

画像情報特論 (4)

- デジタル圧縮 (2)

RD最適化

音声・オーディオ圧縮

情報理工学専攻 甲藤二郎

E-Mail: katto@waseda.jp

RD最適化と各種の応用

R-D最適化 (1)

目的: 与えられたレート制約下のひずみの最小化 (最適化問題)

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & D(\pi) \\ \text{subject to} & R(\pi) \leq R_{\max} \end{array}$$

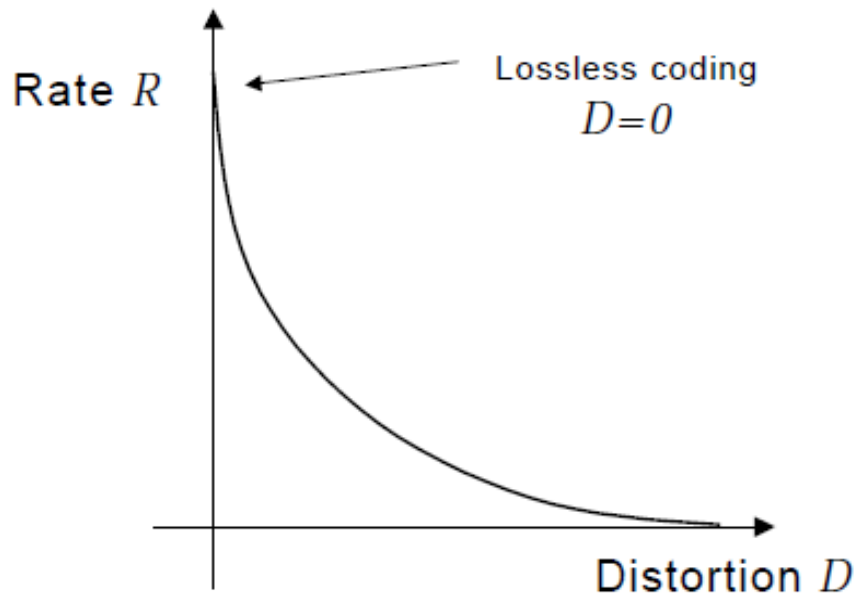
← すべてのデジタル圧縮の基本

D : Distortion (ひずみ)

R : Rate (符号量)

R_{\max} : 最大レート (制約条件)

π : パラメータ



R-D最適化 (2)

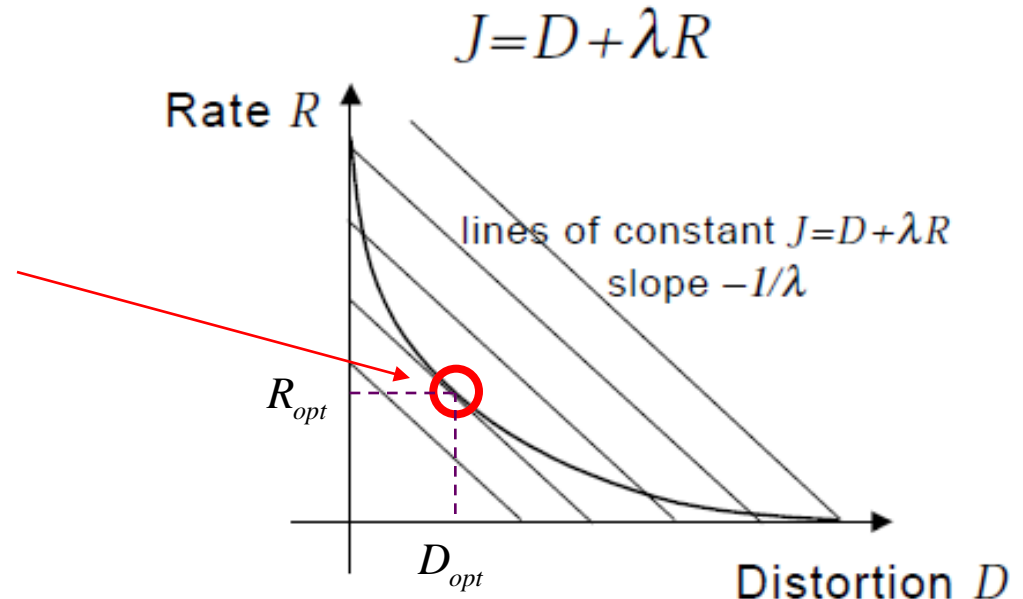
解法例：ラグランジュの未定乗数法

$$\text{minimize} \quad J = D(\pi) + \lambda \cdot R(\pi)$$

λ : ラグランジュの未定乗数

R で微分すると、極小値では
以下が成立

$$\frac{dJ}{dR} = \frac{dD}{dR} + \lambda = 0$$



R-D最適化 (3)

具体例: DCT変換係数への量子化ビット割り当ての最適化

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \sigma_q^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sigma_{qk}^2 \\ \text{subject to} \quad & R = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} R_k \leq R_{\max} \end{aligned}$$

k : 変換係数のインデクス

σ_q^2 : 量子化誤差分散 (ひずみ)

σ_k^2 : 変換係数 k の信号分散

σ_{qk}^2 : 変換係数 k の量子化誤差分散

R_k : 変換係数 k のレート (符号量)

$$J = \sigma_q^2 + \lambda \cdot R$$

$$\frac{\partial J}{\partial R_k} = \frac{\partial \sigma_q^2}{\partial R_k} + \lambda \cdot \frac{1}{N} = 0$$

$$\leftarrow \sigma_{qk}^2 = \varepsilon^2 2^{-2R_k} \sigma_k^2$$

(情報理論のRDモデル)

$$R_{k,\text{opt}} = R + \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_k^2}{\left[\prod_{j=0}^{N-1} \sigma_j^2 \right]^{1/N}}$$

$$\sigma_{q,\text{opt}}^2 = (\text{自習})$$

R-D最適化 (4)

RD-最適化の種々の拡張

$$\text{minimize} \quad J = D(\pi) + \lambda \cdot R(\pi)$$

1. 動き補償における予測モード・動きベクトルの選択
2. マクロブロック量子化におけるモード選択
3. 複数参照フレームにおける参照フレーム選択
4. Rate-Distortion 最適化ストリーミング (RaDiO)
5. Congestion-Distortion 最適化ストリーミング (CoDiO)
6. ひずみ・経路ジョイント最適化
7. ひずみ・消費電力ジョイント最適化

R-D最適化 (5)

動き補償における予測モード・動きベクトルの選択

$$\text{minimize } J = D(\pi) + \lambda \cdot R(\pi)$$

D: 動き補償予測誤差

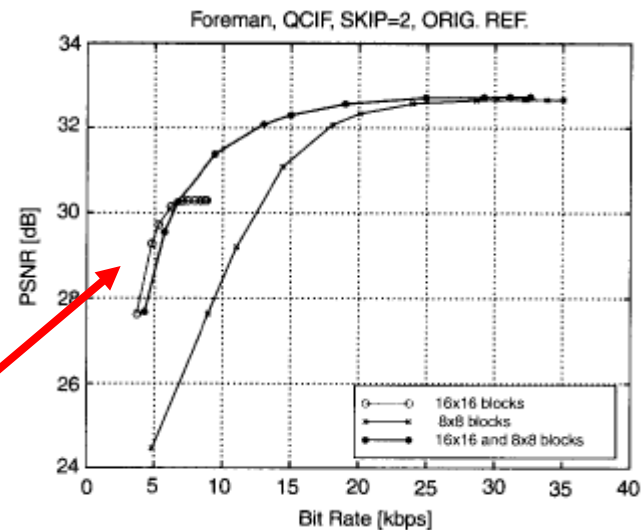
R: 予測モードと動きベクトルの送信に必要なオーバーヘッド

【予測モード】

Variable block-size: 16x16 ~ 4x4

• Pel-accuracy: integer, 1/2 pel, 1/4 pel

ブロックサイズが小さいほど予測効率は上がるが
オーバーヘッドが増える ⇒ RD-最適化



R-D最適化 (6)

