インタラクティブシステム論
第3回

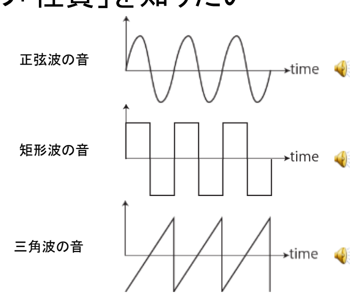
梶本裕之
Twitter ID kajimoto
ハッシュタグ #ninshiki

日程

4/9 イントロダクション
4/16 Scilabの紹介（西6号館3階PCルーム）
4/23 出張により休講
4/30 フーリエ変換
5/7 フーリエ変換と線形システム
5/14 信号処理の基礎
5/21 信号処理応用1（相関）
5/28 信号処理応用2（画像処理）
6/4 研究室見学（大学院オープンラボ）
6/11 中間確認テスト
6/18 ラプラス変換
6/25 出張により休講
7/2 古典制御の基礎
7/9 行列
7/16 行列と最小二乗法
7/23 ロボティクス
8/5〜11 期末テスト

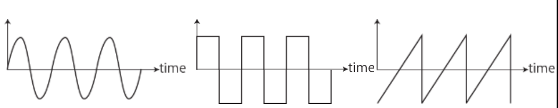
フーリエ変換

信号の「性質」を知りたい



（Q）この3つは，何が違うのだろうか？

答えは認識の数だけある

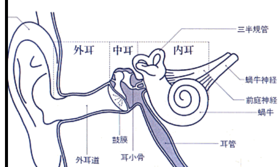


（Q）この3つは，何が違うのだろうか？

(A1)形が違う
(A2)上昇速度，下降速度が違う
(A3)ある閾値以上となる時間幅が違う
etc... すべて正しい

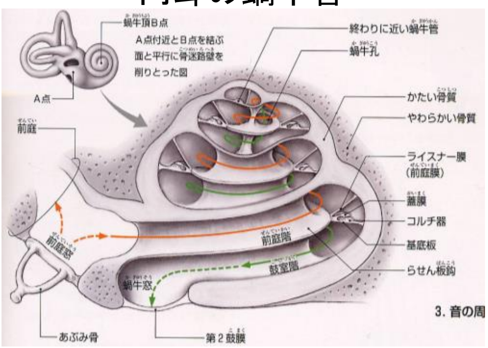
回答の正しさは，現象の本質にどれだけ迫っているかによる．
つまり，現象を認識するシステムによって正答は異なる．

音の「認識」とは？



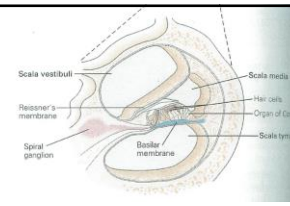
1. 気体の振動
2. 鼓膜の振動
3. つち骨・きぬた骨・あぶみ骨によるリレー
4. 前庭窓の振動
5. リンパ液（液体）の振動
6. 基底膜の振動

