仙台市/仙台市産業振興事業団

ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー

C26/Rev 1.0

第２６回

玉乗りロボットをつくる

前編：全体の構想とメカ設計

仙台市地域連携フェロー

熊　谷　正　朗

kumagai@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部
ロボット開発工学研究室 RDE

玉乗りロボットをつくる：構成

○ 前編：全体の構成とメカ設計

◇ロボット開発の仕様と構成
◇ロボットに用いる原理（発想と式）
◇駆動系の設計パラメータの調整
◇メカ全体の設計



○ 後編：回路と制御ソフトウエア

◇制御回路群（主マイコン、モータ駆動、表示）
◇制御の基本部分
◇実用性のための上位層

今回の目的　～設計を裏付け、改良する数学～

○ 前編：全体の構成とメカ設計

◇ロボット開発の仕様と構成

・どのような目的・目標でロボットをつくるか

・目的を実現するための要素構成

◇ロボットに用いる原理 （発想と数式）

・倒立振子制御 と 球の駆動

◇駆動系の設計パラメータの調整

・車輪 と 球駆動部の具体的な設計

◇メカ全体の設計

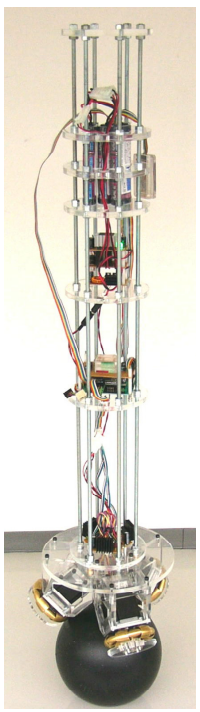
開発の目的

○ 背景：玉乗りロボット

◇「球に乗ってバランスするロボットつくりたい」

・という、学生さんの希望・提案(2004，07)

・ロボットの開発と発表(2008)