マクロブロック量子化におけるモード選択

$$\text{minimize } J = D(\pi) + \lambda \cdot R(\pi)$$

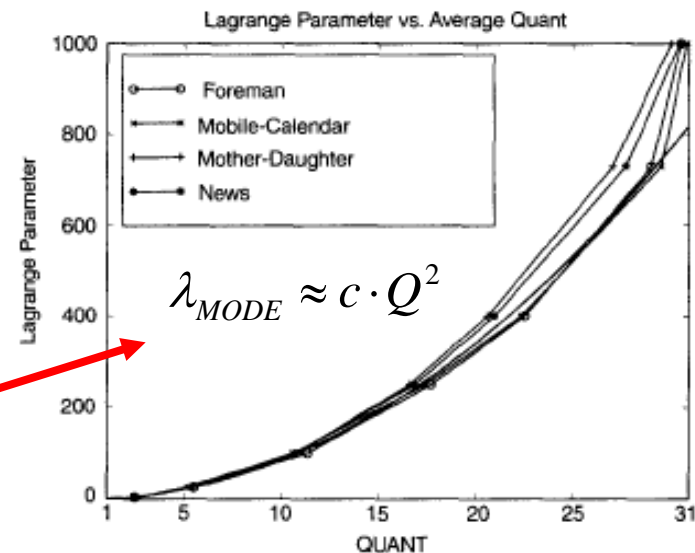
D: 量子化誤差分散

R: マクロブロックのモードと量子化結果の送信に必要な符号量

【マクロブロック・モード】

- Intra: 種々のイントラ予測
- Inter: 種々のインター予測
- Skip: マクロブロック・スキップ(モード情報のみ)

量子化パラメータ Q と λ の関係 (実測値)



R-D最適化 (7)

複数参照フレームにおける参照フレーム選択

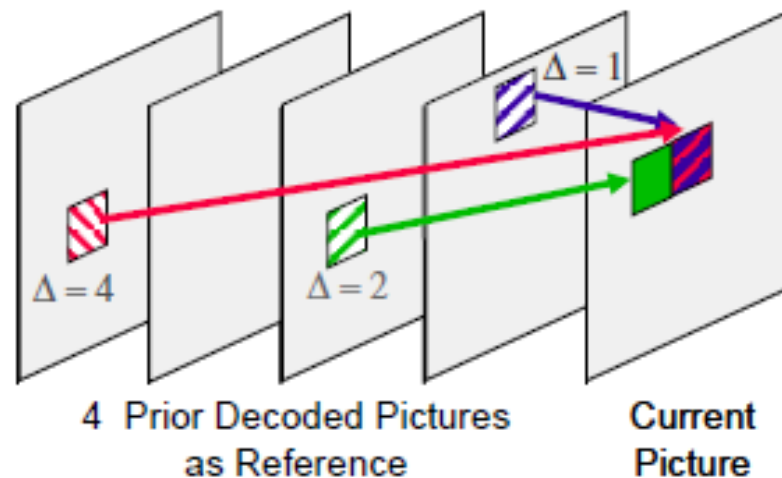
$$\text{minimize } J = D(\pi) + \lambda \cdot R(\pi)$$

D: 量子化誤差分散

R: 参照ピクチャの指定と動きベクトルの送信に必要な符号量

【実験報告例】

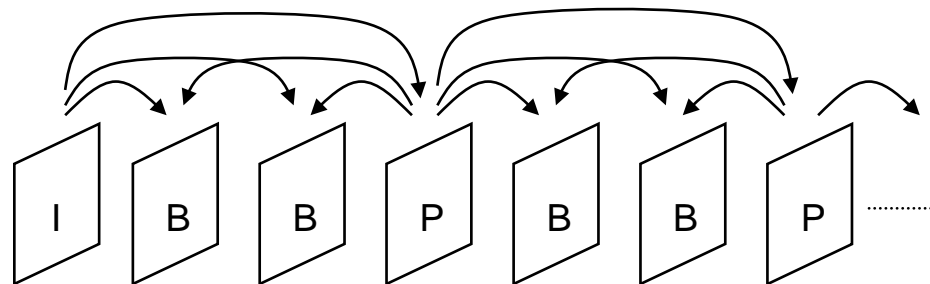
参照枚数を50枚にすることで動き補償予測誤差を1~2dB改善できたが、オーバーヘッドも30%増加 ⇒ RD-最適化の対象



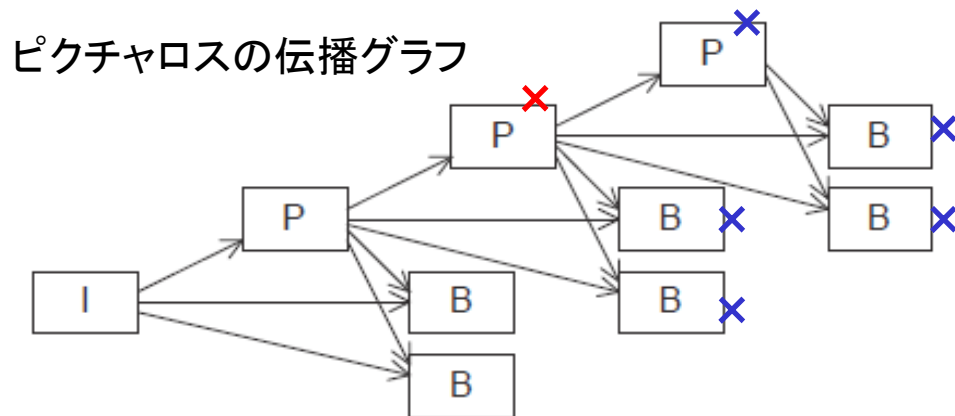
R-D最適化 (8)

RD-Optimized ストリーミング (1) RaDiO

IPB 予測



Dependency graph



Transmission policy

$$\pi = [1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0]$$

ピクチャ送信パターン

1: 送信する, 0: 送信しない

R-D最適化 (9)

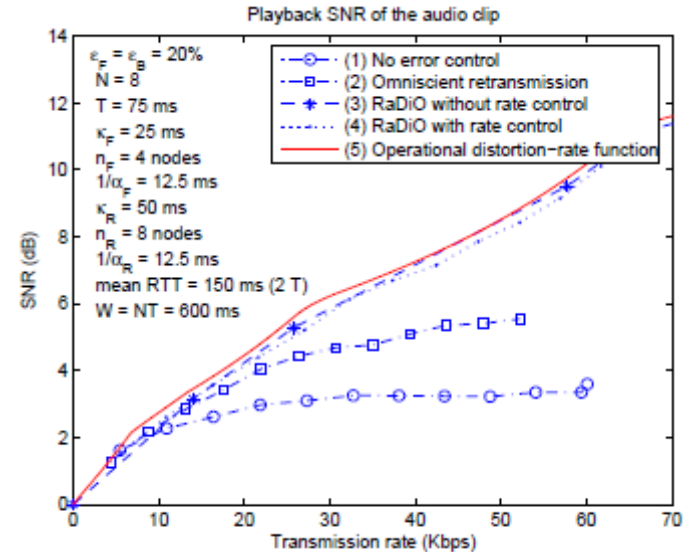
RD-Optimized ストリーミング (2)

minimize $J = D(\pi) + \lambda \cdot R(\pi)$

$$D(\pi) = D_0 - \sum_l \Delta D_l \prod_{l' \leq l} (1 - \varepsilon(\pi_{l'}))$$

$$R(\pi) = \sum_l \rho(\pi_l) B_l$$

ロスの発生を前提に、I ピクチャ、P ピクチャから優先的に送信する戦略の数学基盤



- D_0 : 何も送らないときのひずみ (最悪値)
- ΔD_l : ピクチャ l の復号で改善されるひずみ
- $\varepsilon(\pi_l)$: ピクチャ l の到着率 (復号される確率)
- $\rho(\pi_l)$: ピクチャ l の送信回数 (再送を含む)
- B_l : ピクチャ l の符号量

