



応用数学第一

第十一回

梶本裕之



日程

講義番号	講義日	講義内容	pdf	video	レポート締め切り
1	10/5	周期関数、フーリエ級数の定義	[pdf](2022年版)	video	10/12
2	10/12	フーリエ級数の計算例	[pdf](2022年版)	video	10/19
3	10/19	複素フーリエ級数、直交関数系	[pdf](2022年版)	video	10/26
4	10/26	周期関数のたたみこみ、パーセバルの等式	[pdf](2022年版)	video	11/2
5	11/2	非周期関数、フーリエ変換の定義・計算例	[pdf](2021年版)	video	11/9
6	11/9	フーリエ変換の性質	[pdf](2022年版)	video	11/16
7	11/16	デルタ関数とフーリエ変換、たたみこみのフーリエ変換、パーセバルの等式	[pdf](2022年版)	video	11/23
-	11/23	調布祭準備			
-	11/30	休講日 (クォーター制との調整による)			
-	12/7	中間確認テストとその解説 (前半。現在は大学を予定)	中間確認テスト用問題集	[pdf](2022年版)	
-	12/14	出張による休講			
8	12/21	離散時間信号と離散時間フーリエ変換 (教科書外)	[pdf](2022年版)	video	1/4
9	1/4	離散フーリエ変換 (教科書外)	[pdf](2022年版)	video	1/11
10	1/11	離散フーリエ変換の性質 (教科書外)	[pdf](2022年版)	video	1/18
11	1/18	サンプリング定理	[pdf](2022年版)	video	1/25
12	1/25	ラプラス変換の定義と性質	[pdf](2022年版)	video	2/1
13	2/1	線形常微分方程式のラプラス変換による解法	[pdf](2022年版)	video	2/8
-	2/8	期末確認テストとその解説 (後半。現在は大学を予定)	期末テスト用問題集	[pdf](2022年版)	



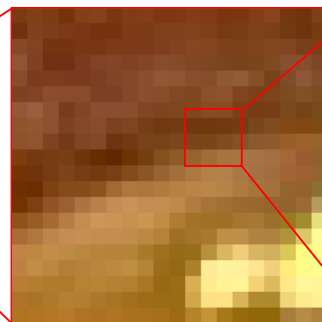
今日の目標

サンプリング定理を（大まかに）理解する

今日は総集編的にいろいろな復習が出てきます。



（復習）（ほとんど）すべての信号は離散的なデータとして扱われる



10	12	16	35	53	44
34	68	43	43	57	45
57	66	12	21	22	66
55	54	15	45	45	64
67	54	32	77	83	22
66	67	21	97	75	34



