ファジィ理論による
倒立振子の制御
Control of inverted pendulum by fuzzy theory.

工学院大学大学院 情報学専攻 修士課程 1年
山口直彦[EM-09018]

Version 4

注意

- 内容がだいぶテキストと変わっているので、レポートはこの資料を元に書くこと（テキストを参考にする分には構わない）
- この資料の最新版は弱電実習室のWebページから入手できる。アップデートを予定しているので、できるだけ最新の資料を見ながらレポートを書くようにしてください。

•http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwc1049/

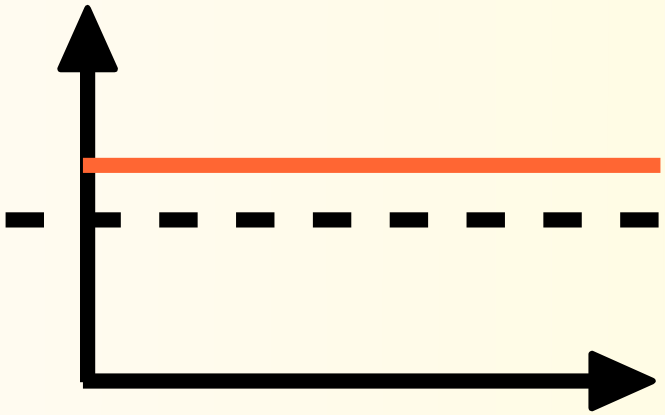
第 1 章　理論

Section 1 Theory

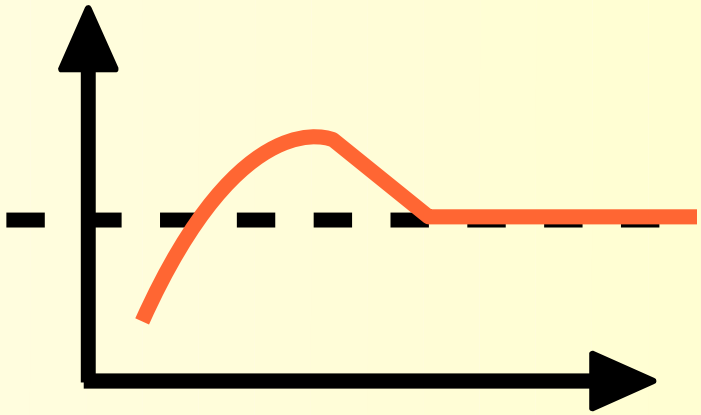
はじめに

- 制御とは
  - 命令通りに動いてくれない「クセのある」機械をどうにかして安定操作する方法
    - クセの例：偏差，オーバーシュート，振動
- 基本的な考え方
  - フィードバック制御
    - 命令を実行した結果をセンサで確認して次の命令に反映（例：サーボモータ）
  - フィードフォワード制御
    - 命令を垂れ流すだけ（例：STP モータ）

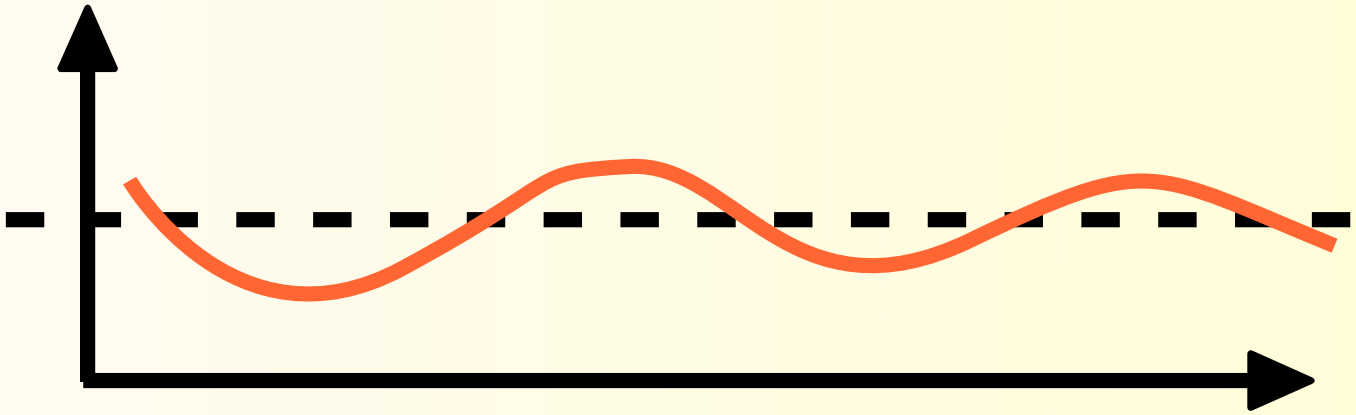
はじめに



偏差：
　目標値に対して一定のズレ

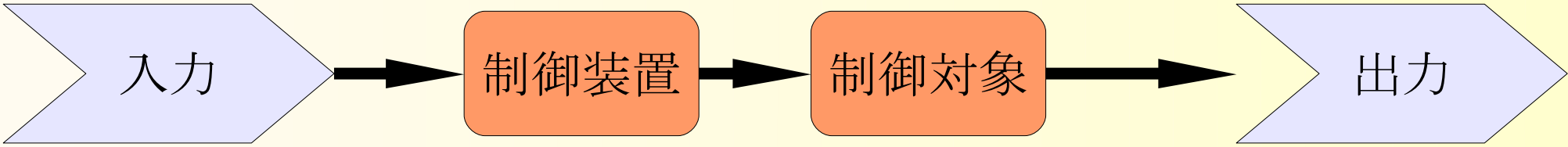


オーバー（アンダー）シュート：
　目標値を一瞬行き過ぎる
　（下がり過ぎはアンダー）



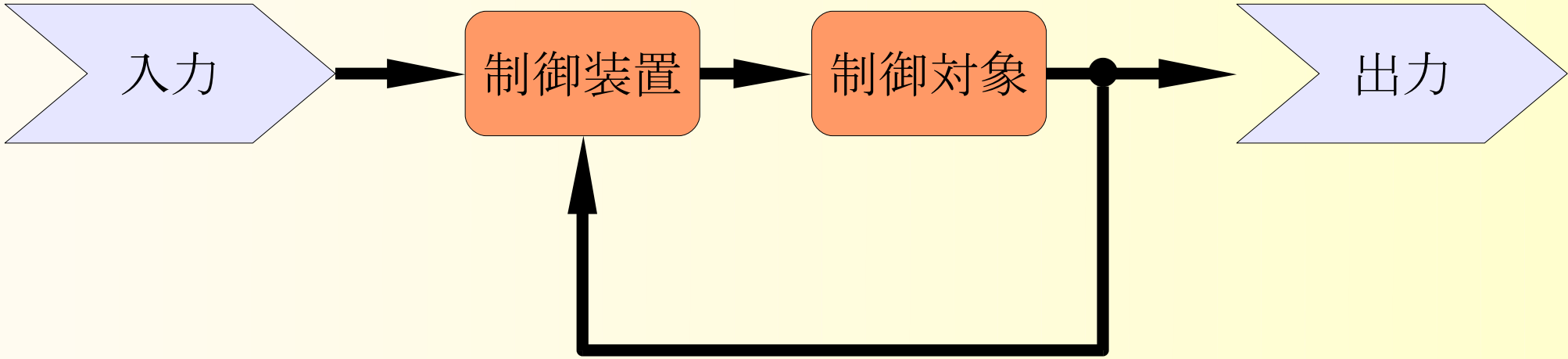
振動：
　目標値付近を上下する

はじめに



- フィードフォワード
  - ある入力を加えたときに制御対象の動きが完全に予測できるとき有効
  - 完全なフィードフォワードは少ない
  - ステッピングモータはフィードフォワードが可能

はじめに



- フィードバック
  - 出力と目標のズレを制御装置が監視しながら調整を行う方式
  - 制御するといったら普通はこれ
  - サーボモータは、モータの動きを制御装置に伝えるセンサがあらかじめ組み込まれたモータ

