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
C27/Rev 1.0

第27回

玉乗りロボットをつくる
後編：回路と制御ソフトウエア

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

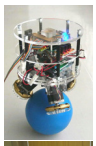
今回の目的 ～メカをロボットにする仕掛け～

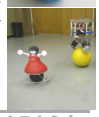
○ 後編：回路と制御ソフトウエア
- ◇ダイジェスト：ロボットの仕様・構成・メカ
  - ・ロボットの目的と基本原理／メカの構造
- ◇ロボットの制御回路
  - ・制御系（マイコン＋センサ）
  - ・電力系（駆動＋電源）
- ◇ロボットの制御ソフトウエア
  - ・制御系／上位操作系

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

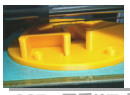
◇公開しうる設計データ
- ・メカ：3D 回路：基板起こし ソフト：可読性
- ・公開情報だけで、「やればコピーできる」
  レベルの精細さを想定

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


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

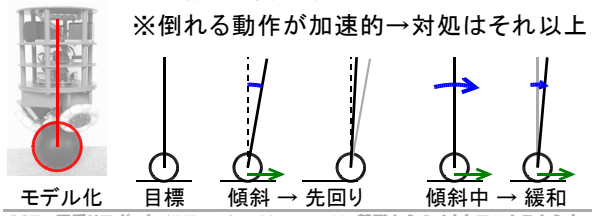
◇球を転がす：3方向
・全方向移動用車輪
・複数の車輪で球を回転させる
・別の車輪の回転を邪魔しない

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

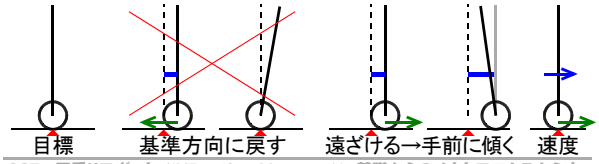
◇棒が倒れないように下端を加速的に動かす
(1) 今傾いている→直す方に動かす
(2) 傾く速度がある→止める方向に
※倒れる動作が加速的→対処はそれ以上



基本原理：倒立振子制御

○ 位置を維持するフィードバック

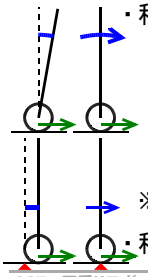
◇どこまでも走って行かないように位置の制御
× 基準位置に戻す方向に動かす
○ 基準位置から遠ざかる方向に加速する
※安定判別の出す条件、実験的、考察的に



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

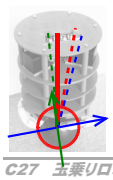
◇この制御式の特徴
・動作は4個のゲインが決める
※角度と位置に対するPD制御 （→C09）
※ゲインの大小バランスで姿勢重視／位置重視
・一般には、
トルク(力)＝ ゲイン×…＋
の式（力操作は制御、ロボット系で一般的）
・ステッピングモータ使えるよう加速度操作

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

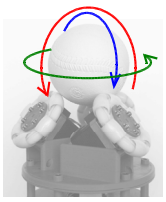
◇単純なアイデア
・左右方向の制御＋前後方向の制御
※斜め方向に倒れる＝両者の組み合わせ

◇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

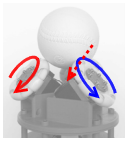


◇球の任意の回転の自由度は3
※自由度＝回転・直動などの
1軸の動きの合計の数

◇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

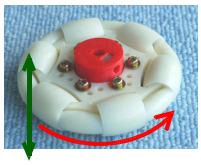
基本原理：球の駆動



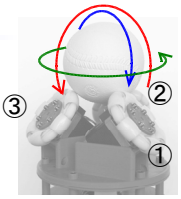
○ 3自由度回転の実現

◇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



○ 車輪の速度計算式

◇今回の配置に対しての計算
詳細はC26（前編）

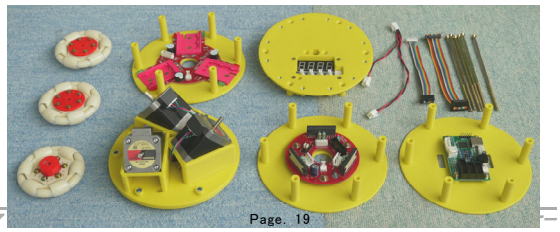
車輪1＝ −0.5A×前後 −0.87A×左右 ＋B×旋回
車輪2＝ −0.5A×前後 −0.87A×左右 ＋B×旋回
車輪3＝ 1.00A×前後 ＋0.00A×左右 ＋B×旋回