→ 23,65,67,43,22,90,32,21,55,43

デジタルコンピューティングの圧倒的進化による。

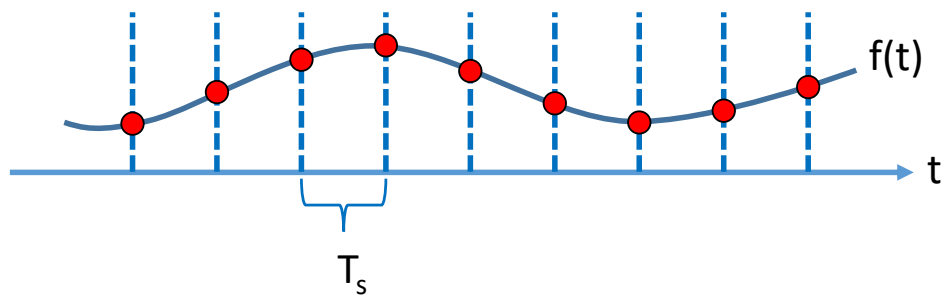
離散的：2つの意味。

- 時間的，空間的な「サンプリング」が離散的
- データのビット数が決まっている（ex. 8bit:-128～127）

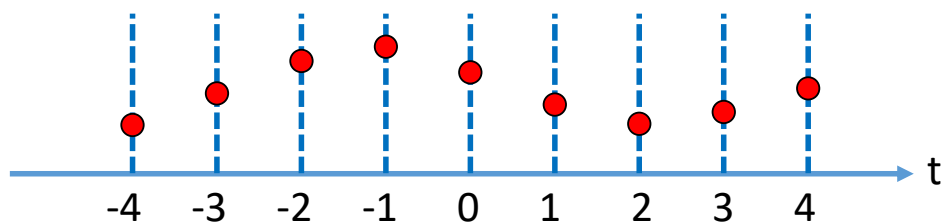
これから扱うのは特に**サンプリングが離散的な信号**。



(復習) サンプリング



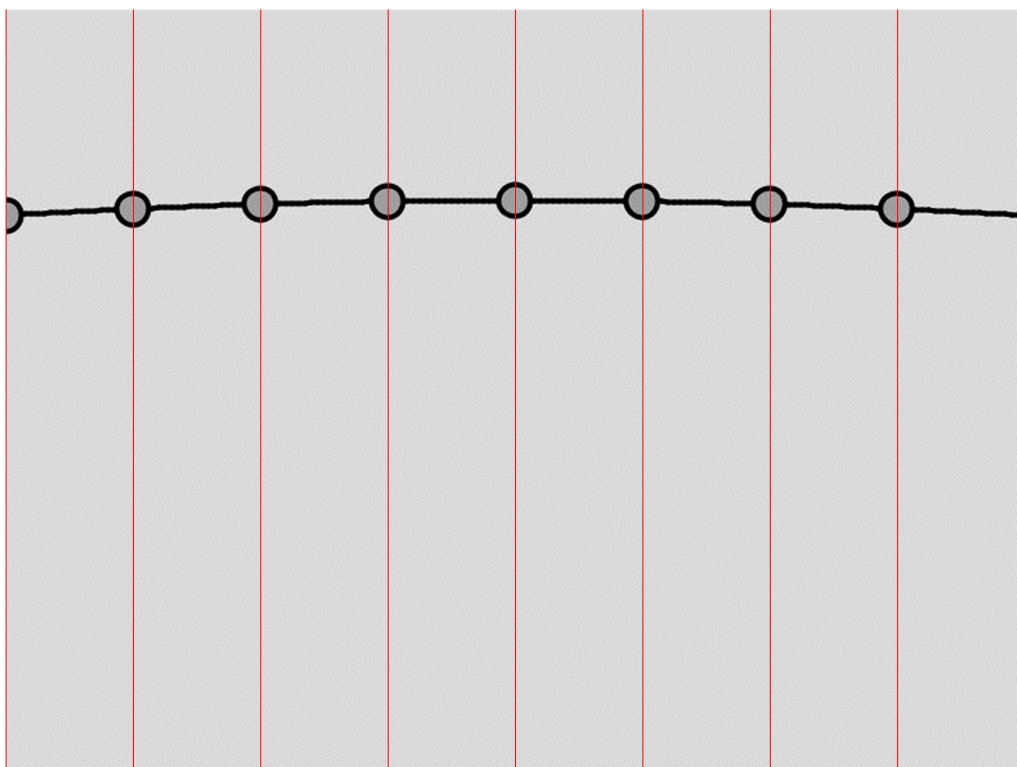
1次元データとしては時間信号が多いので今後 t と表記.
一定周期 T_s (サンプリング周期) で関数の値を取り出す.



$f(-2T_s), f(-1T_s), f(0T_s), f(1T_s), f(2T_s)$, を取り出す.
時間を整数に正規化し, $f(-4), f(-3), \dots, f(3), f(4)$ と表記



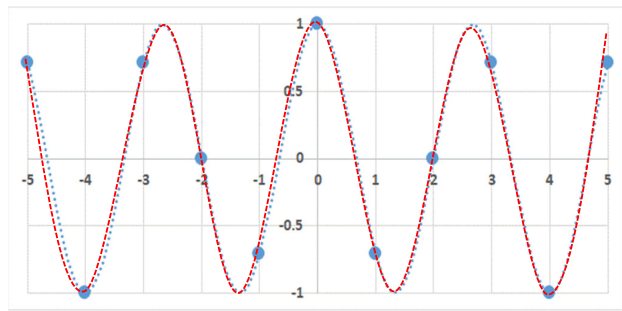
(復習) 動画



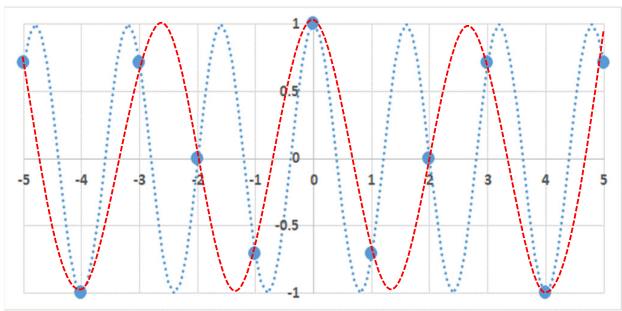
元の波形が正弦波の場合, サンプリングされたデータも正弦波となる
ただし元の波形の周波数が高い場合, サンプリングデータの周波数は元の周波数と一致しない.



