

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

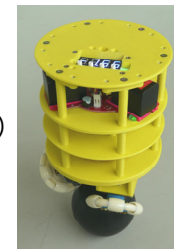
東北学院大学工学部
ロボット開発工学研究室



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ェア

- ◇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～

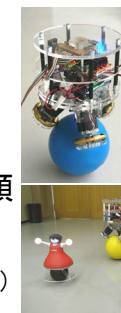
○ 前編：全体の構成とメカ設計

- ◇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）
 - ・倒立振り子制御 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)

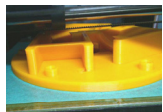
◇メカの小型化

- ・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

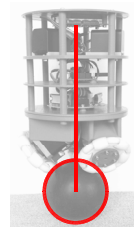
○ 姿勢を維持するフィードバック

◇ 棒が倒れないように下端を加速的に動かす

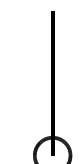
(1) 今傾いている → 直す方に動かす

(2) 傾く速度がある → 止める方向に

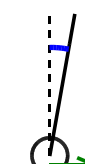
※倒れる動作が加速的 → 対処はそれ以上



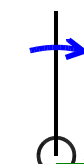
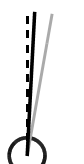
モデル化



目標



傾斜 → 先回り



傾斜中 → 緩和

基本原理：倒立振り子制御

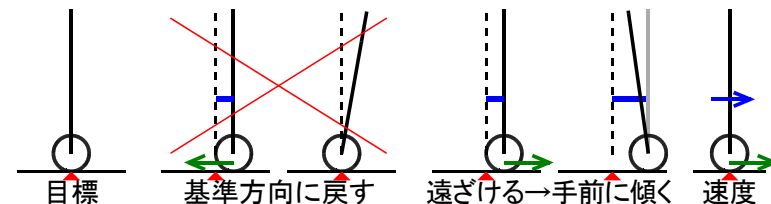
○ 位置を維持するフィードバック

◇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：倒立振り子制御

○ 倒立振り子制御の制御式

◇制御式

$$\begin{aligned} \text{移動の加速度} = & \text{角度ゲイン} \times \text{姿勢傾斜角} \\ & + \text{角速度ゲイン} \times \text{傾斜角速度} \\ & + \text{位置ゲイン} \times \text{位置} \\ & + \text{速度ゲイン} \times \text{移動速度} \end{aligned}$$

※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：倒立振り子制御

○ 倒立振り子制御の制御式

◇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、

$$\text{トルク(力)} = \text{ゲイン} \times \dots +$$

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

○ 倒立振り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

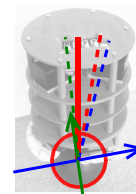
◇実現するために必要な駆動系

・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

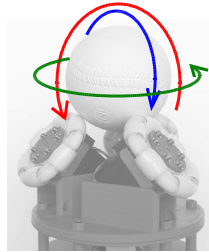
○ 球の回転操作

◇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

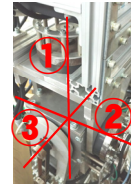
◇鉛直軸まわりの回転
→ロボットのその場での旋回が可能に



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わらない
(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

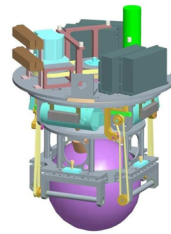


基本原理：球の駆動

○ そのほかの球の駆動方法

◇ 逆マウス球駆動方式(ballbot型)

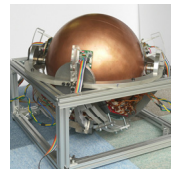
- ・ 2組のローラで駆動
- ・ メカが比較的シンプル
- ・ 旋回ができない



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



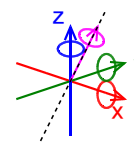
球面誘導モータ

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

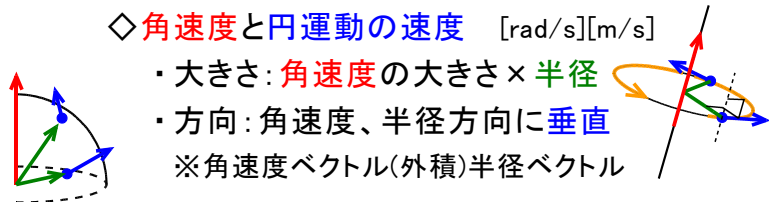
◇ 3次元の角速度 ※角速度≡回転速度

- ・ 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

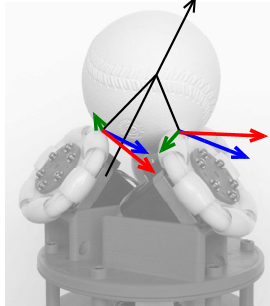
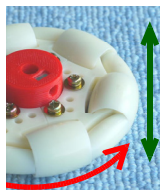