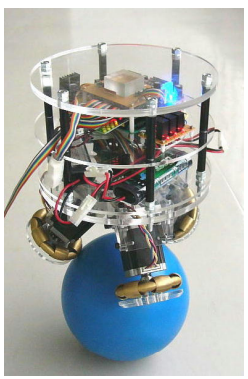
◇このロボットの重要性 （≠実用性）

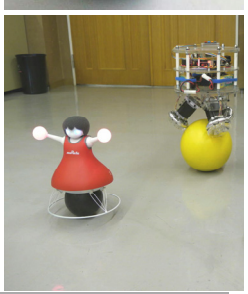
・コンテンツ性、教育の導入の話題

・学内外デモンストレーションの筆頭

・たまに学外から問い合わせある

（※まれな公開企業事例：村田製作所様）





開発の目的



○ 背景：既存ロボットの課題と要望

◇大きくて重い → 小さく軽く



・運搬の手間　（学内外、計15kg弱）

・実験時の危険性　（落ちると危険、破損）



◇設計データの欠如

・詳細な設計データが揃っていない

※ファイルの分散、落書き、そもそも無い

→ 問い合わせに答えきれない

開発の目的

○ 目的：不十分さを解消する新規開発



◇小さく軽く、運用性の向上





- 手持ちできるケースに一式入る
  ※市販のアルミケースを設計目標に
- 準量産性の確保：複数台運用

◇公開しうる設計データ

- メカ：3D　回路：基板起こし　ソフト：可読性
- 公開情報だけで、「やればコピーできる」
  レベルの精細さを想定

構成の概要

○ 目的を実現するための構成 （メカ系）

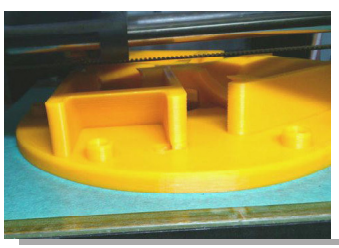
◇メカの小型化

- 駆動用車輪の小型化設計（他テーマ兼用）
- 構造見直しによる機構の圧縮



◇メカの全面3Dプリント化

- 「データがあればつくれる」
- 一般的「切削加工図面→加工依頼」に比べると試しやすい／改造しやすい



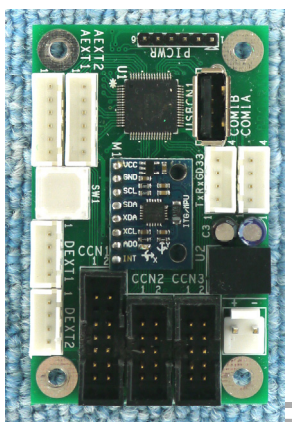
構成の概要

○ 目的を実現するための構成 （非メカ系）

◇回路の基板化 （前作もほぼ、再設計）

- データ→実体化しやすい
- 数量を確保しやすい （組み立て、特性均一）

◇マイコンの変更とプログラムの書き直し



- 世界的に入手性の良いマイコン品種
  ※海外からの問い合わせが多いため
- 既知のノウハウに基づく書き直し
  ※試行錯誤・増築し続けてひどかったため

構成の概要

○ 目的を実現するための構成 （運用性）

◇単独運用・即起動 （既存仕様を改善）

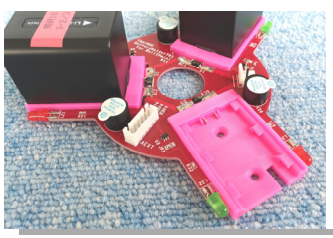
・電源入れてすぐ動くこと　別PCなど不要

◇電池の入手性向上

・旧：ラジコン用NiCd/MH系充電池

※廃品傾向(Li系置き換え)、充電器の用意

→ 新：ビデオカメラ用Li系充電池



・入手性、保護有、充電器も

・導入しやすい、増やしやすい



今回の目的

○ 前編：全体の構成とメカ設計

◇ロボット開発の仕様と構成

・どのような目的・目標でロボットをつくるか

・目的を実現するための要素構成

◇ロボットに用いる原理 （発想と数式）

・倒立振子制御 と 球の駆動

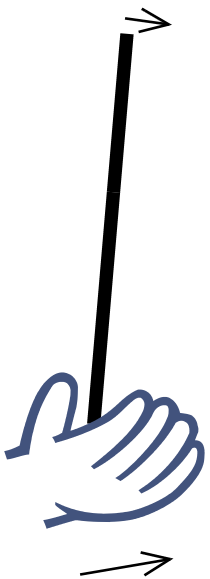
◇駆動系の設計パラメータの調整

・車輪 と 球駆動部の具体的な設計

◇メカ全体の設計

玉乗りロボットの基本原理

○ 基本構成：バランス制御＋球を転がす



◇バランスの制御：倒立振子

- ほうきを手の上に立てて遊ぶことと類似
- 立てた棒状のものの下端を移動操作する

※他の形式：物を回転させる反動を使う

◇球を転がす：3方向

- 全方向移動用車輪
- 複数の車輪で球を回転させる
- 別の車輪の回転を邪魔しない



基本原理：倒立振子制御

→C09 制御の基礎

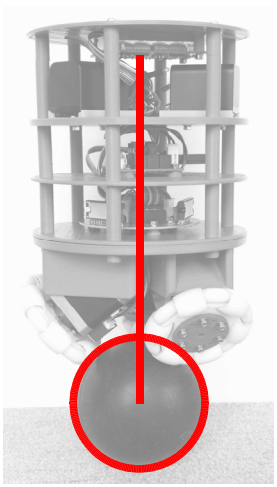
○ 姿勢を維持するフィードバック

◇棒が倒れないように下端を加速的に動かす

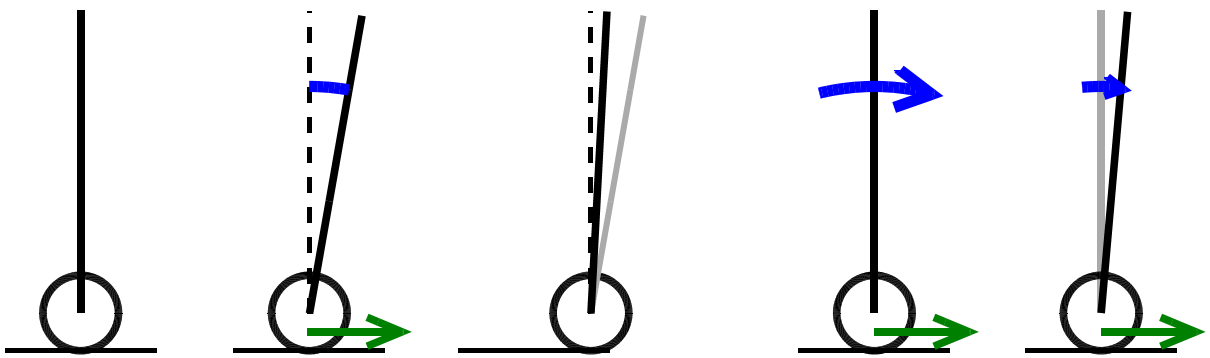
(1) 今傾いている→直す方に動かす