今日の疑問：サンプリングはどれだけ細かければ十分か



もとに戻せそう！

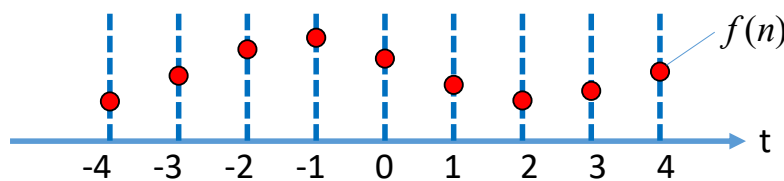


あきらかに戻せない！

直感的に元信号に含まれる周波数とサンプリング間隔で決まる？
これを数式で明らかにする



(復習) サンプリングデータに対するフーリエ変換 (DTFT)

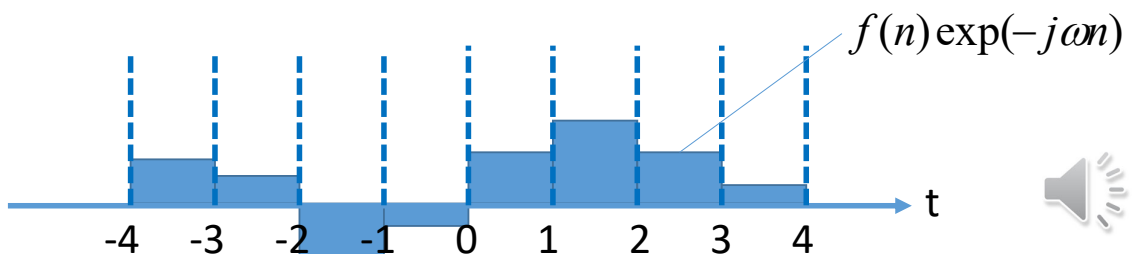


通常のフーリエ変換 $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-j\omega x) dx$

$f(x)$ は離散的な場所でしか値を持たないとする。積分できないので近似的に、 $f(x) \exp(-j\omega x)$ が $n < x < n+1$ の間一定値として、

$$F(\omega) \approx \dots + f(-2) \exp(-j\omega(-2)) + f(-1) \exp(-j\omega(-1)) \\ + f(0) \exp(-j\omega(0)) + f(1) \exp(-j\omega(1)) + f(2) \exp(-j\omega(2)) + \dots$$

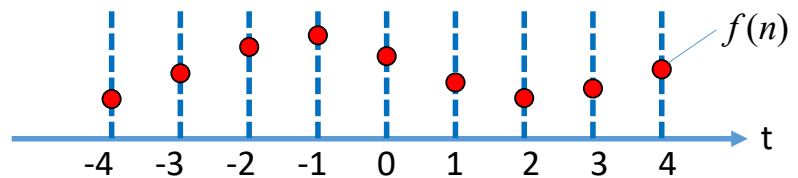
=



(復習) 離散時間フーリエ変換(DTFT)

離散信号 $f(n)$ に対して,

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) \exp(-j\omega n)$$



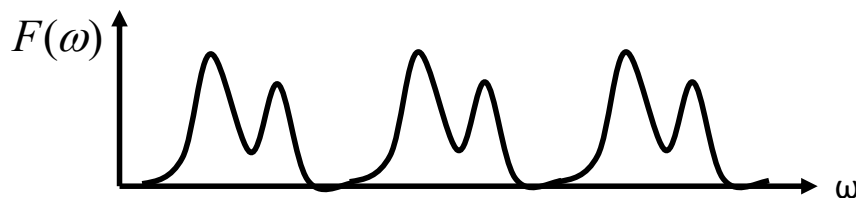
を離散時間フーリエ変換(Discrete-Time Fourier Transform, DTFT)とよぶ.

(サンプリング間隔を1と設定)

連続性: $F(\omega)$ は ω の連続な関数である.

周期性: $F(\omega)$ は ω の周期的な関数であり, その基本周期は 2π である.

$$\because F(\omega + 2\pi) = \quad =$$



離散時間フーリエ変換を観察する

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) \exp(-j\omega n)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{t=-\infty}^{\infty} f_o(t) \exp(-j\omega t) \delta(t-n) dt$$

\because デルタ関数による積分は値を取り出すことに相当

$$= \int_{t=-\infty}^{\infty} f_o(t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-n) \right\} \exp(-j\omega t) dt$$

これは, 二つの関数 $f_o(t)$ と $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-n)$ の積をフーリエ変換した, とみなせる
(o は元の関数という意味)

この計算はどうやれば良いか? \rightarrow 二つの関数の積のフーリエ変換は?



(復習) フーリエ変換同士のたたみ込み積分

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau)G(\omega - \tau)d\tau \text{ を逆フーリエ変換する.}$$

$$h(t) =$$

=

=

=

=

$$\therefore \frac{1}{2\pi}h(t) = f(x)g(x)$$



(復習) フーリエ変換同士のたたみ込み積分

元関数f,g,hが乗算の関係のとき, フーリエ変換F,G,Hは「たたみ込み積分」の関係

$$\frac{1}{2\pi}h(t) = f(x)g(x)$$

のとき,

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau)G(\omega - \tau)d\tau$$

さきほどの式を見直すと,

$$F(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} f_o(t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-n) \right\} \exp(-j\omega t) dt$$

↓

上式の $f(x)$ 上式の $g(x)$

この式の右辺は, $f(x)g(x) = \frac{1}{2\pi}h(t)$ をフーリエ変換したものだから,
上式の $\frac{1}{2\pi}H(\omega)$ に相当するはず!