基本原理：球の駆動

○ 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

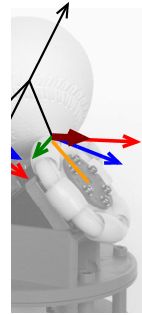


基本原理：球の駆動

○ 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

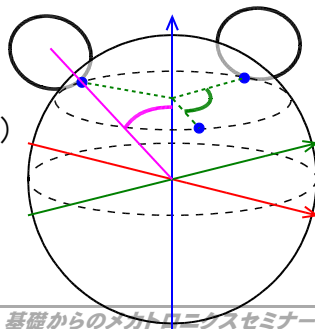
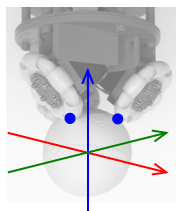
○ 駆動部の設計パラメータ

◇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)

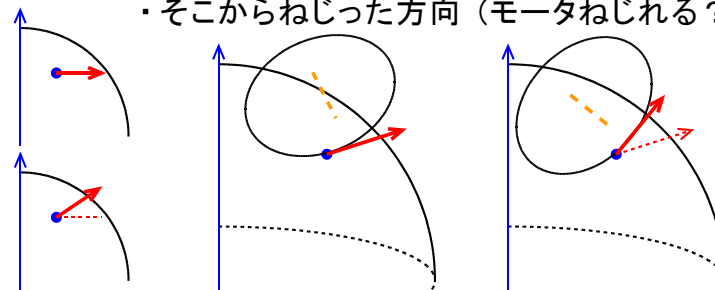


基本原理：球の駆動

○ 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？）

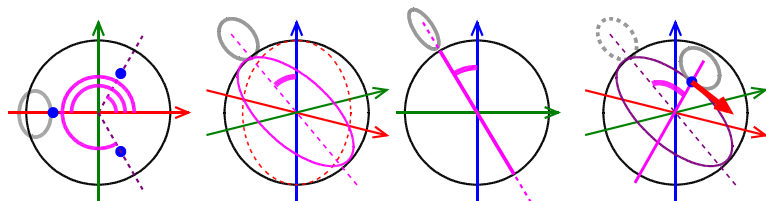


基本原理：球の駆動

○ 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＝中心を含む断面の円
- ・大円上の接点決定角



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

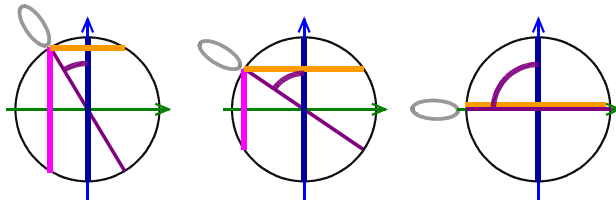
○ 駆動部の設計パラメータ: 3角度表現

◇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**

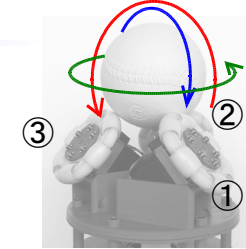


基本原理: 球の駆動

○ 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 = $-0.5A \times \text{前後} - 0.87A \times \text{左右} + B \times \text{旋回}$

車輪2 = $-0.5A \times \text{前後} - 0.87A \times \text{左右} + B \times \text{旋回}$

車輪3 = $1.00A \times \text{前後} + 0.00A \times \text{左右} + B \times \text{旋回}$

※A,Bは別途決まる定数

※ $0.87 = \sqrt{3}/2$

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)

