ロボットはできた.
さあ，どう動かそう？

東京工業大学
制御システム工学科
三平　満司

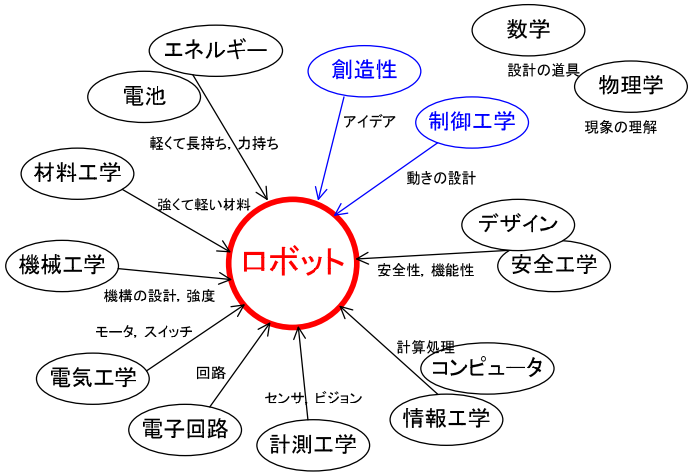
制御システム工学科ホームページ
http://www.ctrl.titech.ac.jp
IDC国際ロボコンホームページ
http://www.idc-robocon.org/

今日の授業で覚えてほしい言葉

「制御　(せいぎょ:コントロール)」
ある目的を達成するために対象に
操作を加えること

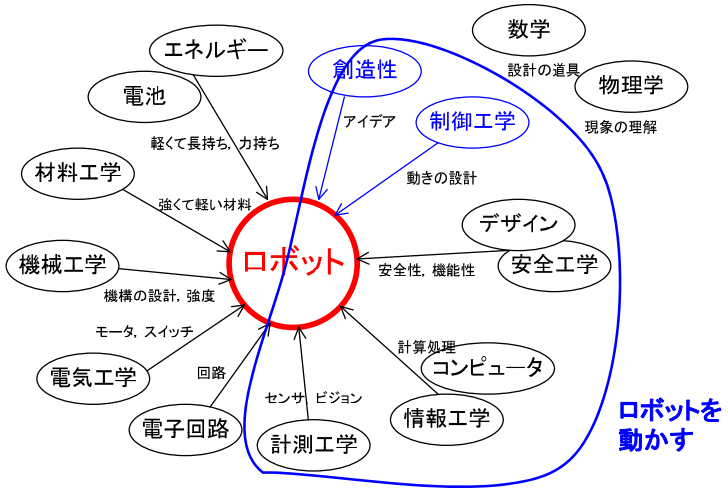
ロボットを思い通りに動かす技術
人間が直感で動かせないものも
動かす技術

ロボットは技術の総合デパート



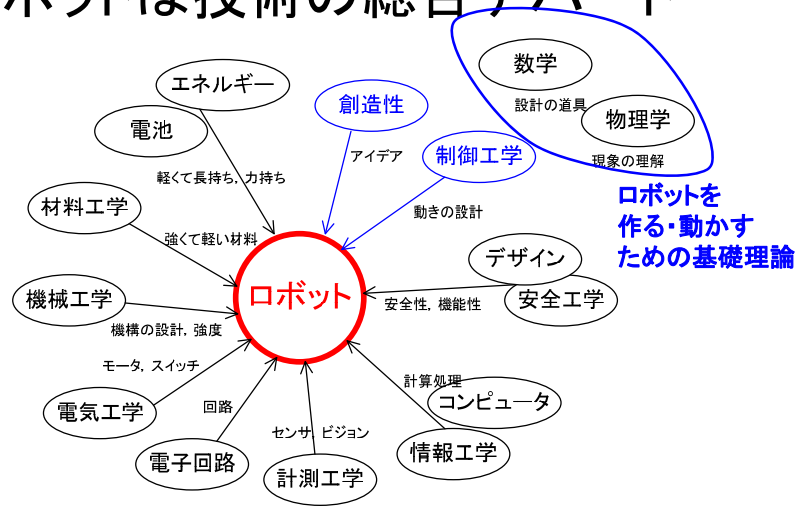
ロボットは技術の総合デパート，分化した学問の再融合（原始ものづくりへの回帰）

ロボットは技術の総合デパート



ロボットは技術の総合デパート，分化した学問の再融合（原始ものづくりへの回帰）

ロボットは技術の総合デパート



ロボットは総合工学，分化した学問の再融合（原始ものづくりへの回帰）

James Watt (1736-1819)

Wattの蒸気機関が産業革命を牽引した.