(2) 傾く速度がある→止める方向に

※倒れる動作が加速的→対処はそれ以上



モデル化



基本原理：倒立振子制御

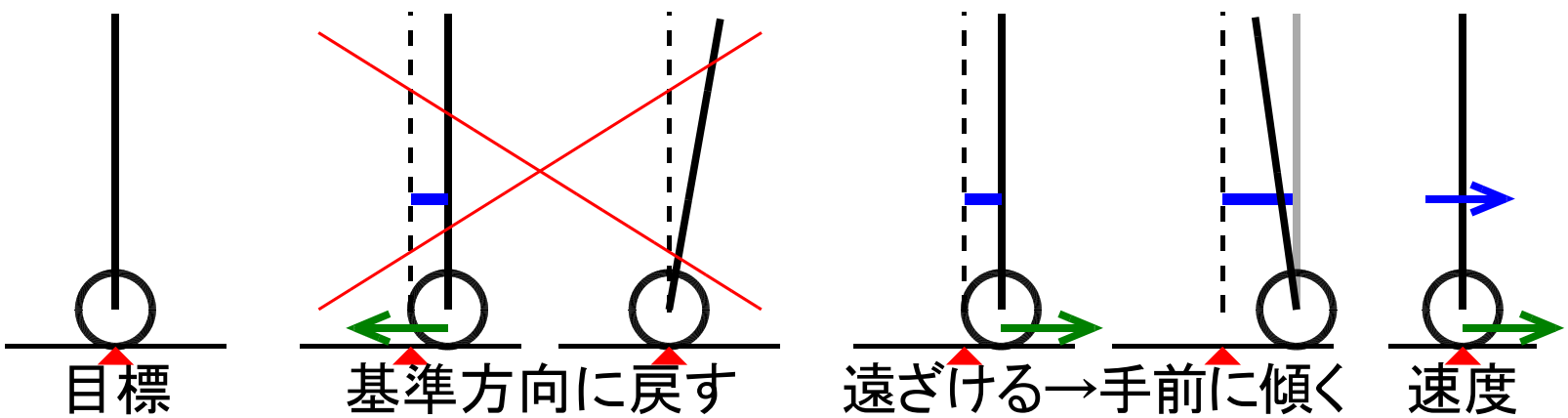
○ 位置を維持するフィードバック

◇どこまでも走って行かないように位置の制御

× 基準位置に戻す方向に動かす

○ 基準位置から遠ざかる方向に加速する

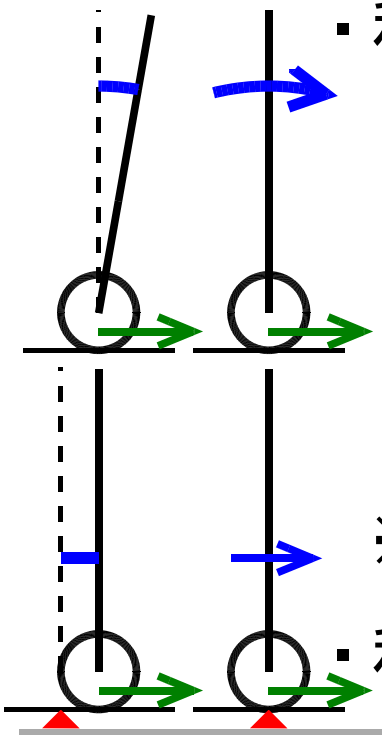
※安定判別の出す条件、実験的、考察的に



基本原理：倒立振子制御

○ 倒立振子制御の制御式

◇制御式



・移動の加速度＝

角度ゲイン × 姿勢傾斜角

＋ 角速度ゲイン × 傾斜角速度

＋ 位置ゲイン × 位置

＋ 速度ゲイン × 移動速度

※ゲイン：反応の程度を調整するための定数

・移動の加速度を操作(指令)する

基本原理：倒立振子制御

○ 倒立振子制御の制御式

◇この制御式の特徴

- 動作は4個のゲインが決める

  ※角度と位置に対するPD制御 （→C09）

  ※ゲインの大小バランスで姿勢重視／位置重視

- 一般には、

  トルク（力）＝ ゲイン×…＋

  の式（力操作は制御、ロボット系で一般的）

- ステッピングモータ使えるよう加速度操作

玉乗りロボットの基本原理

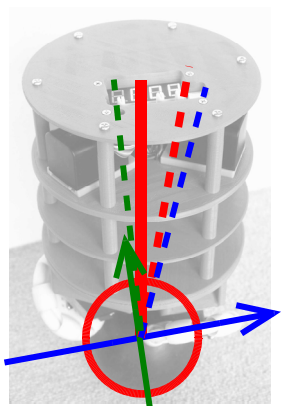
○ 倒立振子制御を空間で実現する

◇単純なアイデア

・左右方向の制御＋前後方向の制御

※斜め方向に倒れる＝両者の組み合わせ

◇実現するために必要な駆動系



・左右＋前後にきっちり加速度をだせる

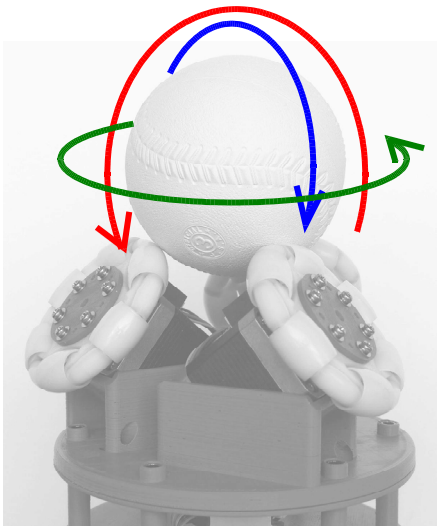
※それぞれ任意の大きさでの組み合わせ

・左右＋前後にきっちり速度or位置でも可

※加速度 →積分→ 速度 →積分→ 位置

基本原理：球の駆動

○ 球の回転操作



◇球の任意の回転の自由度は3

※自由度＝回転・直動などの
１軸の動きの合計の数

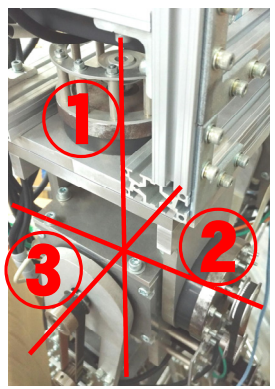
◇球を前後左右に回転できる
→倒立振子制御、移動

◇鉛直軸まわりの回転
→ロボットのその場での旋回が可能に

基本原理：球の駆動

○ ３自由度回転の実現

◇１軸のモータ×３



・一般的なモータの回転：１軸まわり
　→ ３個組み合わせて回転

・関節のようなものの場合：順次回転(限度有)

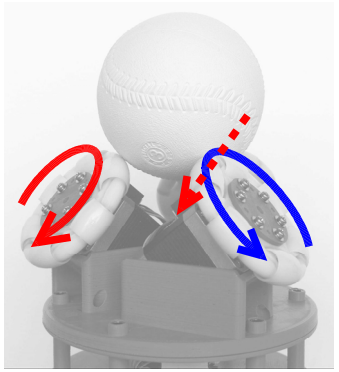
・車輪としての球：　無限に回る必要

◇全方向移動ロボットがヒント

・床面上で 前後左右＋旋回 の動き

・床＝半径無限大の球とみなせる

基本原理：球の駆動



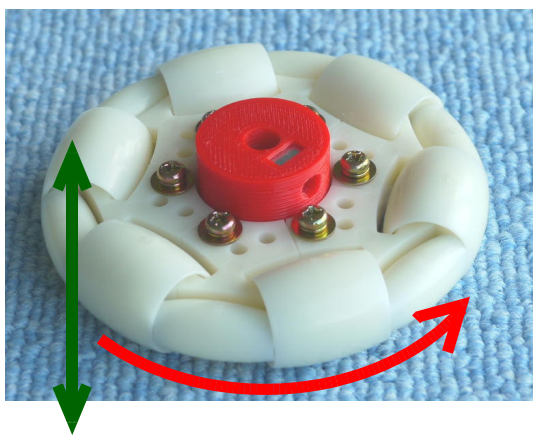
○ ３自由度回転の実現

◇全方向移動ロボット用の車輪＋球

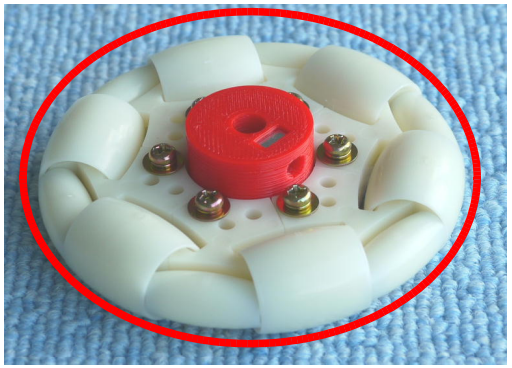
- 各車輪が、車輪の方向に球を回転させる
- 他の車輪の回転を、邪魔しない

◇全方向用車輪の特性

- 能動的に駆動する方向
  （回転方向）
- 受動的に受け流す方向
  （軸方向）

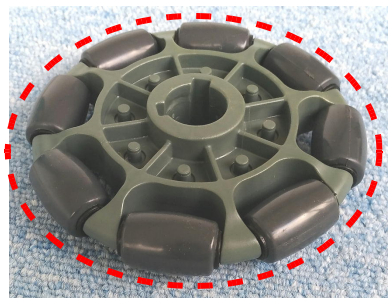


基本原理：球の駆動



○ 車輪の選定

◇理研・浅間先生による車輪



- 外周が連続　（比較：断続）

  動作におけるなめらかさ

- 外周が１列　（比較：２列）

  車輪と球の接点が変化しない

  （接点位置が速度比決定：後述）

  ※相手が平面なら、２列でも可



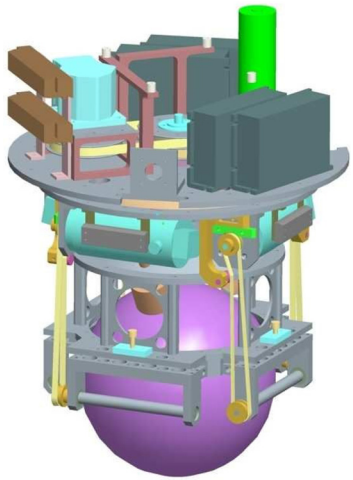
◇車輪設計については後述

基本原理：球の駆動

○ そのほかの球の駆動方法

◇逆マウス球駆動方式(ballbot型)