R-D最適化 (10)

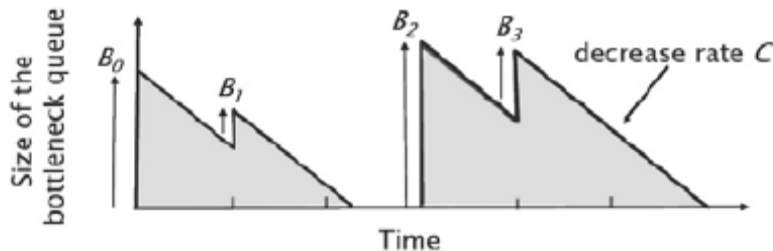
“Congestion-Distortion” Optimized ストリーミング: CoDiO

minimize $J = D(\pi) + \lambda \cdot X(\pi)$

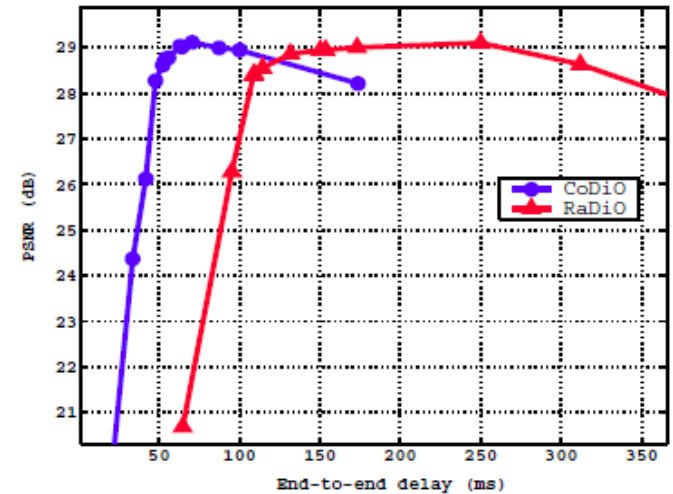


$$D(\pi) = D_0 - \sum_l \Delta D_l \prod_{l' \leq l} (1 - \varepsilon(\pi_{l'}))$$

$$X(\pi) = \text{delay} \cong \sum_l \frac{\rho(\pi_l) B_l}{C}$$



- D_0 : 何も送らないときのひずみ (最悪値)
- ΔD_l : ピクチャ l の復号で改善されるひずみ
- $\varepsilon(\pi_l)$: ピクチャ l の到着率 (復号される確率)
- $\rho(\pi_l)$: ピクチャ l の送信有無 (0 or 1)
- B_l : ピクチャ l の符号量
- C : ボトルネックリンクのキャパシティ



R-D最適化 (11)

ひずみ・経路ジョイント最適化 (1)

リンク集合: $L = \{(i, j) \mid \text{node } j \text{ can hear node } i\}$

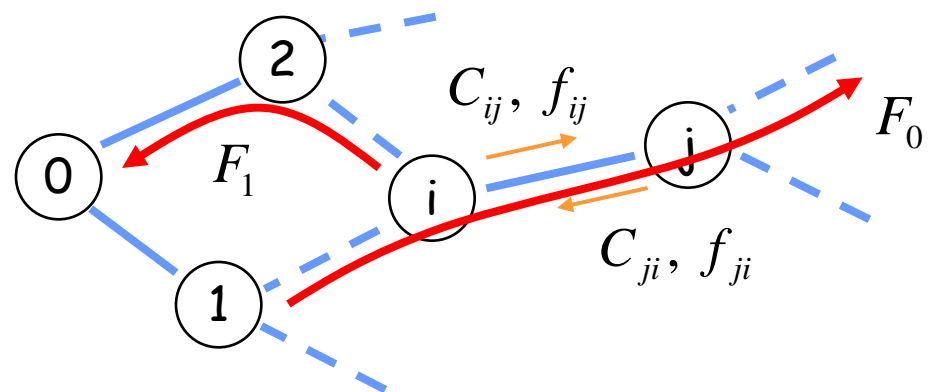
リンクキャパシティ: $C = \{C_{ij} \mid (i, j) \in L\}$

フロー集合: $F = \{f_{ij} \mid (i, j) \in L\}$

ストリーム集合: $S = \{s \mid \text{collection of streams}\}$

ストリーム s のフロー集合: $F_s = \{f_{ij}^s \mid (i, j) \in L\}$

ストリーム s のビットレート: R_s



R-D最適化 (12)

ひずみ・経路ジョイント最適化 (2)

$$\text{minimize } J = D(\pi) + \lambda \cdot X(\pi)$$

D: ビデオ品質(量子化誤差分散など)

X: ネットワーク輻輳状況(遅延など)

$$e.g. \quad X = \sum_{(i,j) \in L} \frac{f_{ij}}{C_{ij} - f_{ij}}$$

レート拘束:

$$0 \leq f_{ij} = \sum_s f_{ij}^s < C_{ij}$$

その他の拘束条件

ループ回避:

$$\sum_{k:(i,k) \in L} f_{ik}^s - \sum_{k:(k,i) \in L} f_{ki}^s = \begin{cases} -R_s & (i = src) \\ R_s & (i = dst) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$

干渉緩和(無線の場合):

$$\frac{f_{ij}}{C_{ij}} + \sum_{(m,n)/(i,j)} \frac{f_{mn}}{C_{mn}} \leq 1$$

R-D最適化 (13)

ひずみ・消費電力ジョイント最適化

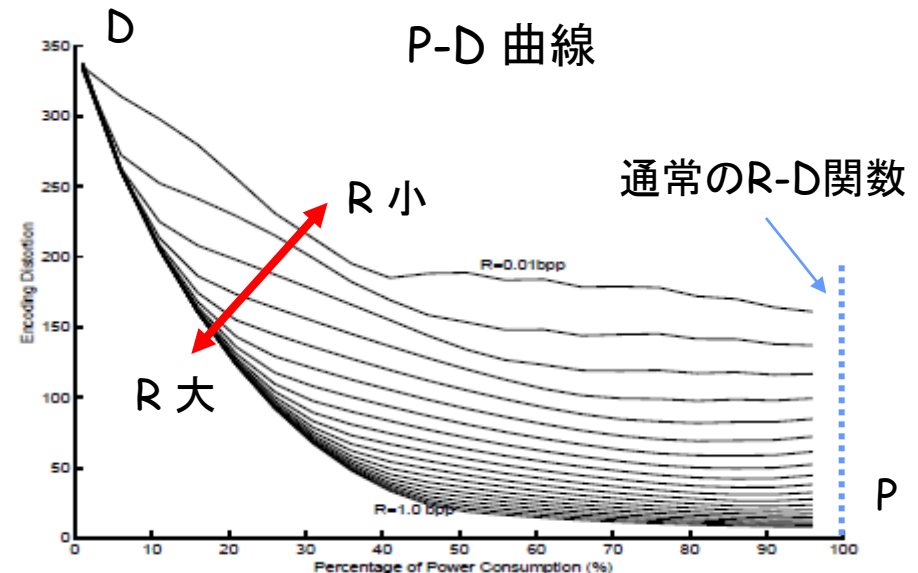
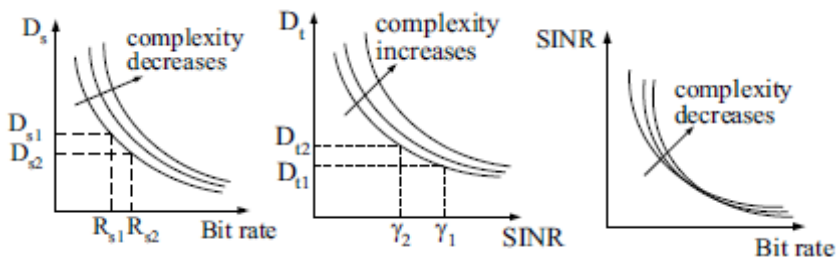
$$\text{minimize } J = D(R, \pi) + \lambda \cdot P(\pi)$$

