

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

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: 倒立振り子

- ・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 **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: 倒立振り子制御

→ 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

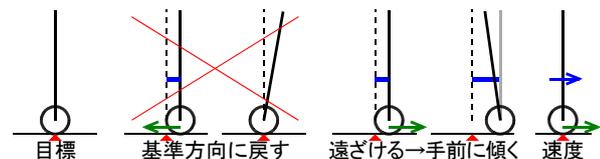
○ 位置を維持するフィードバック

- ◇ 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

- ・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)

- ・ **ステップモータ**使えるよう **加速度操作**

玉乗りロボットの基本原理

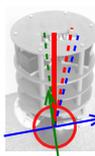
○ 倒立振り子制御を空間で実現する

◇ 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

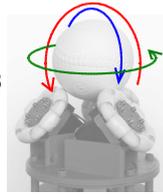
○ 球の回転操作

◇ 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
→ 倒立振り子制御、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

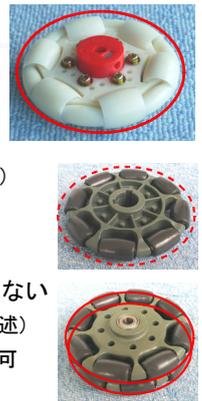
◇ 全方向用車輪の特性
・ **能動的に駆動** する方向
(回転方向)
・ **受動的に受け流す** 方向
(軸方向)



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)
車輪と球の接点位置が変化しない
(接点位置が速度比決定: 後述)
※ 相手が平面なら、2列でも可



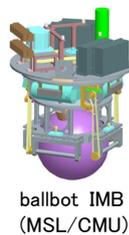
◇ 車輪設計については後述

基本原理: 球の駆動

○ そのほかの球の駆動方法

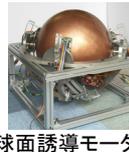
◇ 逆マウス球駆動方式(ballbot型)

- ・ 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



◇ 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



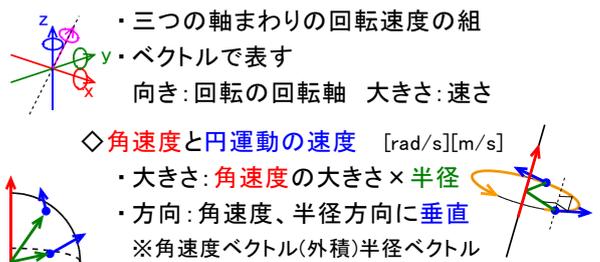
基本原理: 球の駆動 ~ここから少し数学的

○ 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

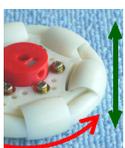


基本原理: 球の駆動

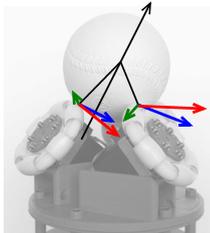
○ 球の駆動に関する特性式

◇ 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**

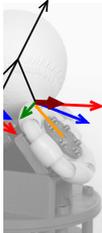


基本原理: 球の駆動

○ 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**

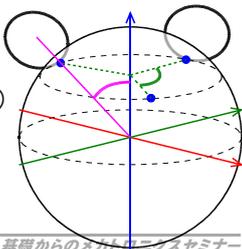
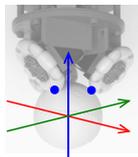


→ 車輪をどこに、どの向きに付けるか

基本原理: 球の駆動

○ 駆動部の設計パラメータ

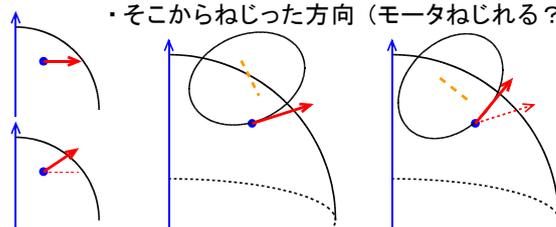
- ◇ 車輪の数
 - ・最低3 (球回転が3自由度、「乗る」ため)
- ◇ 各車輪の接触位置
 - ・鉛直軸対称 (3個なら120度単位)
 - ・頂点からの距離 (=角度、天頂角)



基本原理: 球の駆動

○ 駆動部の設計パラメータ

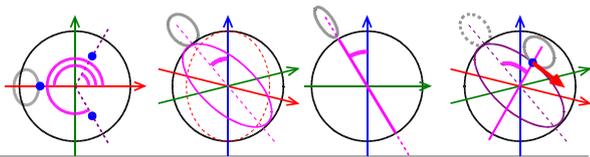
- ◇ 各車輪の駆動方向 (同じく対称性を考慮)
 - ・たとえば水平方向 (構造設計案)
 - ・そこからねじった方向 (モータねじれる?)



基本原理: 球の駆動

○ 駆動部の設計パラメータ: 3角度表現

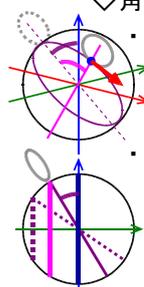
- ◇ 車輪の接点と駆動方向を3角度で表す
 - ・鉛直軸まわりの角度 (120度単位等)
 - ・駆動大円の傾斜角 ※大円=中心を含む断面の円
 - ・大円上の接点決定角



基本原理: 球の駆動

○ 駆動部の設計パラメータ: 3角度表現

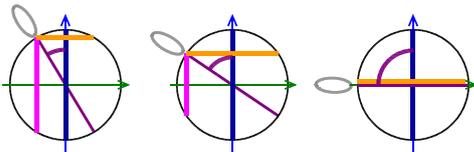
- ◇ 角度と機構の特性
 - ・大円傾斜角と接点決定角
 - 接点の天頂角=「乗る」位置
 - ※静的安定に関わるが影響小
 - ・大円傾斜角 ※接点決定角は影響なし
 - 一種の速度比(増速比、次ページ詳細)
 - 傾斜角大きいほど増速=トルク減
 - 小さい方が有利(ただし旋回に敏感)