離散時間フーリエ変換を見直す

$$F(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} f_o(t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-n) \right\} \exp(-j\omega t) dt$$

\downarrow
 右式の $f(x)$ 右式の $g(x)$
 \downarrow
 右式の $\frac{1}{2\pi} h(t)$

$$\frac{1}{2\pi} h(t) = f(x)g(x)$$

のとき,

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau)G(\omega-\tau)d\tau$$

$f_o(x)$ のフーリエ変換を $F_o(\omega)$, $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-n)$ のフーリエ変換を $G(\omega)$ とすれば,

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} H(\omega) =$$

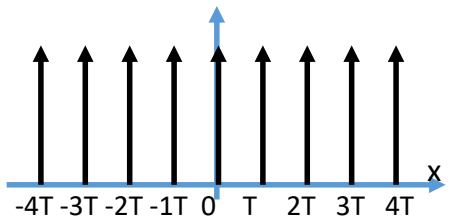
\downarrow
DTFT

\downarrow \downarrow
 元関数の ぐし形関数
 フーリエ のフーリエ
 変換 変換

つまり、DTFTは、元関数のフーリエ変換結果Foに対して、ぐし形関数のフーリエ変換を畳み込み積分したものになる

(復習) ぐし形関数のフーリエ変換

$$\delta_T(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-nT)$$



ぐし形(comb)関数とよぶ。デジタル信号処理に重要。

このフーリエ変換も、ぐし形関数になる (証明はすでにやったので省略)

$$\delta_T(x) \xrightarrow{\text{Fourier}} \frac{2\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2n\pi}{T}\right)$$

サンプリング間隔が1のときは,



離散時間フーリエ変換とフーリエ変換の関係

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_o(\tau) G(\omega - \tau) d\tau \quad G(\omega) = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - 2n\pi)$$

↓
↓
↓

 DTFT結果 元関数のフーリエ ぐし形関数のフーリエ

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_o(\tau) G(\omega - \tau) d\tau$$

=

=

=

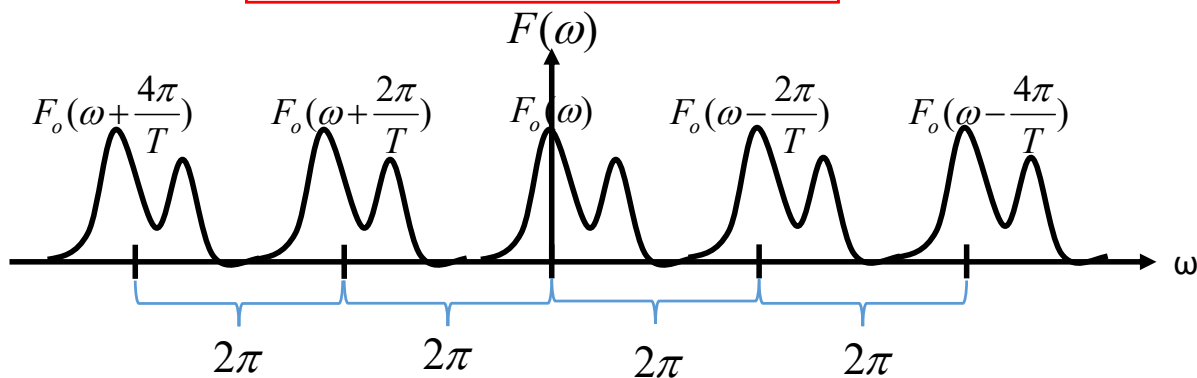
∴デルタ関数の性質



つまり、離散時間フーリエ変換は、元関数のフーリエ変換を重ね合わせたものになる。

離散時間フーリエ変換とフーリエ変換の関係

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_o(\omega - 2\pi n)$$

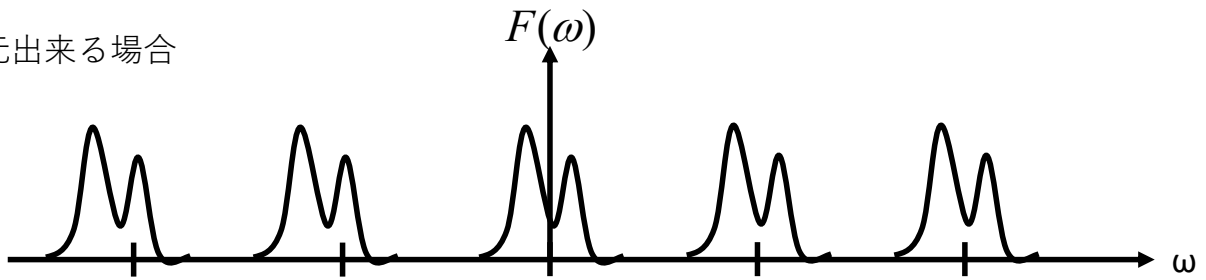


つまり、元関数のフーリエ変換を角周波数 2π ずつずらして重ね合わせたものになる。
(ただしサンプリング間隔を 1 とした)