※A,Bは別途決まる定数
※0.87＝√3/2

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



回路・ソフトへの要求

○ メカを動作させ玉乗りロボットを実現

◇回路への要求
- 制御系（マイコン＋センサ）
- ステッピングモータの駆動

◇ソフトへの要求
- 倒立振子制御（一定周期）
- モータへの速度分配＆モータへの指令
- デモに耐えうる操作性などの上位層

玉乗りロボットの回路構成

○ Simple is best

◇回路は最大限シンプルに
- コスト、部品点数
- 組込マイコンがなんとかしてくれることを前提とした回路設計
  ※周辺機能、ソフト処理性能向上

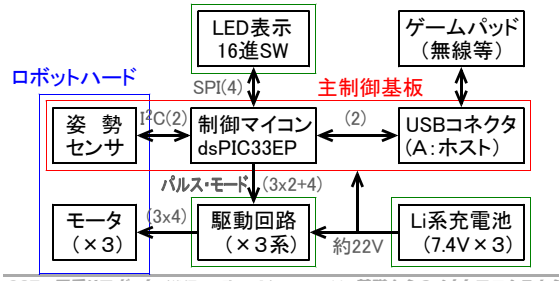
◇データシート（取説）の記述に忠実に

◇汎用性
- 回路資源の流用（多様な開発の手間削減）

玉乗りロボットの回路構成

○ 回路の構成図

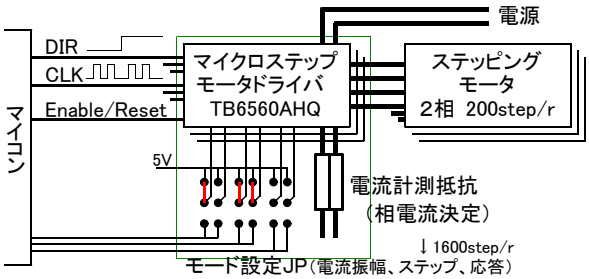
◇機能毎に回路は4グループ　※(線本数)