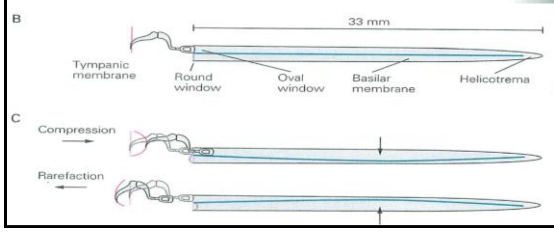
内耳の蝸牛管



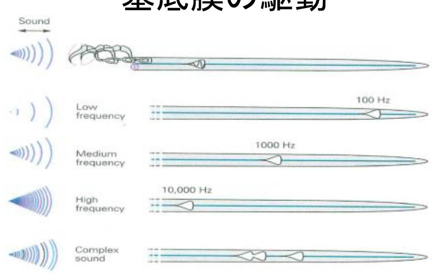
蝸牛内の基底膜

- 管を上下に仕切る膜



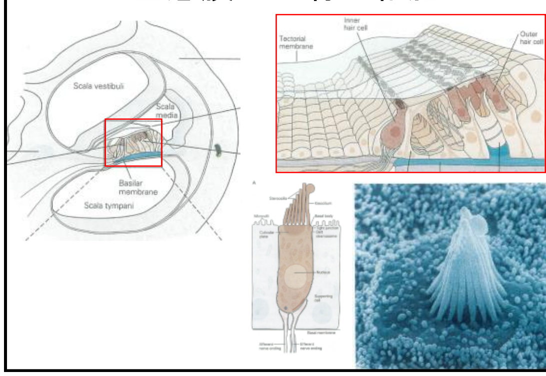


基底膜の駆動

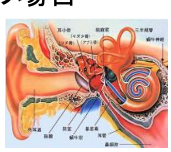


- 基底膜上に進行波を形成
- 低周波ほど減衰せずに奥まで到達する（周波数分解）

基底膜上の有毛細胞



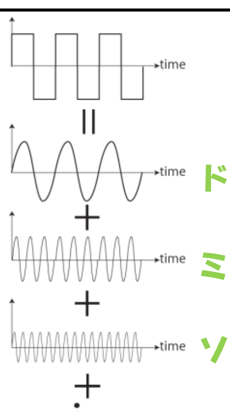
音の場合



耳は音を，周波数で分解して認識.

⇒周波数成分がアルファベット,
その合成が単語に相当

⇒音の場合の答え：
「周波数成分が違う」



他の多くの場合でも周波数が重要

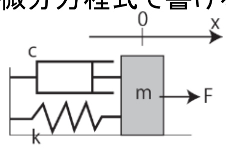
●耳は音を，周波数分解して認識する装置

●耳に限らず，多くの生体センサは周波数分解によって現象を把握（例：皮膚）

（Q）なぜ周波数なのだろうか

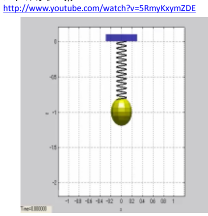
言い換えると，
正弦波はなぜ多くの場合，要素，成分，アルファベットにふさわしいのだろうか？

物理現象の多くは線形な微分方程式で書ける



(例)バネ・マス・ダンパ系
おもりに加わる力は，
F:外力
cx':粘性による力
Kx:バネによる力
ニュートンの法則ma=Fより，

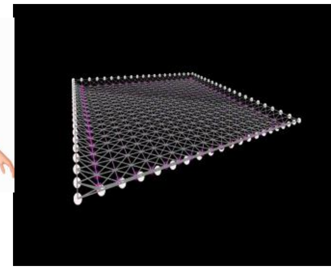
バネマスダンパ系
http://www.youtube.com/watch?v=5RmyKxymZDE



●システムの「入力」と「応答」
- ✓ 入力：F(t)：おもりに加える外力
- ✓ 応答：x(t)：おもりの動き

(参考)バネ・マス・ダンパ系による記述例

Syflex
http://www.youtube.com/watch?v=IS3vZxj_xLw

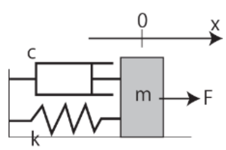


布のシミュレーション
http://www.youtube.com/watch?v=ib1vmRDs8Vw

「入力」と「応答」の関係を知りたい

$$m\ddot{x} = F - kx - c\dot{x}$$

- ✓ 入力：F(t)：おもりに加える外力
- ✓ 応答：x(t)：おもりの動き



「ある入力波形，F(t)を加えた時に，応答x(t)はどうなるか」

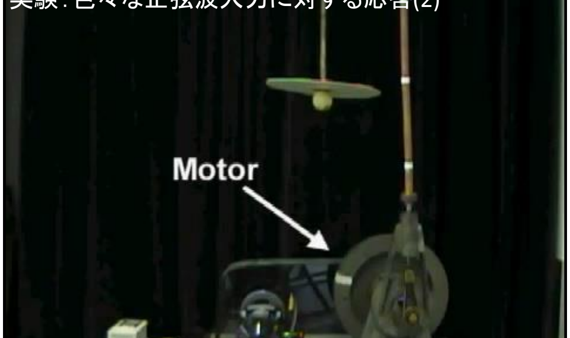
この問題に一般的に答えることは出来るか？

出来る．正弦波入力を考えることによって

実験：色々な正弦波入力に対する応答 (1)