はじめに

- 制御理論は理解が大変（微分方程式の嵐！）
- ファジィ制御は、 Zadeh 教授が提唱した比較的新しい制御理論
- 考え方はかなり独特だが、人間のもついい加減 (=free and easy,≠ dishonesty) さやあいまいさをコンピュータに扱わせることができる面白い手法。
- この時間では到底全てを教えられない。実験は比較的易しいが、自習を兼ねて課題で制御についていろいろ勉強してもらうので覚悟しておくこと。

導入

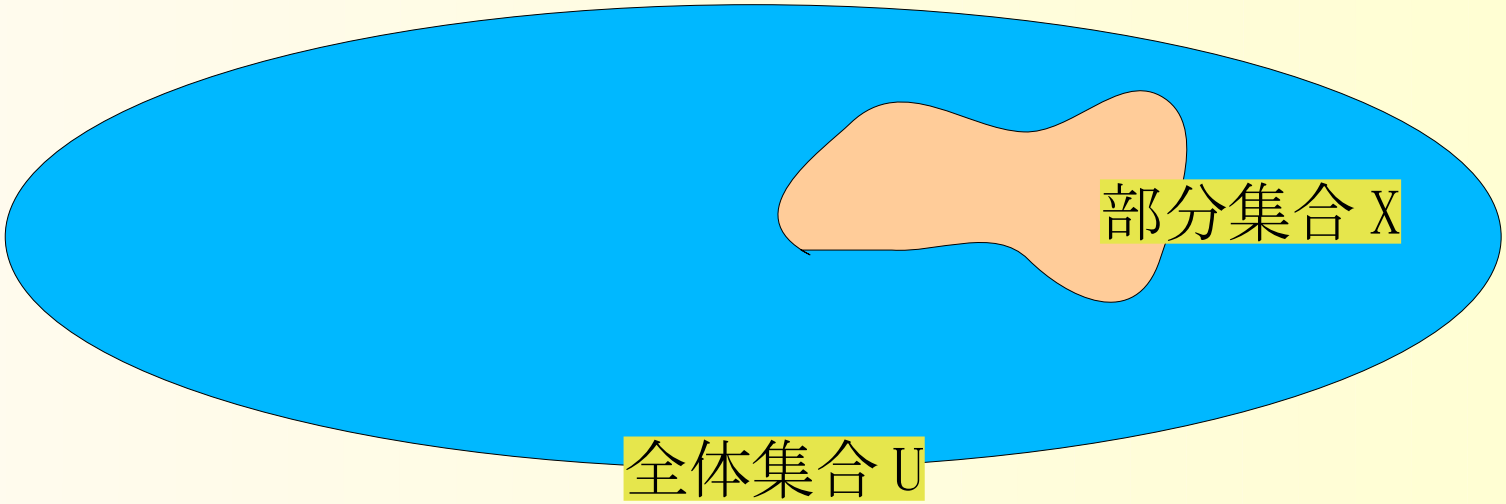
- 軽音楽部をモデルにした某アニメ(けいおん！)に登場する「私の恋はホッチキス」挿入歌に
  - 「好きの確率　割り出す　計算式　あれば　良いのに」

  という歌詞がある。

- あいまいさを扱える「ファジィ理論」なら
  この計算式を作れる！？

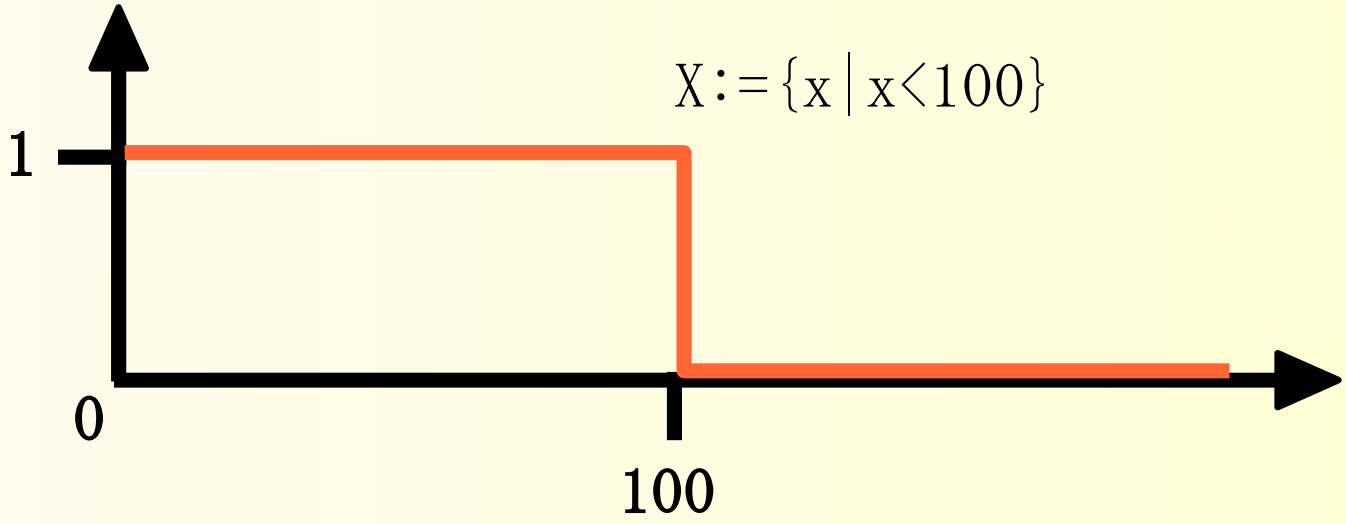
ファジィ集合とクリスプ集合

- 一般に数学で用いられる集合
  - 連続 or 離散値から成る全体集合 U
  - U の各要素は、部分集合 X に「含まれる」か「含まれない」のどちらか。
  - 例： U:= 整数 ,X:={x|x<100}



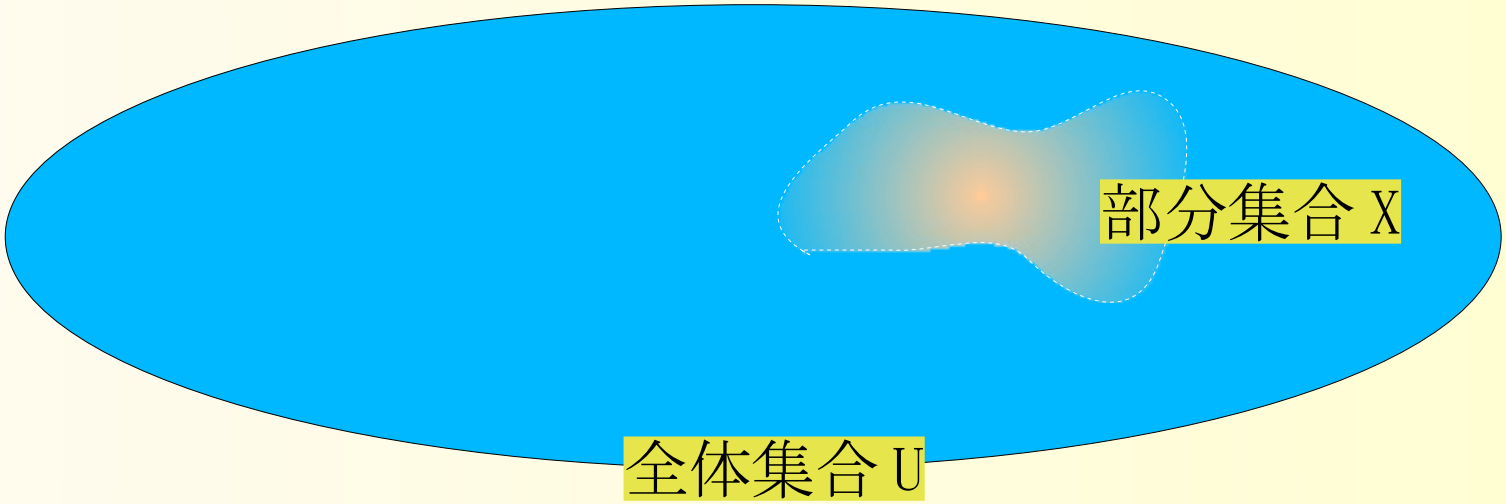
ファジィ集合とクリスプ集合

- 全体集合の要素を１本の軸上に並べられると仮定して横軸に置く
- その要素が部分集合ｘに含まれるなら１、含まれないなら０を縦軸に置く
- このような集合をクリスプ集合という



