仙台市/仙台市産業振興事業団

スペシャル

ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー

C14/Rev 1.0

第１４回

バドミントン練習用ロボットをつくる

仙台市地域連携フェロー

熊　谷　正　朗

kumagai@tjcc.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

今回の目的

○ ロボット開発の構想から制御まで

◇「ロボットのつくりかた」の実例

・メカトロを全横断

・こういうロボットを作りたい

→ 具体化、妥当性チェック

→ 仕様策定のための検討

→ メカの設計開発

→ 制御方法の検討

→ 動作検証

アウトライン

○ ロボット開発の構想から制御まで

◇第一部：アイデアから仕様策定

- バドミントン練習ロボを作りたい！
- どう打ち出すか？　どのくらい？
- 実験とシミュレーション
- 打ち出し方法の検討

◇第二部：詳細の検討と実装

イントロダクション

○ 謝　辞

・このロボットは熊谷研の平成23年度卒業研究の一環として開発されました。

・このロボットを着想し、主に運動計測やメカの設計などを行った担当卒業生、菊地祐介君から、紹介することを快諾してもらいました。

イントロダクション

○ 熊谷研のロボット開発のプロセス

◇発想＝学生　技術＝熊谷

- 学生が「こんなロボットをやりたい」と
  アイデアを持ち込むところからスタート
  ※3年科目、ジュニアセミナを活用

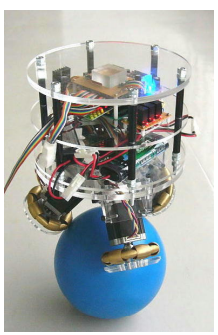
- 「それ、おもしろそうだね！」
  と、答えるまでの間に、技術的課題と
  必要なリソースと、落としどころを想定し、
  OK／NGを判断する。

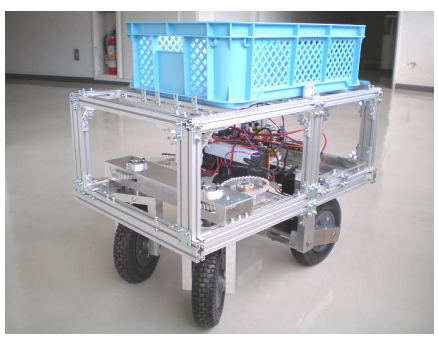
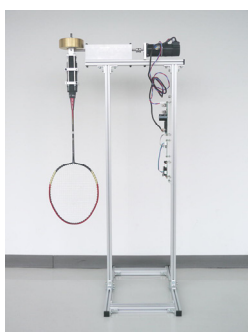
イントロダクション