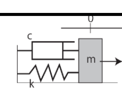
spring-mass second order system frequency response
http://www.youtube.com/watch?v=_XTj_ePLvFI

実験：色々な正弦波入力に対する応答(2)

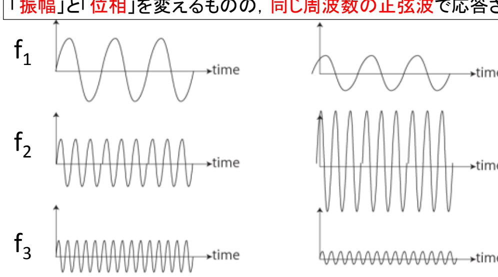


MIT Physics Demo -- Driven Mechanical Oscillator
http://www.youtube.com/watch?v=aZNnwQ8HJHU

正弦波は歪まない

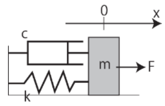


●線形な微分方程式で記述されるシステムでは，正弦波の入力は「振幅」と「位相」を変えるものの，同じ周波数の正弦波で応答される．

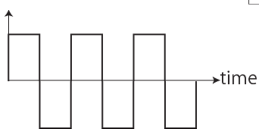


●入力：F(t)=sin(ft)　　●応答：x(t)

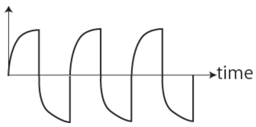
一般の波は（もちろん）歪む



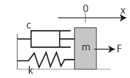
●入力：F(t) 矩形波状の力を加える

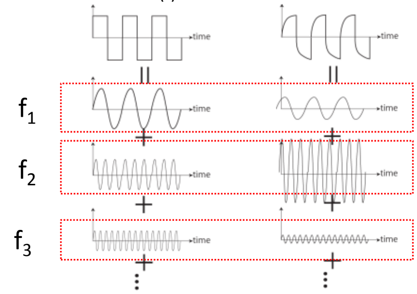


●応答（出力）：x(t)

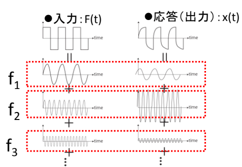


歪みを周波数で分解して説明





(Q)正弦波はなぜ多くの場合，要素としてふさわしいのだろうか？



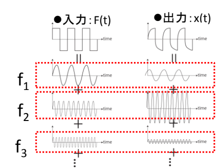
(A1)　正弦波入力に対する出力も
　　　同じ周波数の正弦波となる(と近似できる事が多い)から

(A2)　周波数成分ごとの入出力関係から，
　　　一般の入力に対する応答（出力）を合成できるから

（今は参考まで）「線形」微分方程式の意味

$$m\ddot{x} = F - kx - c\dot{x}$$

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t)$$



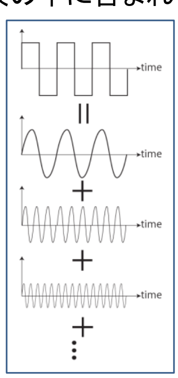
$$m\ddot{x}_1(t) + c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = F_1(t)$$

$$m\ddot{x}_2(t) + c\dot{x}_2(t) + kx_2(t) = F_2(t)$$

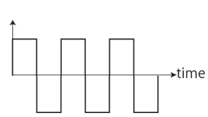
$$m\left(\ddot{x}_1(t)+\ddot{x}_2(t)\right) + c\left(\dot{x}_1(t)+\dot{x}_2(t)\right) + k\left(x_1(t)+x_2(t)\right) = F_1(t)+F_2(t)$$