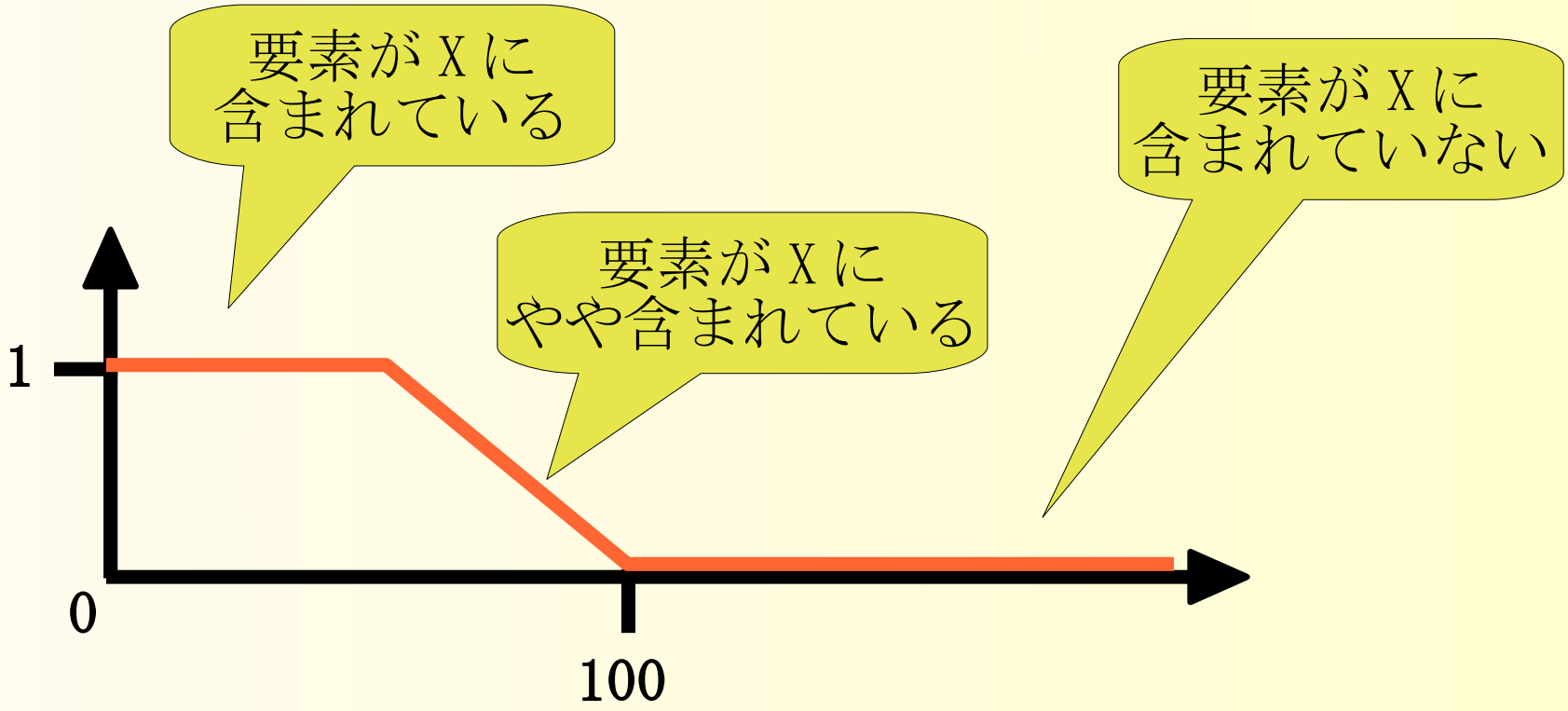
ファジィ集合とクリスプ集合

- ファジィ集合
  - U の要素が部分集合 X に含まれるとき 1、含まれないとき 0 として、連続的な値をとる。



ファジィ集合とクリスプ集合

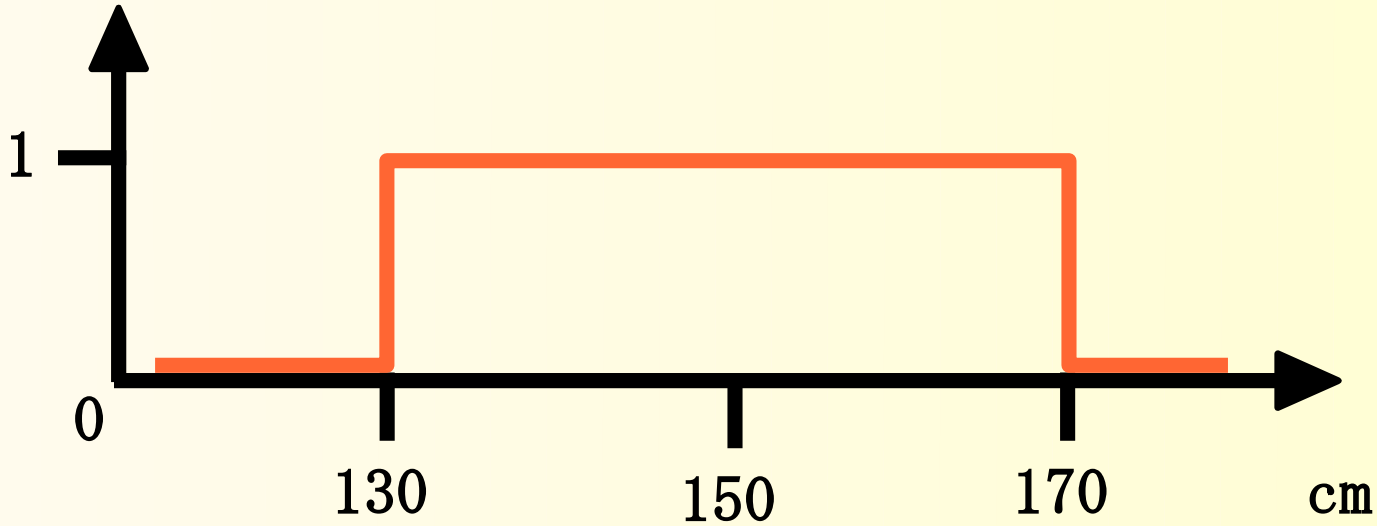
- 要素が部分集合Xに含まれる度合いを連続的な値として縦軸に示す
- このような集合をファジィ集合という