玉乗りロボットの回路解説

○ ステッピングモータの駆動回路

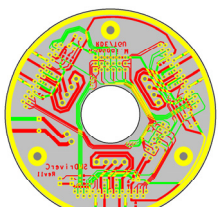
◇マイクロステップ駆動IC（のみ）



玉乗りロボットの回路解説

○ ステッピングモータの駆動回路

◇基板設計
- 120度対称（見た目重視＆質量バランス）
- 部品の座標計算→配置インポート

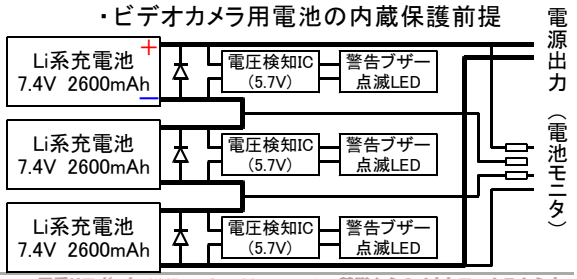


玉乗りロボットの回路解説

○ 電源部

◇電池＋電池バイパス＋低下警報

・ビデオカメラ用電池の内蔵保護前提

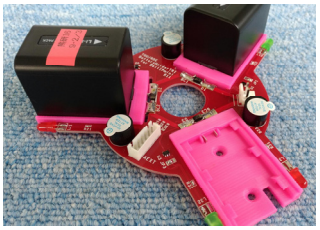


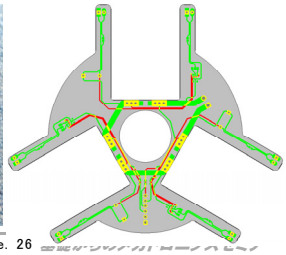
玉乗りロボットの回路解説

○ 電源部

◇基板化 （←旧：空中配線）

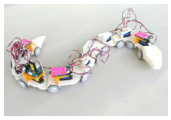
・形状はCAD設計→DXFインポート





玉乗りロボットの回路解説

○ 主制御基板



◇制御基板の設計開発方針

△ 玉乗りロボットの制御基板

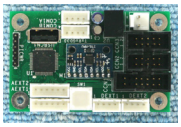
○ 研究室の今後数年の小型ロボット制御用

・旧：秋月H8＋コネクタ分配簡易母板

・マイコン基板はそうそう新造できない
※金額コストよりも手間/暇/精神力

・マイコン基板＋ハード対応ソフト流用で
開発負担の大幅低減

玉乗りロボットの回路解説



○ 主制御基板

◇制御基板（およびマイコン）の要件

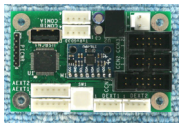
・標準的なマイコンコア

・姿勢センサを搭載（不要なら実装せず）

・研究室標準コネクタをなるべく多く搭載
通信系(0，3.3，デジタル入出力×2)
汎用系(0，3.3/5，デジタル入出力×8)
アナログ系(0，3.3，5，アナ対応×3)

・電源回路を搭載(～40V供給)