2つの微分方程式を足しあわせても成立する
（波形の重ね合わせが成立する）
（例えばもし$x^2(t)$等の項があるとこれは成立しない）

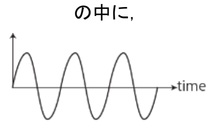
波の中に含まれる正弦波の成分を調べたい



第一段階として，



の中に，



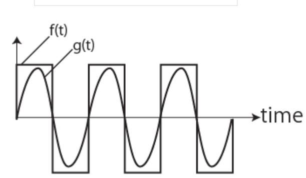
はどれだけ含まれるだろうか？

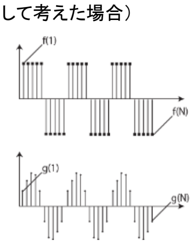
波形fに波形gはどれだけ含まれるか

波形f中の，波形gの成分

$= \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^T f(t)g(t)dt$　（連続関数）

$=$　　　　　　（離散化して考えた場合）



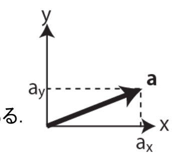


ベクトル空間と内積(復習)

ベクトル **a**=[a_x, a_y] のx成分は？. . . . .　a_x

これはベクトル**a**とベクトル **x**=[1,0]との内積である.

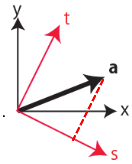
a・**x** = [a_x, a_y]・[1,0] = a_x



回転した座標軸，s, tを考える.
ベクトル **a**=[a_x, a_y] の，s 成分は？

これはベクトル**a**とベクトル **s**=[s_x, s_y]との内積である.

a・**s** = [a_x, a_y]・[s_x, s_y]

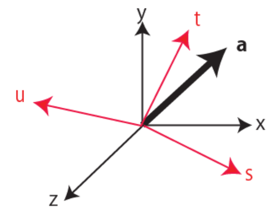


内積は，あるベクトルが別のベクトルの成分をどれだけ持つかを表す

さらに

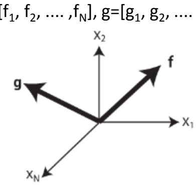
3次元空間に，座標軸s,t,uを考える.
ベクトル **a**=[a_x, a_y , a_z] の，s 成分は？

これはベクトル**a**とベクトル **s**との内積である.
a・**s** = [a_1, a_2 , a_3]・[s_x, s_y , s_z]



では

N次元空間で，二つのベクトル
f=[f_1, f_2, ... ,f_N], g=[g_1, g_2, ... ,g_N] を考える.



内積 **f**・**g**は，ベクトルfの，g軸成分(または逆)を表す.

=

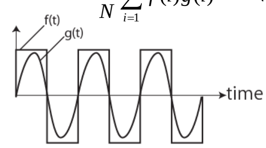
=

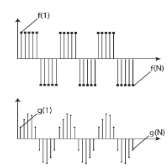
波形*f*に波形*g*はどれだけ含まれるか（再）

波形*f*中の，波形*g*の成分

$$= \frac{1}{T}\int_0^T f(t)g(t)dt \quad \text{(連続関数)}$$

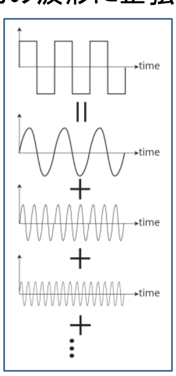
$$= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f(i)g(i) \quad \text{(離散化して考えた場合)}$$





これは二つの波をベクトルと考えた時の内積に他ならない
※内積を連続関数に対して定義

元の波形に正弦波がどれだけ含まれるか



元の波形：周期Tの波形 f(t)

周期Tのcosine波はどれだけ含まれるか

$a_1 =$

周期Tのsine波はどれだけ含まれるか

$b_1 =$

周期2Tのcosine波はどれだけ含まれるか

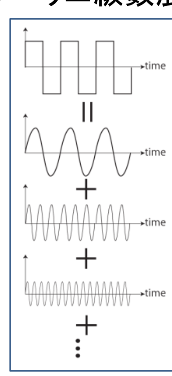
$a_2 =$

周期2Tのsine波はどれだけ含まれるか

$b_2 =$

以下a_3, b_3, a_4, b_4, ...

フーリエ級数展開：定義



周期Tの波形 f(t)は次のように分解できる

$$f(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos(2\pi mt/T) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin(2\pi mt/T)$$

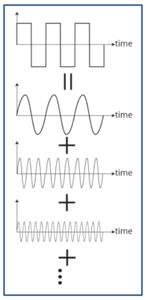
$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt \quad \text{平均値（DC成分）}$$

$$a_m = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(2\pi mt/T)dt$$

$$b_m = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(2\pi mt/T)dt$$

※この授業では係数は気にしない.