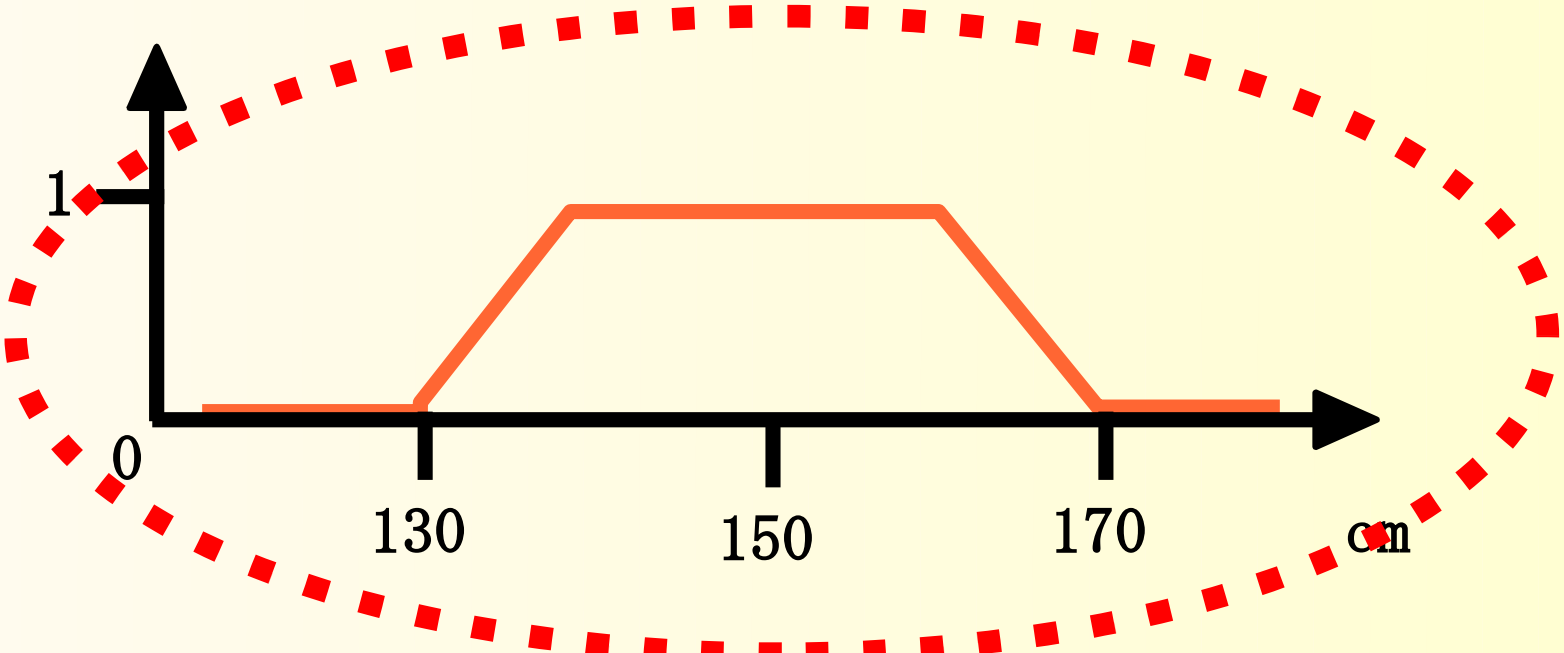


好きの確率

- 「身長」という全体集合について、
  「好き」という部分集合が成立するとする。
- とりあえず、「身長の低い人が好き」ということにしてみよう。
- 次のスライドに示す2つの「好き」集合はどちらがよりそれらしいと思うか？

好きの確率





好きの確率

- ある身長を境目に「好き」「嫌い」がきっぱり分かれるのは不自然
  - 人の思考を表すにはクリスプよりファジィ
- 縦軸の数字は集合への所属度を表し、これを「グレード」という。
- また、全体集合の要素を入力するとグレードを返す関数をメンバーシップ関数といい、記号λであらわす。
  - 前頁の例なら λ(135)=0.5　などと表現

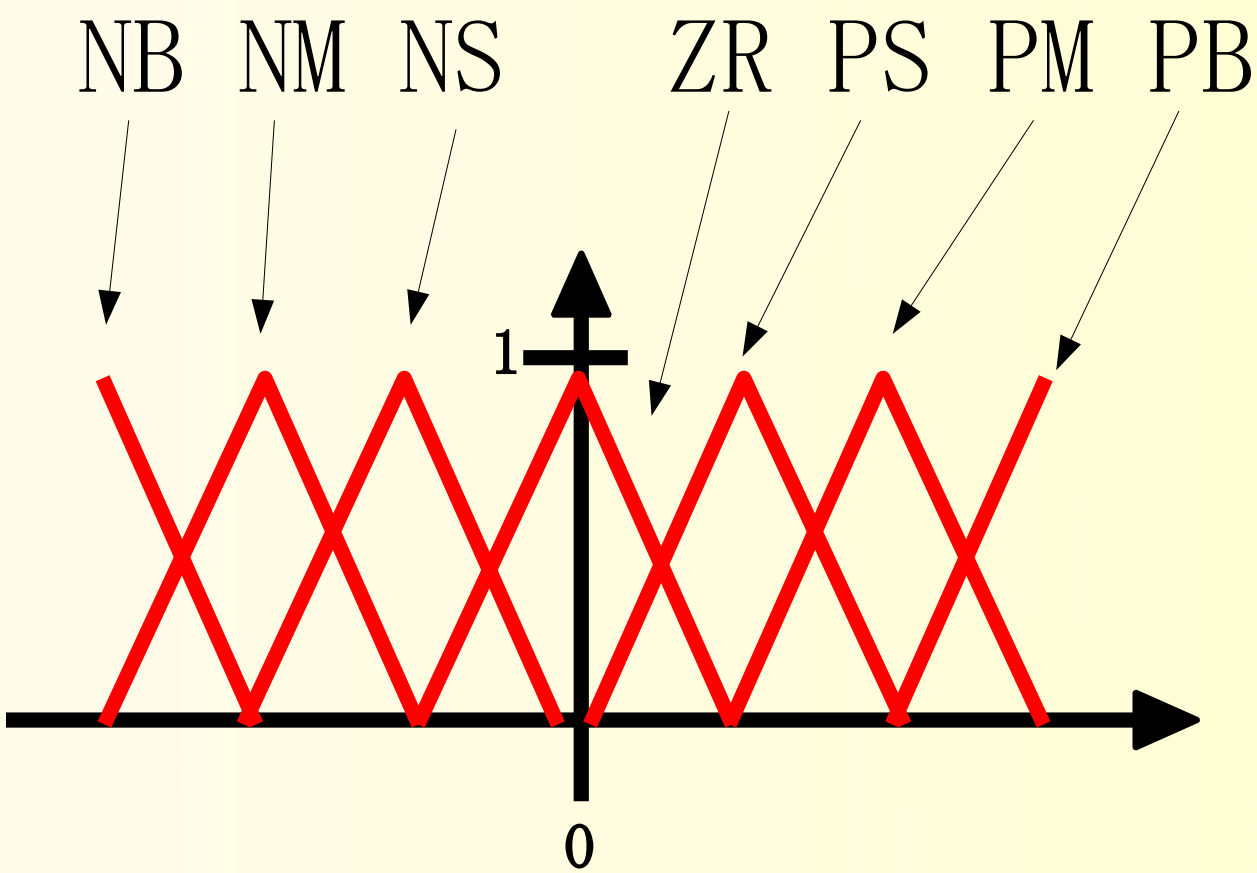
「おおよそ」の数を表す

- 「リンゴをおおよそ 50 個あげるよ」と言われたとする。
  - 実際の数が 50 個でなかった時、どれくらいなら許せますか？
    - 45~55? それえとも 40~60?
- ファジィ集合を使って、おおよその数を表したとき、その数を「ファジィ数」と言う。