玉乗りロボットの回路解説



○ 主制御基板

◇制御基板（およびマイコン）の追加仕様

・USBホストができる
USB-OnTheGo対応マイコン
→ ゲームコントローラ等が使える

・基板上にインジケータと操作
2色LED内蔵スイッチ

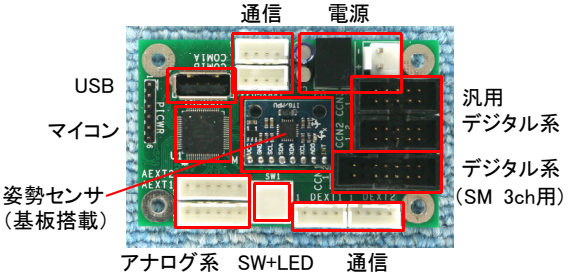
・3相モータの制御ができる
モータ制御基板の試作用に

玉乗りロボットの回路解説

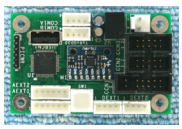
○ 主制御基板

基板寸法 72x45mm
タカス IC-301-60

◇基板外観

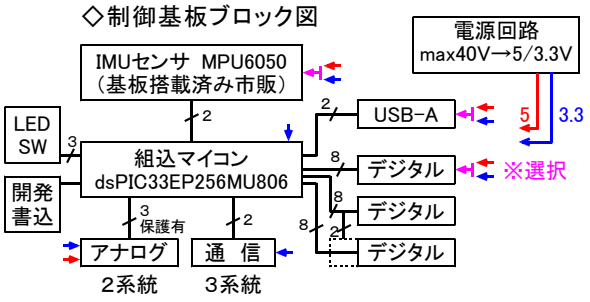


玉乗りロボットの回路解説

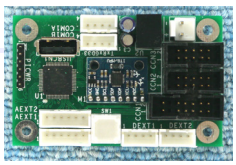


○ 主制御基板

◇制御基板ブロック図

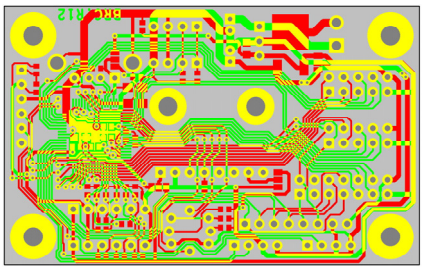


玉乗りロボットの回路解説

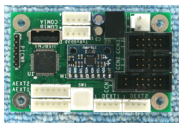


○ 主制御基板

◇基板外観



玉乗りロボットの回路解説



○ 主制御基板

◇マイコン基板設計のこつ？

・マイコン周り：データシート通り

・電源供給、パスコン、クロック源

・リセット、開発時書き込み回路

・特定機能端子の割り当て

例）5V耐性、アナログ入力、I^2C

・配線しやすいように回路図書き換え

例）配線交差→ピン割り当て交換

玉乗りロボットの回路解説

○ LED＋設定入力基板

◇4桁の7segLED＋4個の4bit16進SW

＋ ステータスLED、LED内蔵スイッチ

・ロボットの状態表示、デバッグ用

・動作の設定 （パラメータ設定）

・以前から同様なものを使用し、有用性○

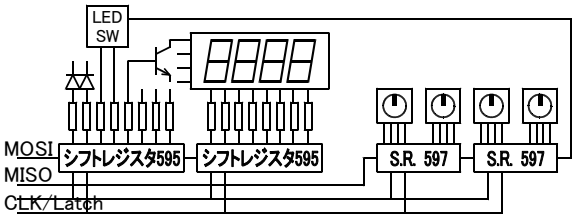
・マイコンとの接続はSPI型、４本のみ

玉乗りロボットの回路解説

○ LED＋設定入力基板

◇ブロック図

・入出力のシフトレジスタ、ダイナミック点灯



玉乗りロボットの回路解説

○ 回路の製造

◇基板の外注

・両面シルク付きで10枚で1000円台～

※電池基板が70USD（大きさ、2oz仕様）

・PCBGOGO，Elecrow，FusionPCBなど

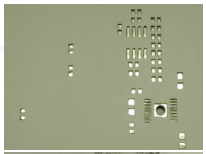
中国の基板製造業、一部は日本語対応

基板のデータ(ガーバ)を送信 → 基板届く

通常指定で1週間程度

・部品発注と変わらない速さ？

玉乗りロボットの回路解説



○ 回路の製造

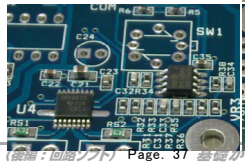
◇基板の組立

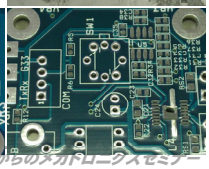
・がんばって半田付け

・卓上簡易リフロー炉

（マスク＋クリーム半田

＋実装＋炉で過熱）





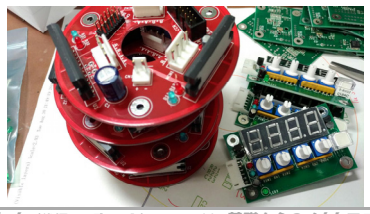
玉乗りロボットの回路解説

○ 回路の製造

◇基板の組立

・そろそろ外注を試してみたい

・前記基板製造メーカ等で取り扱い



玉乗りロボットのソフトウエア

○ 制御ソフトウエアがなすべきこと

◇玉乗りの制御

・センサ情報の処理

・倒立振子制御

・モータへの動作指令

◇動作シーケンスの制御

・初期化、動作の状態遷移

◇使えるロボットとしての操作機能

・ゲームコントローラへの対応

玉乗り制御

○ 制御の中核

◇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

・「×」の右：必要な情報　　左：要調整

・加速度→モータへの指令

・一定周期で繰り返し演算

玉乗り制御

○ 制御の実行に必要なもの

◇ロボットの姿勢傾斜角、角速度
← 姿勢センサ
・姿勢センサ（ハード）からの計測値取得
・姿勢角・角速度の計算

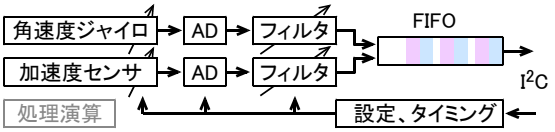
◇ロボットの位置、速度　　比較：角度センサ
← 操作指令値から積算で求める

◇球の加速回転
・球の駆動指令と各車輪の速度

玉乗り制御

○ 姿勢角の取得

◇デジタル通信型IMUセンサ MPU6050
・3軸の加速度　3軸の角速度(ジャイロ)
・AD変換、フィルタ処理など内蔵
・I^2C通信、自前の計測周期、FIFO内蔵
・姿勢情報の処理機能内蔵（未使用）



玉乗り制御

○ 姿勢角の取得

◇デジタル通信型IMUセンサ MPU6050

◇ソフト側の処理　（参考→C13 デジタルセンサ）
・MPU6050との通信(I^2C，初期化，平常)
・加速度と角速度の合成処理

◇処理方針
・センサ側FIFOから1式単位で読み出す
→ 処理　　あるだけ繰り返す
・センサの周期との同期は不要

玉乗り制御

○ 加速度の操作・モータへの指令

◇加速度 →積分→ 速度 →積分→ 位置

◇前後・左右方向の倒立振子制御（加速度）
→ 前後・左右方向の移動速度
→ 3車輪の速度指令値

◇速度に応じたモータへの指令パルス
・1パルス＝1角度単位の回転 （1/1600回転）
・モータの回転速度＝対応する周波数

玉乗り制御

○ 速度演算部の実装式

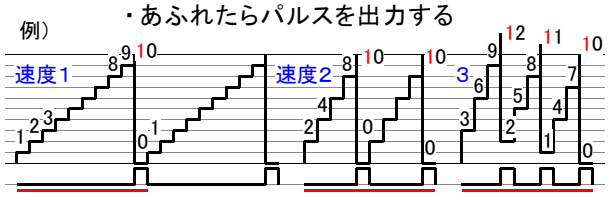
◇加速度a →積分→ 速度v →積分→ 位置x
・周期ごと:　　v ＝ v＋a,　x ＝ x＋v
・正式には:　　v ＝ v＋(a × 周期)
周期一定、a,v,x は内部の単位系
※制御周期が1単位時間のような