D: ビデオ品質 (量子化誤差分散など)

R: 圧縮符号量

P: 消費電力 (圧縮 + 送信)

π : 処理の複雑度 (complexity)



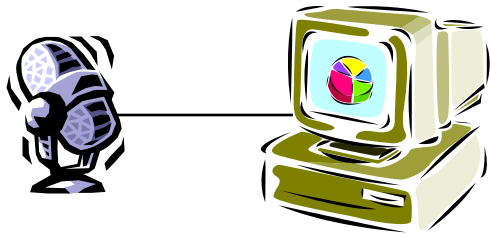
音声・オーディオ圧縮

デジタルオーディオ

• キャプチャ&圧縮

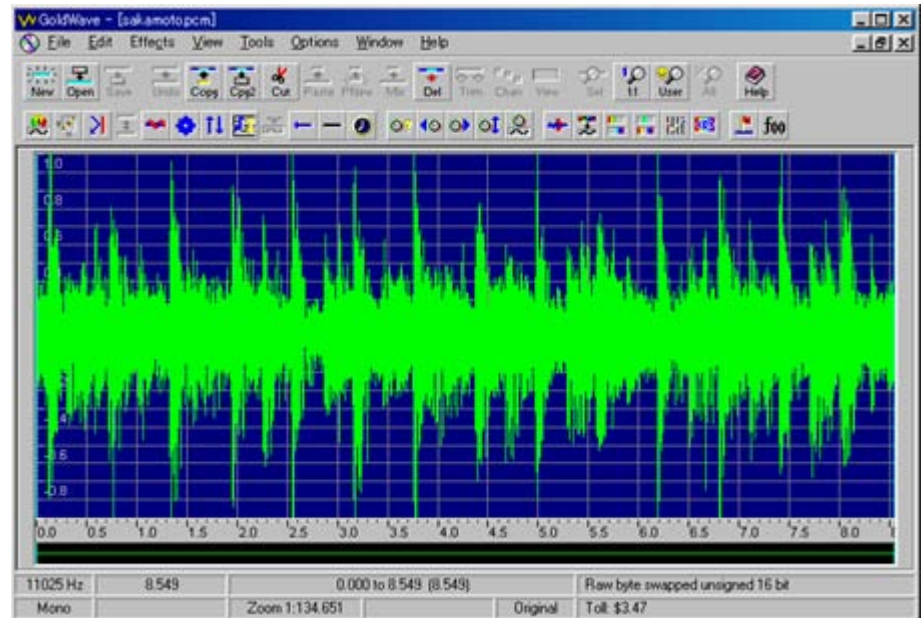
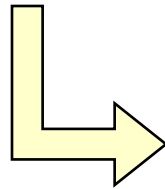
典型的なサンプリングレート