○ 熊谷研のロボット開発のプロセス

◇「こんなロボットやりたい！」

- 玉乗りロボット BallIP
- トレーラー型ロボット
- 農業支援運搬ロボット Kulara
- バドミントン練習用ロボット BBM



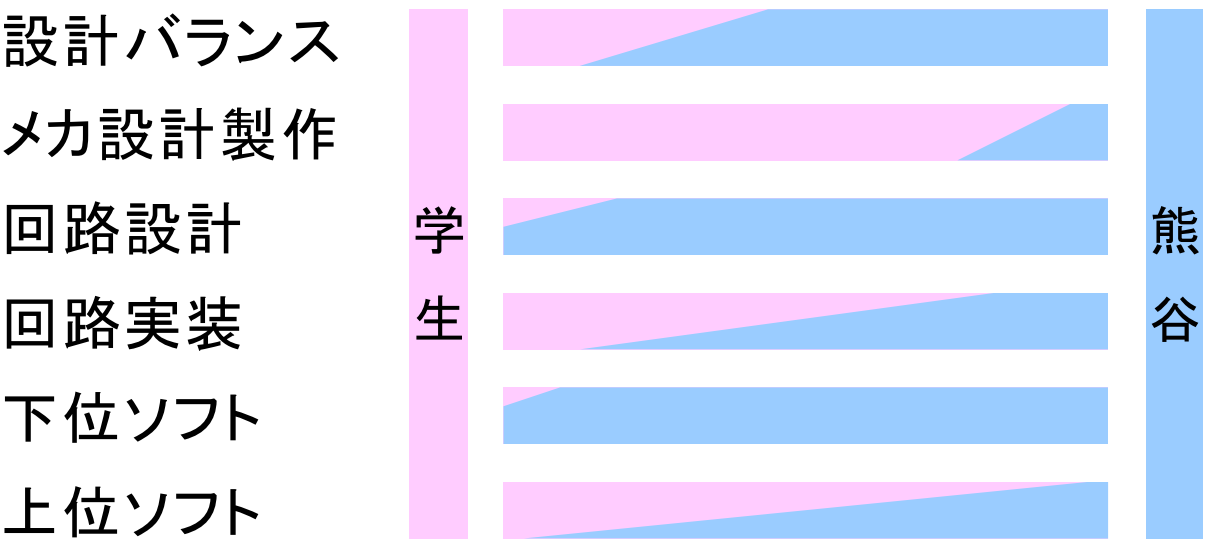



イントロダクション

○ 熊谷研のロボット開発のプロセス

◇開発分担

- できることは学生がやる。
- 学生の「オーバーテクノロジ」は熊谷。

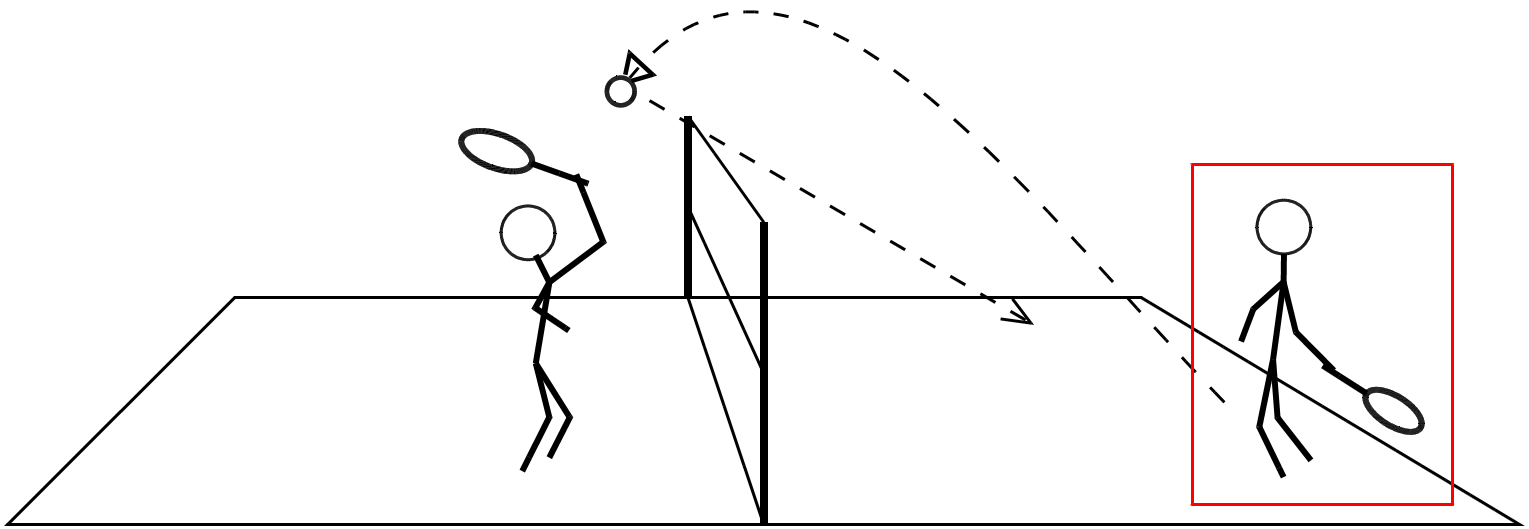


イントロダクション

○「バドミントン練習手伝いロボ作りたい」

◇学生の発案：（2010年10月ころ）

・卒業研究で、バドミントンの練習のために
シャトルを打ち上げるロボットをつくりたい。



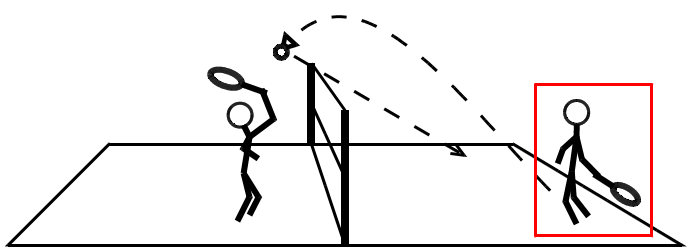
イントロダクション

○「バドミントン練習手伝いロボ作りたい」

◇発案の背景

・打ち返す練習が必要。

・一定のポイントに羽根を上げられること。
＝ある程度熟練した人でなければ、
この練習の相手はつとまらない。
※野球の打撃練習には上手な投手必要



・個人や小さな団体でも
手軽に練習できるように。

イントロダクション

○「バドミントン練習手伝いロボ作りたい」

◇世の中にこういう機械はないか？

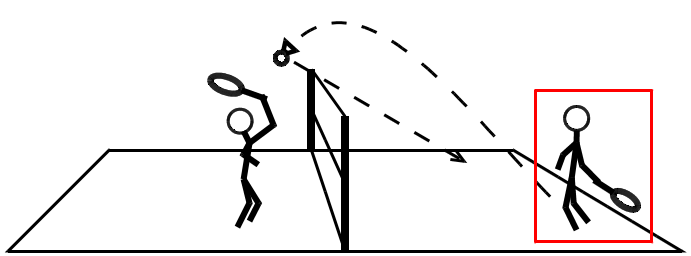
・球技では多数(ローラで射出可能)。

・ゴルフクラブを振るロボット。

・バドミントンはほとんど情報がない。

※2012年になって、2，3の実例が出てきた

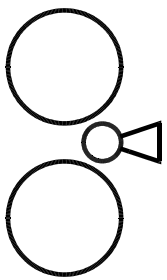
→ 作るしかない！



イントロダクション

○「バドミントン練習手伝いロボ作りたい」

◇方式の検討



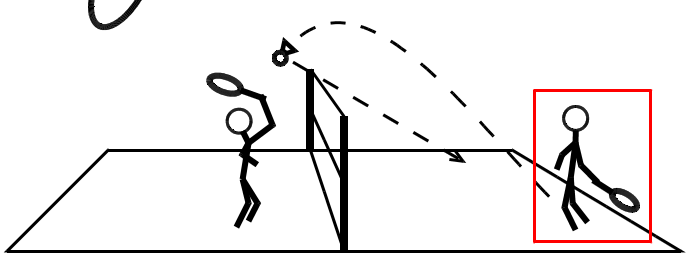
・シャトルの形状から、ローラーは困難。

・エア等噴射系は制御技術、圧縮機、
初速確保の難しさから困難。



・やはり、ラケットで打つのが無難？

→
・動作がわかりやすい
・モデルが明確
・モータ制御に帰着



アウトライン

○ ロボット開発の構想から制御まで

◇第一部：アイデアから仕様策定

- バドミントン練習ロボを作りたい！
- どう打ち出すか？　どのくらい？
- 実験とシミュレーション
- 打ち出し方法の検討

◇第二部：実装のための検討

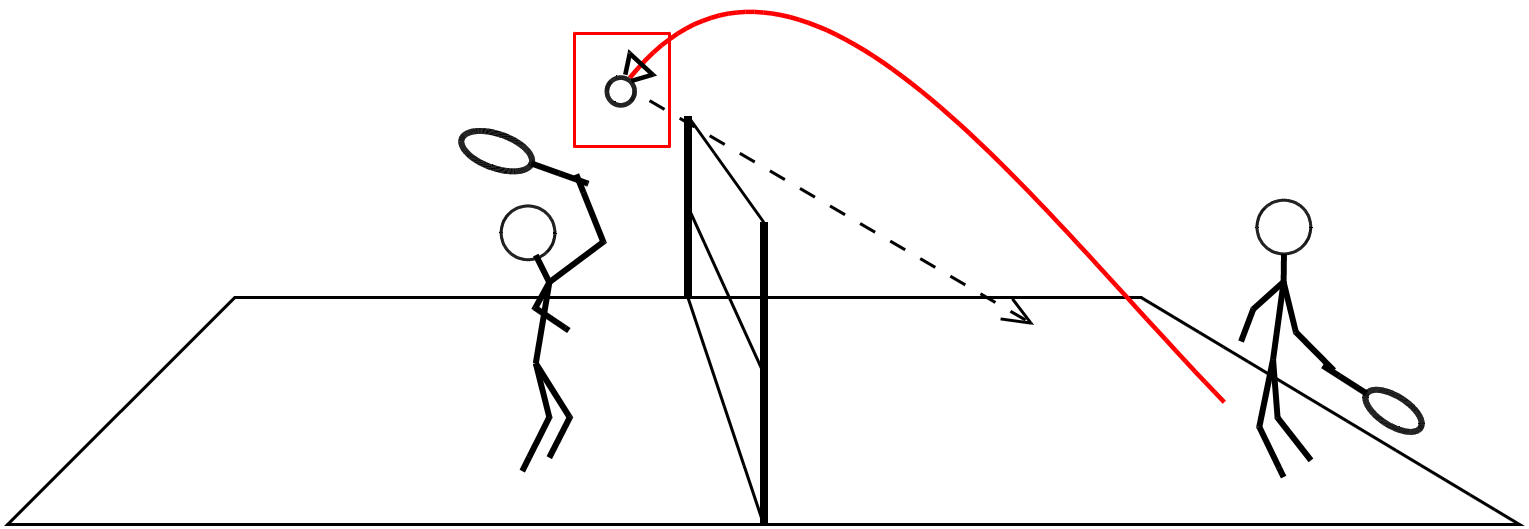
仕様策定のための基礎検討

○ どう打ち出せば良いか？

◇要求動作

・コート内でネットを超えて飛ばす。

・打ちやすいところに落ちてくること。



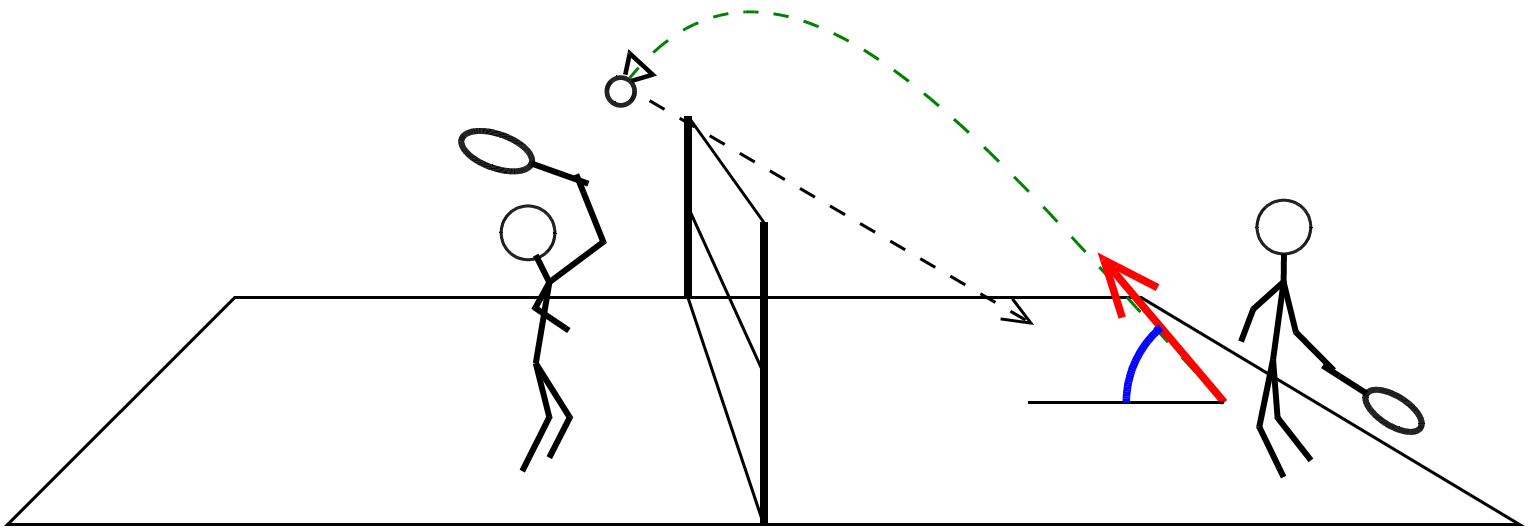
仕様策定のための基礎検討

○ どう打ち出せば良いか？

◇ロボットへの要求

・所定の速度、角度でシャトルを打ち出す。

・その先は一定の物理モデルで飛行と仮定。



仕様策定のための基礎検討

○ どう打ち出せば良いか？

◇ロボットへの要求

- 所定の速度、角度でシャトルを打ち出す。
  → どのくらい？

- 物理の計算
  放物線運動 → 実は全然たりない
  空気抵抗を加味したシミュレーション
  → パラメータは？
- 実際に人間が打ってみて、解析する

仕様策定のための基礎検討



カシオ社WEBより

○ 人間の打ち出し動作の解析

◇実験方法

・高速度撮影デジカメ CASIO EX-F1 で
300コマ/秒の撮影

→ コマ送りしてシャトル位置を座標特定

→ 座標と実距離の変換

※簡易的、歪み・画角の補正などはせず

※最大1200fps撮影可能であるが、画素数を考えると
このあたりが無難。詳細は次回にも。

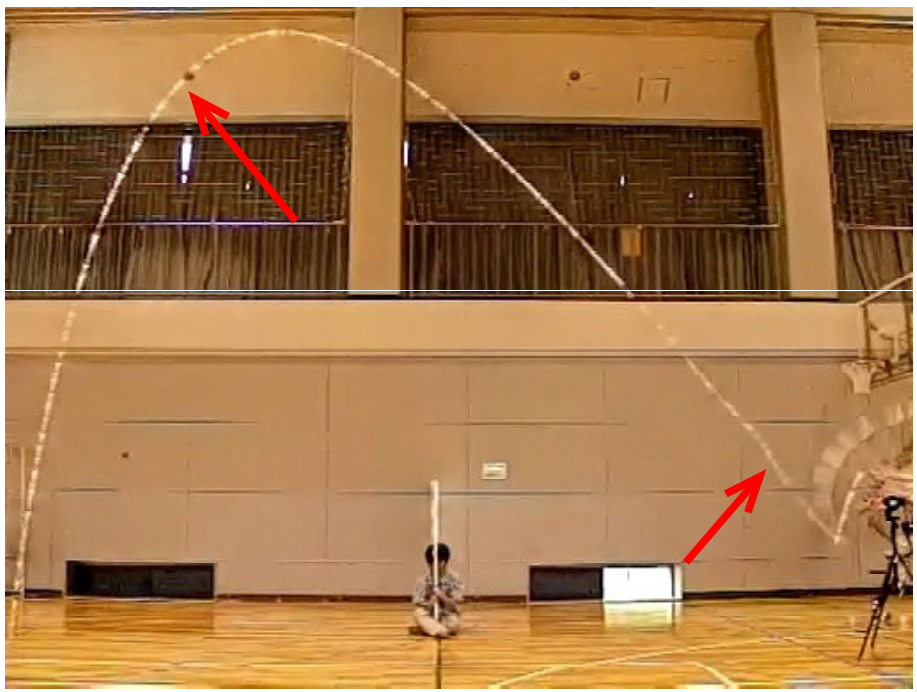
仕様策定のための基礎検討



カシオ社WEBより

○ 人間の打ち出し動作の解析

◇実験実験結果



メモ：

- 綺麗な放物線ではない。
  後半に急激に落下＝空気抵抗で減速
- 打撃直後に軌道の変化が見られる。

仕様策定のための基礎検討



○ 人間の打ち出し動作の解析

◇実験実験結果

・この実験の例では

初速： 34[m/s] （時速120km，マッハ0.1?）

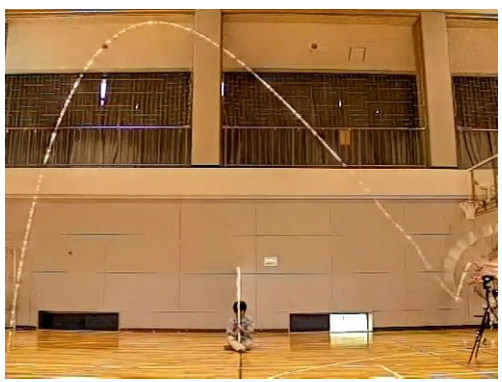
射出角：52[deg]