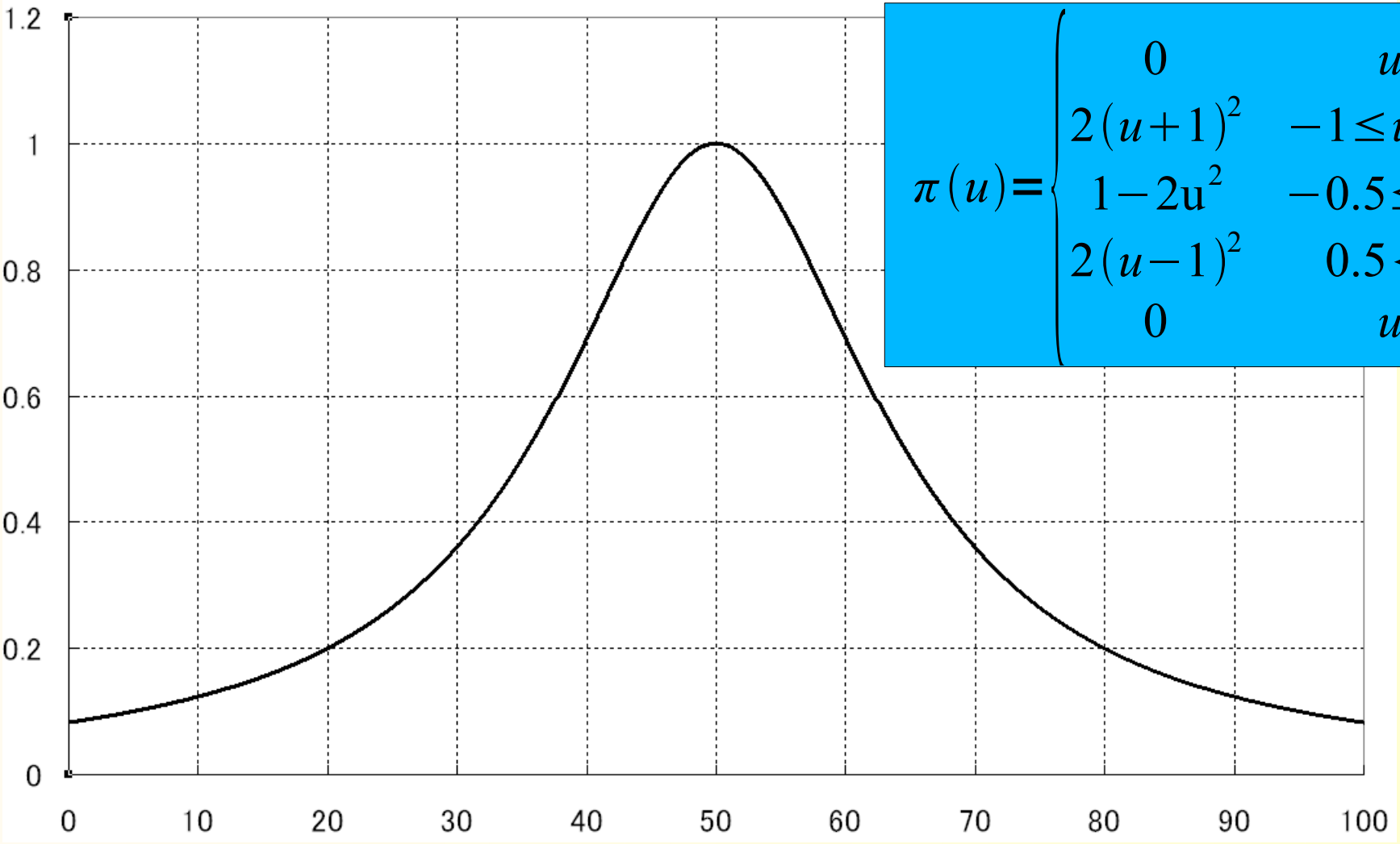
メンバーシップ関数の決定

- メンバーシップ関数の決定方法は様々
- 制御目的の場合、三角形メンバーシップ関数が多く用いられる。
  - 形状が簡単で計算しやすい
  - 他の標準メンバーシップ関数に比べても遜色ない制御結果が得られる
- 本実験では全体集合を 7 つの三角型メンバーシップ関数に分けたものを使う。
  - どんなシステムにも対応できるように、ファジィ数の横軸を相対化したと思えば良い

三角型メンバシップ関数（7分割）



参考 :π （パイ）関数

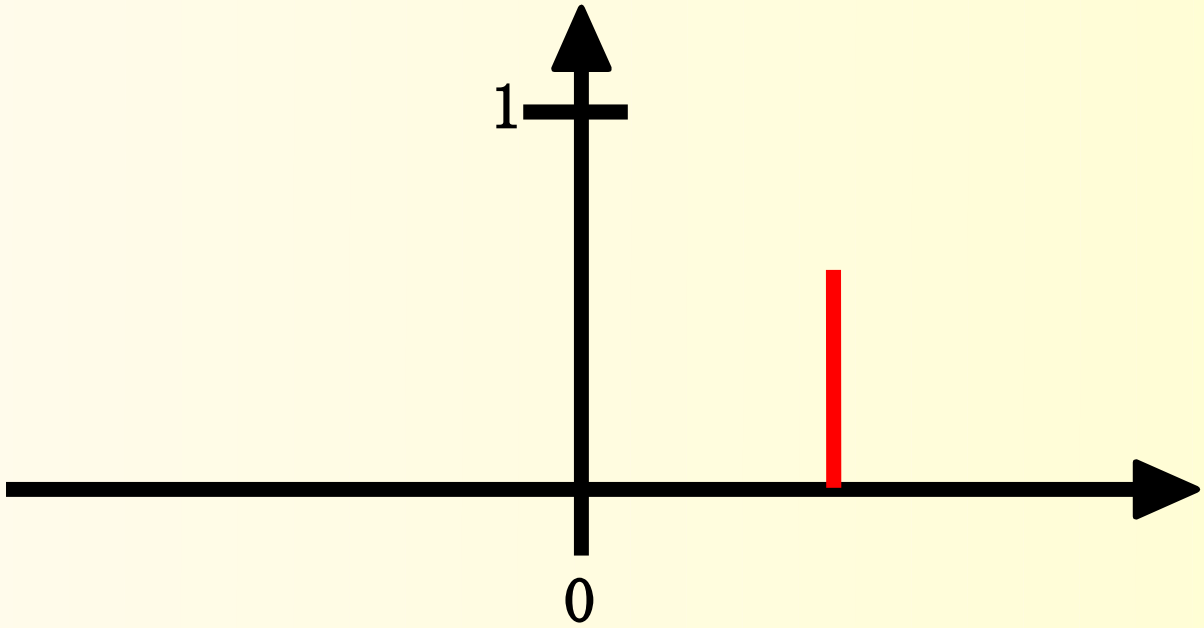


$$\pi(u)=\begin{cases} 0 & u<0 \\ 2(u+1)^2 & -1\le u\le -0.5 \\ 1-2u^2 & -0.5\le u\le 0.5 \\ 2(u-1)^2 & 0.5<u\le 1 \\ 0 & u>1 \end{cases}$$

- メンバシップ関数を曲線で表す関数の 1 つ

参考：シングルトン

- 以下の条件を満たすファジィ集合を「シングルトン」という
  - 横方向の広がりをもたない
  - グレードを持つ



ファジィ制御の考え方

- 人間に作業を教えるとき
「こんな状況の時は→こうする」という
形式で記述されたルールを教えれば良い。
- ファジィ制御は、これと同じ事をファジィ
集合の概念を用いてコンピュータに
わかるように記述する。
- if A then z (if-then ルール)
  - A : 前件部
  - z: 後件部

ファジィ制御の考え方

- 前件部・後件部にファジィ集合を用いると

  「だいたいこんな時」（前件部）に
  「だいたいこうする」（後件部）

  といった形で、「あいまいさを残したまま」のルールを記述できる。
- ただし、実際に働く装置はファジィを理解できないことが多いので、最終的に後件部は何らかの形で数値化する必要がある。
  - これを「脱ファジィ化」という。

min-max 重心法

- Zadeh 教授が提唱した伝統的な方法
- min （最小値） max （最大値）という、容易に計算できる方法を使用していて、計算がしやすい
- その反面、 min,max は非線形性が強くて挙動を把握しにくい。
- 最終的には後件部を合成したメンバーシップ関数の重心を求めて脱ファジィ化する