◇速度分配式　　※√3/2＝0.867
・車輪1＝ −0.5 × 前後 − 0.866 × 左右 ＋旋回
・ms1 ＝ −(s1>>1) −((s2*222)>>8) ＋s3
※222/256＝0.867

玉乗り制御

○ パルス出力：DDS型(Direct Digital Synthesizer)

◇手法
・上限のあるカウント変数を用意し、
・一定の周期で速度値を加算し、
・あふれたらパルスを出力する



玉乗り制御

○ 実装上のその他の主な細工

◇すべて整数（固定小数）で演算
・一般的な浮動小数は計算負荷が高い
※floatよりはlongのほうが分解能高い
・SI単位系ではない、独自単位系

◇割り算を使わない
・他の演算に比べてかなり遅い（例　約1/20）
・÷(2^n)にする → 右シフト演算(>>n)

玉乗り制御

○ 主ループの実装

◇制御演算を一定周期で
・センサの情報処理
※センサ自身の周期とは差、最新値
・倒立振子制御
・→3個のモータの速度指令
※モータの指令生成DDSは別周期(10k)で

◇制御周期
・500Hz（2ms）

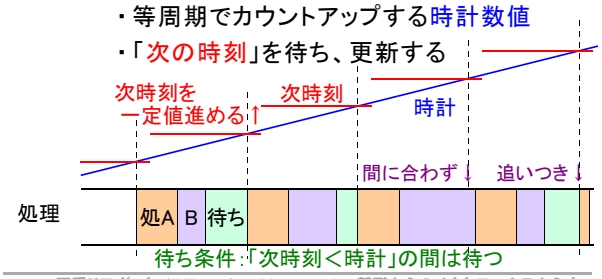
玉乗り制御

○ 主ループの実装

◇時計待ち型実装

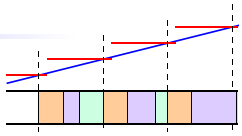
・等周期でカウントアップする時計数値

・「次の時刻」を待ち、更新する



玉乗り制御

○ 主ループの実装



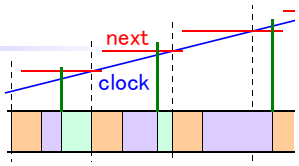
◇プログラム例

・時計変数：clock　次時刻：next　刻み：step

```
next=clock+step;  // 初期値
while(1) { // メインループ
    while(clock<next) {
        暇つぶし処理;
    }
    next=next+step;    // clock+step
    以降、制御処理等
```