フーリエ級数展開の意味するところ



元の波形：周期Tの波形 f(t)

周期Tのcosine波はどれだけ含まれるか

$$a_1 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(2\pi t/T)dt$$

周期Tのsine波はどれだけ含まれるか

$$b_1 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(2\pi t/T)dt$$

周期2Tのcosine波はどれだけ含まれるか

$$a_2 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(2\pi t\times 2/T)dt$$

周期2Tのsine波はどれだけ含まれるか

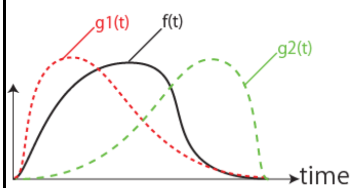
$$b_2 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(2\pi t\times 2/T)dt$$

以下a_3, b_3, a_4, b_4, ...

①分解の仕方は一通り
②分解した各成分を合成すると元に戻る

これは当たり前のことではない！！

①分解の仕方は一通り？



f(t)を，g1(t)成分と，g2(t)成分と，残りに分けたい．

f(t)から，
（1）まずg1(t)成分を抽出し，残りからg2(t)成分を抽出する
（2）まずg2(t)成分を抽出し，残りからg1(t)成分を抽出する
このニつは，通常は異なる結果を生む．

f=[茶色の丸，
紫の丸，
紫の三角]

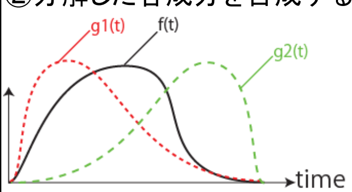
g1:茶色
g2:丸

（1）
g1:
g2:

（2）
g2:
g1:

普通，分解の仕方は抽出の順番に依存

②分解した各成分を合成すると元に戻る？



ある成分を抽出した「残り」から次の成分を抽出したことが問題？
では
f(t)からg1(t)成分を抽出
f(t)からg2(t)成分を抽出
すれば抽出の順番は関係なくなる？？

このニ成分を合成すると，元のf(t)より大きくなってしまう．

f=[茶色の丸，
紫の丸，
紫の三角]

g1:茶色
g2:丸

g1:
g2:

g1 +g2:

普通，合成しても元に戻らない

つまり

ある関数f(t)を，
関数群$g_1(t)$, ... , $g_\infty(t)$の成分に分解するとき，
(たとえばフーリエ変換ではsin,cos．これを基底関数と呼ぶ)

分解方法が一通りで，
分解結果を合成して元に戻るのは

稀で特殊

うまくいくのは

任意の基底関数同士が，
お互いの要素を持たないとき，
分解の仕方は一通りとなる．

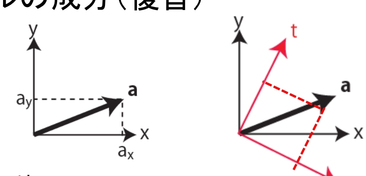
f=[茶色の丸，
紫の丸，
紫の三角]

g1:丸
g2:三角

g1:
g2:

g1＋g2＝f

ベクトルの成分（復習）

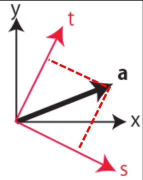


ベクトル**a**は，
●ベクトル**x**と**y**の成分に一意に分けられる．各成分は**a**･**x**，**a**･**y.**
●ベクトル**s**と**t**の成分に一意に分けられる．各成分は**a**･**s**，**a**･**t.**

これは
●ベクトル**x**と**y**が，お互いの成分を持たないから．
●ベクトル**s**と**t**が，お互いの成分を持たないから．

このとき，**x**と**y**(**s**と**t**)は直交しているという．

直交ベクトルと直交基底（復習）

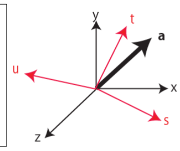


直交ベクトル同士は，内積が0である．

x・y=[1,0]・[0,1]=0
s・t=[s_x,s_y]・[t_x,t_y]=0

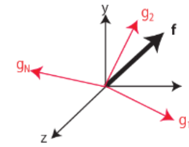
逆に，内積が0であることが直交基底であることの条件！

N次元空間でN個のベクトルが，
どの二つをとっても直交しているとき，
これを直交基底と呼び，
その空間の任意の点は，
直交基底の成分で表せる．
（図では**x,y,z**が直交基底．**s,t,u**も直交基底）