工夫としての制御

ワットの蒸気機関

- 蒸気の力を用いて機械を動かす考えは，ワット以前からあった.
- ワットは「工夫」としての「制御」を導入して蒸気機関を改良し，実用化した.

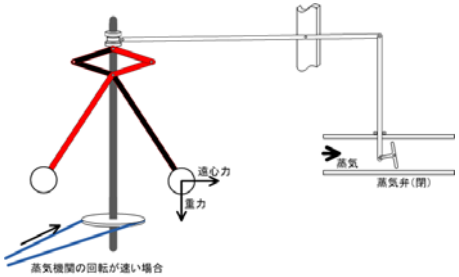
⇒ ガバナによる回転速度の制御

浮きを使ったボイラーの水位，圧力の制御

ガバナを用いた回転速度制御

蒸気機関の回転が負荷により変わると困る

工夫としての制御

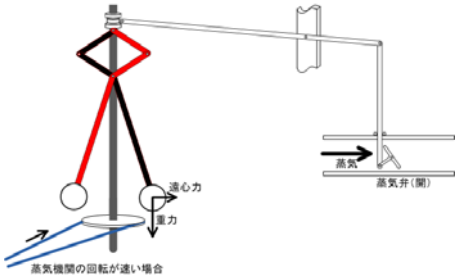


回転が速くなる

⇒ガバナのおもりが上がる

⇒蒸気バルブが閉まる

⇒回転が遅くなる



回転が遅くなる

⇒ガバナのおもりが下がる

⇒蒸気バルブが開く

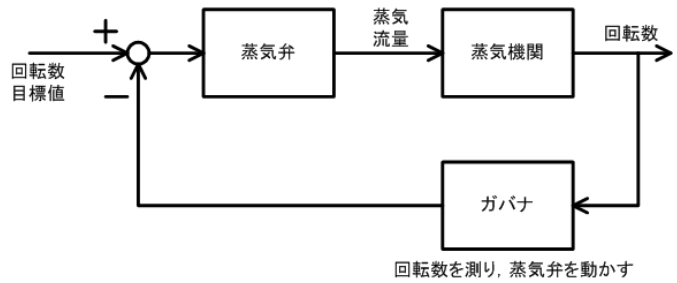
⇒回転が速くなる

フィードバック制御

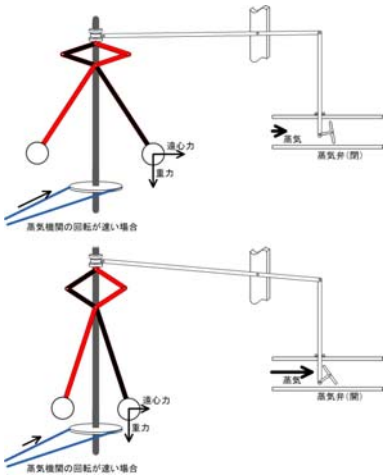
結果（回転速度）を元にシステム（蒸気機関）の入力（蒸気流量）を決定する（フィードバック）する制御

