- エンドミルはねじれ角が大きいもの（40°以上）を使う
- 切れ味の落ちた工具はさっさと捨てる（折れるまで使わない）



加工パラメータ、便利ツール紹介

加工パラメータ（右図）

- オリジナルマインドmini-CNC HAKU 2042でアルミ加工する用
- 機械剛性や工具に応じてチューニング要。
- エンドミルはZ切り込み量&Z送り速度をなるべく小さく

加工に便利なフリーソフト（個人サイトにつき使用は自己責任で！）

- NCVC : CAMソフト。加工時間の確認が可能

<https://k-magara.github.io/>

- safe z point : ポケット加工の加工時間短縮できる

http://sliverqueen.gee.jp/contents/presentation/aoi/how_to_safe_z_point/how_to_safe_z_point.html

- GCSW : 歯車計算ツール。歯形のdxfファイルが簡単に作れる

https://www.khkgears.co.jp/gear_technology/gcswforweb.html

エンドミル

Tool List

- End Mill (2 mm)(Al)
- End Mill (1 mm)(Al)
- End Mill (1.5 mm)(Al)
- End Mill (2.0 mm)(Al)
- End Mill (2.5 mm)(Al)
- End Mill (3 mm)(Al)
- POM -----
- End Mill (2.5 mm)(POM)
- PC -----
- End Mill (2 mm)(PC)
- End Mill (2.5 mm)(PC)
- End Mill (3 mm)(PC)
- wood -----
- End Mill (2 mm)(wood)
- End Mill (3 mm)(wood)
- drill -----
- Drill (Center)
- Drill (1.6mm)

Tool Info

Name: End Mill (2.5 mm)(Al)

Tool Type: End Mill

Geometry

Diameter (D): 2.5 mm

Cutting Parameters

Pass Depth: 0.05 mm

Stepper: 1.25 mm 50.0 %

Feeds and Speeds

Spindle Speed: 16000 r.p.m

Feed Rate: 800.0 mm/min

Plunge Rate: 20.0 mm/min

Tool Number: 5

Buttons: New ... Copy ... Delete Apply OK Cancel

ドリル

Tool List

- End Mill (2 mm)(Al)
- End Mill (1 mm)(Al)
- End Mill (1.5 mm)(Al)
- End Mill (2.0 mm)(Al)
- End Mill (2.5 mm)(Al)
- End Mill (3 mm)(Al)
- POM -----
- End Mill (2.5 mm)(POM)
- PC -----
- End Mill (2 mm)(PC)
- End Mill (2.5 mm)(PC)
- End Mill (3 mm)(PC)
- wood -----
- End Mill (2 mm)(wood)
- End Mill (3 mm)(wood)
- drill -----
- Drill (Center)
- Drill (1.6mm)

Tool Info

Name: Drill (1.6mm)