リニアファジィ推論法

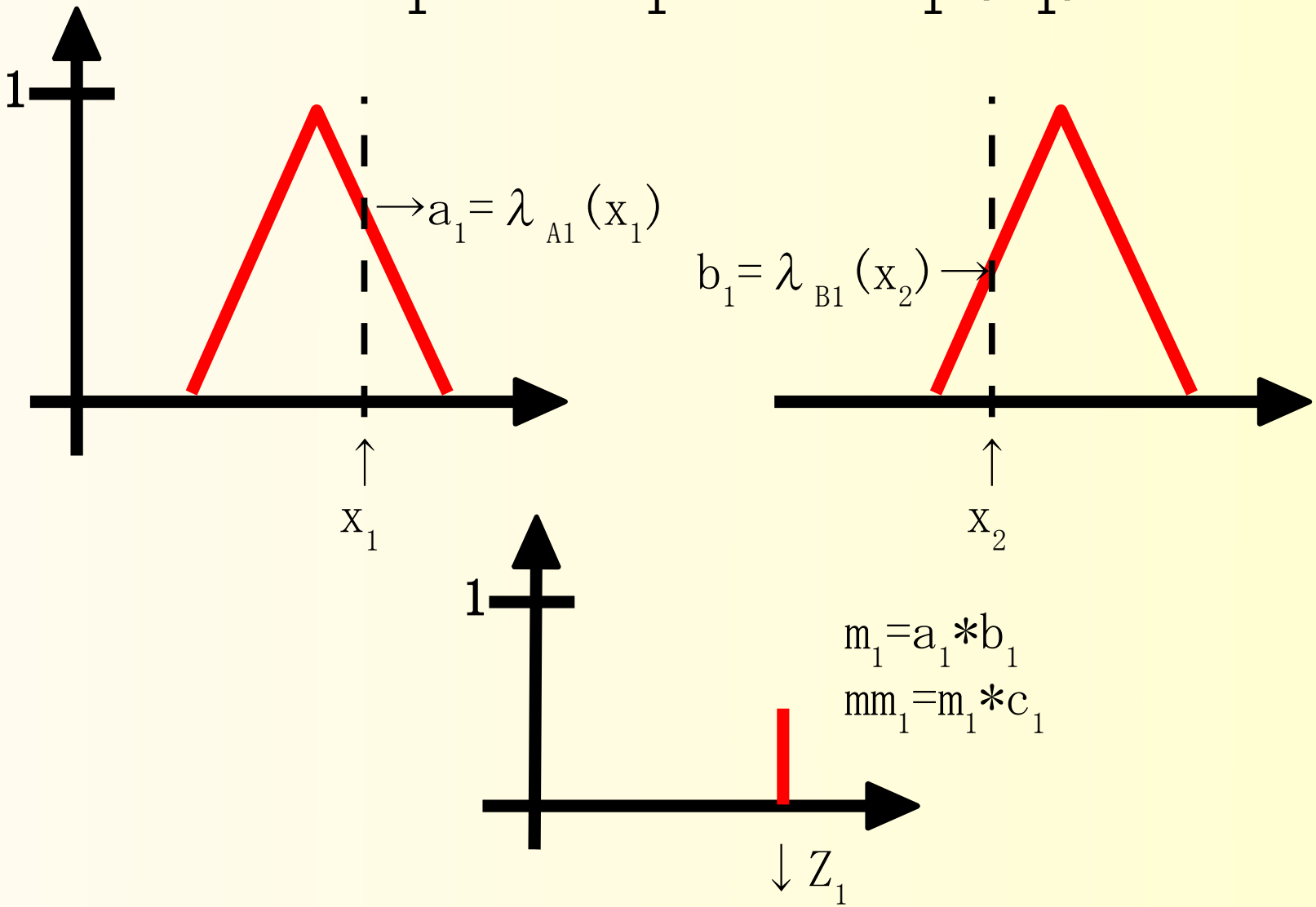
- この実験で利用する方法
- min,max ではなく代数積･代数和を利用
- 一般的なファジィルールに加えて貢献度（そのルールが制御出力にどの程度影響を与えるか）を設定可能
  - 前件部貢献度
    - ルールと一緒に入力する
  - 後件部貢献度
    - （実験システムでは 1 固定なので気にしなくて良い）

リニアファジィ推論法

- ルール表記：　if A then z (c)
  - A は前件部（ファジィ集合）
  - z は後件部（シングルトン）
  - c は貢献度（数値）
- 2 入力 1 出力の場合は
  - if A and B then Z (c)
- 3 入力 1 出力の場合は
  - if A and B and C then Z(c)

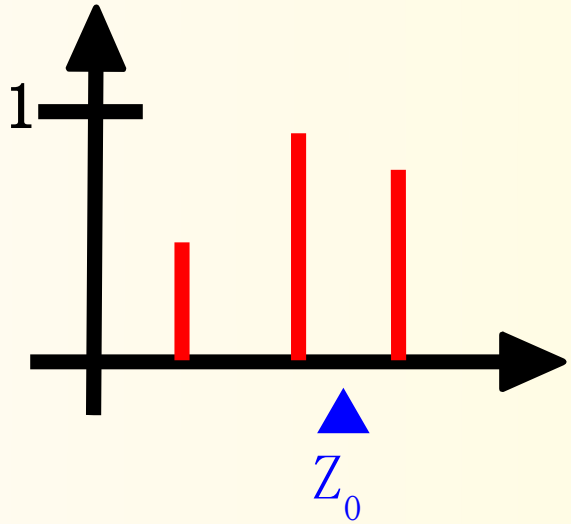
リニアファジィ推論法

- if A_1 and B_1 then Z_1 (c_1)



リニアファジィ推論法

- 各ルールごとに Z_i を求める
- ファイア（$\lambda_i(x_i) \neq 0$）したルールの Z_i を集め、重心を求めて出力とする



$$Z_0 = \frac{a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 \cdot Z_1 + a_2 \cdot b_2 \cdot c_2 \cdot Z_2 \cdots}{a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 + a_2 \cdot b_2 \cdot c_2 \cdots}$$

$$= \frac{\sum_i a_i \cdot b_i \cdot c_i \cdot Z_i}{\sum_i a_i \cdot b_i \cdot c_i}$$

倒立振子とは

- 手の上で傘を立てる遊びをしたことはありませんか？
- まさにそれが倒立振子です (inverted pendulum)
- 振子が倒れそうになった時は、振子を支えている手を動かして倒立状態を保つように制御します。

第 2 章　実験

Section 2 Experiment

担当決め

- この実験の作業分担
  - PC 操作担当
    - 1~2 名
    - ルールの入力、制御の開始などの操作
  - 装置操作担当
    - アームの始動準備、モータ電源の操作
    - アームが暴走すると危険なので、制御実行時にはヘルメットを装着する
  - 記録担当
    - 実験結果の記録を行う

設置～制御ソフト起動

- ロボットアームを、木の板に示された印を参考に設置
- 装置真下の引き出しを抜く
- 2 台の C 型クランプで固定
- A0,B0 の机は少し離し、余計な椅子を片付けてアームの動作範囲を確保する

設置～制御ソフト起動

1. インターフェースボックスと
   ロボットアームの電源ケーブルを差し込む
   - 緊急停止ボタンはロボットアームに接続
   - ロボットアームのスイッチは OFF のまま
     - 制御装置が働いていない状態で ON にすると
       ノイズによって暴走する危険がある
2. 実験台の PC を起動し、デスクトップ上の
   アイコン "Fp05" をダブルクリックして
   制御用ソフトウェアを起動する
3. 「ファイル」メニュー→「新規作成」
4. 「ファジィ制御」を選択して「 OK 」

初期設定

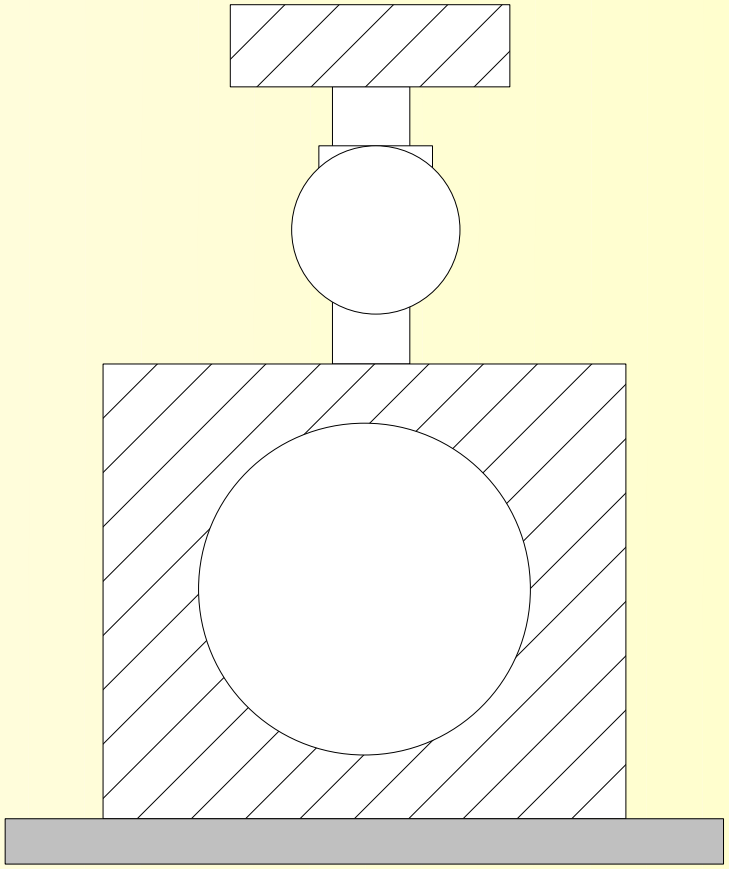
1. 「設定」メニュー→「初期設定」
2. 「前件部数」と「前件部名」に以下の変更を施して「OK」
   a. 前件部数 **[3]**　**1. 振子角度　2. 振子角速度　3. アーム速度**
   b. 後件部数 **[1]**　**1. 制御出力**