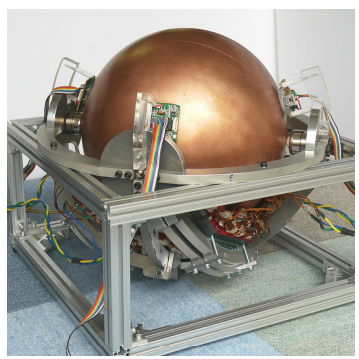
- ２組のローラで駆動
- メカが比較的シンプル
- 旋回はできない



ballbot IMB
(MSL/CMU)

◇球面モータ方式

- それ自体が３自由度のモータ
- メカ的にはシンプル
- 現時点でコストと効率が課題

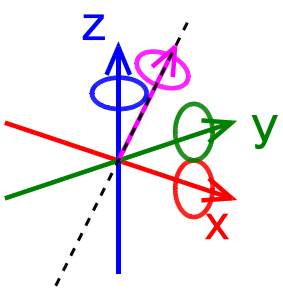


球面誘導モータ

基本原理：球の駆動　～ここから少し数学的

○ 球の駆動に関する特性式：予備知識

◇3次元の角速度　※角速度≒回転速度

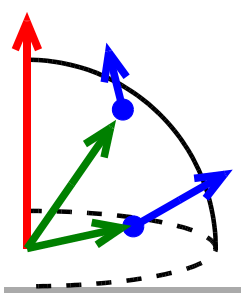


・三つの軸まわりの回転速度の組

・ベクトルで表す

向き：回転の回転軸　大きさ：速さ

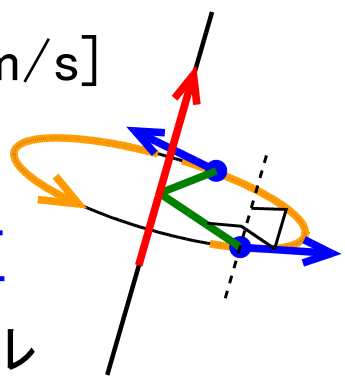
◇角速度と円運動の速度　[rad/s][m/s]



・大きさ：角速度の大きさ×半径

・方向：角速度、半径方向に垂直

※角速度ベクトル(外積)半径ベクトル

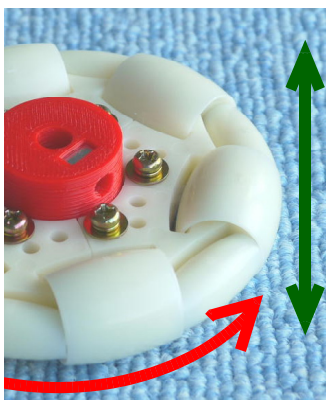


基本原理：球の駆動

○ 球の駆動に関する特性式

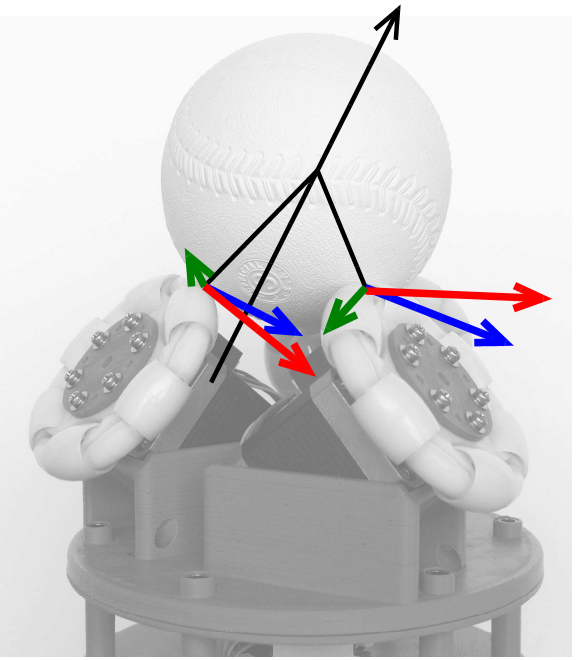
◇車輪の速度の特性

・球のある角速度に対する、球表面速度



＝ 車輪の回転による速度(能動)

＋ 外周ローラの回転による速度(受動)