マイク サウンドキャプチャ

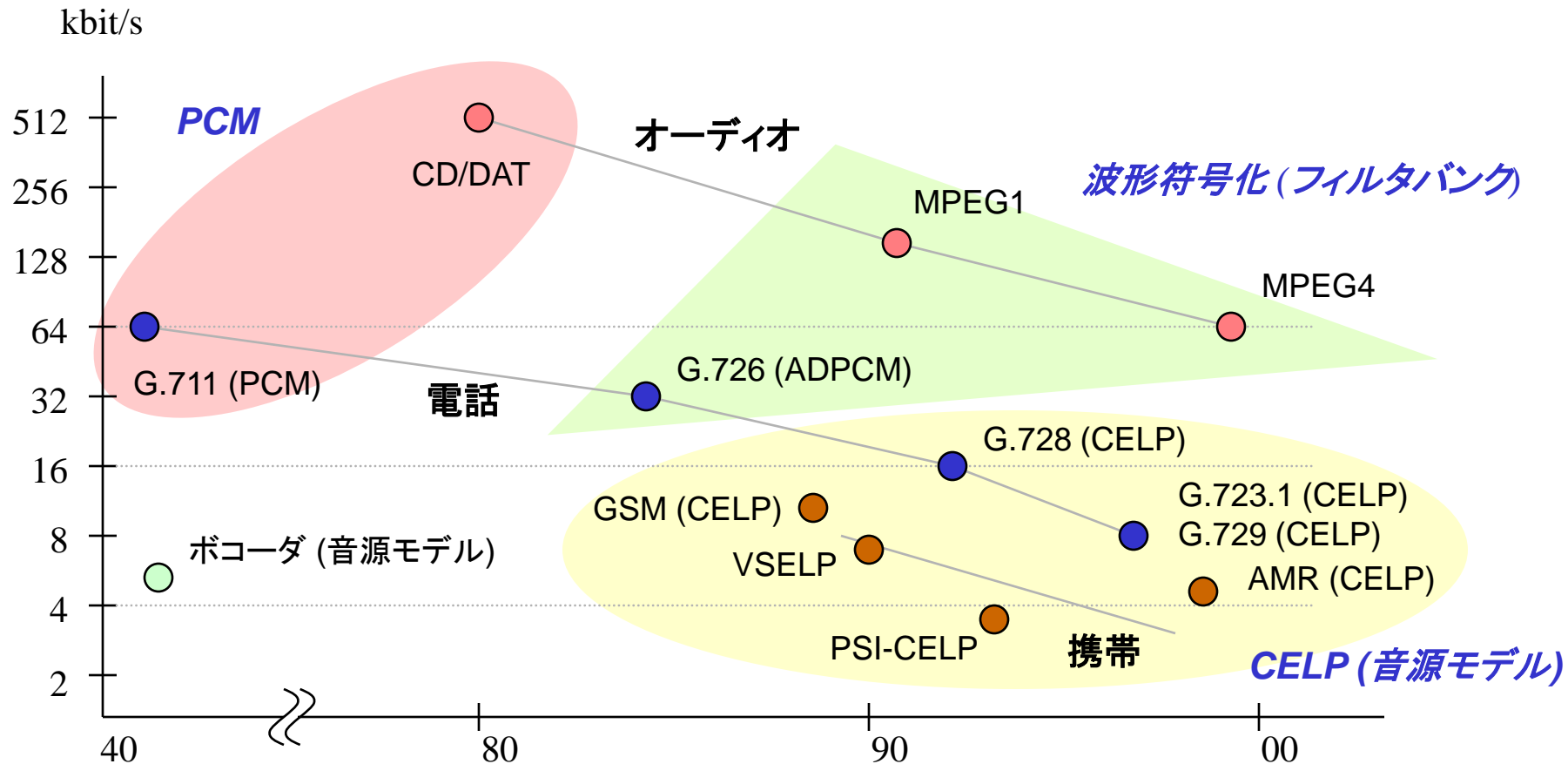


音声:
8 kHz、8 ビット

オーディオ:
22.5, 44.1, 48 kHz、16 ビット



音声・オーディオ符号化の歴史

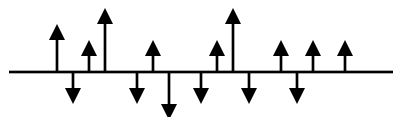
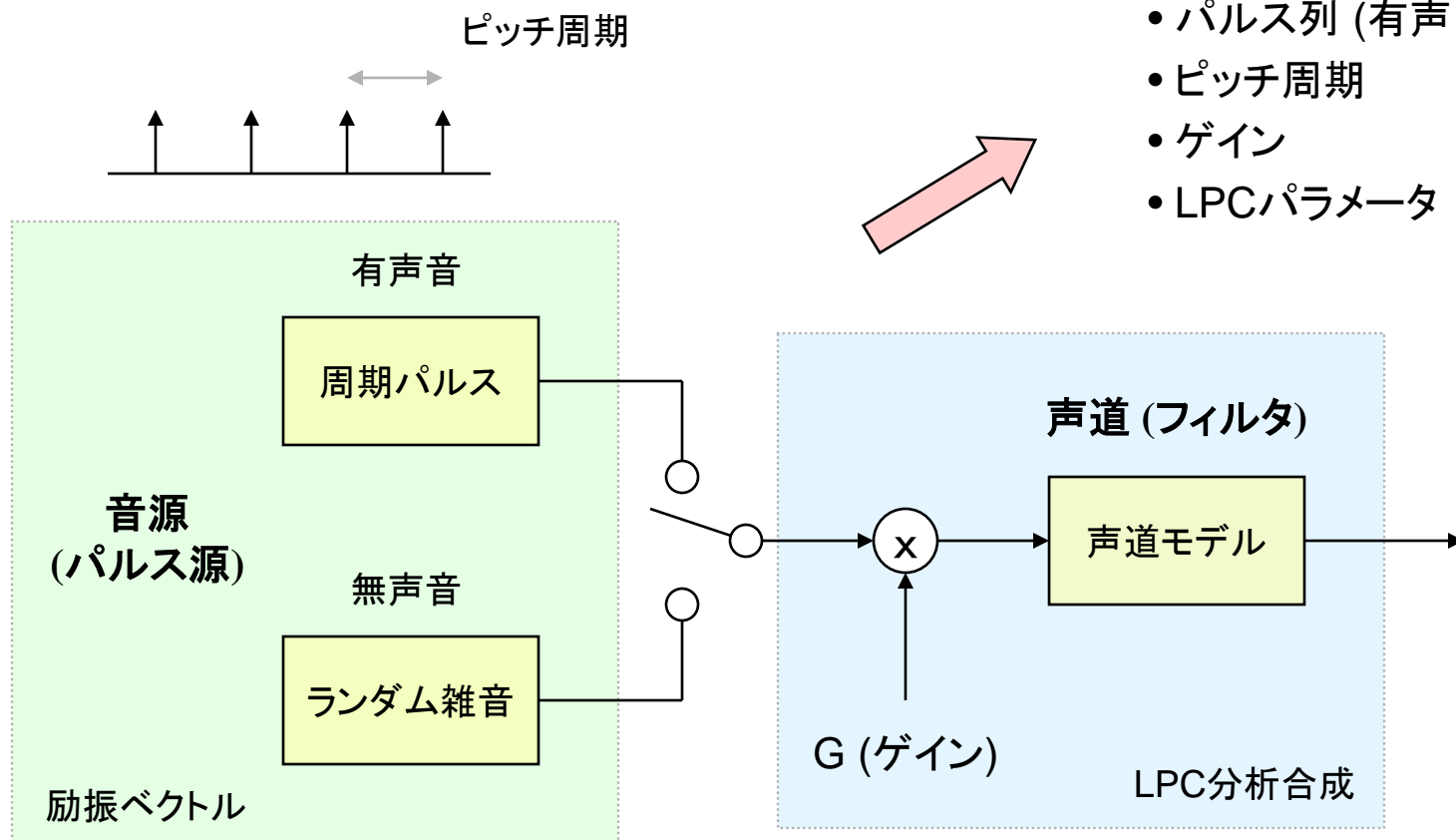


音声符号化 (1)

• 音声合成モデル

以下のパラメータを推定 (予測) して送信する

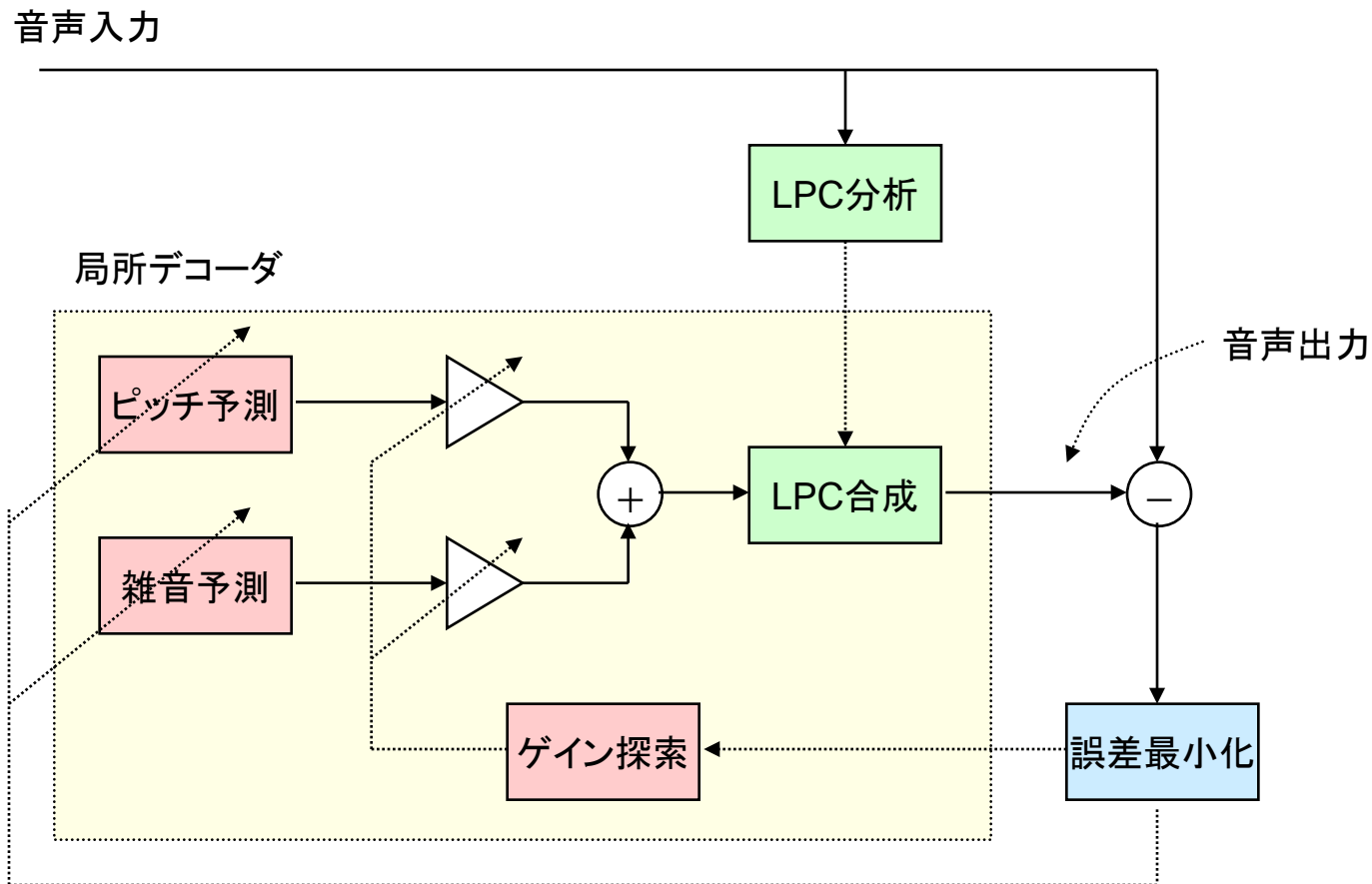
- パルス列 (有声・無声)
- ピッチ周期
- ゲイン
- LPCパラメータ



音声符号化 (2)