実験 1: 入力確認

1. 「制御表示」メニューをクリックして「制御表示画面」を表示
2. 画面左上の振子角度 [白]、振子角速度 [青]、アーム速度 [緑] をクリックして選択
3. 画面右上 [制御開始] をクリック
4. 振子やアームを手で動かして画面に情報がグラフ表示されることを確認する。
5. 画面、右上 [制御停止] をクリック後画面を閉じる

実験 1: 入力確認

- 確認する内容
  - 振子角度
    - グラフが NB,ZR,PB のそれぞれを指す振子の位置を探し、振子の角度を記録する。写真記録可（図も作ること）
  - 振子角速度、アーム速度
    - それぞれ振子、アームを動かして、移動速度とグラフの対応を確認する



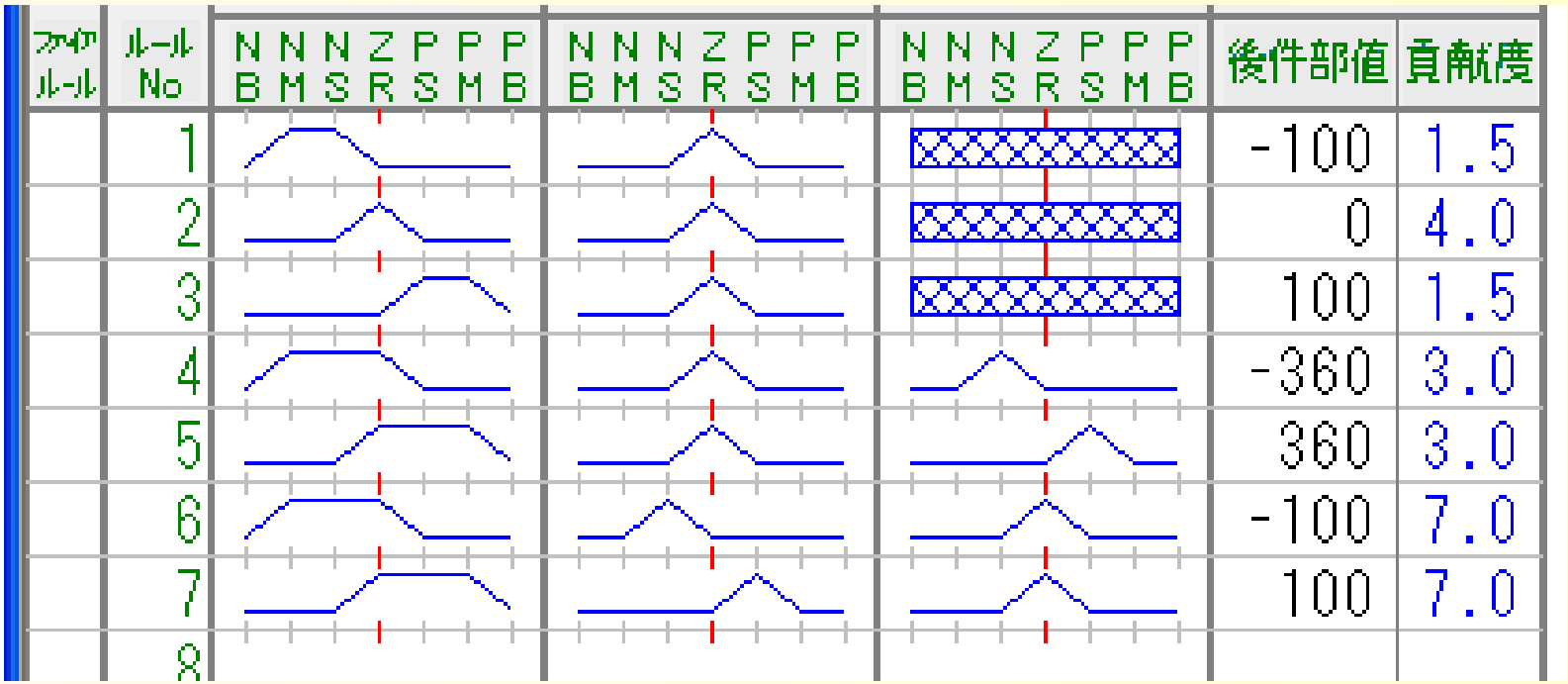
ロボットアーム
正面図

実験 1: 入力確認

- 振子角速度／アーム速度
  - 時計回りに回すとき
    - 入力値は（プラス／マイナス）側にふれる
    - 速く動かすと値は（大きい／小さい）
    - 遅く動かすと値は（大きい／小さい）
  - 反時計回りに回すとき
    - 入力値は（プラス／マイナス）側にふれる
    - 速く動かすと値は（大きい／小さい）
    - 遅く動かすと値は（大きい／小さい）

実験 2: 振子の倒立状態を保持

1. 倒立状態を保持するルールを、下図を参考に入力する。



ファイルルール	ルールNo	N N N Z P P P B M S R S M B	N N N Z P P P B M S R S M B	N N N Z P P P B M S R S M B	後件部値	貢献度
	1				-100	1.5
	2				0	4.0
	3				100	1.5
	4				-360	3.0
	5				360	3.0
	6				-100	7.0
	7				100	7.0
	8					

実験 2: 振子の倒立状態を保持

2. 教員の指示に従って制御を行う

- ✗危険なので絶対勝手に始めない
- ✗アームが稼動範囲を超えようとしたり、暴走した場合は次のようにする
  - ✗機器操作担当者
    - ✗速やかにモータの電源を切る
  - ✗PC 操作担当者
    - ✗速やかに制御を停止する。

実験 2: 振子の倒立状態を保持

- PC 操作担当者
  - 「制御表示」画面を表示
  - 推論入力、推論出力の計 4 つを表示させる
  - 「制御開始」をクリックして、機器操作担当に合図
- 機器操作担当者
  - 振子棒がしっかり取り付けられている事を確認し、振子棒を垂直に立てて手を添えておく

実験 2: 振子の倒立状態を保持

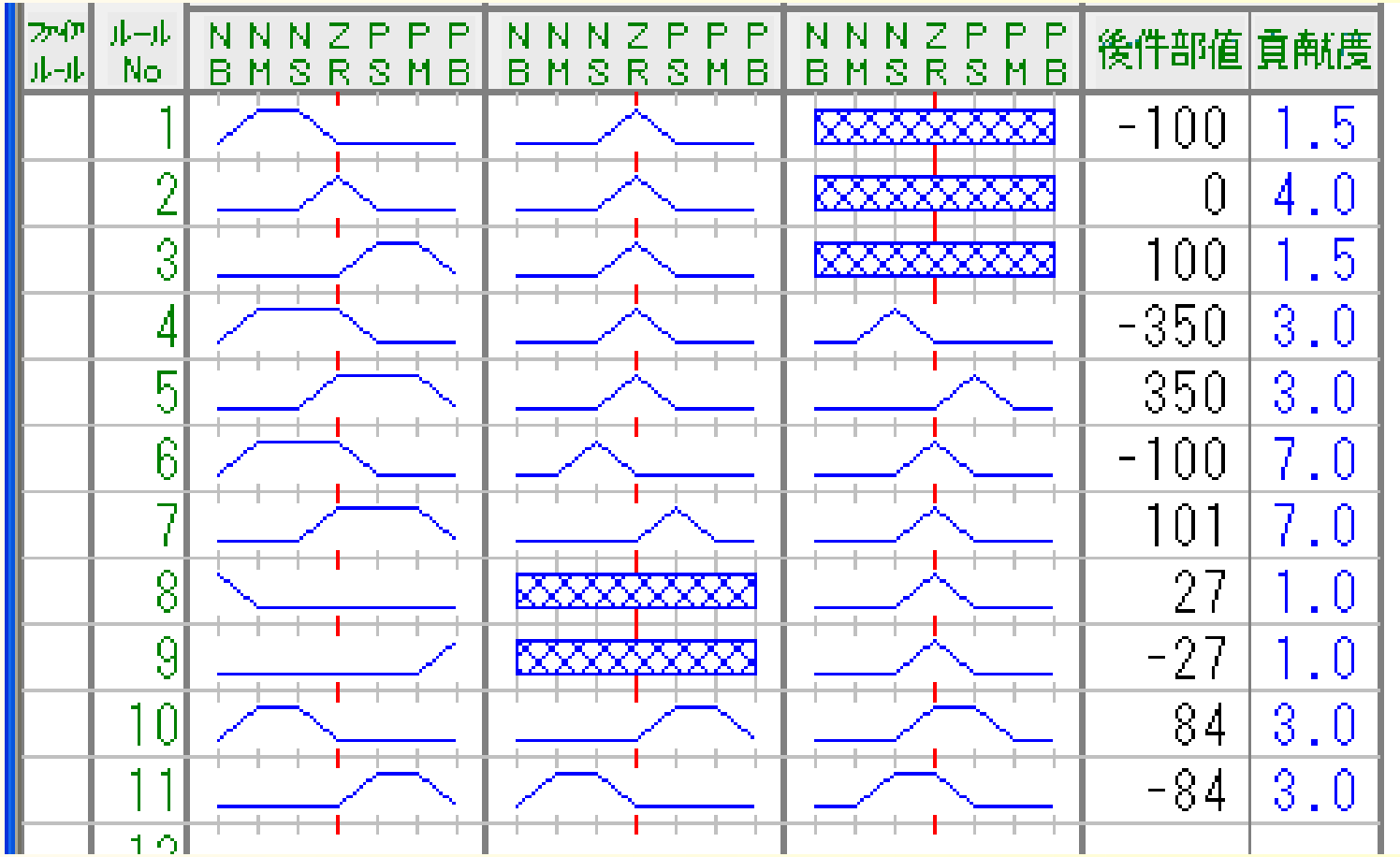
- 緊急停止ボタンの使い方
  - ボタンを押すとランプが点灯し、ロボットは停止状態になる
  - 時計回りにボタンをひねるとランプが消灯し、ロボットが稼動状態になる
- 緊急停止状態（ランプ点灯）にしてからロボットアームの電源を ON にする
- 振子を支えていた手を離すと同時にスイッチをひねり、ロボットを稼動させる