Tool Type: Drill

Geometry

Diameter (D): 1.6 mm

Included Angle (A): 118.0 degrees

Cutting Parameters

Pass Depth: 0.5 mm

Feeds and Speeds

Spindle Speed: 16000 r.p.m

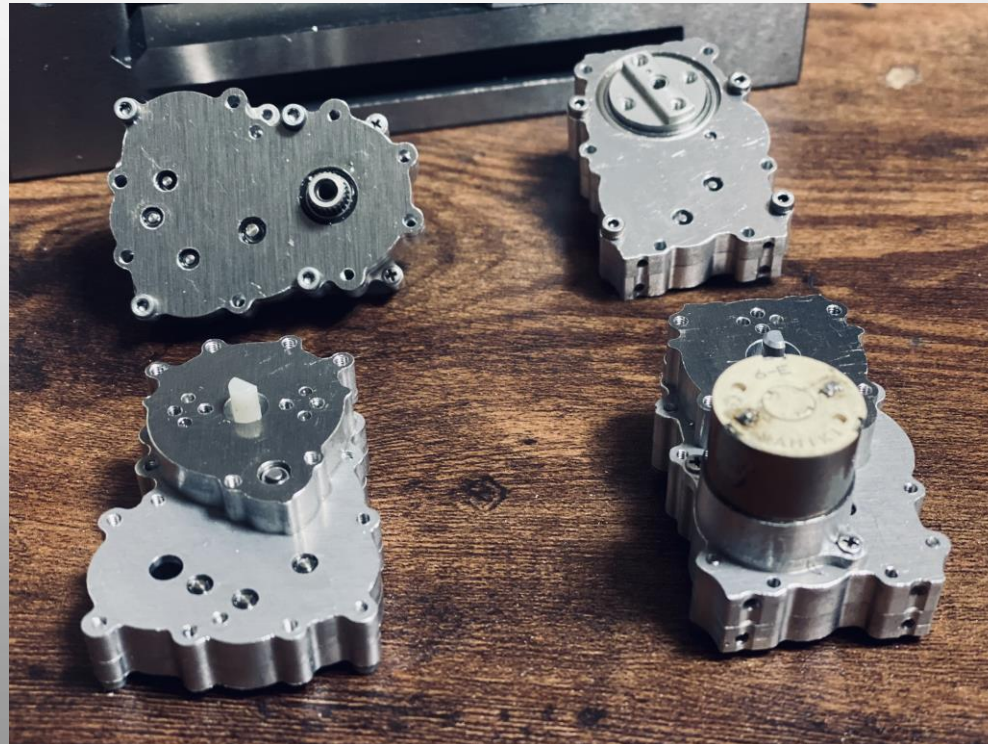
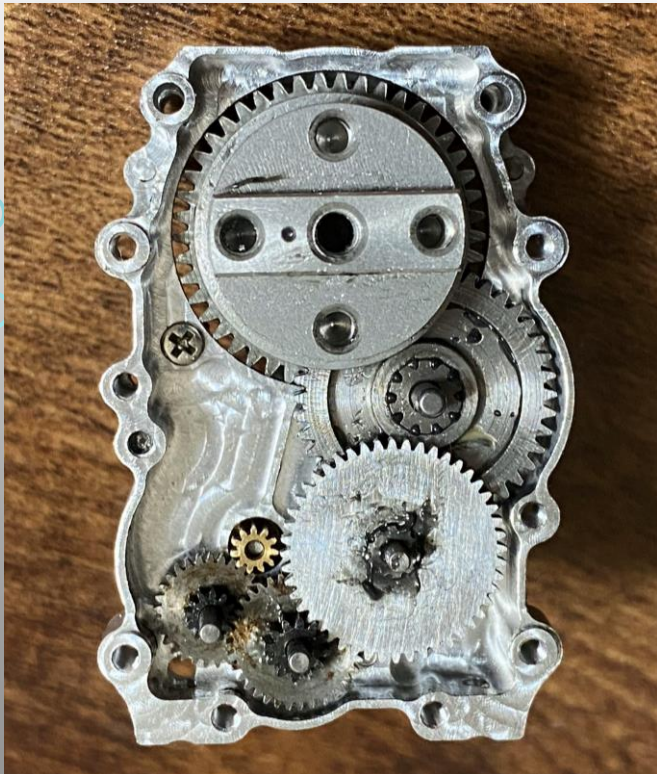
Plunge Rate: 40.0 mm/min