CELP: Code Excitation Linear Prediction

• CELP



音声符号化 (3)

LPC: Linear Prediction Coding

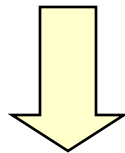
• LPC 分析 (線形予測分析) : 声道モデル

$$s(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-k) + \underline{G \cdot u(n)}$$

過去の k 個のサンプル値から線形予測

(注) 通常、画像のモデルでは雑音と扱う

$s(n)$: 音声サンプル
 a_k : LPC係数
 p : LPC分析次数
 G : 励振ゲイン
 $u(n)$: 正規化励振項



予測誤差二乗平均の最小化

$$\frac{\partial e(n)}{\partial a_k} = 0$$

$$\sum_{k=1}^p r_n(i-k) \hat{a}_k = r_n(i)$$

$r(k)$: 自己相関係数
 \hat{a}_k : 推定LPC係数

自己相関法 (Durbinのアルゴリズム)

音声符号化 (4)

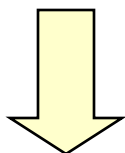
• ベクトル量子化 : 音源パルス列

励振ベクトルとゲインの探索:

$$d = \| \mathbf{x} - gA\mathbf{c} \| \rightarrow \min$$

となる励振ベクトルとゲインを探索

さまざまな探索手法 ...

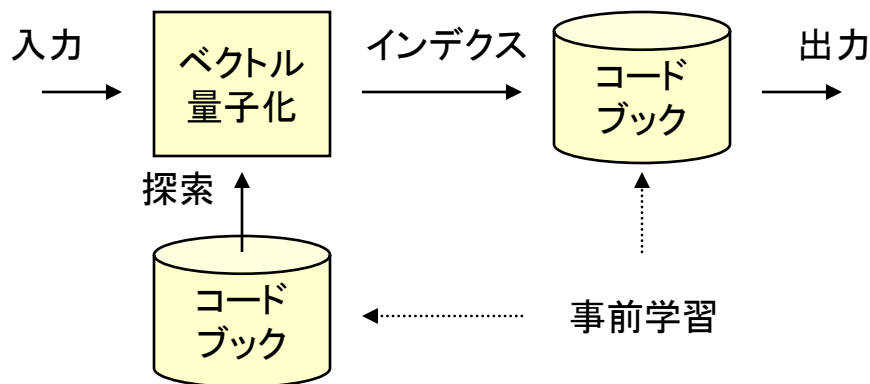


励振ベクトル → ベクトル量子化

ゲイン → スカラー量子化

(声道パラメータ → ベクトル量子化)

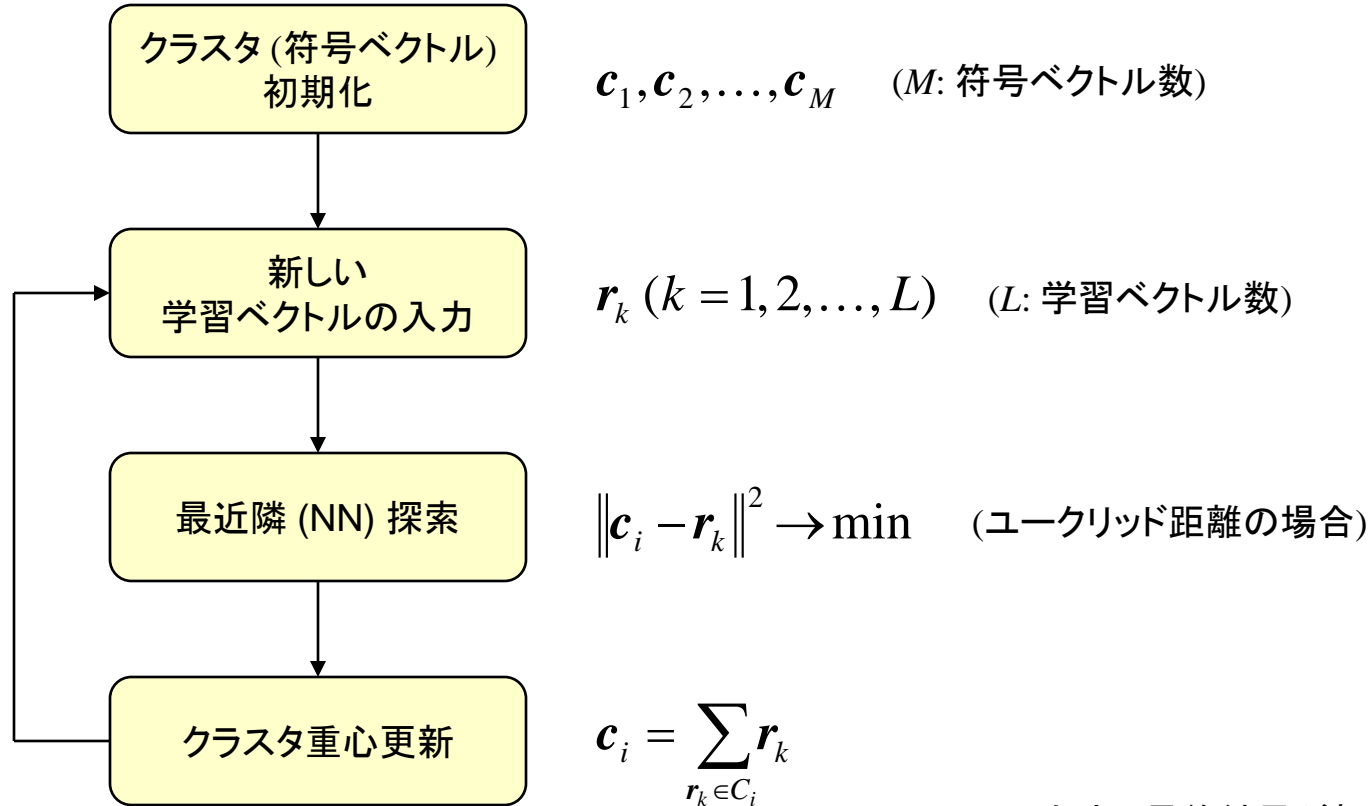
d : ひずみ
 x : 目標ベクトル (入力音声)
 A : LPC係数行列
 g : ゲイン
 c : 励振ベクトル (パルス列)



音声符号化 (5)

•ベクトル量子化 :コードブックの学習 (1)

K-平均アルゴリズム (一般化 Lloyd アルゴリズム)