N次元空間の直交基底

N次元空間で，N個のベクトル
$\mathbf{g_1}$ =[g_{11}, g_{12}, ... ,g_{1N}],
$\mathbf{g_2}$ =[g_{21}, g_{22}, ... ,g_{2N}],
...
$\mathbf{g_N}$ =[g_{N1}, g_{N2}, ... ,g_{NN}]を考える．



すべてのペアの内積 $\mathbf{g_i}$・$\mathbf{g_j}$が0なら，

$\mathbf{g}_i \bullet \mathbf{g}_j$ =

=

=

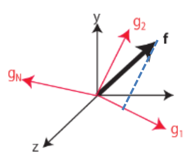
$\mathbf{g_1}$ ～$\mathbf{g_N}$は直交基底であり，

任意のN次元ベクトルfは，$\mathbf{g_1}$ ～$\mathbf{g_N}$の各成分の和で一意に表せる．

N次元空間の直交基底の成分

N次元ベクトル**f**の$\mathbf{g_i}$ 成分は，**f**と$\mathbf{g_i}$ の内積．

結局，ベクトルfは，次のように分解される．



f = (f・$\mathbf{g_1}$) $\mathbf{g_1}$ + (f・$\mathbf{g_2}$) $\mathbf{g_2}$ + ... + (f・$\mathbf{g_N}$) $\mathbf{g_N}$

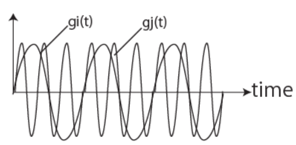
$$[f_1 \quad f_2 \quad \cdots \quad f_N]\bullet[g_{11} \quad g_{12} \quad \cdots \quad g_{1N}]$$
$$= \sum_{n=1}^{N} f_n g_{1n}$$

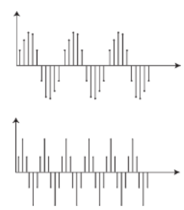
関数でも「直交」を内積から定義できる

波形*g1*と*g2*の内積を取る．

$$= \frac{1}{T}\int_0^T g_1(t)g_2(t)dt$$ （連続関数）

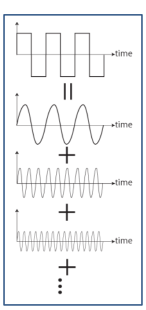
$$= \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} g_1(n)g_2(n)$$ （離散化して考えた場合）





これで準備は整った

フーリエ級数展開の意味するところ（再）



元の波形：周期Tの波形 f(t)

周期Tのcosine波はどれだけ含まれるか
$$a_1 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(2\pi t/T)dt$$

周期Tのsine波はどれだけ含まれるか
$$b_1 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(2\pi t/T)dt$$

周期2Tのcosine波はどれだけ含まれるか
$$a_2 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(2\pi t\times 2/T)dt$$

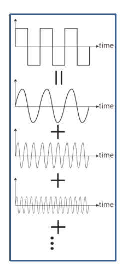
周期2Tのsine波はどれだけ含まれるか
$$b_2 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(2\pi t\times 2/T)dt$$

以下a_3, b_3, a_4, b_4, ...

①分解の仕方は一通り
②分解した各成分を合成すると元に戻る

これは当たり前のことではない！！

フーリエ級数の各基底関数の内積を取る



二つの基底関数，cos(2πmt/T)，cos(2πnt/T)の内積は？

$$\int_0^T \cos(2\pi mt/T)\cos(2\pi nt/T)dt$$
=

これはm=nでなければ必ず0

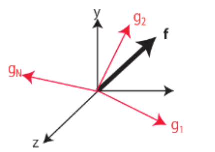
二つの基底関数，cos(2πmt/T)，sin(2πnt/T)の内積は？

$$\int_0^T \cos(2\pi mt/T)\sin(2\pi nt/T)dt$$
=

これも必ず0

任意の基底関数の内積が0.
⇒直交基底となる！！

フーリエ級数の基底関数は直交基底



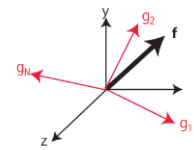
g1=cos(2π×1t/T)
g2=sin(2πt×1t/T)
g3=cos (2π×2t/T)
g4=sin(2πt×2t/T)
g5=cos (2π×3t/T)
g6=sin(2πt×3t/T)
…