と判明。

・ラケット先端速度も

これにほぼ匹敵。

→ラケットをいかに振る？



仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション

◇動作検討のためのシミュレーション

- どの角度、どの出力で飛ばすと効率よく目的位置に到達するのか？
- パラメータを大量に用意したり、手動で毎回調整することなく使えるように。
- 原理の説明ではなく、動作決定のため
  ＝ 現実とあわなければ意味が無い



仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション

◇飛行のモデル

・運動方程式

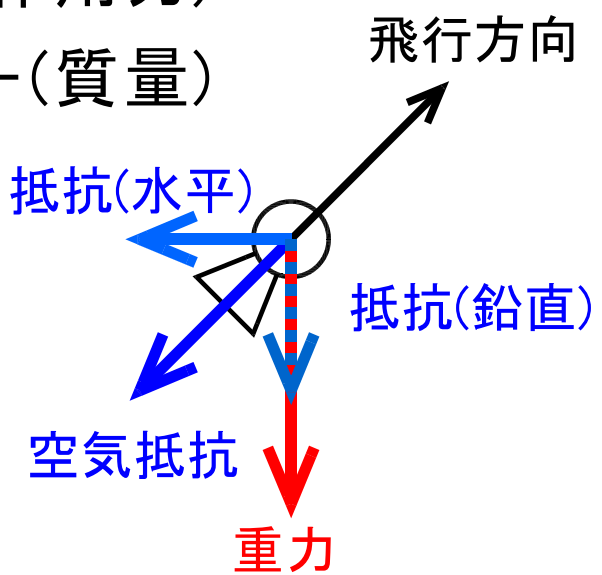
(質量)×(加速度)＝(作用力)

(加速度)＝(作用力)÷(質量)

・シャトルにかかる力

重力

空気抵抗



仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション

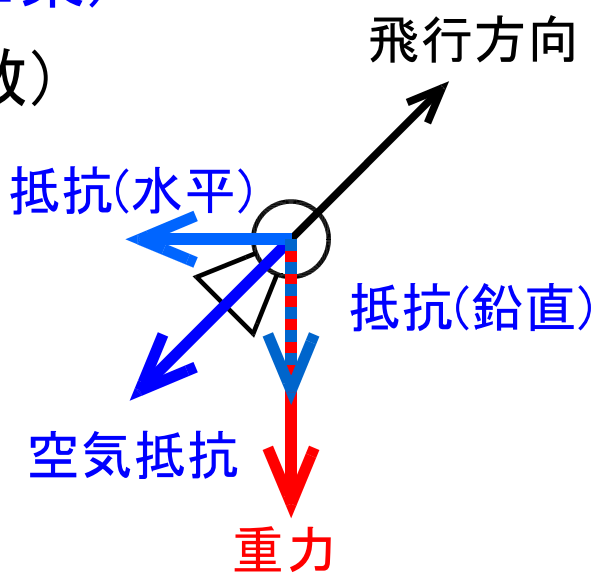
◇空気抵抗のモデル

・抵抗の大きさ

(1/2)×(密度)×(速度２乗)
×(断面積)×(抗力係数)
＝速度２乗に比例
※どのくらい比例？

・方向

飛行方向と逆向き。



仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション

◇加速度→速度→位置

・速度は位置の時間変化

＝(今の位置－少し前の位置)÷(時間差)

加速度は速度の時間変化

↓

・今の位置＝少し前の位置＋速度×時間差

今の速度＝少し前の速度＋加速×時間差

で、少しずつ計算していける。

仕様策定のための基礎検討

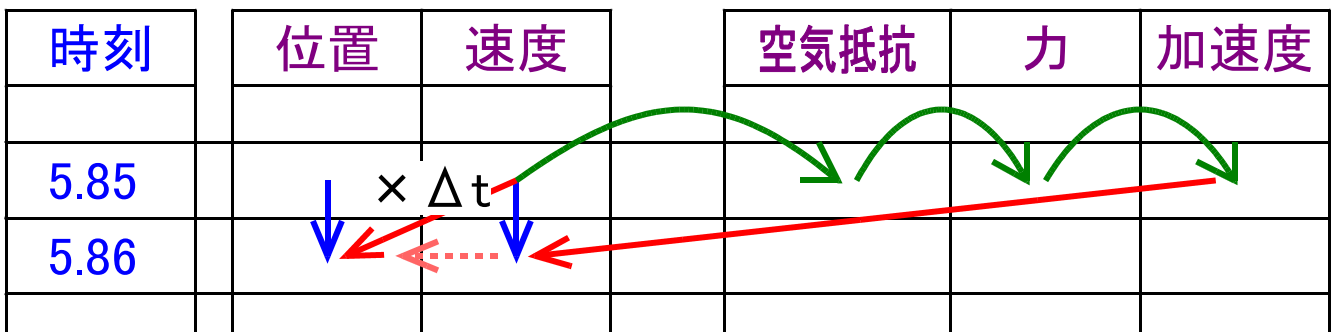
○ 飛行シミュレーション

◇Excelでシミュレーション

・横１行ごとに、ある時刻
　縦１列ごとに、状態量(位置、速度など)

・１行ごとに僅かな時間経過させる。

・上の行の値から、今を計算。

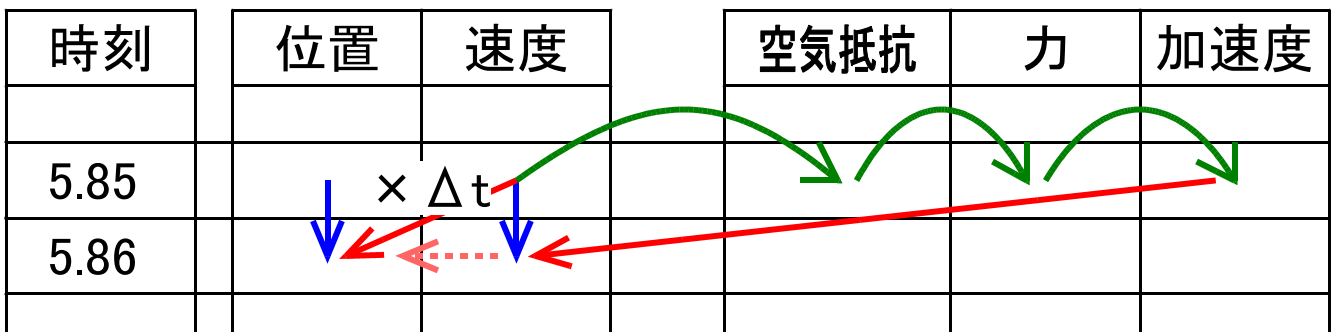


仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション

◇Excelでシミュレーション（コツ）

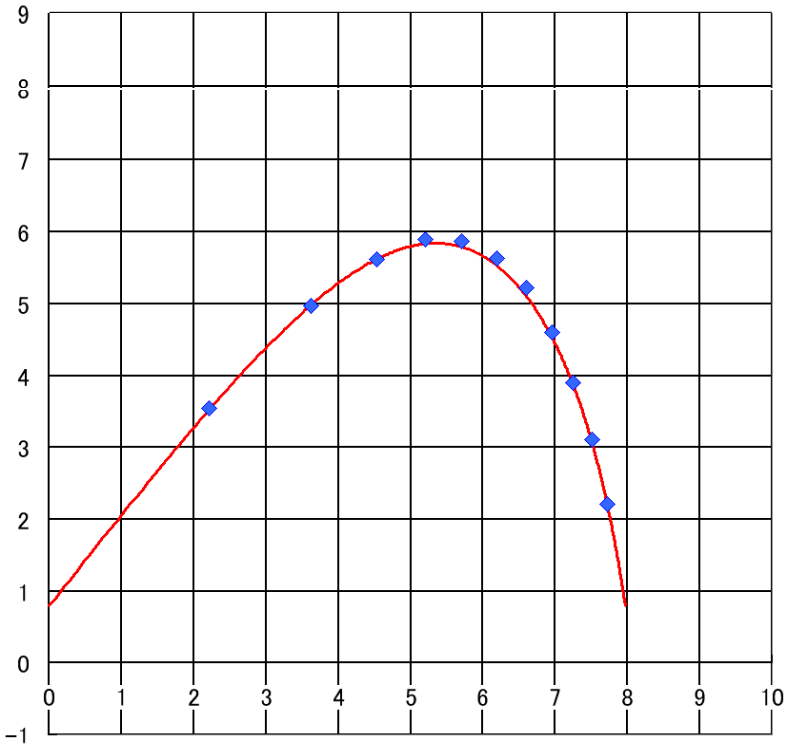
- パラメータなどを変更しやすく(特定セル)。
- グラフは縦軸横軸を固定する。
- 経路など縦横軸とも位置を表すなら(座標)、
  縦と横の目盛が1：1になるように。



仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション

◇実験結果とシミュレーション結果



・青点：実験

・赤線：シミュレーション

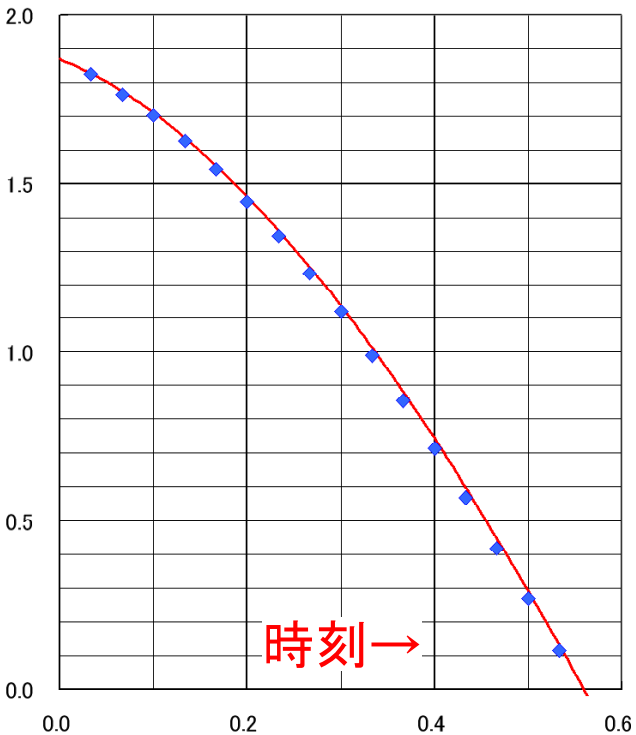
・問題は空気抵抗の係数



仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション（鉛直落下）

◇実験結果とシミュレーション結果

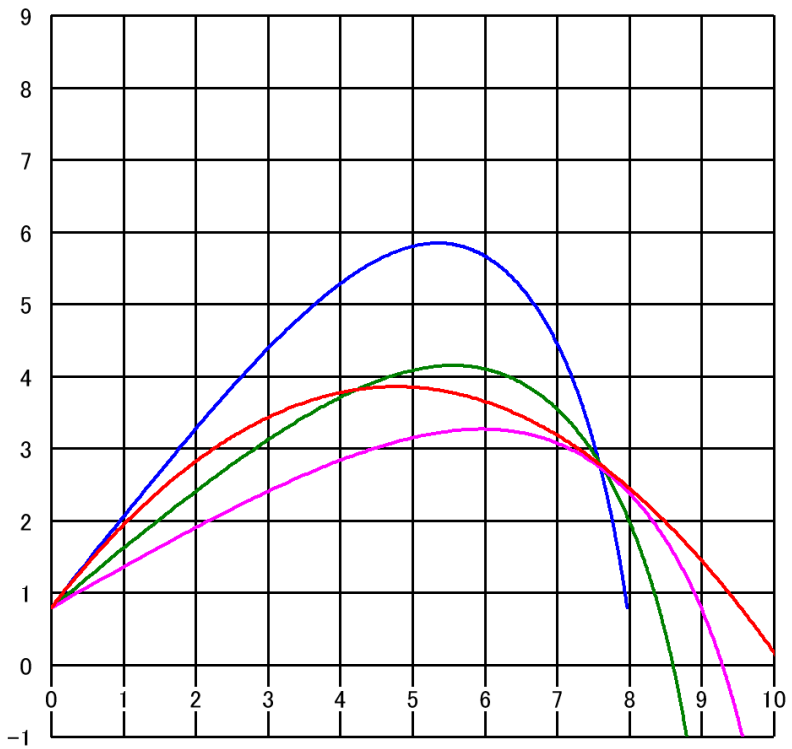


- 青点：実験
- 赤線：シミュレーション
- 縦軸：高さ[m]
- 横軸：時刻[s]

仕様策定のための基礎検討

○ 飛行シミュレーション

◇シミュレーションによる比較検討



33.5[m/s]　52[deg]

28.0[m/s]　40[deg]

30.0[m/s]　30[deg]

抵抗無　9.8[m/s]　52[deg]

- 35～40[deg]あたりだと
  より低い射出速度でも
  目標位置に到達。
- 空気抵抗の影響がかなり
  大きいことが分かる(3倍)

アウトライン

○ ロボット開発の構想から制御まで

◇第一部：アイデアから仕様策定

- バドミントン練習ロボを作りたい！
- どう打ち出すか？　どのくらい？
- 実験とシミュレーション
- 打ち出し方法の検討

◇第二部：実装のための検討

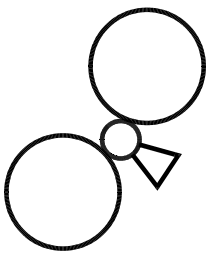
仕様策定のための基礎検討

○ 打ち出し方法

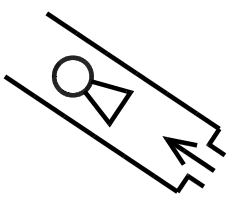
◇目的

・指定の角度で指定の速度で打ち出せる。

・初速30m/sを(最終的に)達成しうる。

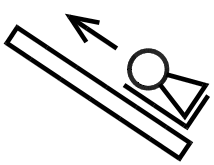


◇NG案(再チェック)



・ローラ式 → シャトル形状に難

・気圧式 → 未知要素が多い



・直動アクチュエータ式 → 加速距離

※長さ1mで30m/sにするには、450m/s^2=45g

仕様策定のための基礎検討

○ 打ち出し方法



◇ラケットを振る → 振り方

(1) 単発式

？ 加減速性能重視。（相応の加速が必要）

○ タイミング調整がおそらく楽。

？ 見た目がわかりやすい。

(2) 連続回転

○ 駆動系は楽。　（回転速度だけ）

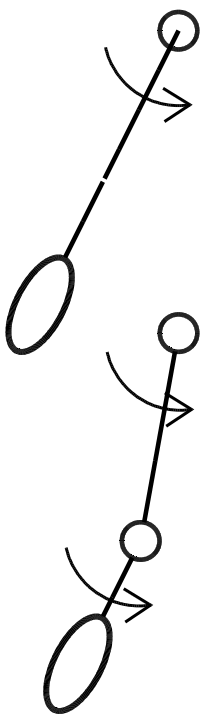
× タイミングに難。　（供給側のタイミング）

仕様策定のための基礎検討

○ 打ち出し方法

◇ラケットを振る → メカ

・バドミントンは特に手首のスナップを使う。



(1) 肩のみ

○ メカは単純化。

× 腕全体を高速回転。

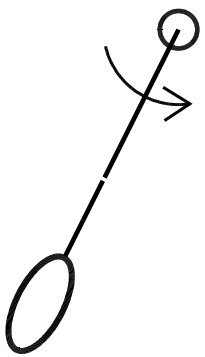
(2) 肩＋手首

× メカが複雑、手首部分の機構も振る。

○ 腕全体の速度を落とせる。

仕様策定のための基礎検討

○ 打ち出し方法の決定と設計方針





◇単純化を最優先

- 駆動は1軸のみ。
- 都度、一振りで加速し打つ。

◇設計開発のポイント

- 安定して回せるメカの設計
- 効率よく加速するための制御システム
- タイミングを調整できる制御法

アウトライン

○ ロボット開発の構想から制御まで

◇第一部：アイデアから仕様策定

ここで質問 ＆ 一時休憩

◇第二部：詳細の検討と実装

- 機構部分の設計とそのための検討
- 駆動系の検討
- 制御法と動作シーケンス
- シャトルの供給

機構部分の開発

○ 基本原理



◇ラケットに軸をつけて回転

・軸の回転の制御に集約

◇重要な要件

・重心が回転軸上にあること

※少しでもずれるとブレ

・慣性モーメントをなるべく小さくする

※加速しやすくする

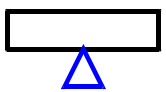
※連続回転重視では逆に大きくする場合あり

機構部分の開発

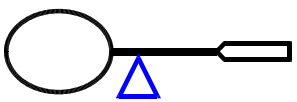


○ 重心の位置

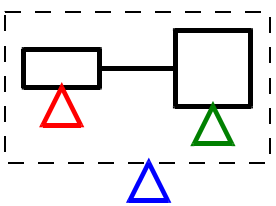
◇重心＝質量分布の平均位置



・一点で支えられる場所。



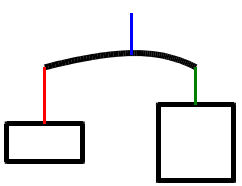
・対称なものは見た目の中心。



・複数の物体からなる全体の重心

$$\frac{(\text{物体1の重心位置})\times(\text{同質量})+(\text{2の位置})\times(\text{同質量})}{(\text{物体1の質量})+(\text{物体2の質量})}$$

で計算される。

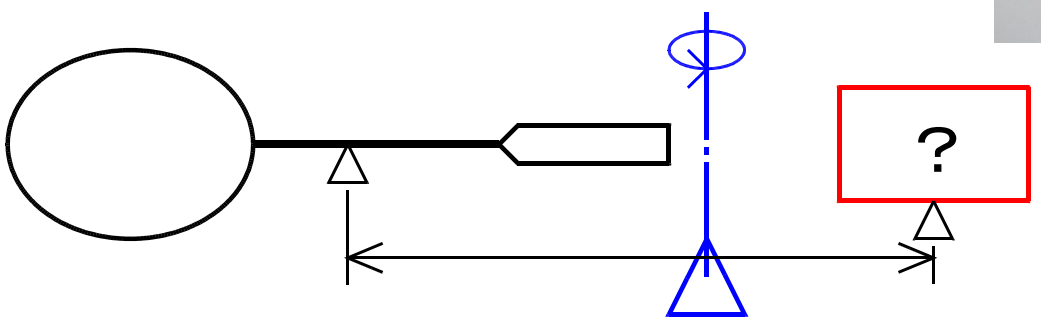


機構部分の開発



○ 重心の位置

◇回転部の重心と釣り合い錘



- 重心を回転軸上に。
- 厳密には固定金具やネジ類も影響する。
- 釣り合い錘の質量と位置には決定の余地：
  (位置)×(質量)のみが計算できまる。

機構部分の開発

○ 慣性モーメント

※ 力＝質量×加速度

◇回転における質量的存在

・(トルク)＝(慣性モーメント)×(角加速度)

・(角加速度)＝(トルク)÷(慣性モーメント)