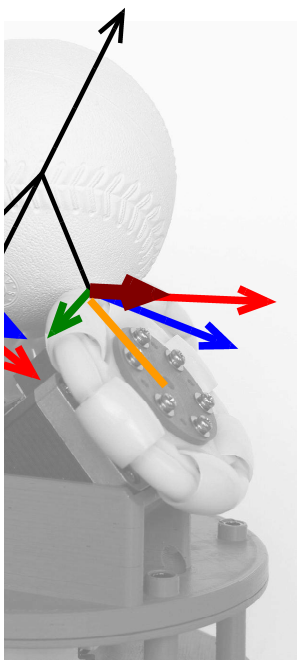


・欲しい角速度に一致する車輪回転

基本原理：球の駆動

○ 球の駆動に関する特性式

◇より厳密な数式表現



・表面速度ベクトル

＝角速度ベクトル（外積）接点位置ベクトル

・車輪外周速さ

＝表面速度ベクトル（内積）駆動ベクトル

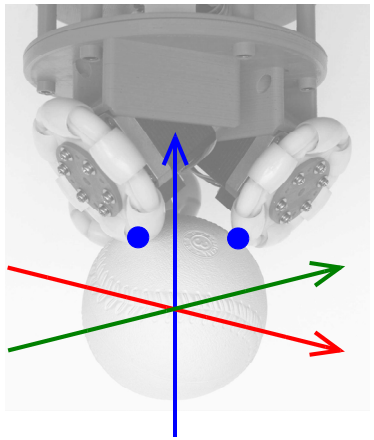
※車輪接線方向

・車輪回転角速度

＝車輪外周速さ÷車輪半径

→車輪をどこに、どの向きに付けるか

基本原理：球の駆動



○ 駆動部の設計パラメータ

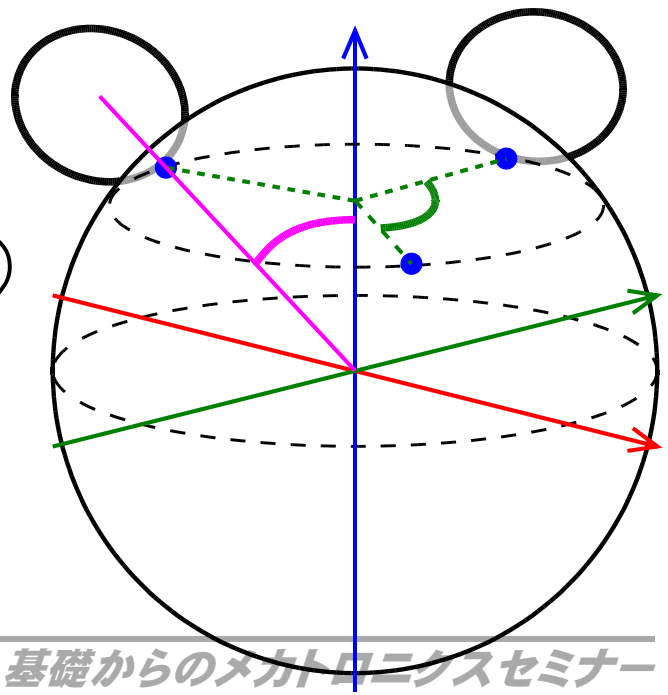
◇車輪の数

・最低３ （球回転が３自由度、「乗る」ため）

◇各車輪の接触位置

・鉛直軸対称
（３個なら120度単位）

・頂点からの距離
（＝角度、天頂角）



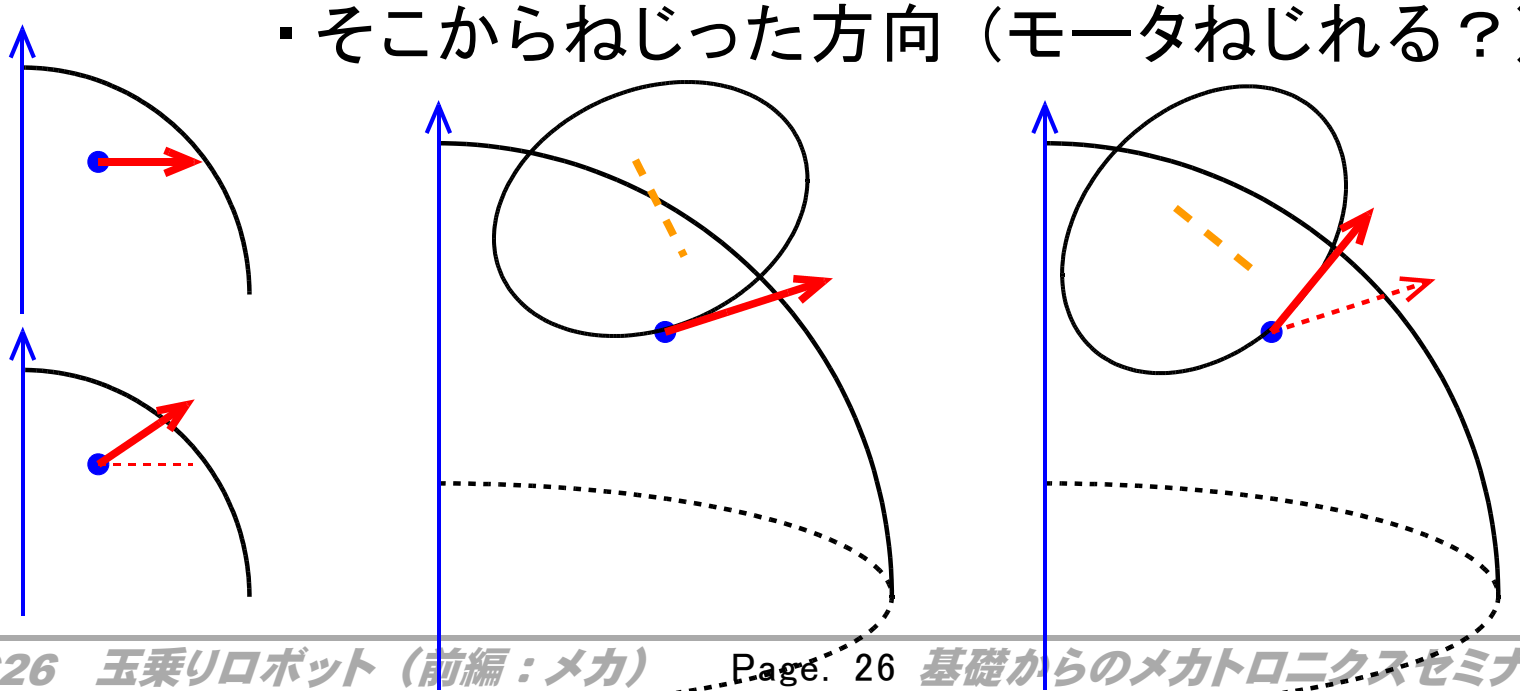
基本原理：球の駆動

○ 駆動部の設計パラメータ

◇各車輪の駆動方向 （同じく対称性を考慮）

・たとえば水平方向（構造設計楽）

・そこからねじった方向（モータねじれる？）



基本原理：球の駆動

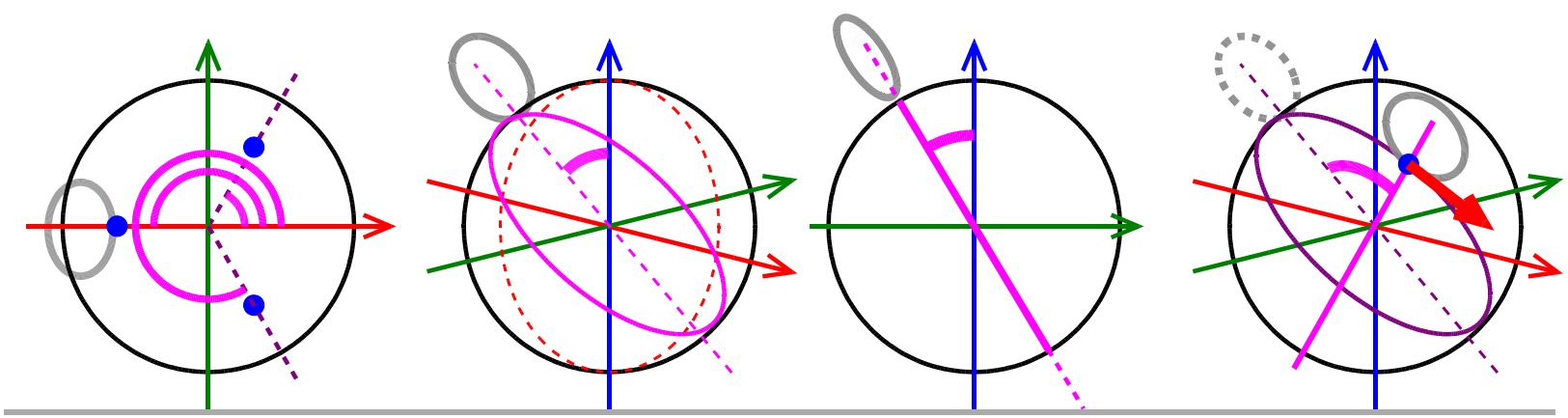
○ 駆動部の設計パラメータ：３角度表現

◇車輪の接点と駆動方向を3角度で表す

・鉛直軸まわりの角度（120度単位等）

・駆動大円の傾斜角　　※大円＝中心を

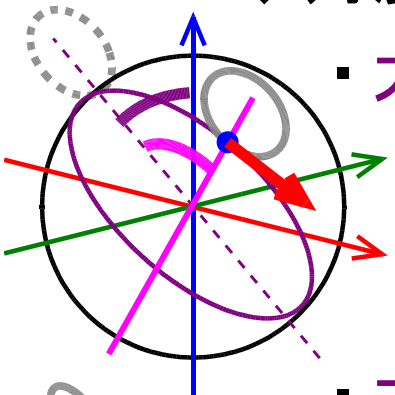
・大円上の接点決定角　　含む断面の円



基本原理：球の駆動

○ 駆動部の設計パラメータ：3角度表現

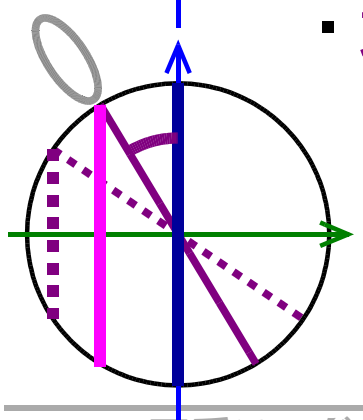
◇角度と機構の特性



・大円傾斜角と接点決定角

→ 接触点の天頂角＝「乗る」位置

※静的安定に関わるが影響小



・大円傾斜角　※接点決定角は影響なし

→ 一種の速度比(増速比、次ページ詳細)

傾斜角大きいほど増速＝トルク減

→ 小さい方が有利(ただし旋回に敏感)