これらは，たがいに直交するベクトルであり，
直交基底を構成する

よって，任意の関数 f はg1～gNによって一意に表現できる．

離散フーリエ級数展開

有限長さの関数(0<t<T)を，N分割して離散的に表す．f(t) ⇒ [f1,f2,…,fN]



基底関数⇒N次元基底ベクトルに
g1=cos(2π×1t/T) = [g11,g12,…,g1N]
g2=sin(2πt×1t/T) = [g21,g22,…,g2N]
g3=cos (2π×2t/T) = [g31,g32,…,g3N]
g4=sin(2πt×2t/T) = [g41,g42,…,g4N]
g5=cos (2π×3t/T) = [g51,g52,…,g5N]
g6=sin(2πt×3t/T) = [g61,g62,…,g6N]
…

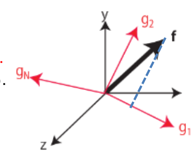
これらは，たがいに直交するN次元ベクトルであり，
直交基底を構成する

よって，任意の波形 f，すなわちベクトル[f1,f2,…fN]
はg1～gNによって一意に表現できる（しかも余らない）．

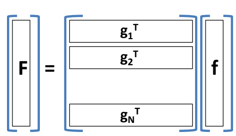
行列による表現

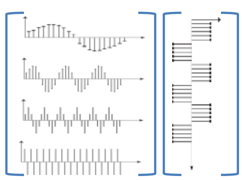
N次元ベクトルfのg_i成分は，fとg_iの内積.
結局，ベクトルfは，次のように分解される．
$\mathbf{f} = \underbrace{(\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}_1)}_{} \mathbf{g}_1 + (\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}_2)\, \mathbf{g}_2 + \ldots + (\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}_N)\, \mathbf{g}_N$

g1の成分．フーリエ級数

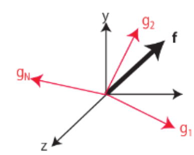


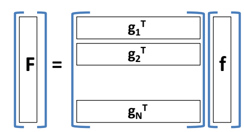
フーリエ級数を求めるには，$\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}_1$，$\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}_2$，… $\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}_N$なる，
N個の内積を計算すればよい．





フーリエ級数展開とは





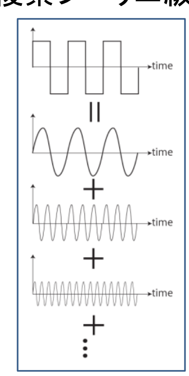
つまり
行列特に回転行列による座標変換の一種であり，
実空間の値で表されているベクトル f を
フーリエ空間の値で表されるベクトル F で表現するもの．

フーリエ○○

フーリエ級数展開
　⇒離散フーリエ級数展開（済）
　⇒複素フーリエ級数展開

⇒フーリエ変換
　⇒離散フーリエ変換

複素フーリエ級数展開：定義



周期Tの波形 f(t)は次のように分解できる

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m \exp(j2\pi mt/T)$$

$$c_m = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\exp(-j2\pi mt/T)dt$$

sin(2πmt/T)，cos(2πmt/T)の代わりに，
exp(i2πmt/T)を用いて整理したもの．
係数c_mはもはや複素数である．

exp(j2πmt/T)は直交関数系である．すなわち

が，m=n以外で成り立つ．

フーリエ変換：定義

“周期T” ではない波形 f(t)に対する変換．Tを無限大とする．

フーリエ変換

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\exp(-j\omega t)dt$$

$$c_m=\frac{1}{T}\int_0^T f(t)\exp(-j2\pi mt/T)dt$$

逆フーリエ変換

$$f(t)=\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)\exp(j\omega t)d\omega$$

$$f(t)=\sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m\exp(j2\pi mt/T)$$