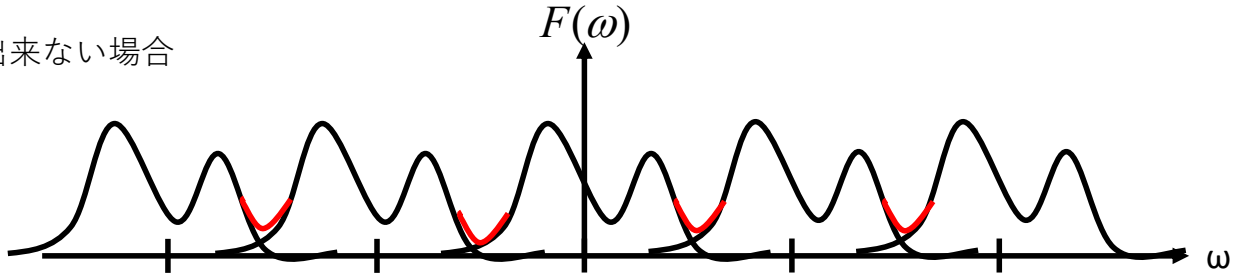


復元可能性

・ 復元出来る場合



・ 出来ない場合

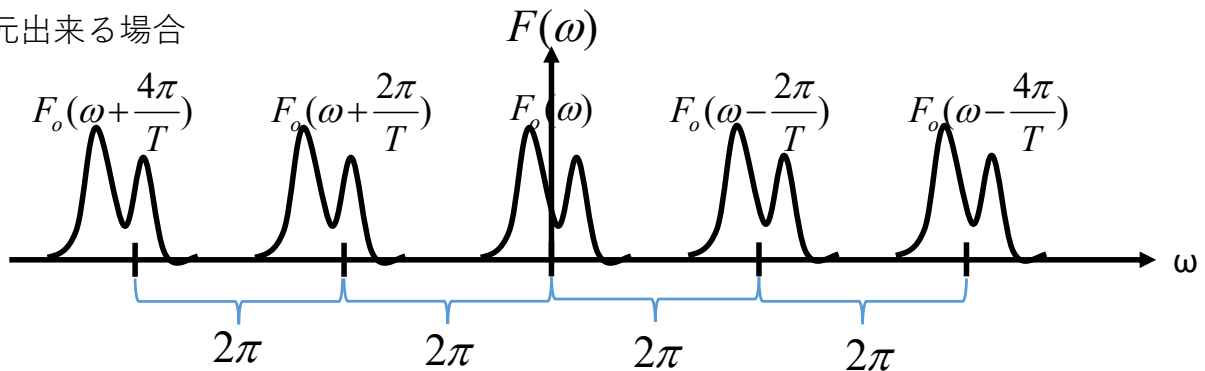


- もとの関数の周波数成分が、角周波数 2π ずつずらした重ね合わせによって「重なり合わない」なら、元関数の情報は維持されているから復元できる。
- 逆に、重なり合ってしまうなら、復元できない



復元可能性

・ 復元出来る場合



元関数の周波数成分が、角周波数 2π ずつずらした重ね合わせで「重なり合わない」 = 元関数の周波数成分が、 $-\pi \sim \pi$ の範囲の成分しか持たない

これまでの議論では、サンプリング間隔 = 1 と置いてきた。つまりサンプリング角周波数は 2π だった。

つまり、

元信号に含まれる周波数成分が、サンプリング周波数の半分未満であれば、
サンプリングされた数値列から元信号が復元が可能である

サンプリング定理

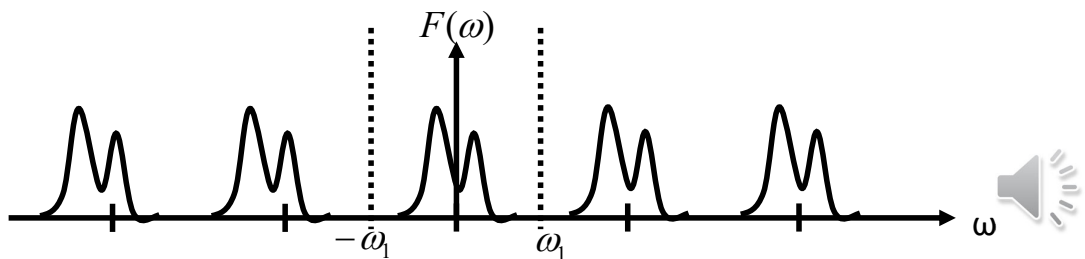


サンプリング定理

関数 $f_o(t)$ が帯域制限信号であるとする。すなわち $F_o(\omega) = 0 \quad (|\omega| > \omega_1)$
ここで、サンプリング間隔 $T < \frac{\pi}{\omega_1}$ ならば、サンプリング値 $f(nT)$ によって、元の関数 $f_o(t)$ を完全に決定することが出来る。