・倒立振り子制御 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

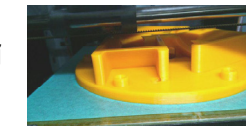
◇メカ設計への制約

・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

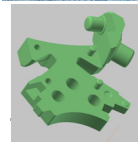
◇ガタ無し、滑らか

- ・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

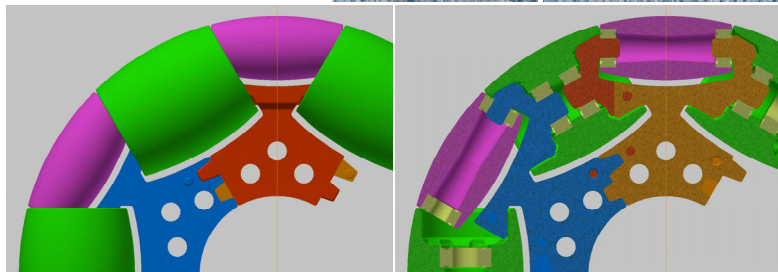
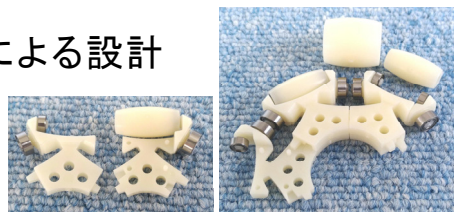


→ 軸はフレームと一体化
「軸」という部品を削減



ロボットのメカ設計：車輪

○ 3次元CADによる設計

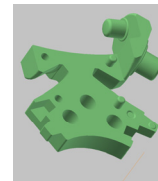


ロボットのメカ設計：車輪

○ 仕様→設計検討

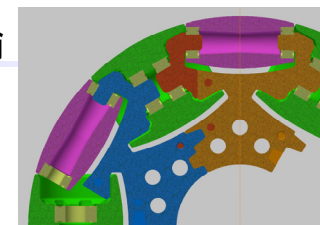
◇小型化

- ・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

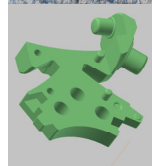
- ・最終的に $\phi 80\text{mm}$ の設計
※従来品100mm、市販品最小55mm
※使用CAD: Autodesk Inventor Pro



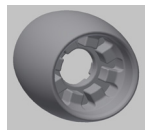
ロボットのメカ設計：車輪

○ 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

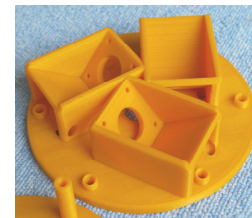
○ 駆動部≡モータ固定フレーム

◇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

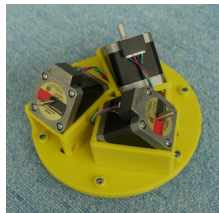
◇モータ固定部の留意点

- ・(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

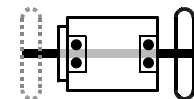


ロボットのメカ設計：駆動部

○ モータ・車輪部設計

◇モータの数は3

- ・最低数(低コスト、小型化)



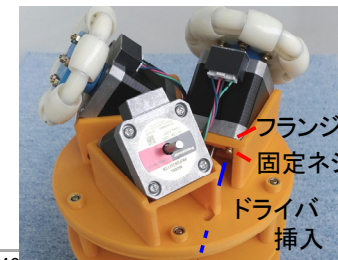
↑フランジ面: 固定

◇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

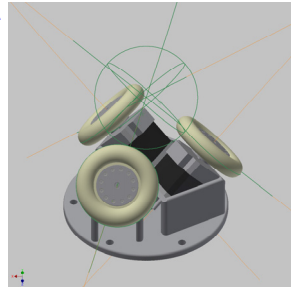
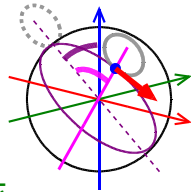


ロボットのメカ設計：駆動部

○ 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

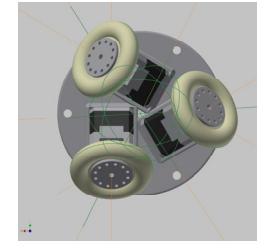
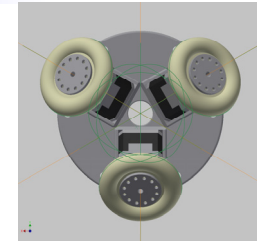