→ 慣性モーメントが小さいほど加速が楽。

→ 今回の用途では小さいほど有利。

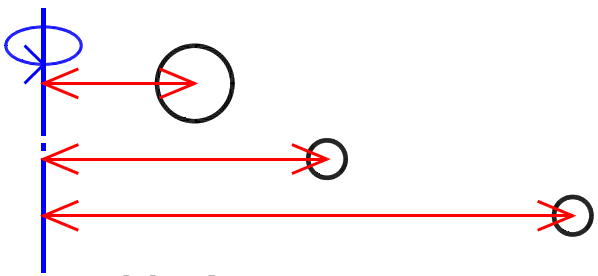
・(質量)×(回転軸からの距離の２乗)の合計。

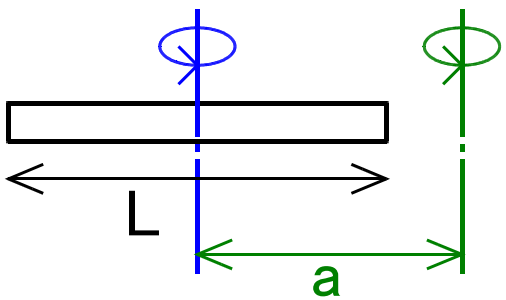
機構部分の開発

○ 慣性モーメント

◇回転における質量的存在

- (質量)×(回転軸からの距離の2乗)の合計





- 特定形状の場合の式

  例)質量m,長さLの棒→$(1/12)mL^2$

- 回転軸のシフト

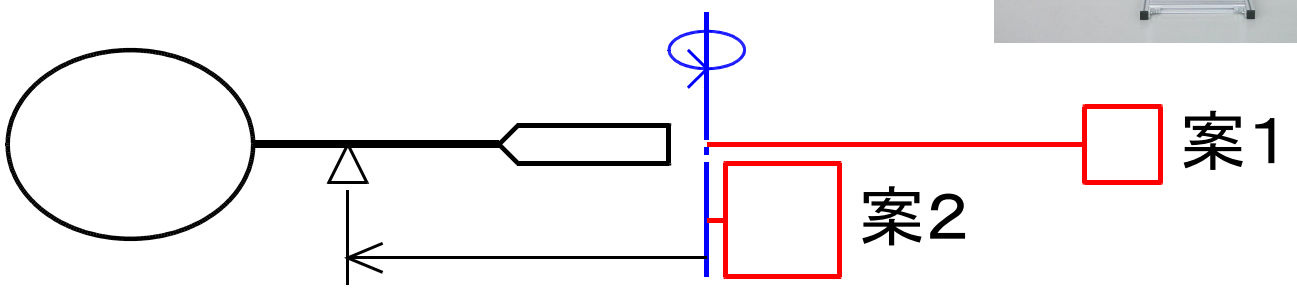
  距離a移動した場合→もと＋ma^2

機構部分の開発



○ 釣り合い錘の位置と大きさ

◇慣性モーメントの最小化

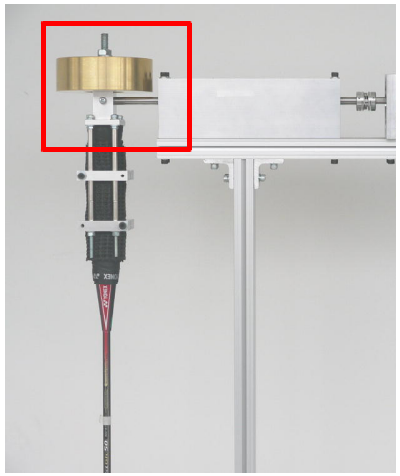


・ラケット等から釣合錘の(質量)×(位置)決定

・案１：小さい錘を遠くに　→全体は軽くなる

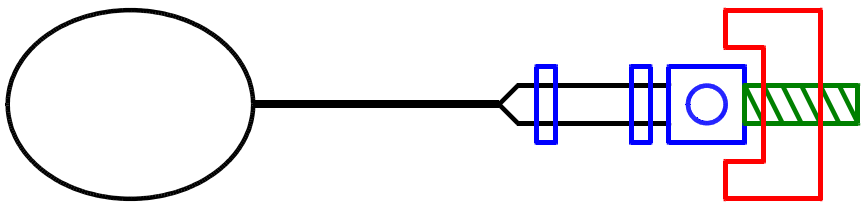
・案２：大きな錘を近くに　→慣性モ小さくなる

機構部分の開発



○ 釣り合い錘の位置と大きさ

◇最終決定案



- 回転軸およびラケット固定部
- 釣り合い錘
- 錘調整用ねじ

※腕の長さも短い方が有利(回転速度は上がる)

機構部分の開発



○ 駆動系の検討

◇必要な運動条件

・ラケットの回転速度

低軌道打ち出し条件→ 打点速度 23[m/s]

ラケット打撃点半径 0.67[m]

ラケット回転角速度 34[rad/s], 5.5[回/s]

一振りで必要な角加速度 ＞90[rad/s^2]

※半径×角速度≒速度

◇回転部の慣性モーメント

計算値 0.01[kgm^2] 程度

機構部分の開発

○ 駆動系の検討

◇等加速度の計算方法（直線/回転共通）

- 位置,角度： x
- 速度,角速度： v
- 加速度: a
- 時刻： t
- $v = at$, $x = (1/2)at^2$
- $v^2 = a^2t^2 = 2ax$
- $x = v^2 / 2a$ ， $a = v^2 / 2x$

→ 速度の２乗で 加速距離or加速度 が大

※当初の速度の見積もりミスがかなり問題に

機構部分の開発

○ 駆動系の検討

◇必要な運動条件

一振りで必要な角加速度 90[rad/s^2]

◇回転部の慣性モーメント

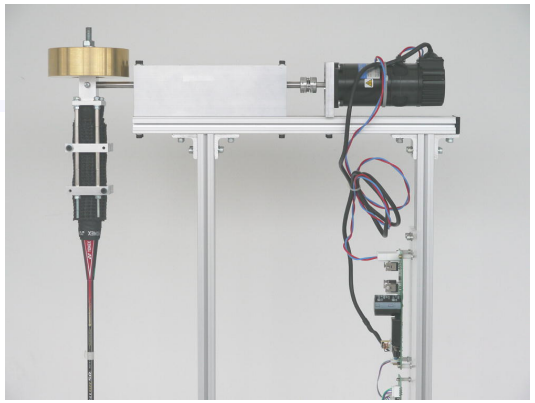
計算値 0.01[kgm^2]

◇加速に必要なトルク （一回転で加速する場合）

90×0.01 ＝ 0.90[Nm]

※角速度 34[rad/s]

機構部分の開発



○ 駆動系の検討

◇減速機を使うかどうか？

・減速機を使うメリット

トルクは稼げる。

・減速機のデメリット

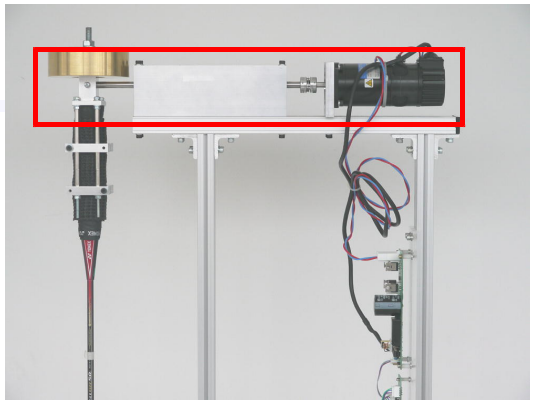
モータ自体の速度はさらに上がる

→加速もさらに必要。

トータルの(等価的)慣性モーメント増加。

ガタなど制御上の問題。

機構部分の開発



○ 駆動系の検討

◇モータを直結する

・回転軸を支える軸受けのみ用意

◇モータの選定

・山洋T511　110[W]モータ

定格トルク:　0.27[Nm]　＜0.9(振るのに必要)

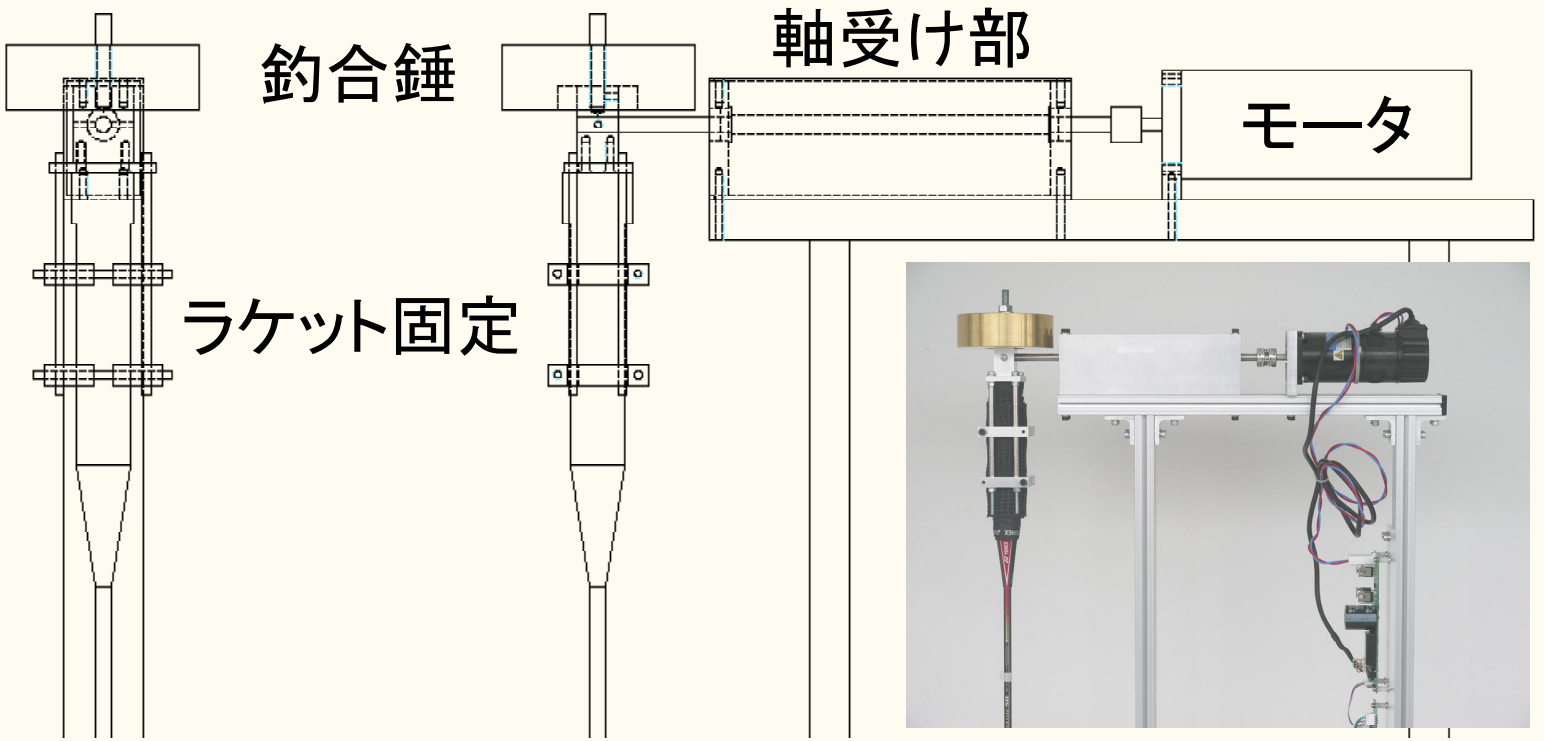
定格回転:　3000[rpm]＝50[rps]＝314[rad/s]