Tool Number: 8

Buttons: New ... Copy ... Delete Apply OK Cancel

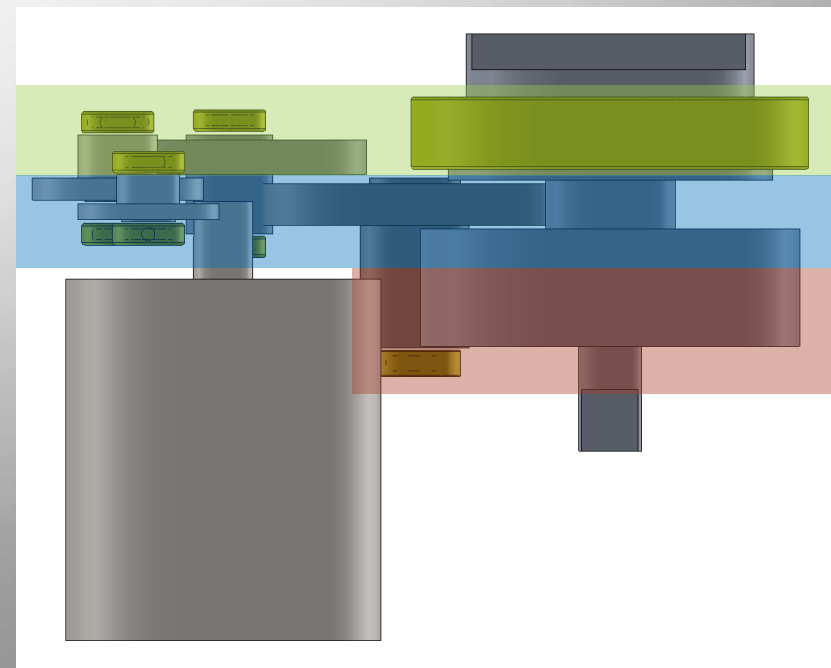
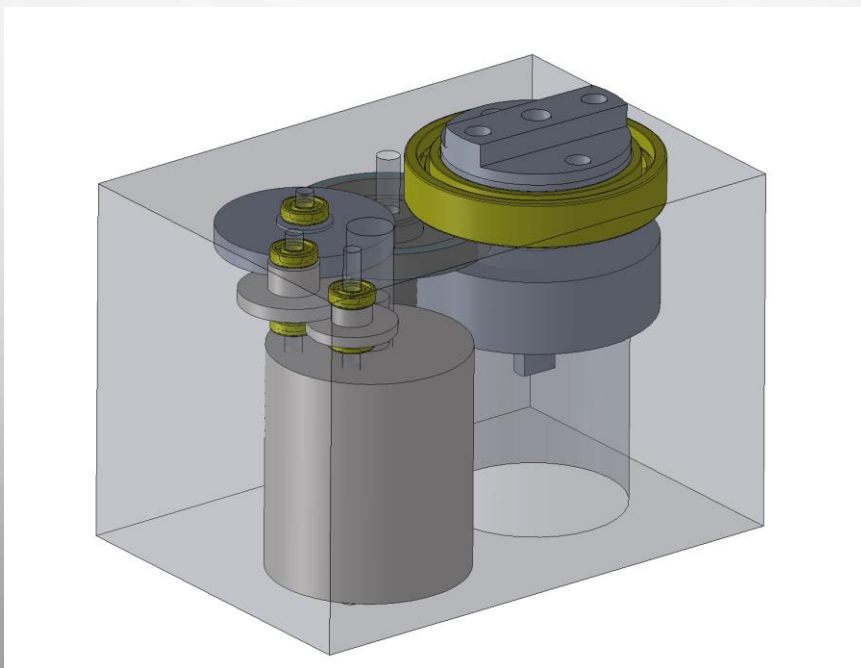
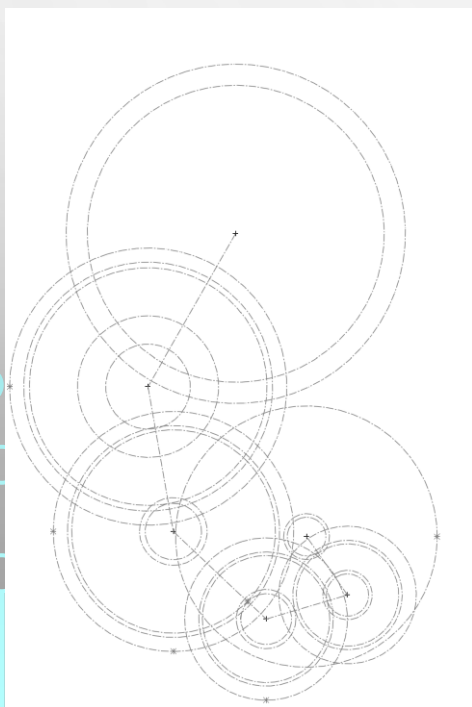
自作サーボケースについて