基本原理：球の駆動

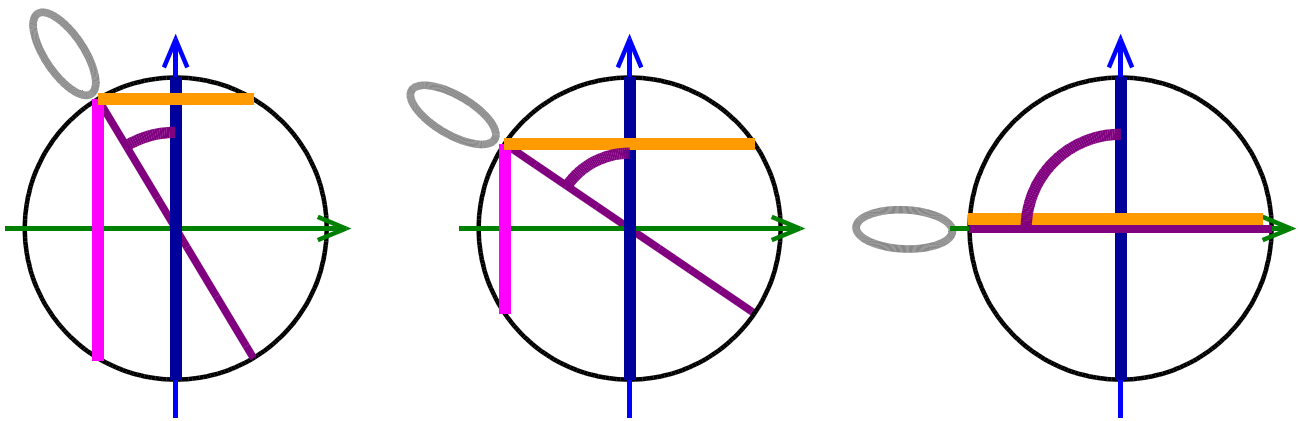
○ 駆動部の設計パラメータ：３角度表現

◇角度と機構の特性（補足）

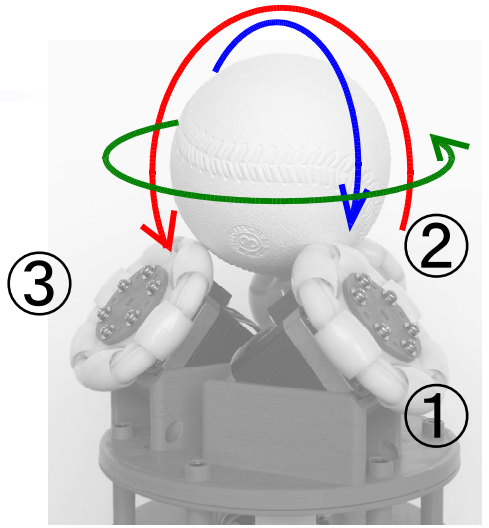
・大円傾斜角 （接点決定角＝0の場合）

小さい→車輪回転→転がすほう有利

大きい→車輪回転→鉛直軸まわり回転



基本原理：球の駆動



○ 車輪の速度計算式

◇今回の配置に対しての計算

計算式 →P24

車輪1＝ −0.5A×前後 ー0.87A×左右 ＋B×旋回

車輪2＝ −0.5A×前後 ー0.87A×左右 ＋B×旋回

車輪3＝ 1.00A×前後 ＋0.00A×左右 ＋B×旋回

※A,Bは別途決まる定数

※0.87＝√3/2

今回の目的

○ 前編：全体の構成とメカ設計

◇ロボット開発の仕様と構成

・どのような目的・目標でロボットをつくるか

・目的を実現するための要素構成

◇ロボットに用いる原理（発想と式）

・倒立振子制御 と 球の駆動

◇駆動系の設計パラメータの調整

・車輪 と 球駆動部の具体的な設計

◇メカ全体の設計

ロボットのメカ設計

○ 設計の注目点

◇メカ設計への要求

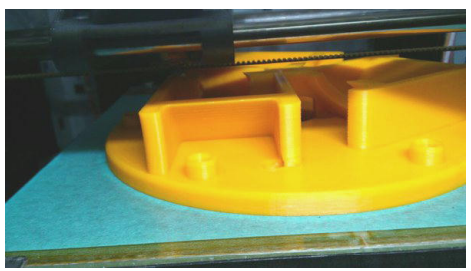
- 小型化

◇メカ設計への制約

- 小型化しにくい要素

  モータ、回路、電池、車輪

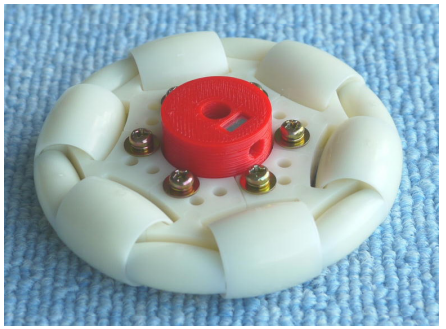
- 部品形状への制約



3次元プリンタを前提にする：かなり緩和

→C25 3次元CADと3次元加工

ロボットのメカ設計：車輪



○ 全方向移動用車輪の設計

◇車輪の原理 （理研特許 3421290）

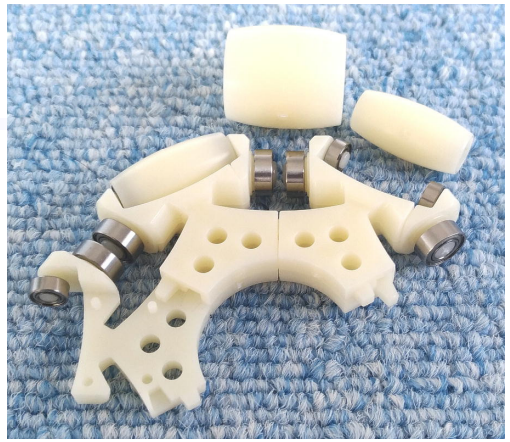


- 円周を構成する樽形ローラ2種
  大ローラに食い込む小ローラ
- ローラを支持するフレーム

◇要求仕様

- 小型であること
- ガタがない、滑らか(受動方向の抵抗小)
- 量産性(部品製造、組み立て性)

ロボットのメカ設計：車輪



○ 仕様→設計検討

◇ガタ無し、滑らか

・ローラをボールベアリング支持

◇量産性



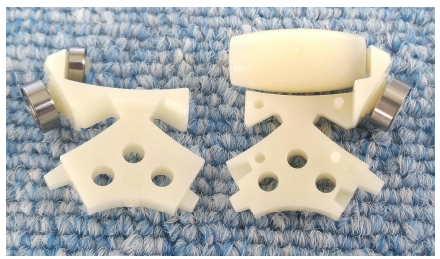
・部品を射出成形で製造

※従来品は旋削＋レーザ加工

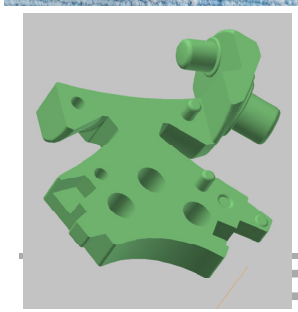
・部品点数の削減

→ 軸はフレームと一体化

「軸」という部品を削減

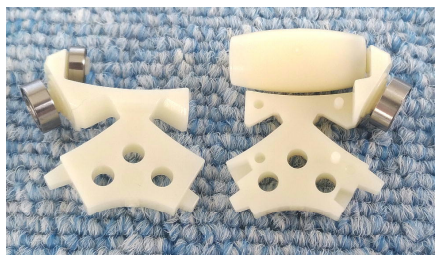


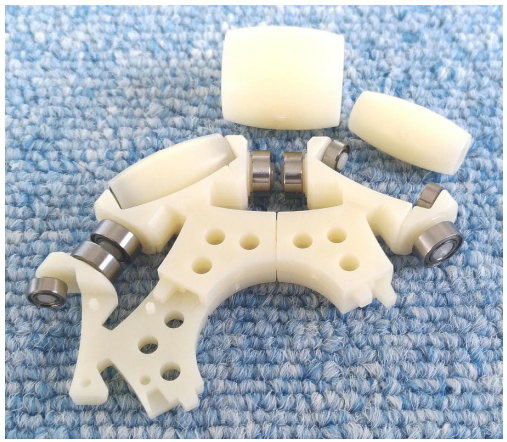


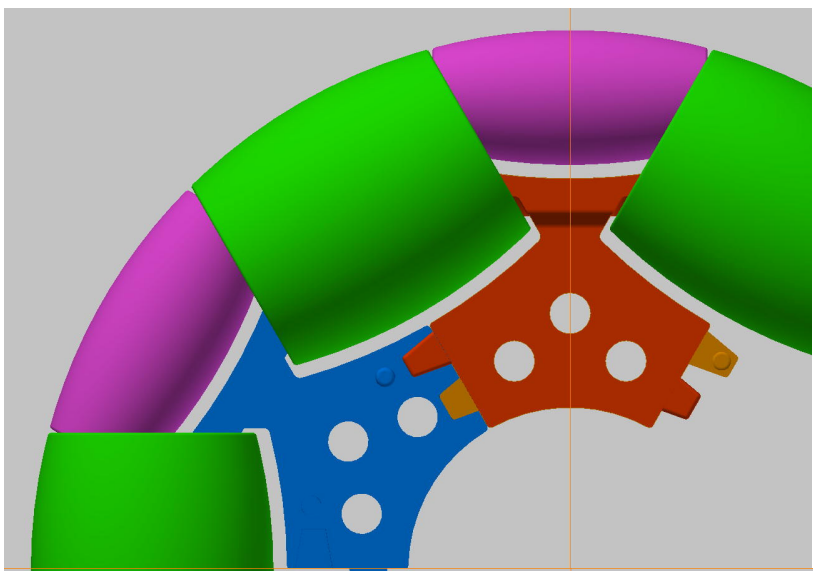


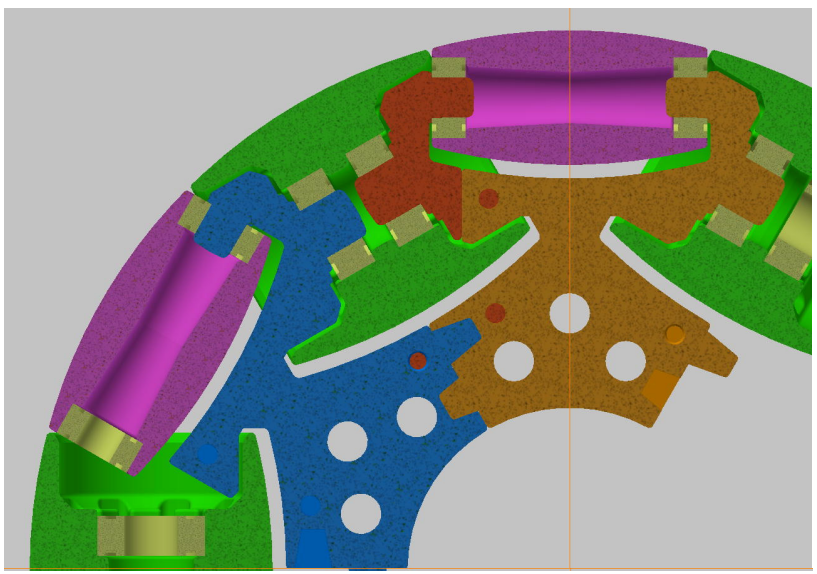
ロボットのメカ設計：車輪

○　3次元CADによる設計

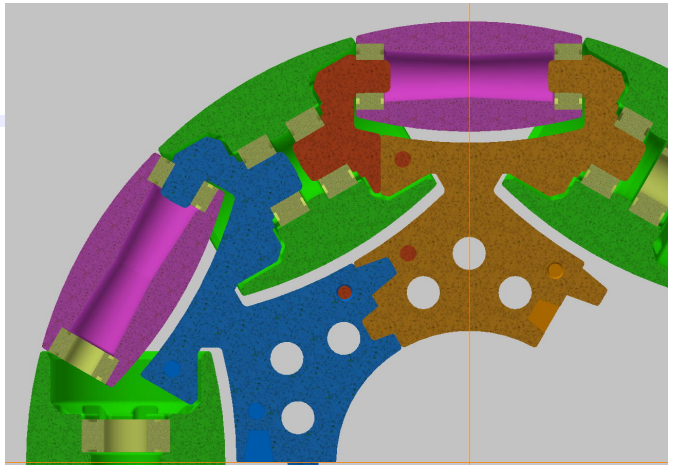






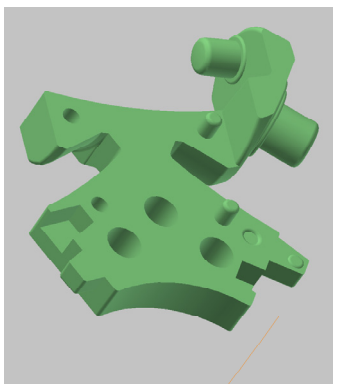


ロボットのメカ設計：車輪



○ 仕様→設計検討

◇小型化



・３次元CAD上で、

・不安の無い寸法(軸部、フレーム他)

・空間干渉しないこと

・ベアリングの妥当なサイズ(入手性)