⇒ 外乱，システム変動があっても目的が達成できる

ボイラと蒸気機関の制御システム



工夫から理論へ



速度が速い

⇒急にバルブが閉まる

⇒回転速度が遅くなる

⇒回転速度が遅くなりすぎる

⇒バルブが開く

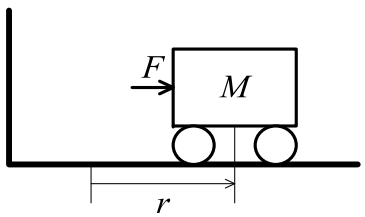
⇒回転速度が速くなる

⇒回転速度が速くなりすぎる

バルブの開閉の度合いを決定する理論が必要

直感の限界

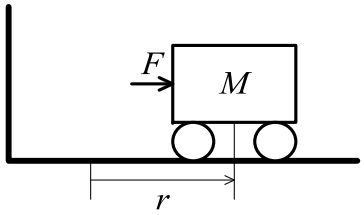
- 台車の制御（$r = 0$としたい）



直感の限界

- 台車の制御（$r = 0$としたい）
  台車が目標値の右にいれば左に，
  左にいれば右に力をかければよい？

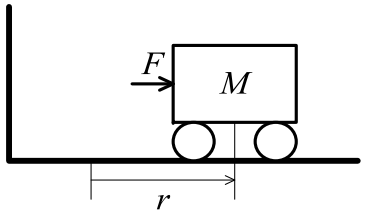
$$F = -kr$$

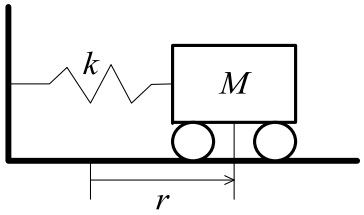


直感の限界

- 台車の制御（$r = 0$としたい）
  台車が目標値の右にいれば左に，
  左にいれば右に力をかければよい？

$$F = -kr$$





⇒バネをつけたのと同じ

⇒単振動

直感の限界

- 台車の制御
  理論的にいえば速度も0になるように制御

$$F = -kr - cv$$

行き過ぎなく1秒以内に物体を目標値で止める

➡ k, c の選び方

➡ 理論の必要性

工学的手法(制御工学)

- 対象のモデル化（モデリング）
  制御対象：
  微分方程式，ラプラス変換（複素数）
- 対象の解析（アナリシス）
  可制御性，安定性：
  行列の固有値，ランク，線形部分空間
  微分幾何学(多様体)
- 設計（デザイン）
  制御系の設計（対象の安定化）：
  線形代数，微分幾何学

制御理論の世界

- 対象の記述

伝達関数 $y = G(s)u$

線形状態方程式 $\dfrac{dx}{dt} = Ax + Bu$

$y = Cx$

非線形状態方程式 $\dfrac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u$

$y = h(x)$

制御理論の世界

- 制御方法

フィードバック $u = C(s)y$

線形状態フィードバック $u = Fx$

動的フィードバック $u = C_c z + D_c y$

$\dfrac{dz}{dt} = A_c z + B_c y$

非線形状態フィードバック $u = a(x)$

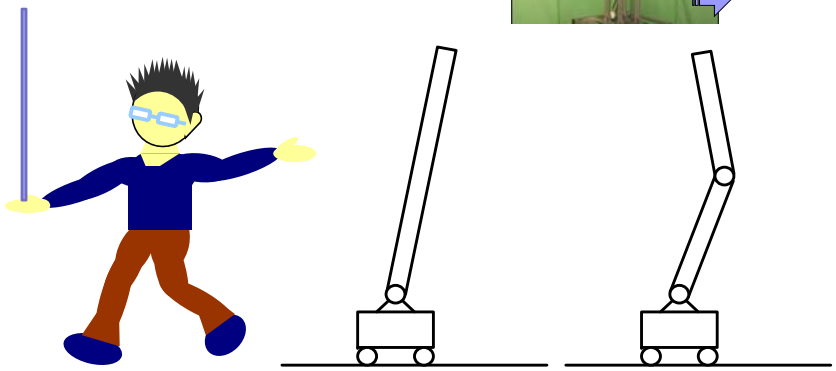
非線形動的フィードバック $u = c(z) + d(z)y$

$\dfrac{dz}{dt} = a(z) + b(z)y$

工夫から工学へ

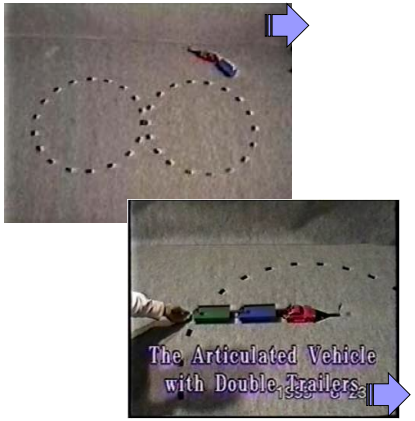
- 対象のモデル化（モデリング）
- 対象の解析（アナリシス）
- 設計（デザイン）