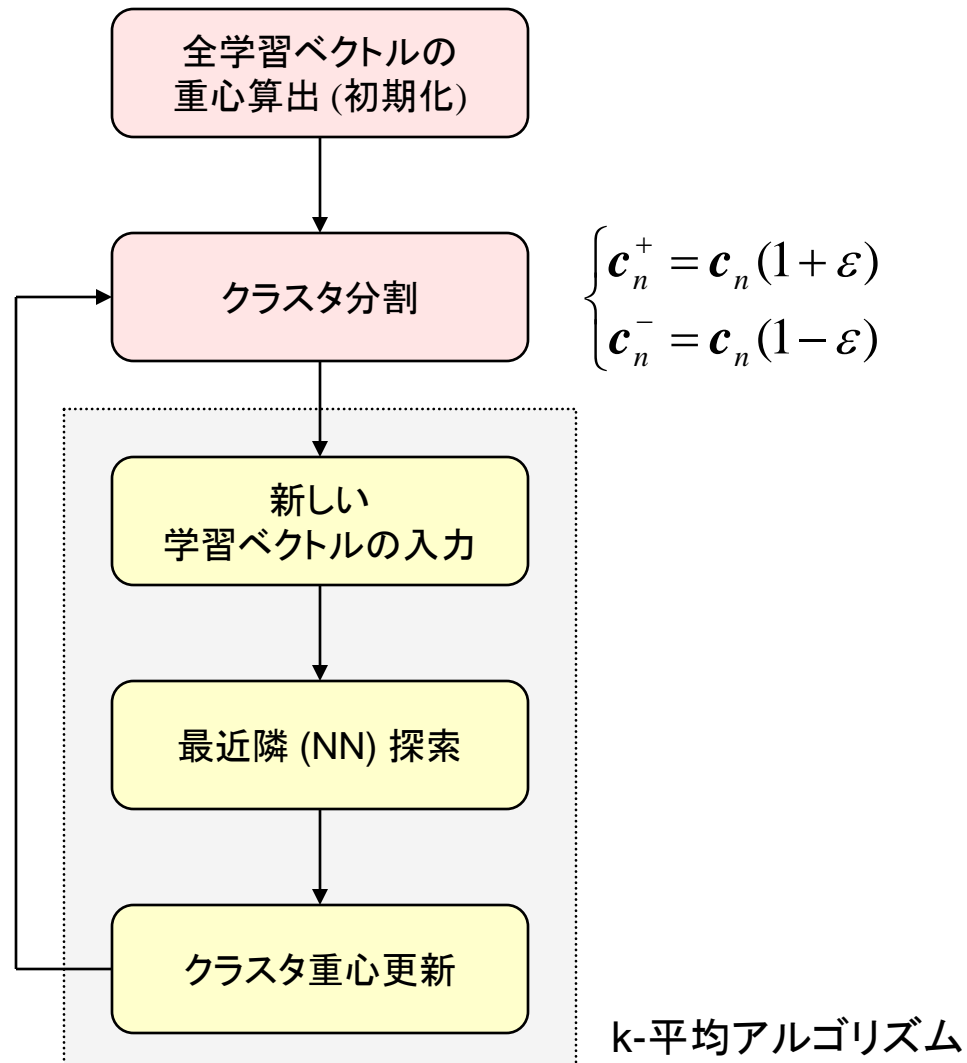


欠点: 最終結果が初期ベクトルに依存

音声符号化 (6)

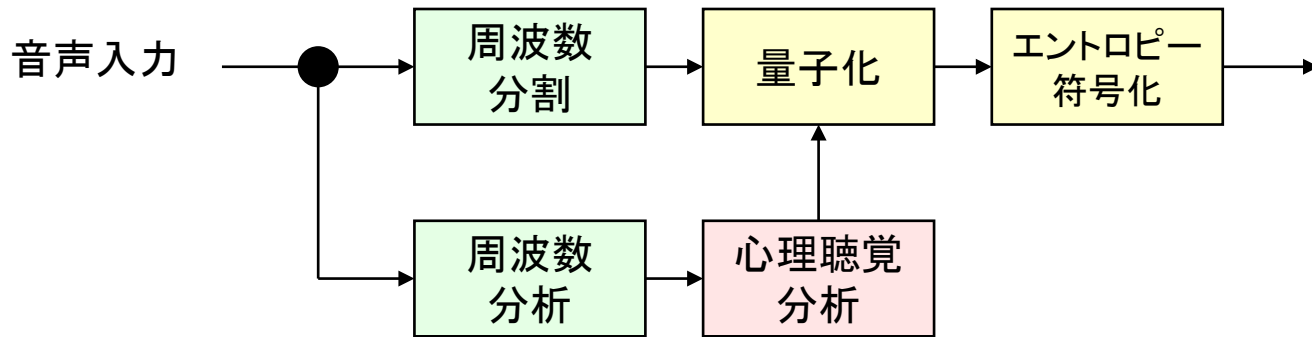
•ベクトル量子化 :コードブックの学習 (2)

LBG アルゴリズム



オーディオ符号化 (1)

• オーディオ符号化の基本

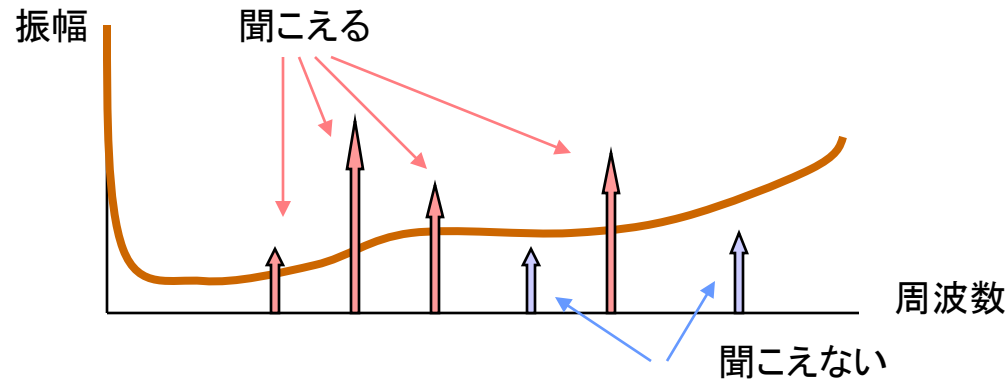


- 周波数分割、周波数分析: FFT、サブバンド分割 (QMF)、MDCT
- 心理聴覚分析: 絶対閾値とマスキング
- 量子化、エントロピー符号化: スカラー量子化とハフマン符号

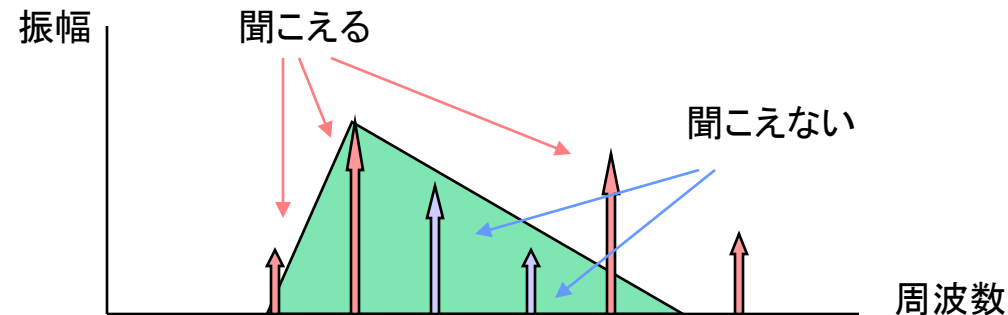
オーディオ符号化 (2)