を前提に可能な範囲で小型化

・最終的にφ80mmの設計

※従来品100mm、市販品最小55mm

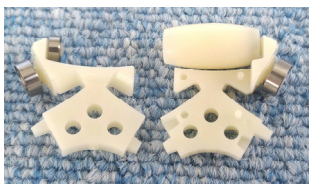
※使用CAD: Autodesk Inventor Pro

ロボットのメカ設計：車輪

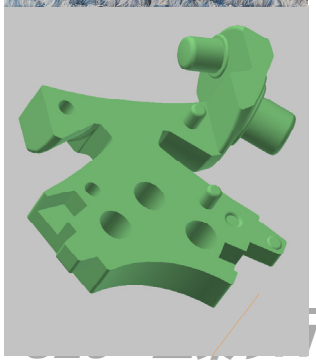


○ 設計の微調整

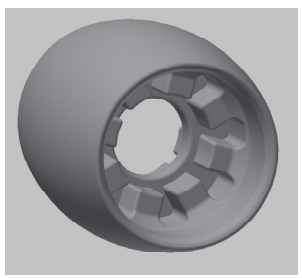
◇部品設計の注力点







- (感覚的に)強度がなるべく確保できるよう
- 部品点数の削減：フレームは単一種で
- 仮組み時にはめ込み組立を前提
  最終的にはネジ固定



- 射出成形にあわせた形状調整
  ※主に肉厚部の対策、角のRの補正など

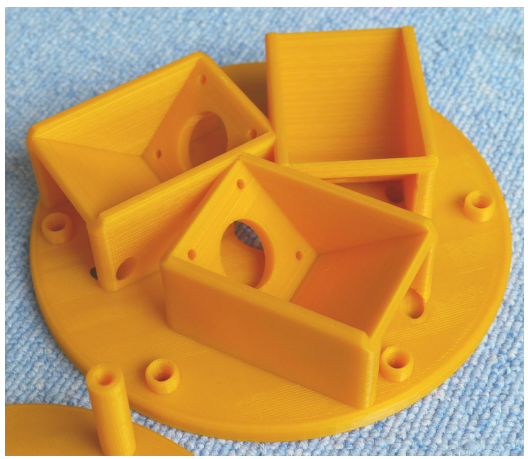
ロボットのメカ設計：駆動部

○ 駆動部≒モータ固定フレーム



◇関連要素

- 車輪（前述）
- ステッピングモータの選定
- モータの配置＝車輪配置パラメータ



◇設計基準

- 強度と大きさ
- 組み立て可能であること

ロボットのメカ設計：駆動部

○ 駆動部≒モータ固定フレーム

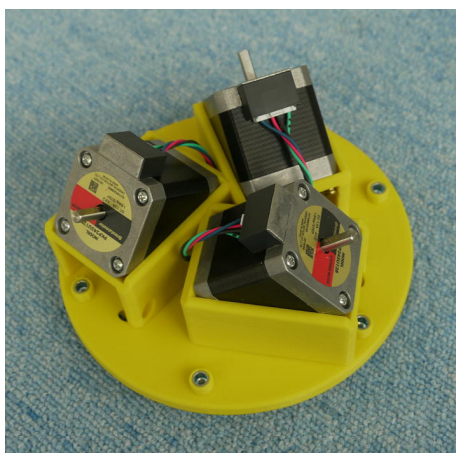
◇モータ固定部の留意点

- （ロボットの重量、積載重量を支持）
- 転倒、落下時の衝撃が直接加わる
  前世代機で破損事例あり



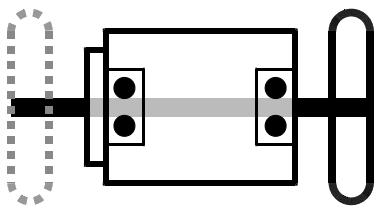
◇モータ選定の留意点

- 出力(トルク)は高いほどよい
- ロボットの大きさ、質量、
  電源への影響大



ロボットのメカ設計：駆動部

○ モータ・車輪部設計

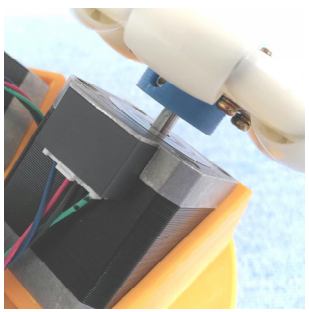


↑フランジ面：固定

◇モータの数は3

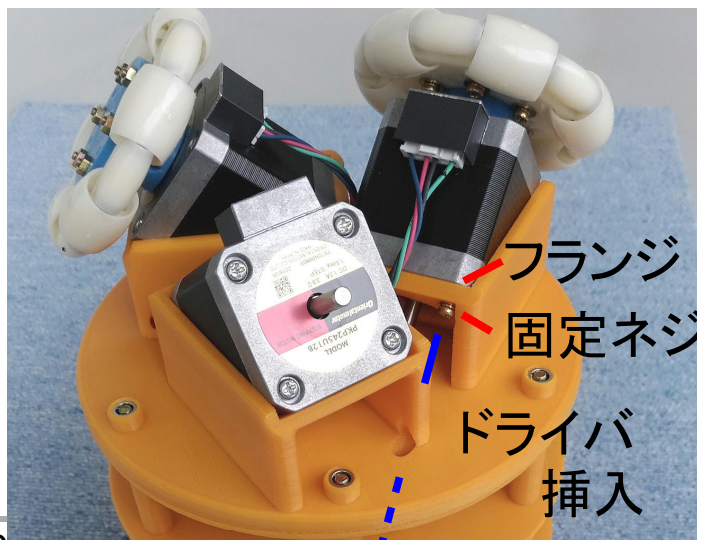
・最低数（低コスト、小型化）

◇両軸モータの後ろ軸を利用



・固定の容易さ

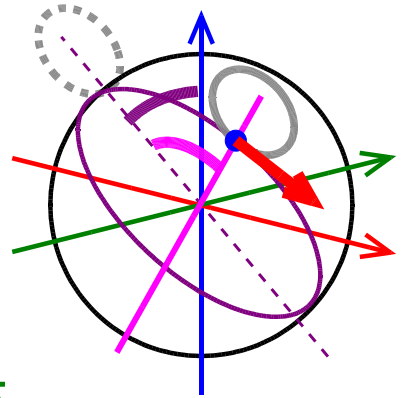
・強度的デメリットの少なさ



◇車輪のハブは

3Dプリント

ロボットのメカ設計：駆動部



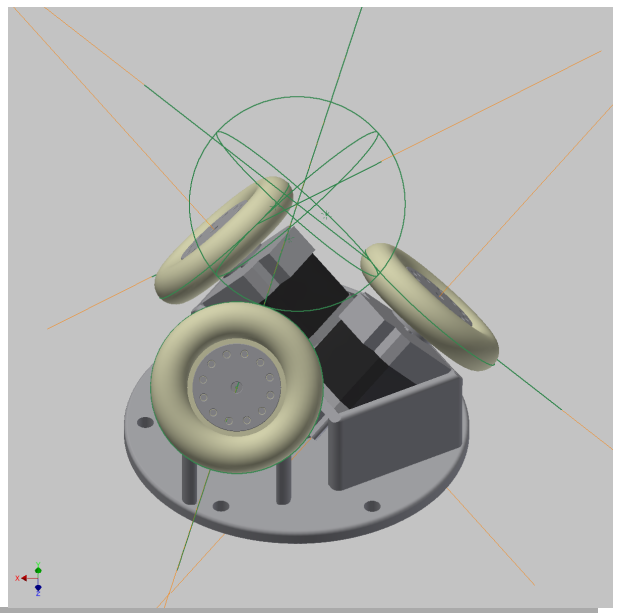
○ 車輪配置の検討

◇配置パラメータ

- 鉛直軸まわり角＝120度対称
- 大円傾斜角なるべく小

  ※小型化、トルク伝達
- 大円上配置角

  ＝ 調整の余地



ロボットのメカ設計：駆動部

○ 車輪配置の検討

◇Y配置 と 三つ巴配置

・今回の小型化の切り札

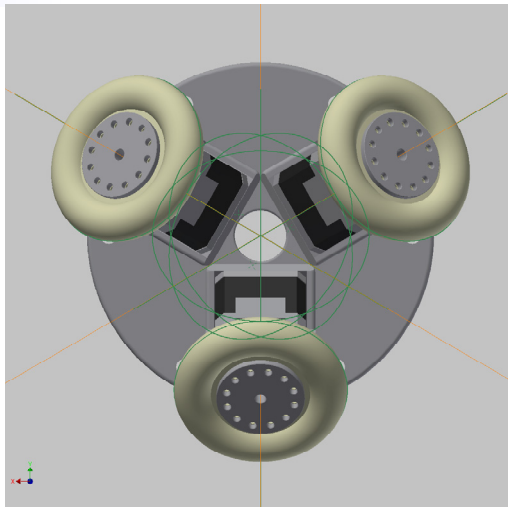
※同系ロボットでほぼ

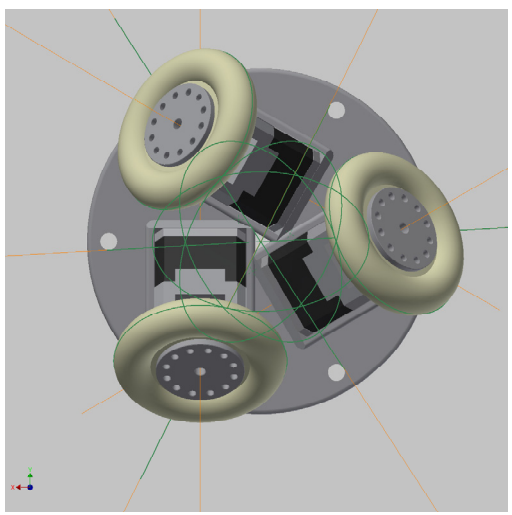
採用事例なし

・形状設計の複雑化→

3次元CADの

パラメトリック機能で調整





ロボットのメカ設計：駆動部

○ CADのパラメトリック機能

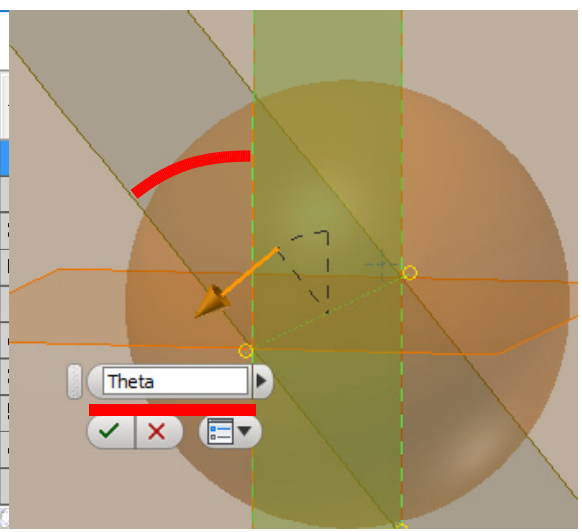
◇設計の基準数値を変数化

→ 数値変更で設計形状が変化する

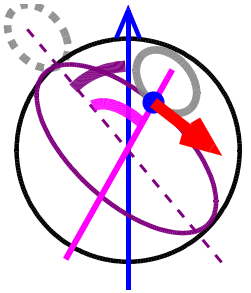
・要調整箇所を形を見ながら変更

パラメータ

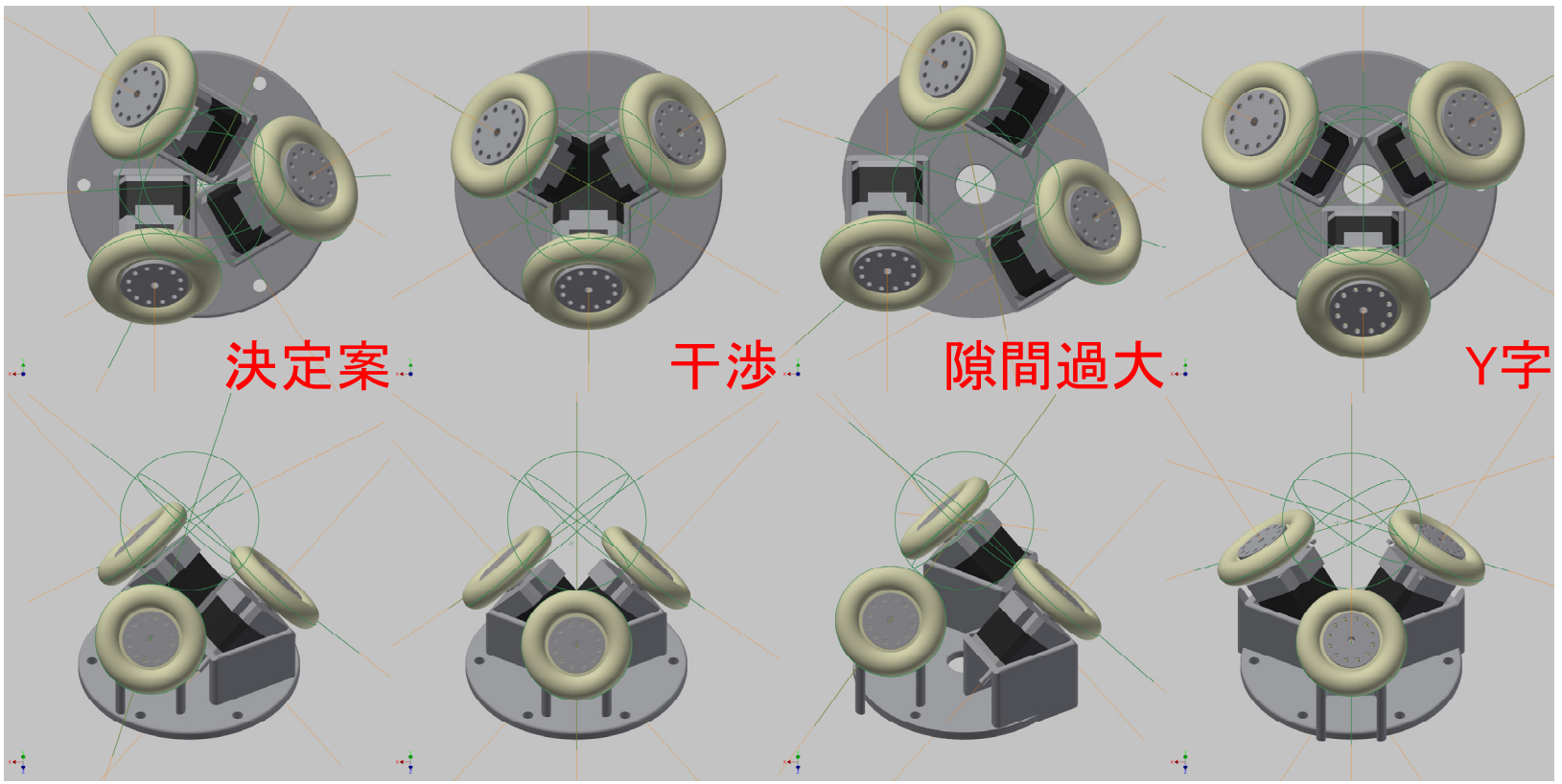
パラメータ名	単位/タイプ	計算式	表記値	寸法公差
モデル パラメータ				
ユーザ パラメータ				
NumMotor	ul	3 ul	3.000000	
PhiOffset	deg	0 deg	0.000000	
PhiStep	deg	360 deg / NumMotor	120.000000	
Theta	deg	40 deg	40.000000	
Psi	deg	36 deg	36.000000	
RadiusSphere	mm	50 mm	50.000000	
RadiusWheel	mm	40 mm	40.000000	
MountReferenceHeight	mm	140 mm	140.000000	