離散フーリエ変換(DFT)：定義

f(t), F(ω)を離散化したもの．Discrete Fourier Transform
時間を有限とすると離散複素フーリエ級数展開と同じ．

離散フーリエ変換

$$F(k)=\sum_{t=0}^{N-1} f(t)\exp(-j2\pi\frac{k}{N}t)$$

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\exp(-j\omega t)dt$$

離散逆フーリエ変換

$$f(t)=\sum_{k=0}^{N-1} C(k)\exp(j2\pi\frac{k}{N}t)$$

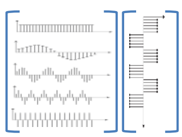
$$f(t)=\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)\exp(j\omega t)d\omega$$

高速フーリエ変換(FFT)：紹介のみ

離散フーリエ変換 $F(k)=\sum_{t=0}^{N-1} f(t)\exp(-j2\pi\frac{k}{N}t)$

⇒結局行列の計算になる

$$\begin{bmatrix} F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi t/N) \\ \vdots \\ \exp(-j(N-1)/N\cdot 2\pi t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \end{bmatrix}$$



一般に行列×ベクトルは行列サイズの数だけ乗算が必要（N×Nのオーダー）
しかし，
•exp(-j2πk/N・t)は繰り返し構造をとる
•特にNが2の階乗の時，行列全体にフラクタル的な繰返し構造が生じる
という特徴をうまく使うと，乗算回数を抑えられる(N×logNのオーダー)
リアルタイムにフーリエ変換を行う必要がある応用に必須．

振幅，パワースペクトラム，位相

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\exp(-j\omega t)dt$$ 一般的に複素数の関数

$$\omega=2\pi f$$ 角周波数

角周波数ωでの振幅

角周波数ωでのパワースペクトラム

角周波数ωでの位相

パワースペクトラムで、元の信号がもつ周波数成分を観察できる

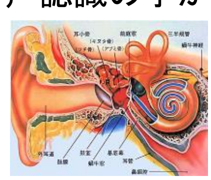
パワースペクトラムの観察

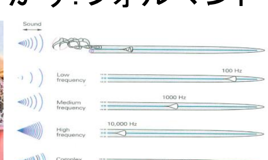
スペクトラム・アナライザ

低　周波数　高

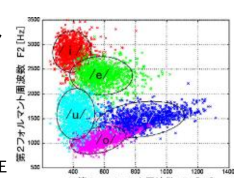
アイウエオ

音声認識の手がかり：フォルマント





- 母音は主な周波数（第一フォルマント）と，次に多い周波数（第二フォルマント）で認識
- 関連話題
  - フォルマント合成による合成音声
  - 音声のピッチ変換時のフォルマント補正



(参考)しゃべるピアノ

Youtube: Speaking Piano
http://www.youtube.com/watch?v=muCPjK4nGY4&feature=player_embedded

レポート

次のサンプルを参考に，同じ周期の正弦波，矩形波，三角波をフーリエ変換し，
パワースペクトルを観察，比較せよ．
レポートでは
●3つのパワースペクトルを一つのグラフに表示する一つのソースコード
●そこからわかったこと，すなわち音色の違いの原因の考察をメール本文に

```
//一周期100の矩形波(ただし直流成分を無くすため平均値0としている)
wave=[ones(1,50), zeros(1,50)] - 0.5;

//5回繰り返す（回数は適当）
wave = [wave,wave,wave,wave,wave];

//フーリエ変換
fourier = fft(wave);

//パワースペクトルを計算
power_spec = fourier .* conj(fourier);

//計算結果を表示
plot(power_spec);
```

レポート課題

- 授業ではScilabを使えることを前提に課題を出します．
- 何かこだわりがあれば，他の物でもかまいません．
  （Matlab, Mathematica, Octave, MATX, Excel,...)
- 課題はほぼ毎回出します．
- Scilabを使ったレポートは下記にメールで提出してください．

report@kaji-lab.jp

メールのタイトルに学籍番号と名前を書いてください．
「0912345 山田太郎　第1回レポート」

レポートの締め切りは次の週の授業開始前