サンプリング間隔の条件 $T < \frac{\pi}{\omega_1}$ を **ナイキスト条件** と呼ぶ。
この時の限界の周波数 $\frac{\omega_1}{2\pi}$ を **ナイキスト周波数** と呼ぶ。

このサンプリング定理は現代情報社会の根幹を支えるもの。



サンプリング定理の例

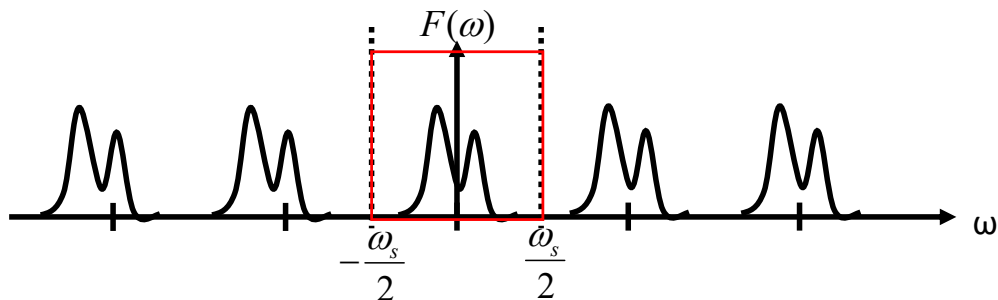


- 人間の可聴域は20kHzまで
→音楽CDのサンプリング周波数は44.1kHz
- 人間の音声は7kHzくらいまで。明瞭に内容がわかるのは4kHzくらいまで
→電話のサンプリング周波数は8kHz

あらかじめ原信号にローパスフィルタを掛け、**帯域を制限**しておくことが必須

復元の方法

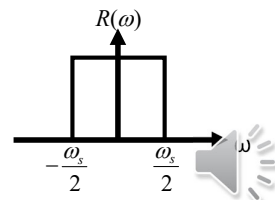
$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_o(\omega - 2\pi n)$$



サンプリング定理の意味するところ：この繰り返し周波数信号 $F(\omega)$ の**一つだけを切り出せば**，それがもとの $F_o(\omega)$ であり，逆フーリエ変換でもとの信号に戻るはず。

$$F_o(\omega) = F(\omega) \cdot R(\omega) \quad R(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| < \frac{\omega_s}{2} \\ 0 & |\omega| > \frac{\omega_s}{2} \end{cases} \quad \text{: 単発矩形波}$$

ω_s はサンプリング角周波数で $T = \frac{2\pi}{\omega_s}$



(復習) たたみ込み積分のフーリエ変換

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(x - \tau)d\tau \text{ をフーリエ変換する.}$$

$$H(\omega) =$$

=

=

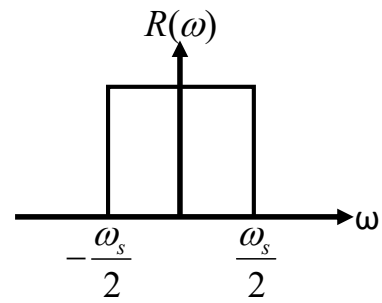
=

=

よって， $H(\omega) = F(\omega)G(\omega)$ となり，たたみ込み積分のフーリエ変換は元の関数のフーリエ変換同士の掛け算になる。

単発矩形波の逆フーリエ変換

$$R(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| < \frac{\omega_s}{2} \\ 0 & |\omega| > \frac{\omega_s}{2} \end{cases}$$

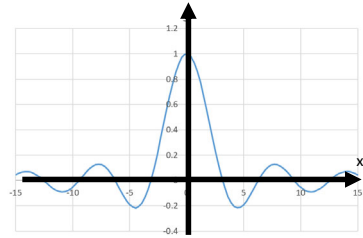


$$r(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega) \exp(j\omega x) d\omega$$

$$=$$

$$=$$

$$= \quad = \quad \therefore T = \frac{2\pi}{\omega_s}$$



フーリエ変換の場合と同様Sinc関数となる。 $x=0$ の場合の扱いは省略



復元の方法

$$F_o(\omega) = F(\omega) \cdot R(\omega) \quad R(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| < \frac{\omega_s}{2} \\ 0 & |\omega| > \frac{\omega_s}{2} \end{cases}$$