ロボットのメカ設計：駆動部

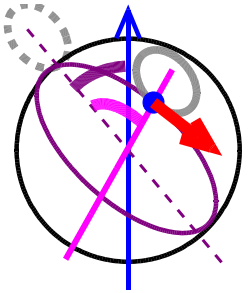


○ パラメータの調整例

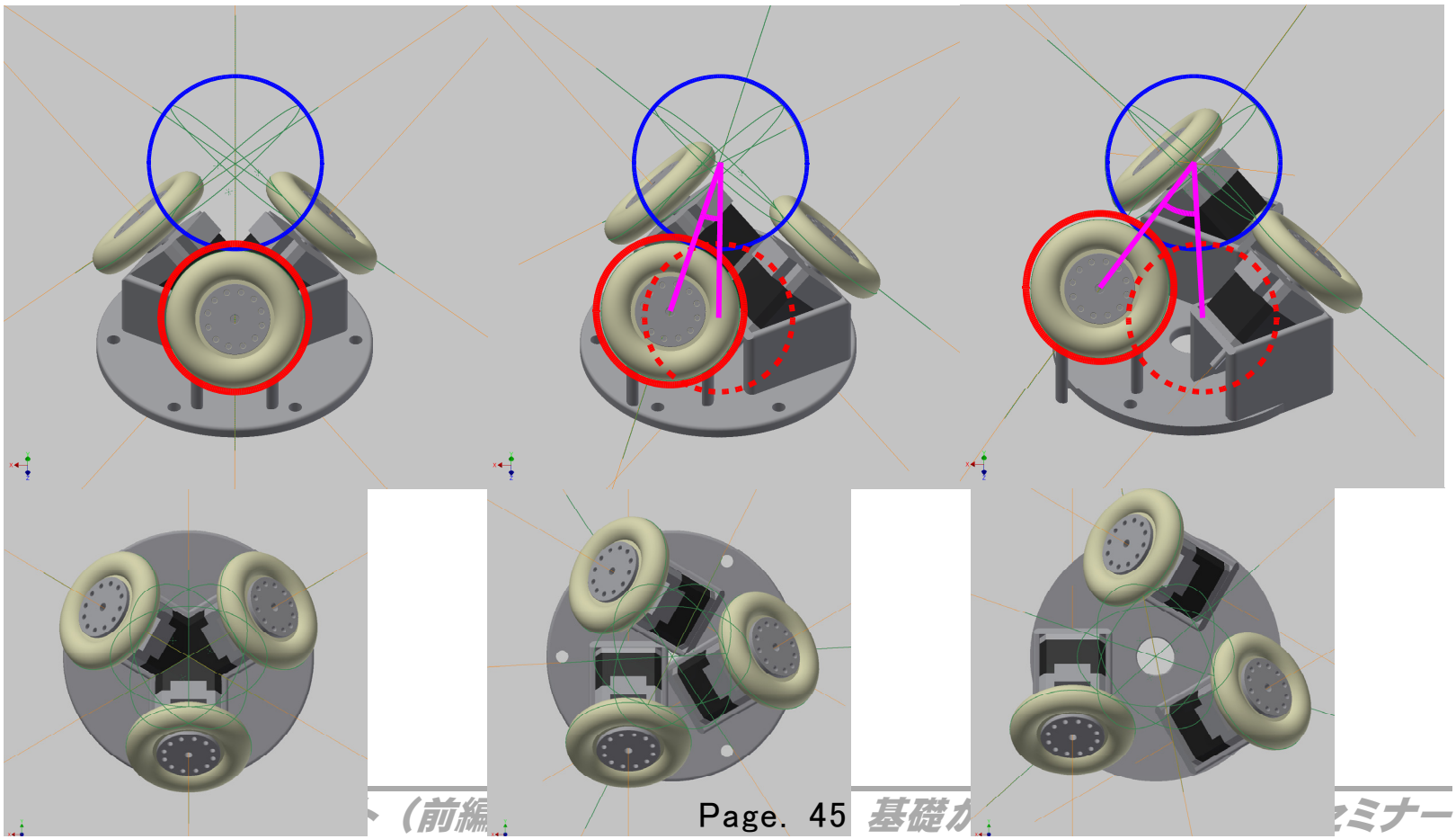


傾斜40—配置18deg　40−0　40−36　52−0

ロボットのメカ設計：駆動部



○ パラメータの調整例（配置角）



ロボットのメカ設計：駆動部

○ ３次元プリンタ前提の設計

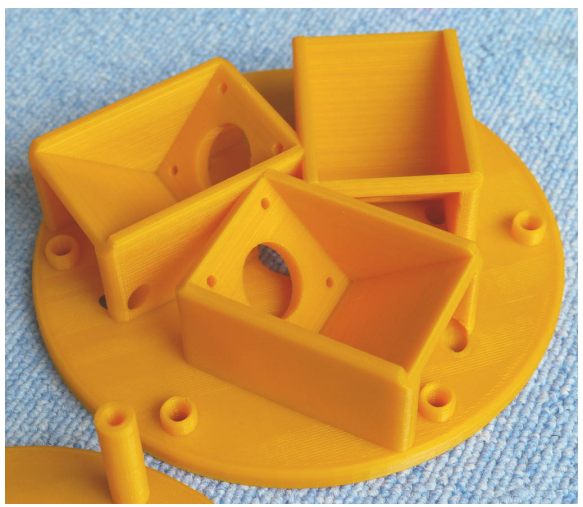
◇従来型手段では禁止レベル

・工具が入らない形状

・内側直角

・５軸加工が必要な形状

※前２者は対応できる
ように修正は可能



◇これによって可能となる、
より適した形状設計

ロボットのメカ設計：全体構成



○ ロボットに乗せるべきもの

◇駆動部

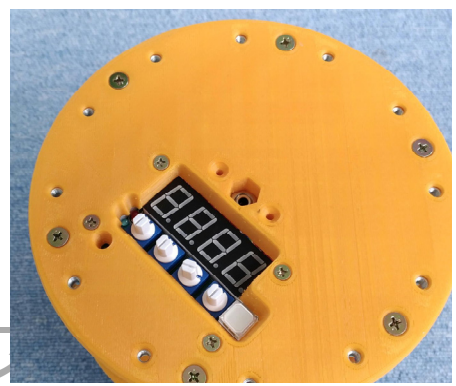
◇電池　→　セオリーでは上の方

◇回路基板

・モータ駆動回路　（駆動部直上）

・マイコン ＋ 姿勢センサ(鉛直軸上)

・状況表示・設定基板



◇「ロボットに乗せる」もの

・フラットな天板を用意

ロボットのメカ設計：全体構成

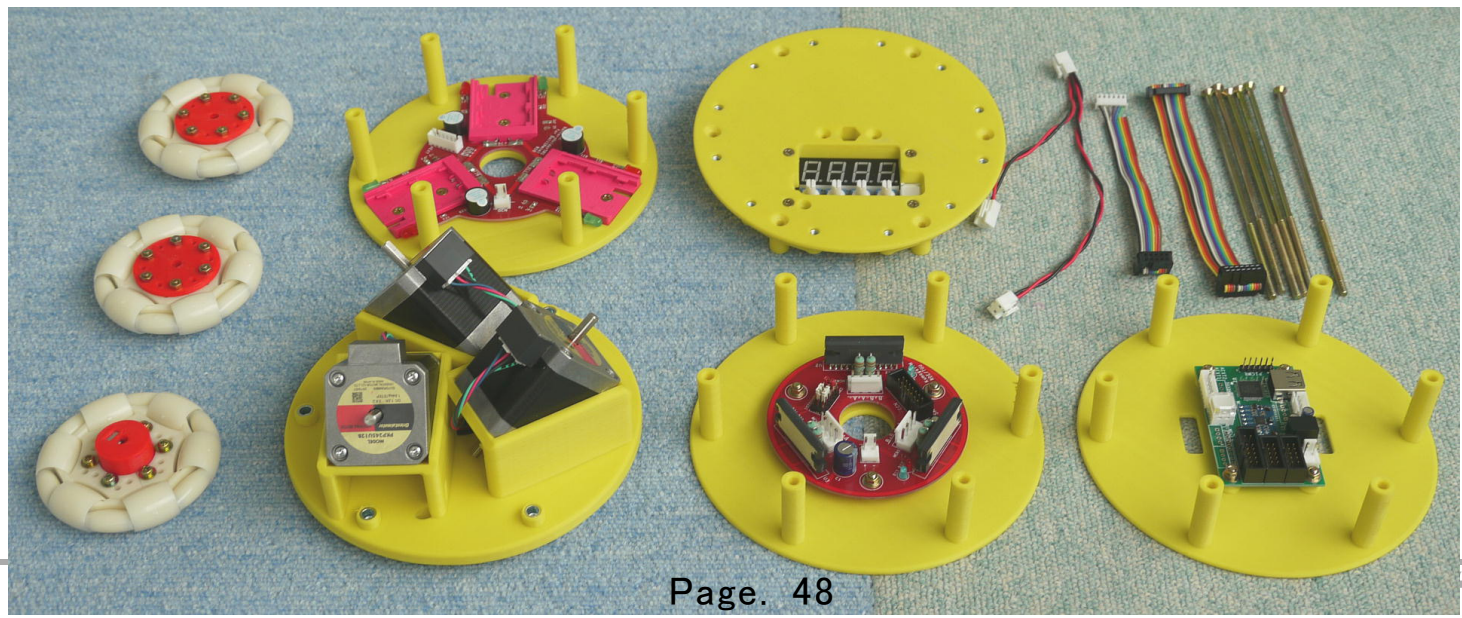


○ ロボットの全体構造

◇層構造

・ベースとなる板部

・支柱（一体成形）　　・貫通ネジ



ロボットのメカ設計：全体構成

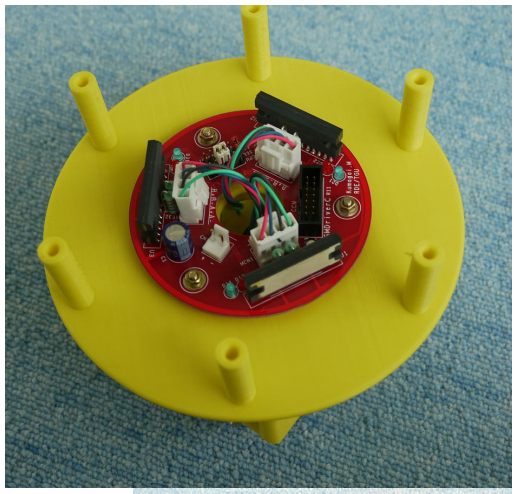
○ 層ごとの設計

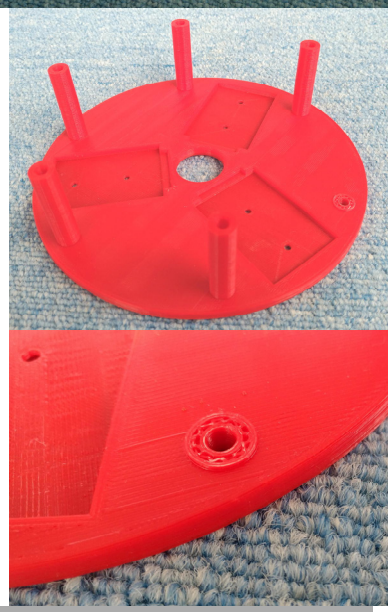
◇3Dプリンタで一体成形

- ベースの板部（配線穴）
- 基板固定用ポスト
- 層間支柱（パイプ）

※プリンタで作る意義は少ない

- レーザ加工で切抜＋パイプのほうが生産性が高い
- 壊れやすい形状





まとめ



○ 玉乗りロボットの設計（メカ編）

◇ロボットの背景に数式(数学)あり

- 制御のための数学、特性の数学
- 機構設計のための数学 （応用できる考え方）
- 「直感」から「原理的に正しい」へ
- 多分「ロボット」要件の一つ：統合された駆動

◇玉乗りロボット

- 前後左右に動く倒立振子
- 特殊車輪による玉の３自由度駆動装置

まとめ

○ 玉乗りロボットの設計（メカ編）

◇3次元CADと3次元プリンタを前提にした設計

- 従来は許されない形状の採用

  →目的を果たすのにより適した形

- 射出成形の活用
- 設計の微調整にパラメトリック機能

◇珍しい？非常識？

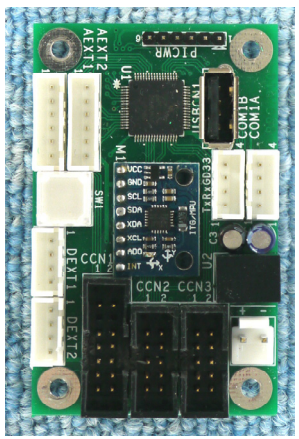
- モータの配置方法の見直し
- ステッピングモータの後ろ軸

まとめ

○ 次回予告＋お知らせ

◇次回　後編：制御回路と制御ソフトウエア

- ロボット制御回路の設計開発
  マイコン系、パワー系、その他
- 制御ソフトウエアの実装



◇玉乗りロボットのデータ公開

http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp
/rde/contents/tech/BallIPMini/indexframe.html