実験 2: 振子の倒立状態を保持

- 確認する内容
  - ロボットアームが振子の倒立状態を保っている事を確認する
  - 振子の先端を軽く押すと、振子の倒れた方にアームが追従して、倒れそうになる振子を迎えにいくことを確認する
    - 注意）強く押すとアームが振子を追いきれずアームが稼動範囲を超えてしまったり暴走するので注意
  - 動作は安定しているか、振動の様子はどうかなどの動作状況

実験 3: 振子の振り上げ

1. 振子の振り上げを行うルールを下図を参考にして追加する。



実験 3: 振子の振り上げ

2. 教員の指示に従って制御を行う

- 危険なので絶対勝手に始めない
- アームが稼動範囲を超えようとしたり、暴走した場合は次のようにする
  - 機器操作担当者
    - 速やかにモータの電源を切る
  - PC 操作担当者
    - 速やかに制御を停止する。

実験 3: 振子の振り上げ

- PC 操作担当者
  - 「制御表示」画面を表示
  - 推論入力、推論出力の計 4 つを表示させる
  - 「制御開始」をクリックして、機器操作担当に合図
- 機器操作担当者
  - 振子棒がしっかり取り付けられている事を確認し、振子棒を垂れ下がった状態より少し傾けておく（真下方向ではうまく制御できない可能性がある）
  - PC 操作担当の合図で添えていた手を離すと同時に非常停止ボタンを解除する

実験 3: 振子の振り上げ

- 確認する内容
  - ロボットアームがタイミングにあわせて振子を振り上げ、真上にきたところで倒立保持動作に切り替わることを確認
    - その際、PC のルール一覧にも注目して、振り上げの時と倒立保持の時でファイヤするルールが異なっていることを確認
  - 動作は安定しているか、振動の様子はどうかなどの動作状況
    - 特に制御に失敗した時の様子

実験 4: 振れ止めの観察

- 課題にある振れ止めがどのようなものかを観察する。
- 教員が用意した振れ止めのルールで、振れ止め制御を行うところを観察する。
  - 教員は学生にルールを見せてはならない（ルールを課題で考えてもらうため）
  - この実験を行う際は、振子の取り付け位置を反転させる必要がある（センサの感知域を下方向に向けるため）

第 3 章　考察と課題

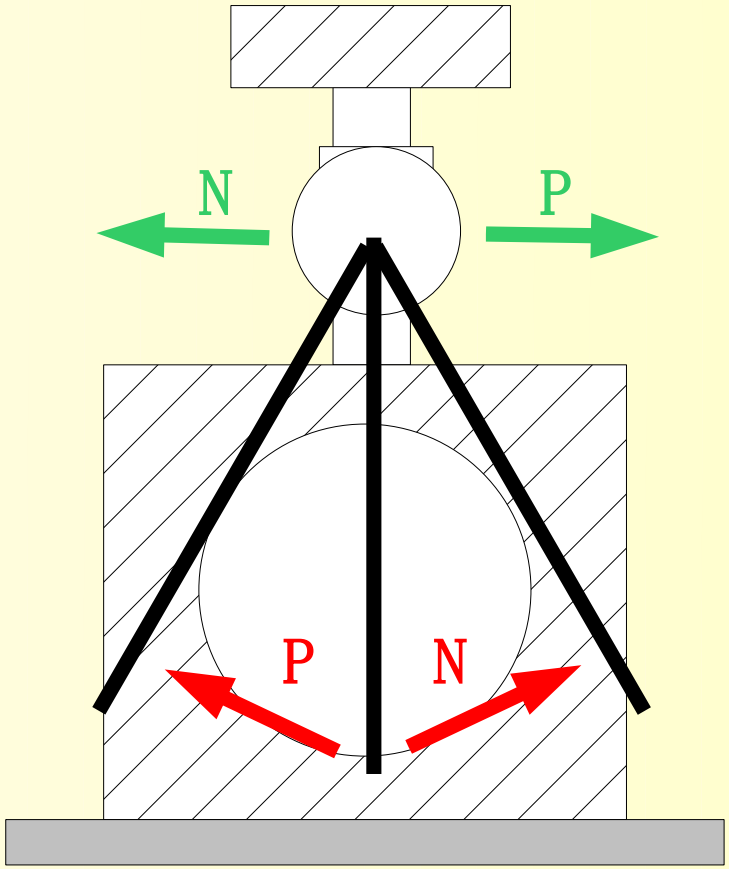
Section 3
Consideration and Exercise

課題 (1)

- テキストの課題を以下に変更する
  - (1)PID 制御の概略を述べ、ファジィ制御と比較せよ。
  - (2) 「倒立振子の振り上げ」実験で入力した各 if-then ルールについて、「●●が■■の時▲▲する」の形式で日本語化して説明せよ。

課題 (2)

- (3) 以下の情報を参考に、ブラブラと揺れる振子をできるだけ早く鉛直方向に静止させる（振れ止め制御）を行うルールを作り、説明しなさい
  - 入力は振子角度のみ（1 入力）
  - 出力はアーム速度のみ (1 出力)



課題 (3)

- (4) ファジィ制御を適用できそうな例を考え、その if-then ルールを考えよ。
  - 注意）オリジナリティのあるレポートを期待する。他人と同じテーマを選ぶなとは言わない（言えない）が、採点においてはオリジナリティのある例が示されているものを優遇する。

付録

Appendix

謝辞

- 謝辞
  - 指導書の原案作成には、本学 OB の阿久津氏にご協力いただいた。
  - 振子棒の製作には、本学 GE 学部在籍の佐野氏にご協力いただいた。

▣担当者・資料作成　山口直彦

- 工学院大学大学院 情報学専攻 修士 1 年
  - 音情報処理研究室　所属
  - 専門は音楽情報処理、特に計算機音楽理論
- 文筆業を開業中。
  - 共著
    - 「ライトノベル研究序説」(2009 青弓社)
  - 単著
    - 「コンピュータの動くしくみと 0 と 1 で計算できる理由」(2009 年末発売予定 , 秀和システム)
  - 質問は em09018@ns.kogakuin.ac.jp
    - http://homepage3.nifty.com/nycity/

参考資料

- 向殿政男「ファジィのはなし」
  - (1989, 日刊工業新聞社)
- 水本雅晴「ファジィ理論とその応用」
  - (1989, サイエンス社)

- 上記 2 点は弱電実習室に 1 冊ずつ所蔵している。