両辺を逆フーリエ変換する→たたみ込み！

$$f_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) r(t - \tau) d\tau =$$

$f(x)$ は離散的な場所でしか値を持たない。近似的に、 $nT < x < (n+1)T$ の間一定として、

$$=$$

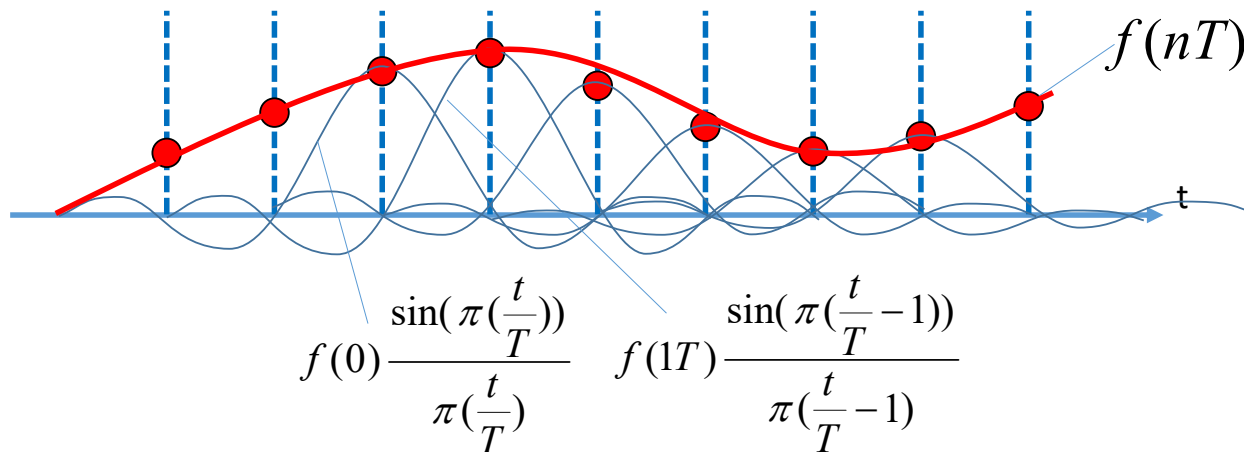
$$=$$



復元の意味：sinc関数の重ね合わせ

$$f_o(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) \frac{\sin(\pi(\frac{t}{T} - n))}{\pi(\frac{t}{T} - n)}$$

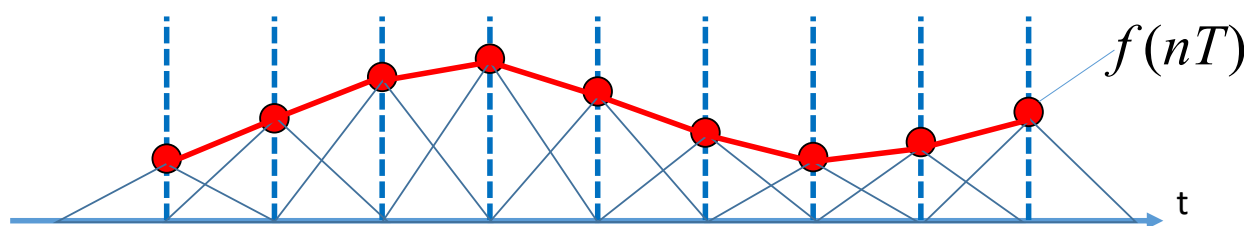
復元の公式



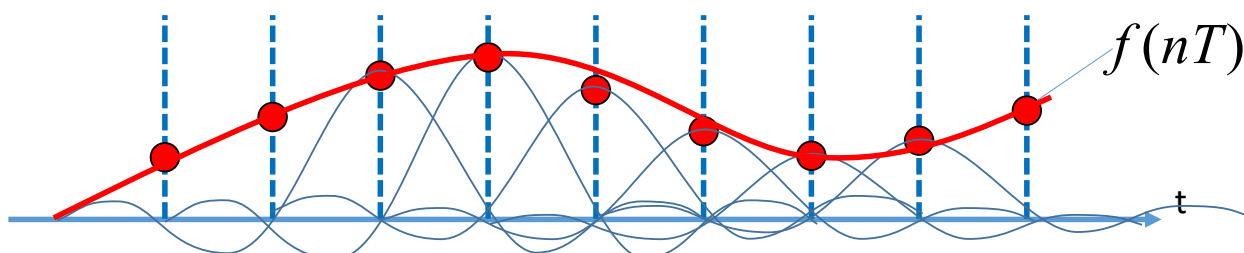
Sinc関数をサンプリング間隔ずつずらしながら、サンプリング点で重ね合わせていくことで元の関数が復元できる