基本原理: 球の駆動

○ 駆動部の設計パラメータ: 3角度表現

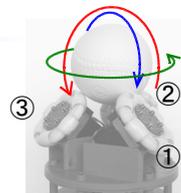
- ◇ 角度と機構の特性 (補足)
 - ・大円傾斜角 (接点決定角=0の場合)
 - 小さい→車輪回転→**転がすほう有利**
 - 大きい→車輪回転→**鉛直軸まわり回転**



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式 → P24



$$\begin{aligned} \text{車輪1} &= -0.5A \times \text{前後} - 0.87A \times \text{左右} + B \times \text{旋回} \\ \text{車輪2} &= -0.5A \times \text{前後} - 0.87A \times \text{左右} + B \times \text{旋回} \\ \text{車輪3} &= 1.00A \times \text{前後} + 0.00A \times \text{左右} + B \times \text{旋回} \end{aligned}$$

※A,Bは別途決まる定数

※0.87=√3/2

今回の目的

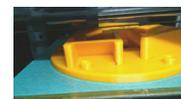
○ 前編: 全体の構成とメカ設計

- ◇ 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

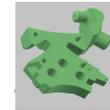
○ 仕様→設計検討

- ◇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

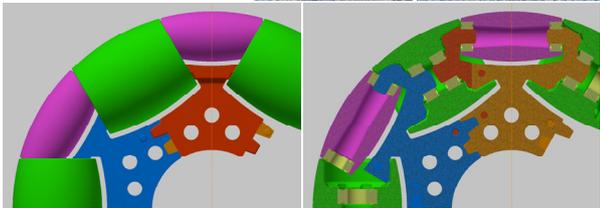


- ・部品点数の削減
- 軸はフレームと一体化
- 「軸」という部品を削減



ロボットのメカ設計：車輪

○ 3次元CADによる設計

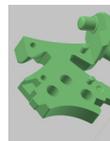


ロボットのメカ設計：車輪

○ 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

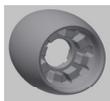
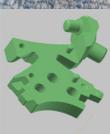
- ・最終的にφ80mmの設計
- ※従来品100mm、市販品最小55mm
- ※使用CAD: Autodesk Inventor Pro

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に
- ・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

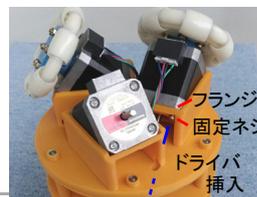
- ・最低数(低コスト、小型化) ↑フランジ面:固定

◇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

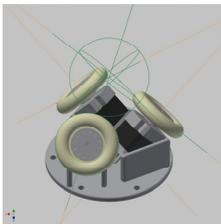
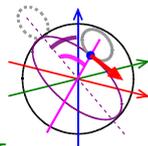


ロボットのメカ設計：駆動部

○ 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

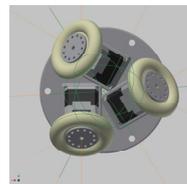
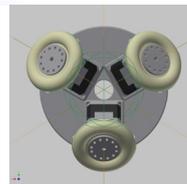


ロボットのメカ設計：駆動部

○ 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
※同系ロボットではほぼ採用事例なし
- ・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



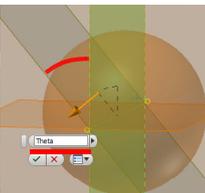
ロボットのメカ設計：駆動部

○ 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				
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	
Phi	deg	PhiOffset	0.000000	
RadiusSphere	mm	50 mm	50.000000	
RadiusWheel	mm	40 mm	40.000000	
MixedPoseraceheight	mm	140 mm	140.000000	



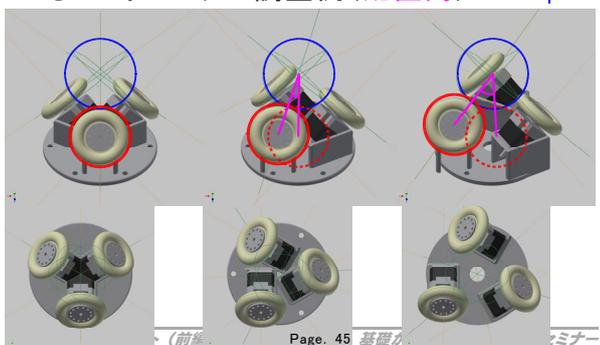
ロボットのメカ設計：駆動部

○ パラメータの調整例



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
※前二者は対応できるように修正は可能

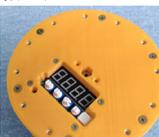


- ◇ これによって可能となる、より適した形状設計

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

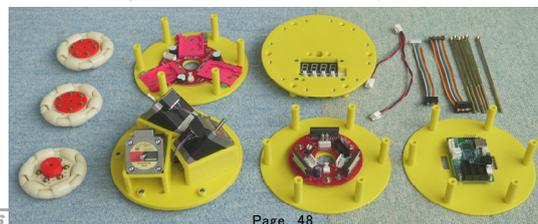
- ◇ 駆動部
- ◇ 電池 → セオリーでは上の方
- ◇ 回路基板
 - ・モータ駆動回路 (駆動部直上)
 - ・マイコン + 姿勢センサ (鉛直軸上)
 - ・状況表示・設定基板
- ◇ 「ロボットに乗せる」もの
 - ・フラットな天板を用意



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