ロボットのメカ設計：駆動部

○ 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



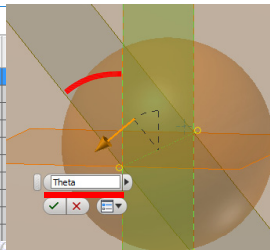
ロボットのメカ設計：駆動部

○ CADのパラメトリック機能

◇設計の基準数値を変数化

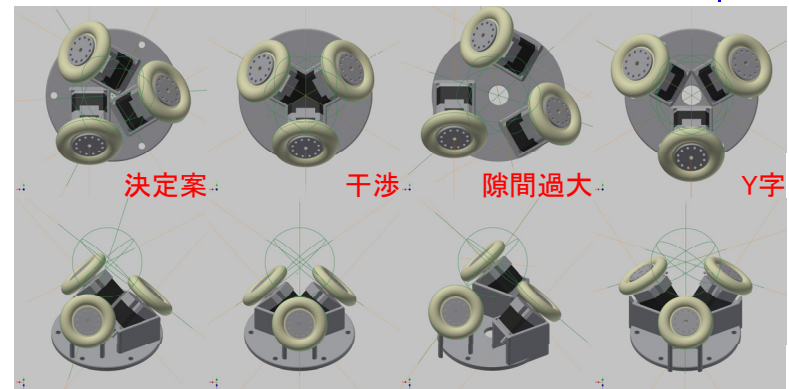
- 数値変更で設計形状が変化する
- ・要調整箇所を形を見ながら変更

パラメータ名	単位/タイプ	計算式	表記値	寸法公差
モデルパラメータ				
ローザパラメータ				
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

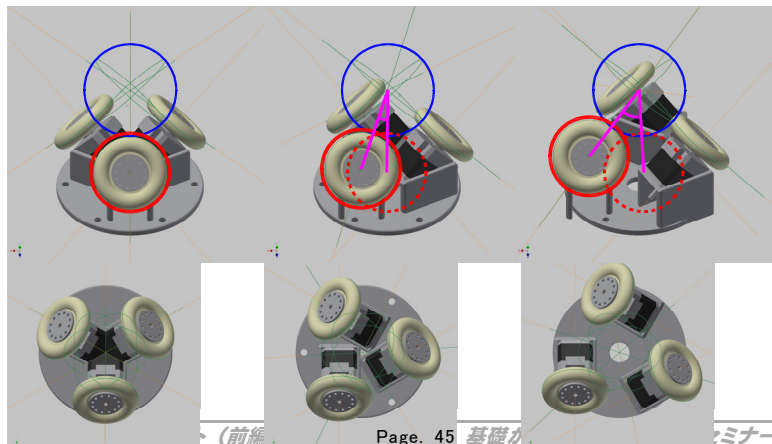
○ パラメータの調整例



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)



(前編) Page. 45 基礎からのメカトロニクスセミナー

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

C26 玉乗りロボット (前編：メカ) Page. 46 基礎からのメカトロニクスセミナー

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



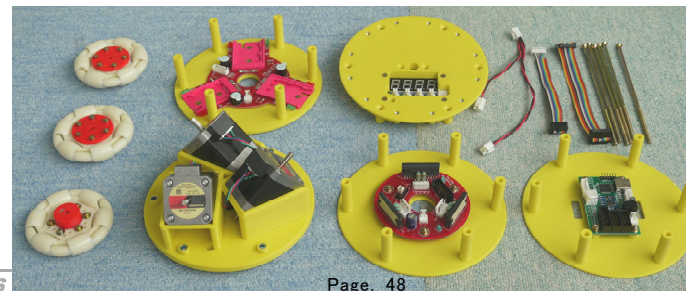
C26 玉乗りロボット (前編：メカ) Page. 47 基礎からのメカトロニクスセミナー

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



C26 Page. 48 基礎からのメカトロニクスセミナー

ロボットのメカ設計：全体構成

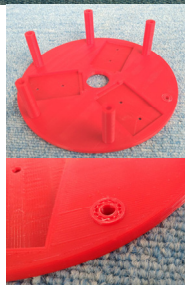
○ 層ごとの設計

◇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り子
- ・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ェア

- ・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
- ・制御ソフトウェアの実装



◇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