倒立振子の制御

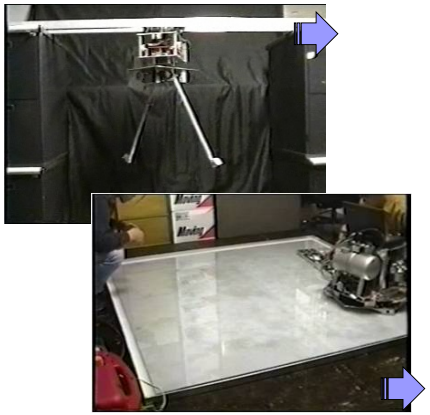


人間の直感では制御できない
ものも制御してみよう.

トレーラーの後退制御

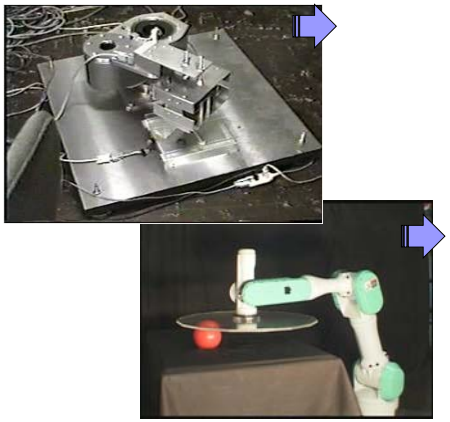


宇宙ロボットの制御

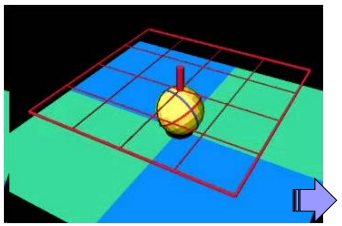


板にはさまれたボールの制御

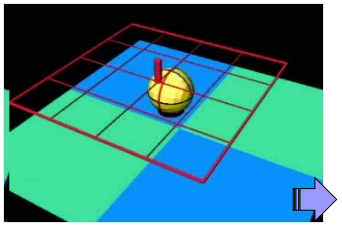
位置制御



姿勢制御

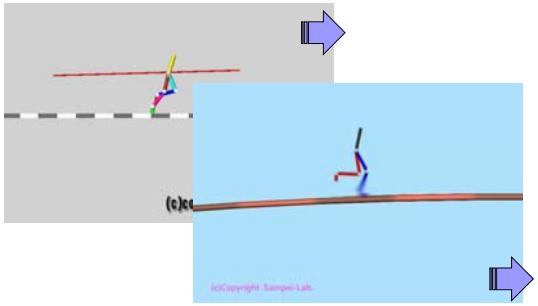


位置・姿勢の同時制御



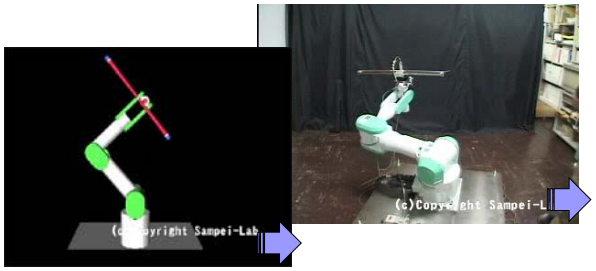
人間はできるけど,
ロボットに教えるのは大変なもの

走る2足方向ロボット



しなりのある鉄棒の
大回転

デビルスティック
プロペラモーション



今日の授業で覚えてほしい言葉

「制御　(せいぎょ:コントロール)」

ある目的を達成するために対象に
操作を加えること

ロボットを思い通りに動かす技術
人間が直感で動かせないものも
動かす技術