単発三角波の重ね合わせとの比較で理解する



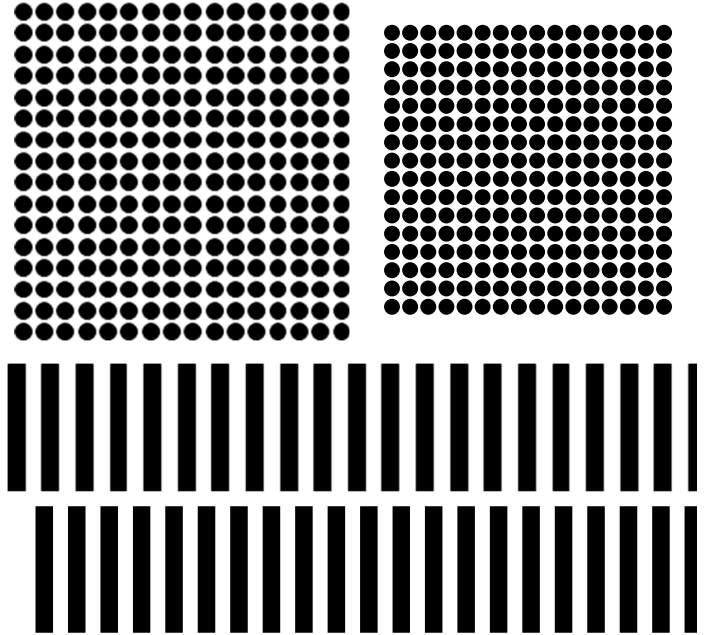
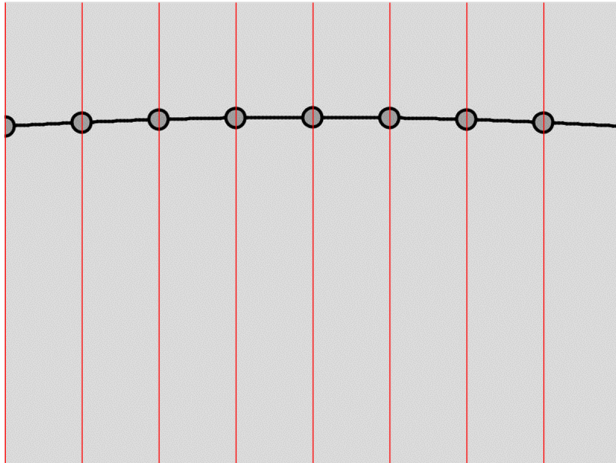
- 各サンプリング点で $f(nT)$ の高さを持ち、隣のサンプリング点で0になるような単発三角波を重ね合わせれば、連続につなげることが出来る（線形補間）



- Sinc関数による重ね合わせも、「各サンプリング点で $f(nT)$ の高さを持ち、隣のサンプリング点で0になる」という性質をもっており、連続かつなめらかにつながる。



エリアシング現象



元の波形の周波数が高い場合、サンプリングデータの周波数は元の周波数と一致しない。
これを**エリアシング現象**と呼ぶ

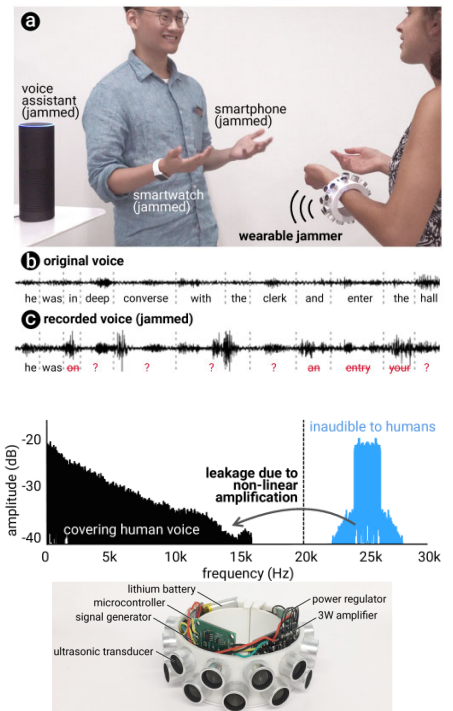
少し空間周波数の異なる縞同士を重ねると、本来とは異なる周波数が出現する縞の間隙から離散的に観察するので、**サンプリングと同義**であり、**エリアシング現象**が生じている。



大学院講義（インタラクティブシステム特論）より

(CHI2020) Wearable Microphone Jamming

Yuxin Chen; Huiying Li; Shan-Yuan Teng; Steven Nagels; Zhijing Li; Pedro Lopes; Ben Y. Zhao; Haitao Zheng



• <https://www.youtube.com/watch?v=qogp8b52uOg>

• ギリギリ非可聴の超音波を流す。サンプリングによって周波数が折り返され、可聴域信号として記録される（エリアシング）。これによって音声の記録を妨害する。



今日のまとめ

- サンプリング定理の概要を理解した。

次回からラプラス変換



今日のレポート

モワレ縞は、近い空間周波数の縞を重ね合わせた時、片方の縞によってもう片方が「サンプリング」されることによって生じるエリアシング現象である。身の回り **(なるべく屋外)** でこのモワレ縞を発見し、撮影すること。例として下の写真を参照。



Moire pattern (Wikipedia)
https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern

レポートは指定のフォームからアップロードする。Googleアカウントによりアップロードするので、大学が提供しているアカウントを使用すること。画像ファイルは5MB以下に抑えること。

今回のレポートはGoogleClassroom内で紹介する可能性があるためプライバシーに配慮すること

提出締め切り：講義日から一週間以内