• 心理聴覚分析

絶対閾値：人間は絶対可聴閾値よりも大きな音しか知覚できない

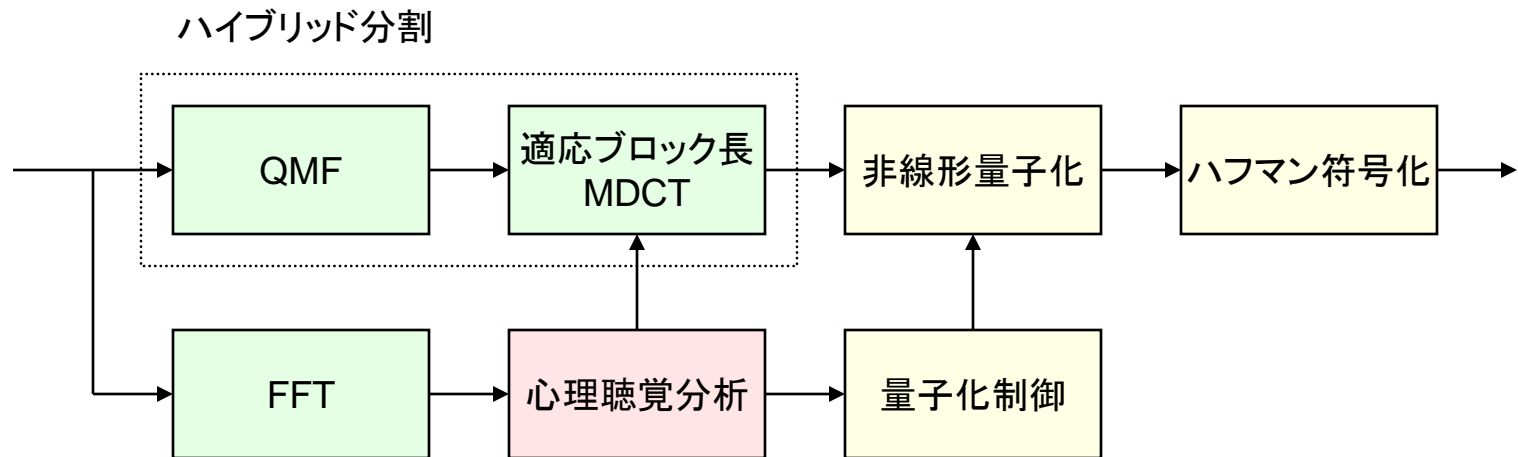


マスキング (相対閾値)：大きな音の周波数の近傍の小さな音の周波数は知覚できない

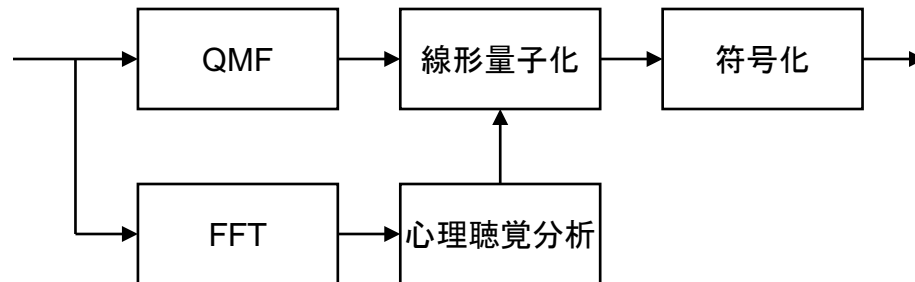


オーディオ符号化 (3)

- MP3 (MPEG-1 Layer III)

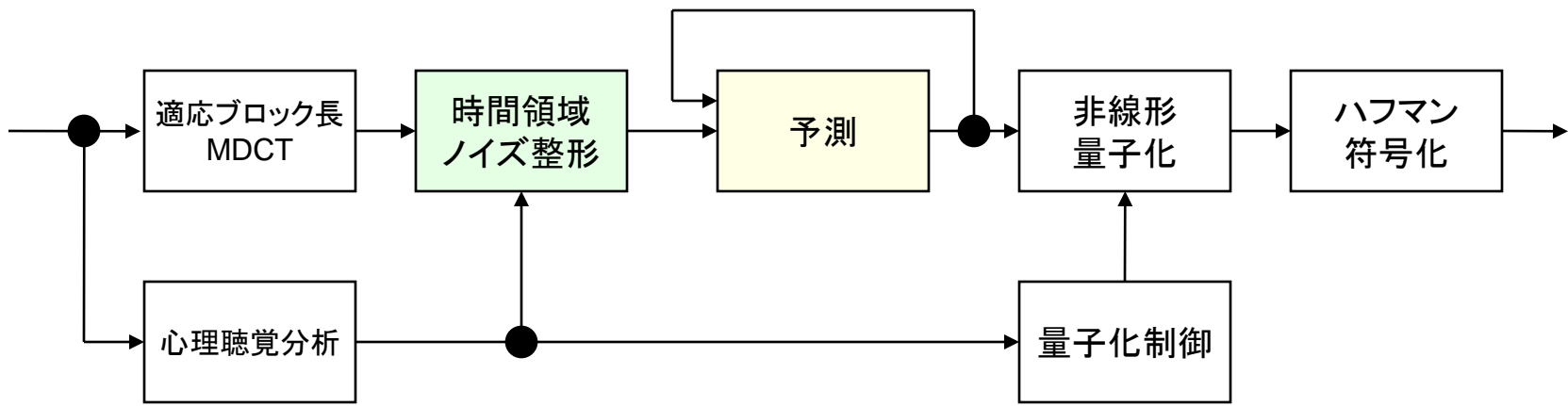


cf. Layer I, II



オーディオ符号化 (4)

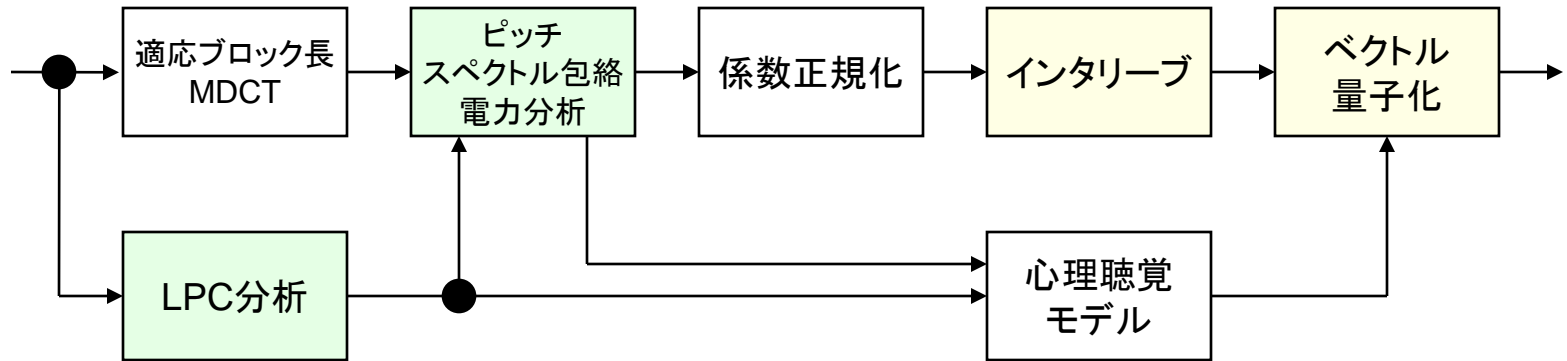
• MPEG-2 AAC



- 時間領域ノイズ整形 (for transient signals): 一部のMDCT係数を時系列とみなして線形予測 (LPC) 分析。振幅の大きい部分に量子化雑音が集中する (ノイズ整形)。
- 予測 (for stationary signals): MDCT係数毎に、過去2フレームのMDCT係数から予測。入力が定常的な場合に有効。

オーディオ符号化 (5)

• Twin VQ



- LPC分析、ピッチ・スペクトル包絡・電力分析：MDCT係数の平坦化。ベクトル量子化のコードブック削減。
- インタリーブベクトル量子化：適応量子化に替わるひずみの最小化手法。傾向の似た変換係数のグルーピング。

音声とオーディオ、ビデオの対比

- 音声符号化

PCM → 波形符号化 → 分析合成符号化 (音声合成モデル)

- オーディオ符号化、ビデオ符号化

PCM → 波形符号化

オーディオ合成モデル: 楽器 (+ ボーカル)

ビデオ合成モデル: コンピュータグラフィックス?

分析合成手法の試み (ブレークスルーにはなっていない):

オーディオ符号化: 音源分離

ビデオ符号化: 知的符号化 (顔画像アニメーション)