玉乗り制御

○ 主ループの実装



◇この実装の利点

・複雑で重たい(?)制御演算を割込にしない

※時刻clockのカウントアップのみを割込

→ 割込にありがちな開発トラブル低減

・処理落ちが分かる：［暇つぶし］の直前に

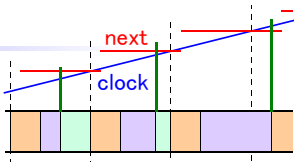
正常：clock<next　のはず、n-c>0

落ち：clock>=next　になる、n-c<=0

→ next-clockが指標になる

玉乗り制御

○ 主ループの実装



◇補足

・next-clockを周期毎に検証

(a)　常に正：問題なし

(b)　負にどんどん増加：間に合ってない

→ 処理見直し or 周期設定長く

(c)　周期的に負が見られる：ほぼOK？

→ 定期的な通信送信などの確認

(d)　不規則に負　→　外的イベント等

装置としての必要な追加処理

○ 制御演算だけでは機能しない

◇初期化処理　（ハード全体、姿勢値のみ）

◇起動ー停止処理　（状態遷移）

◇通信

・PC等とのシリアル通信

・オプション：ラジコンサーボとの通信

◇人間からの操作の受付

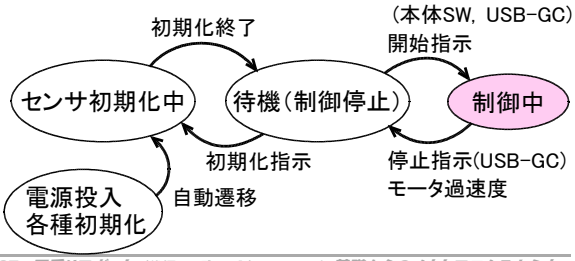
・起動ー停止等、パラメータ調整

・移動などの動作の指示

装置としての必要な追加処理

○ 状態遷移

◇状態：｛待機・制御中・姿勢センサ初期化｝



装置としての必要な追加処理

○ ゲームコントローラへの対応

◇USBへの対応

・USB-OTG対応マイコンを採用

→ USBコネクタへの配線程度の回路

・必要なコード類・事例はメーカが公開

キーボード、マウス、メモリなど

→ ゲームコントローラへの対応改造

※ HIDデバイスとして基本は同じ

デバイスからのデータの解析

装置としての必要な追加処理

○ ゲームコントローラへの対応

◇ゲームコントローラへの対応改造

・デバイスからのデータを16進ダンプ

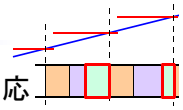
・コントローラのボタンやスティック操作

→ データ列内で変化するところがある

→ 対応関係を解析して、取得コード化

・現状では特定の数種のコントローラのみ対応（自動で対応する手段はあるはず）。

装置としての必要な追加処理



○ ゲームコントローラへの対応

◇制御との干渉回避

・サンプルコードは 1kHz の周期割込で USBの処理関数を呼ぶようになっていた
＝ 制御処理を途中で止める可能性
※割込：現作業を強制中断して別動作

・主制御ループの「周期待ち」で、同関数を呼び出すように　※P50「暇つぶし」
＋ 適当なループ毎に送信リクエスト

装置としての必要な追加処理

○ ゲームコントローラへの対応

◇コントローラ操作→ロボットの挙動

・起動、センサ初期化等

・スティック操作→移動指令
※位置、速度、傾斜(加速)指令モード
※旋回速度指令

・パラメータの変更機能
※実験実習用機能

・コード量は姿勢制御本体よりも多い

補足：ソフトの最下層

○ ハードと直接対応するソフト

◇各種ハードの初期化

・メーカによるスタートアップコード
・動作クロックの設定
・ピンの入出力、機能割り当て
・割り込みやタイマ類の設定
・通信ハード、アナログ入力等の設定
↓
・通信機能、センサ処理の初期化等

補足：ソフトの最下層

○ ハードと直接対応するソフト

◇この部分には特殊な知識・情報必要

・周辺機能の動作の理解
・機能操作についてのお約束的パターン
・メーカ毎の癖
・マニュアルをちゃんと読む必要

◇書けるようになるには

・サンプルやネット参考でとにかく動かす
→ 意味を理解 → マニュアルだけで自力

補足：ソフト開発とExcel

○ プログラムの一部をExcelで書く

◇繰り返しやパターンを表計算で

・数表
・キーワードをもとにした複数行生成

◇基本テクニック

・CSVで別名保存したものを#includeする
※CSVは数式が保存されないのでxls残す

・左の方にコードやデータを、次に
コメント化記号を入れて、右は自由に使う

補足：ソフト開発とExcel

○ プログラムの一部をExcelで書く

◇例：定義の自動化　※ xは行番号

・Axセル：
="#define "&Cx&" "&Dx&" //"
・Bx：15(通し番号等)　Cx: ="IO"&Bx
・Dx: ="Pin"&VLookup(Bx, …)

◇例：数表

・="int table[128]={"
・=cos(Ex), =sin(Ex), "//", 通番号, =Dx…

まとめ

○ 玉乗りロボットの開発（回路＋ソフト編）

◇メカを動かすための回路

・制御するための組込マイコン
・モータの駆動回路
・必要なセンサ

◇メカと動かすためのソフト

・制御理論のプログラム実装
・動作状態の制御
・「使える機械」に必要なユーザ対応

まとめ

○ 玉乗りロボットの開発（回路＋ソフト編）

◇この玉乗りロボットについては

・倒立振子制御
・実運用に配慮した上位層
・USB接続したゲームコントローラで操作
・多用途転用を前提にした開発

◇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