- ケースのみ自作
- モーター、基板、ギヤは市販品を使用
- 軽量化、省スペースが目的



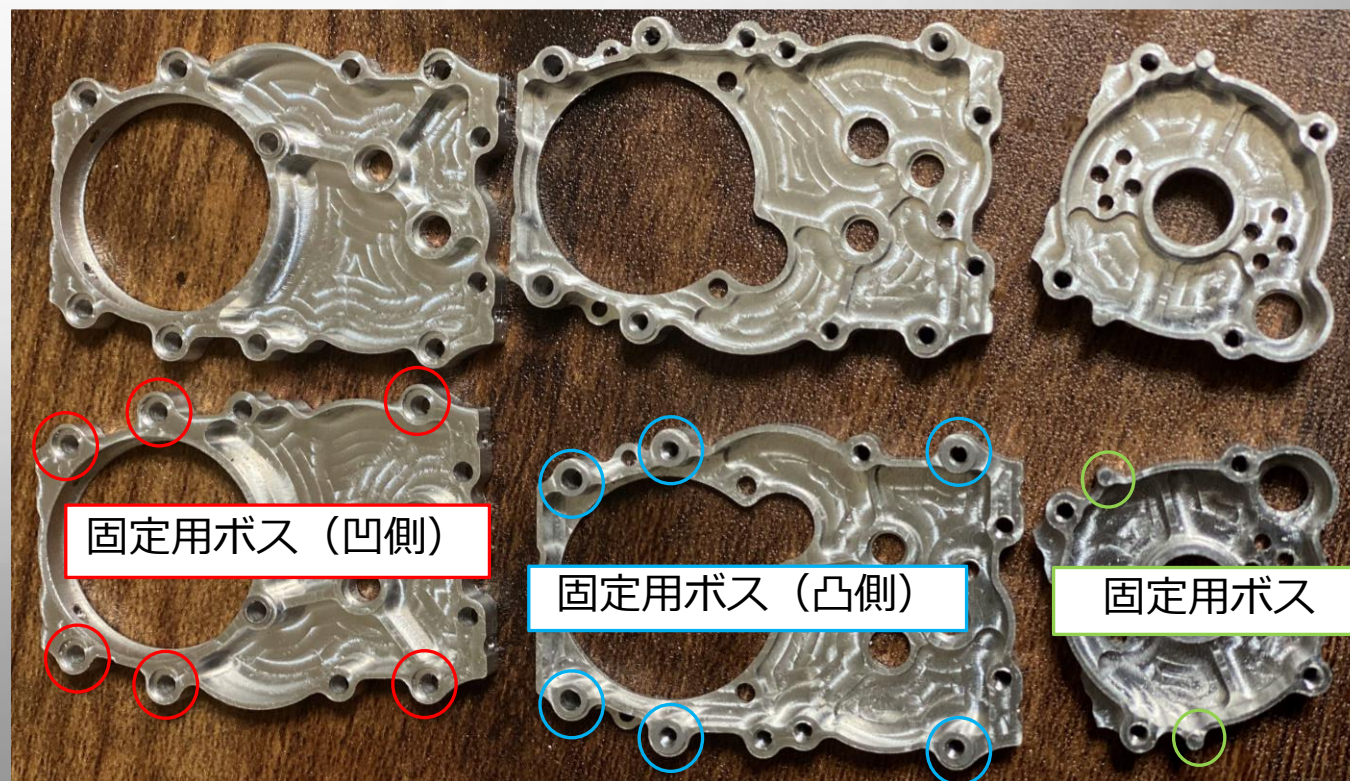
製作手順

- レイアウト検討（2Dスケッチしつつ、3Dモックで干渉確認）
 - 各層の分割位置検討、パーツ同士の固定方法、穴位置を検討
- ⇒ここから各パーツの詳細設計



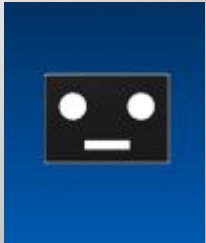
設計のポイント

- ギヤ同士の距離（近すぎ＝回らない／遠すぎ＝バックラッシュ）
- シャフト⇔ケースの穴径公差（強すぎると組立時に変形）
- モーター固定方法（圧着は破損のおそれ、耐熱性のある接着剤がオススメ）
- ケース分割方法（加工しやすさ、材料コスト、組立・分解のやりやすさ）
- ケース同士の固定方法（全体剛性に影響、ネジに頼らない固定方法）



参考：上位勢の活動スタイル（独断と偏見）

技術、モノづくり



自己表現、エンタメ

競技、ゲーム



試合で勝てるロボットのセオリー

※あくまで“手っ取り早く勝率を上げる”ためのセオリー。バトルロボット以外はこの通りでない

アクチュエータ（サーボ）性能

- ロボットの性能・パフォーマンスに直結
- 上位陣は全身ハイトルクサーボが普通 自分も同じものを使ってスタートライン
- 重量制限で機体に搭載できる限界はある あくまで不利にならないための要素

機体設計

- 製作期間の短さ、故障のしにくさ、メンテナンス性が重要
モーション調整と練習時間をできるだけ確保
- 各要素の必要機能を絞り、開発時間と重量のムダを省く
下半身は移動、腕は攻撃に特化 胴体は頑丈な“箱”であることが重要
- 自由度は全身で20軸程度が基本
多すぎ：過度な軽量化で故障しやすい&設計が長引く 少なすぎ：重量が余りがち
- 下半身はトルク>スピード 素早く動くことより素早く止まれることが重要

モーションの作りこみ

- 移動モーションは小刻みに素早いほうが有利
移動速度より“素早くニュートラル姿勢に戻る”ことが重要
- “当たれば確実に倒せる”攻撃モーションは最低一つ準備する
ダウンになりやすい当て方（角度や距離感）を練習で掴んでおく
当ててもダウン取れない攻撃は封印 使うほど隙が増えるだけ