定格電流:　2.0[A]　※トルクと比例

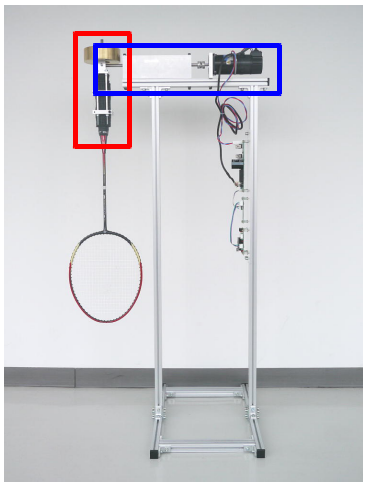
・瞬間的に4倍の電流を投入

機構部分の開発

○ 最終的な設計・組立図



機構部分の開発



○ 設計方針（短期決戦型）

◇不可欠な部分を先に完成させる

- 回転部分
  - ハブ部品
  - ラケット保持部
  - 釣り合い錘
- 回転支持部/駆動部
  - シャフト/軸受け
  - モータ取り付け

アウトライン

○ ロボット開発の構想から制御まで

◇第一部：アイデアから仕様策定

◇第二部：詳細の検討と実装

- 機構部分の設計とそのための検討
- 駆動系の検討
- 制御法と動作シーケンス
- シャトルの供給

動作の検討

○ いかにモータを回すか

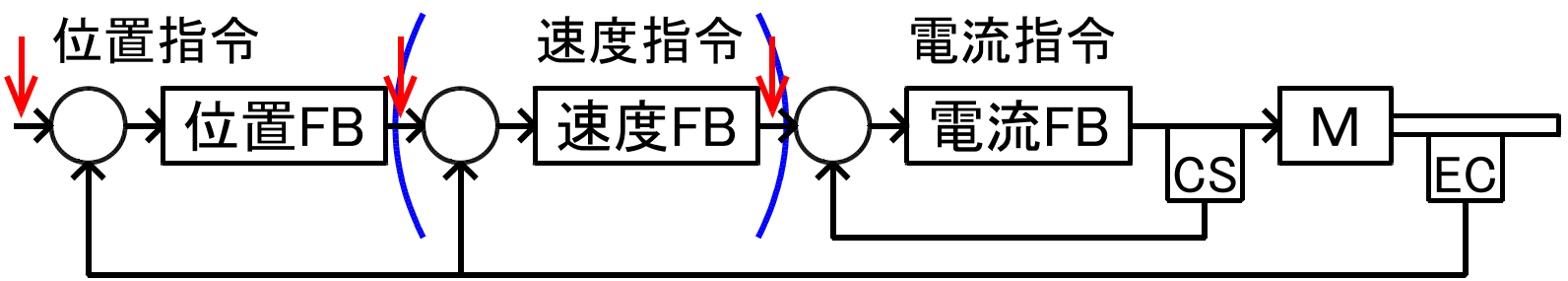
◇主なモータの制御方法

- 位置制御（角度制御）

  ※point-to-point を含む

- 速度制御
- トルク制御（電流制御）

FB：フィードバック
CS：電流センサ
EC：エンコーダ



動作の検討

○ いかにモータを回すか

◇主なモータの制御方法

- 位置制御（角度制御）
  応答は遅くなるが角度を定められる。
- 速度制御
  一定速度で目標に到達するのに便利。
  速度ゼロ目標だとブレーキとして作用。
- トルク制御（電流制御）
  応答最速、モータの最大性能を引き出す。

動作の検討

○ いかにモータを回すか

◇制御で性能を引き出すには？

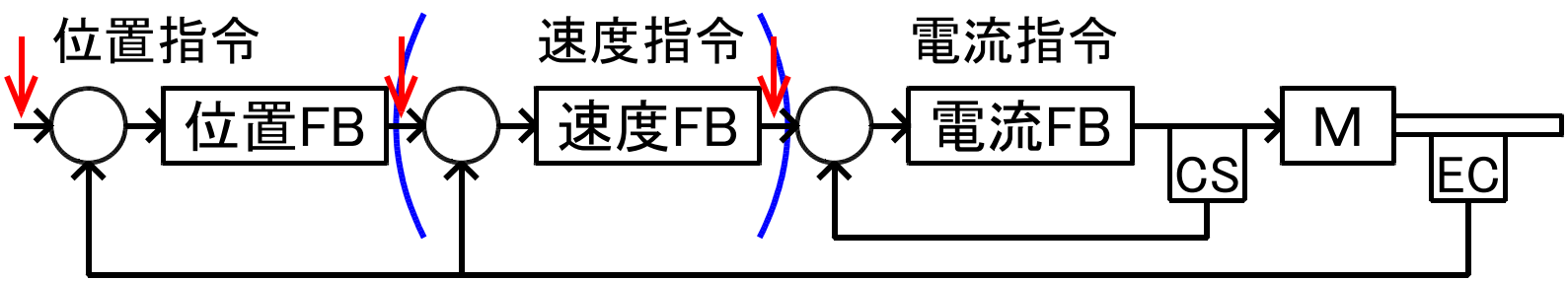
- 誤差を小さくしたいなら、正確な測定と高いゲインによるフィードバック制御。
- 性能をぎりぎりまで引き出すには、なるべく簡素な制御をつかい、対象の特性に本質的な操作を行う。
- フィードバック制御＝出力の余裕をつかって精度・安定を得る。

動作の検討

○ いかにモータを回すか

◇BBMの制御方針

- 状況毎に制御を切り替える。
- 主たるスイングはトルク指令で
- 準備/終了処理を速度/位置指令で



動作の検討

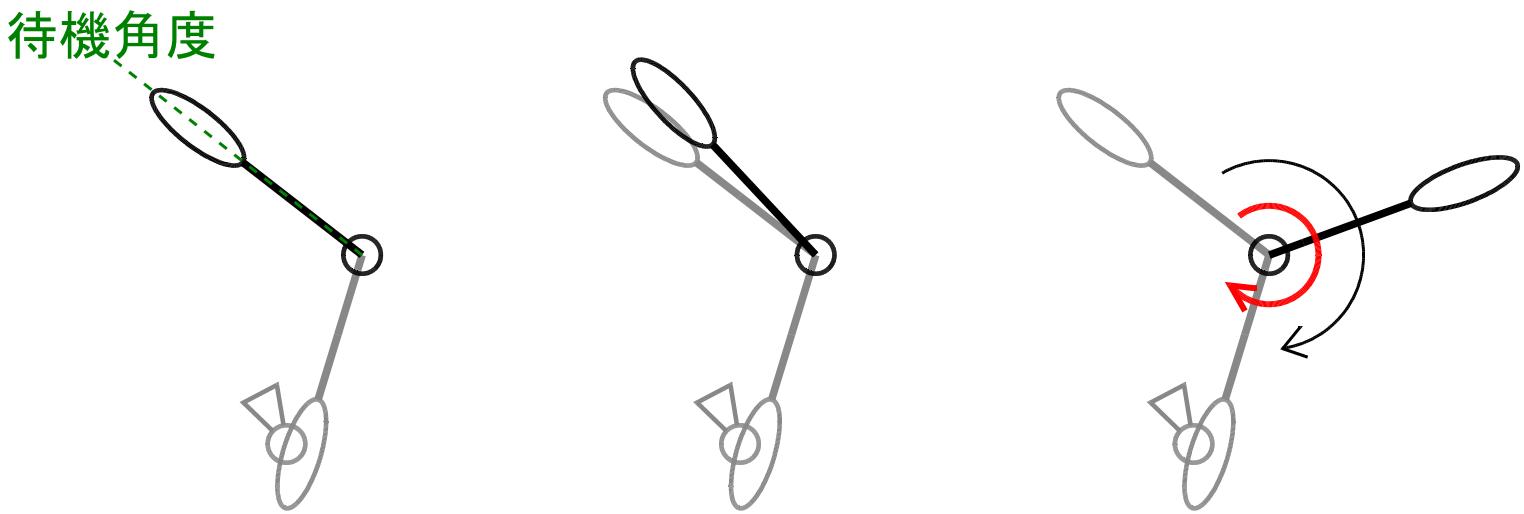
○ 動作シーケンス

[遷移条件等]

(1) 待機 : 所定の角度に位置制御

(2) 始動 : シャトル供給信号から [タイマ]

(3) 加速: 最大トルク指令でモータを加速



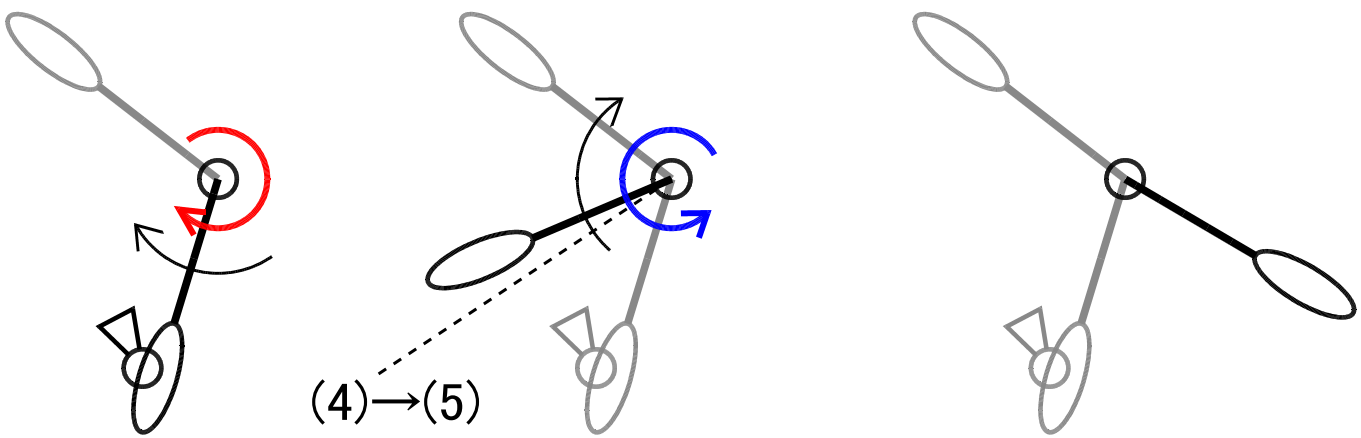
動作の検討

○ 動作シーケンス

(4) 打撃 :　　検出せずに振り抜く [指定角度]

(5) 減速 :　　指令ゼロに速度制御 [≒速度ゼロ]

(6) 停止:　　打ち出し完了



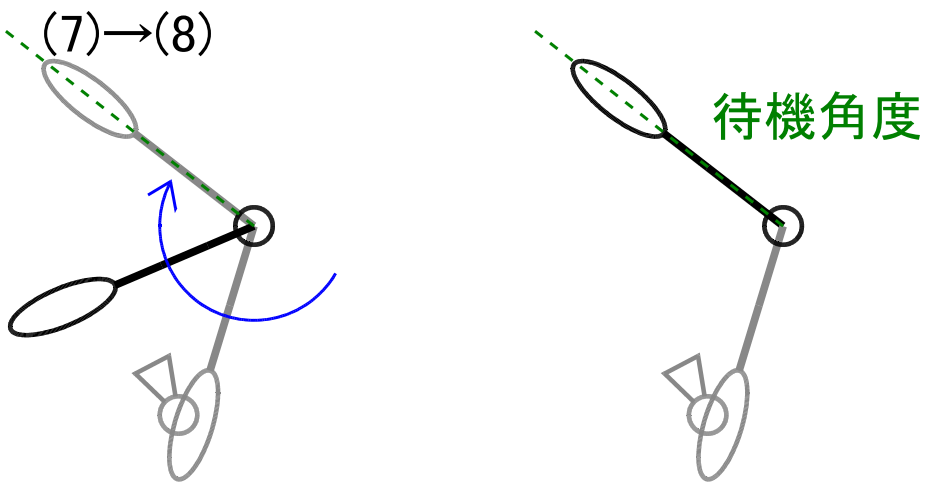
動作の検討

○ 動作シーケンス

(7) 準備 : 一定速度で初期位置へ [指定角]

(8) 初期化 : 所定角度に位置制御 [角誤差≒0]

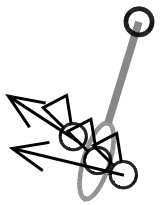
→ (1)へ



動作の検討

○ 動作シーケンスと調整

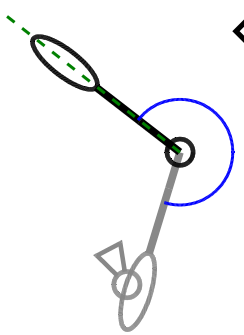
◇飛行角度の調整



・シャトルを準備する位置（後述）

・振るタイミングはあまり影響しない

◇出力の調整



・待機角度（スイング角度幅）

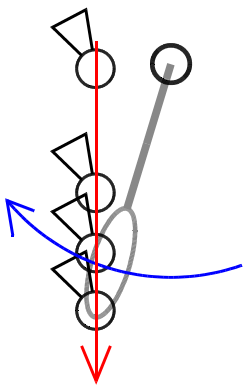
・トルクでも調整できるが、振る時間も影響されるため、結果的に角度調整も必要に

→ 角度のみで

動作の検討

○ 動作シーケンスと調整

◇打点の調整



・シャトルの供給される軌道とスイングの交点でタイミングを合わせる。

・実験的には5/100秒程度の誤差範囲に収まれば、ほぼ同じように飛ぶ。

→ タイミング調整機能

アウトライン

○ ロボット開発の構想から制御まで

◇第一部：アイデアから仕様策定

◇第二部：詳細の検討と実装

- 機構部分の設計とそのための検討
- 駆動系の検討
- 制御法と動作シーケンス
- シャトルの供給

シャトルの供給

○要求される機能

◇非接触

・ラケット軌道外から

◇再現性のある供給

・軌道（≒飛び出し条件）

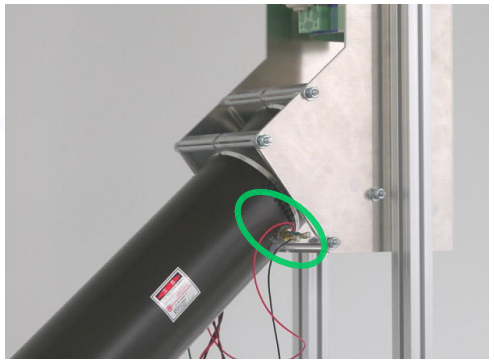
・タイミング

◇シャトルタイミングの検出

・振るためのトリガ



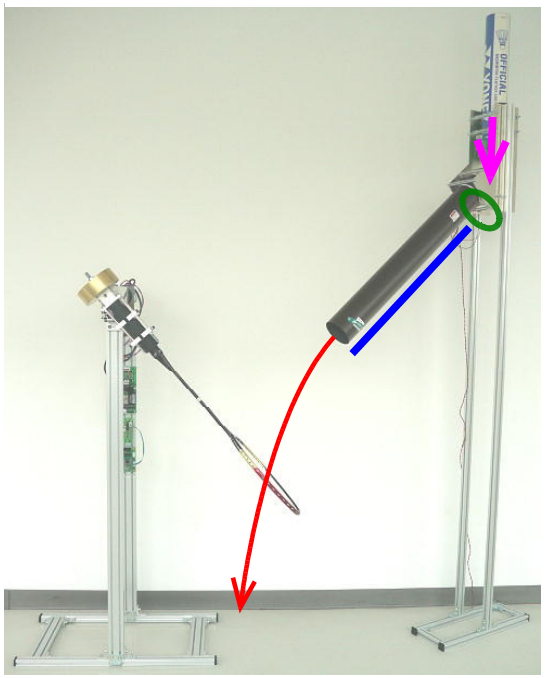
シャトルの供給



○要求される機能の実現

◇非接触

・斜めにすべり落とす



◇再現性のある供給

・すべり台(パイプ)に
落とす→すべり始め

◇シャトルタイミングの検出

・上流部に光センサ

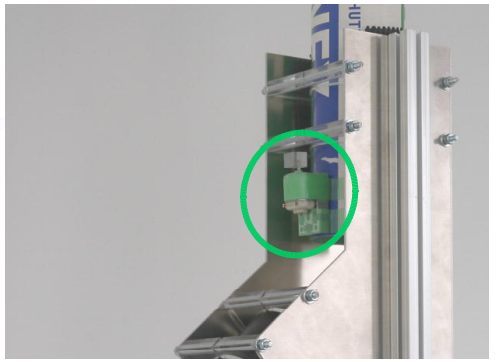
シャトルの供給

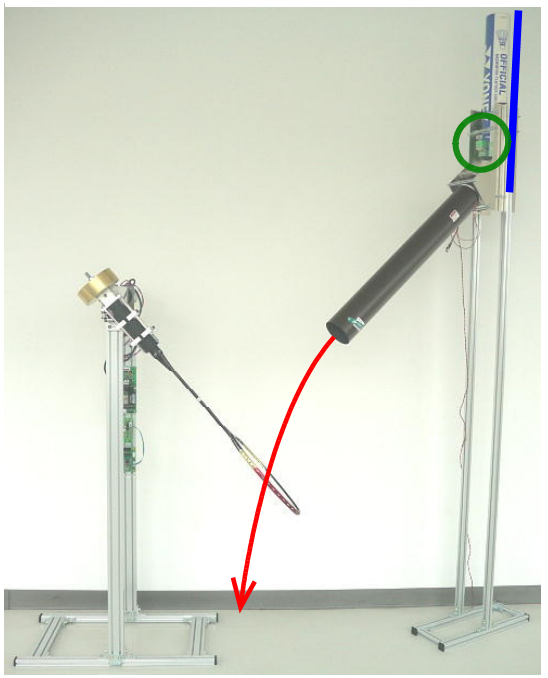
○1個ずつのシャトル供給

◇振動で落とす （暫定）

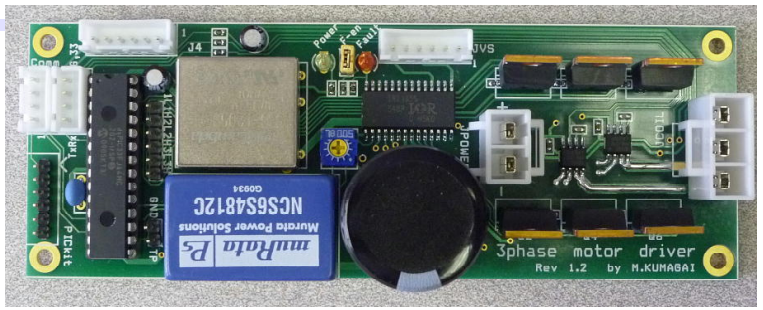
- 上部の筒の内部の摩擦を高めておく
- 振動モータで、ずり落ちさせる。

※未完成/作り直しが必要な箇所





制御系の実装



○ モータドライバ

◇要件

- 電流指令「も」できること

  ※産業用のドライバでは位置・速度指令は一般的
  ※であるが、電流指令がない/扱いが悪いこと多し。

- 電流容量は10[A]。

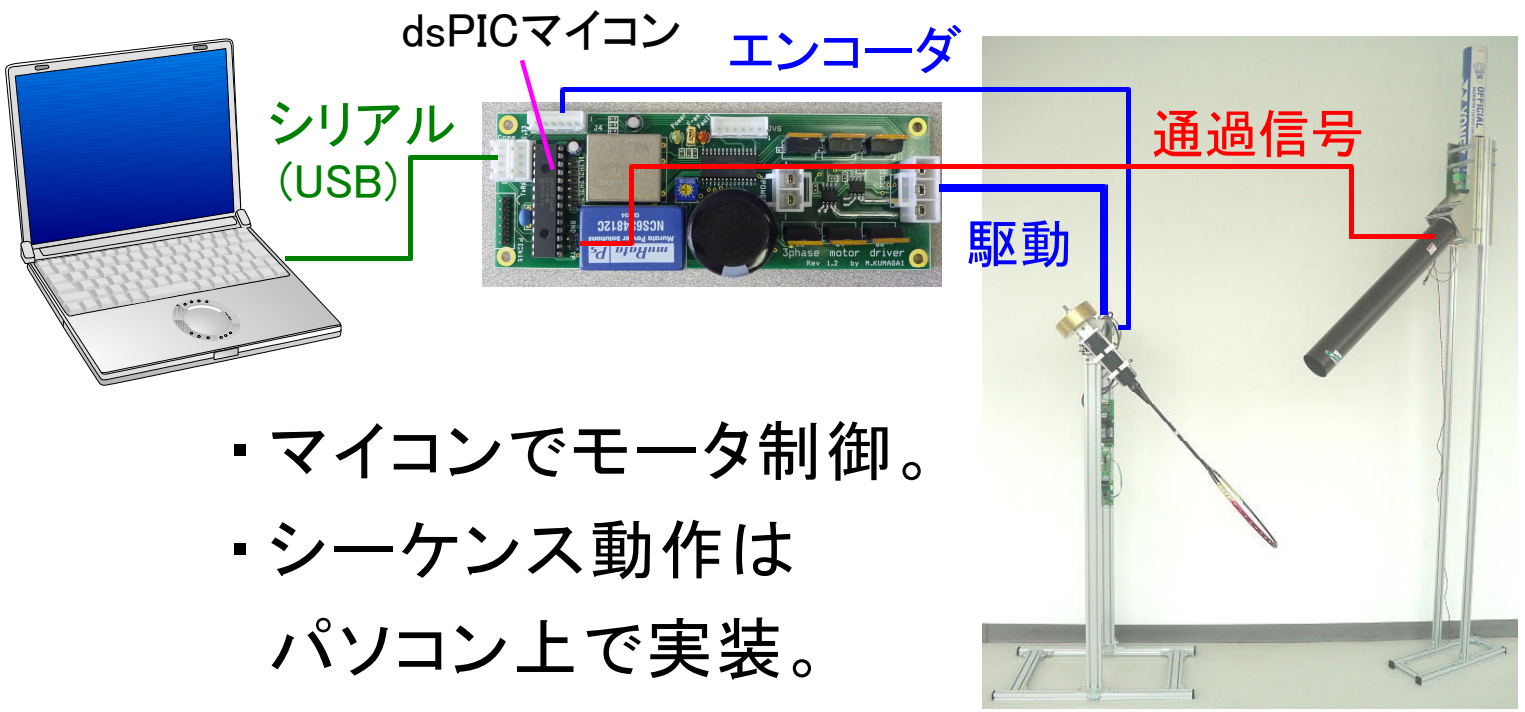
- 以前開発した3相モータドライバの制御プログラムを入れ替えて直流モータ対応に。

  ※指令はシリアル通信

制御系の実装

○ システム構成

◇制御系構成



・マイコンでモータ制御。

・シーケンス動作は
　パソコン上で実装。

制御系の実装

○ システム構成

◇コンピュータの分担

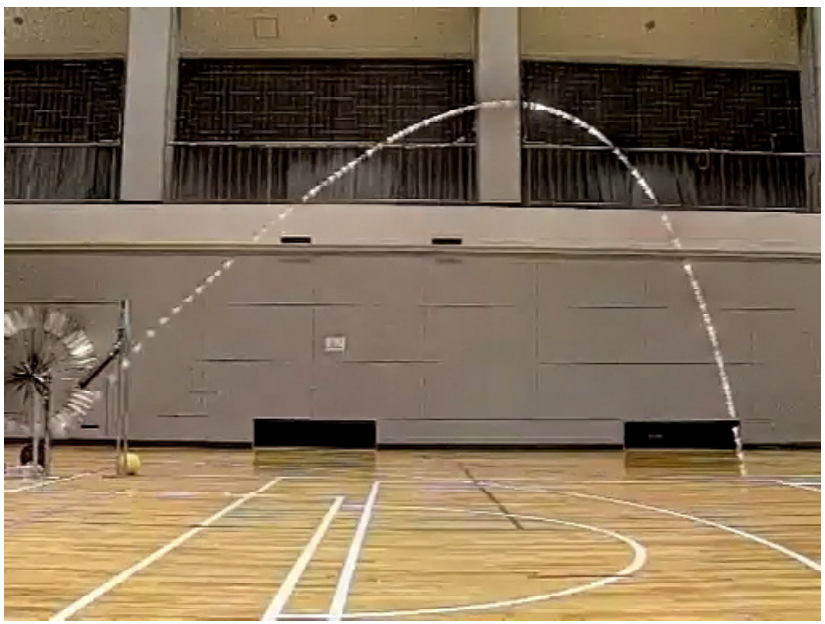
- モータ制御は10[kHz]周期のループで高速に処理。
- パソコンとは100[Hz]で通信 {現在/指令値}
- 開発段階の確認や調整は、マイコンよりパソコンのプログラムが楽→パソコン併用
- 将来的にマイコンのみにすることは可能。
  (難しい処理はしていない)

動作検証

○ 打ち出し実験結果

・一連の動作を確認。

・再現性：6.4[m]先，半径150[mm] 着弾70％



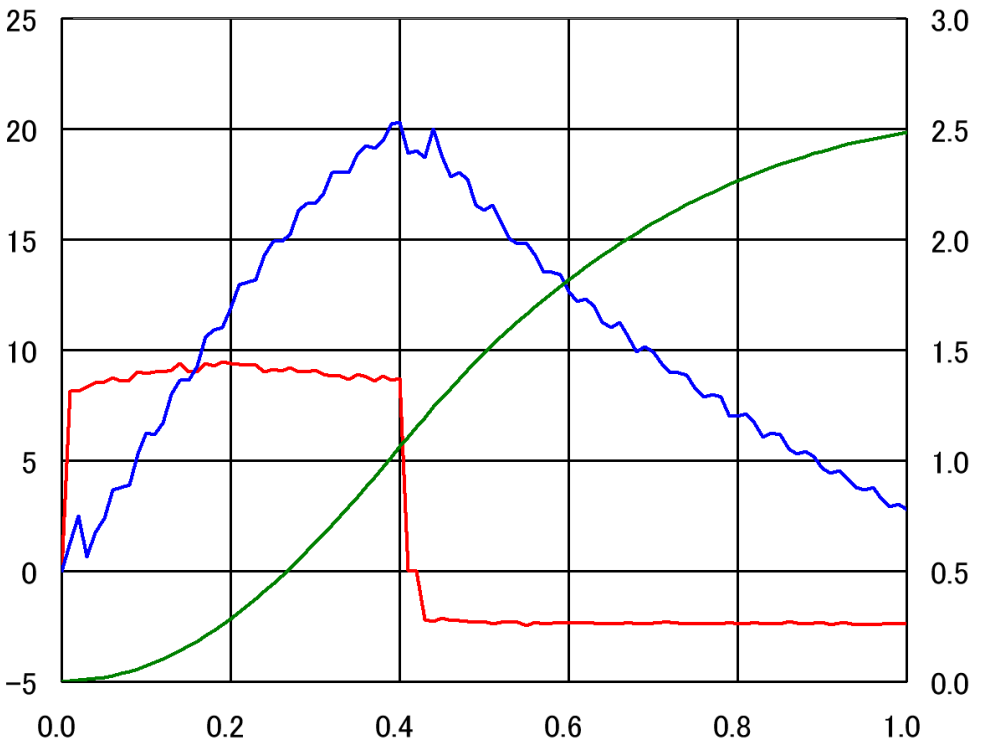
・今回のシャトル供給機を使わずに、シャトルを着脱可能なひも吊りにした場合、88％の150[mm]内着弾率。

＝ シャトル供給が不安定要因。

動作検証

○ モータの駆動状況

・一振りする間の状態変化



・電流、先端速度：
左縦軸
・回転：右縦軸
・データ間隔：0.01[s]
・電流はほぼ指令通り
・速度は直線的

製品化は可能か？

○ 現時点で明確な不備

◇機能面

- シャトルの供給が安定しない。
- シャトルを供給する手間が多い。
  → カゴからざばぁ～っと100個くらい入れたい
- 打ち出しの調整が原始的。
  → 「もうちょっと上」「もうちょっと遠く」「もっと速く」など使いやすく
- 横方向への打ち出し方向変化は？
  → 全体を回せばいい？

製品化は可能か？

○ 現時点で明確な不備

◇出力面

- 現状で、かなり無理をしている＆
  当初の目的の軌道には到達していない。
- シャトル供給機構の構造によっては、
  2回転で加速/連続回転などもあり得る？
- 単にモータの出力を一回り大きくすれば
  解決は容易(ドライバは十分耐える)。
  ※単に当初の選定が見込み違い…。

製品化は可能か？

○ 現時点で明確な不備

◇安全対策

- 振り回す危険性（本質的）
- ラケットがすっぽぬけないか？
  ※構造的にラケットの交換可能
  ※ガット張り替えのための着脱は必要
- 「素人」がつかう対策。

※人がラケット振っても当たったりすっぽ抜けたりするけど

まとめ：これまでのメカトロセミナー関連

○ 検索：[ロボット開発工学]→メカトロセミナー

高速度カメラ	→C15(次回)
直流サーボモータ	→C08
制御の基礎	→C09
各種法則・演算式	→未定

まとめ

○ バドミントン練習用ロボットをつくる

- 思いつきの重要性。
- 漠然としたアイデアから、必要な仕様を抜き出す。
- つくりたいものの特性を知る。
  そのためには実験することが確実。
- 必要な機構を検討し、実現性計算する。
- 設計・加工・組立・制御系実装。

まとめ

○ 開発におけるヒント

- システムの実現性チェックには、簡単なものでも、力学的計算、数学的チェックが有効。（今回は高校～大学初等＋α）
- シミュレーションも見当をつけるためには有効。ただし、現実との一致の検証は必須。シミュレーションに振り回されないこと。
- 設計における表計算ソフトの活用＝パラメータ計算、シミュレーション。