

画像情報特論

- デジタル圧縮とメディア表現

(1) ビデオ圧縮

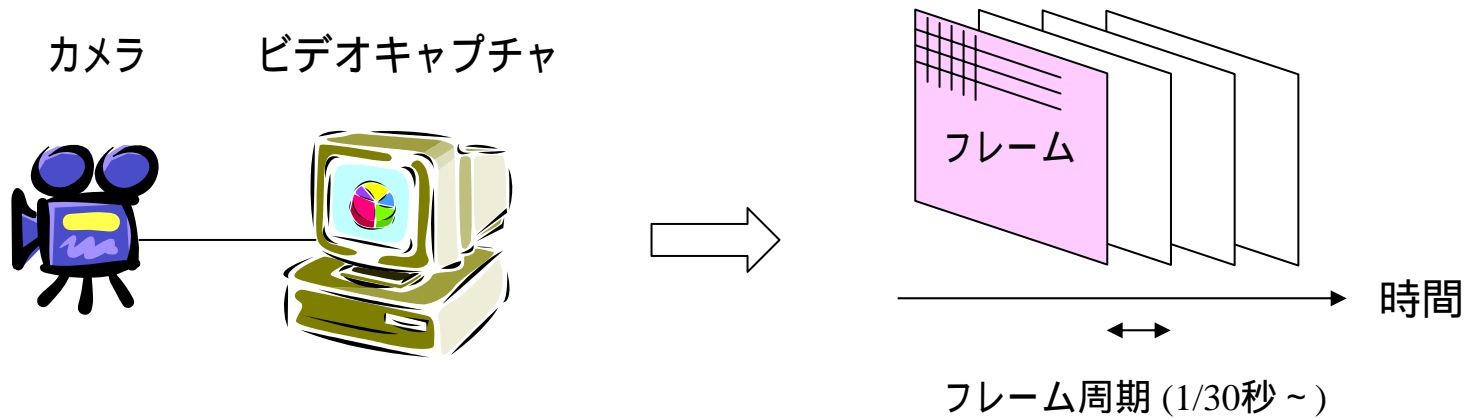
情報ネットワーク専攻 甲藤二郎

E-Mail: katto@waseda.jp

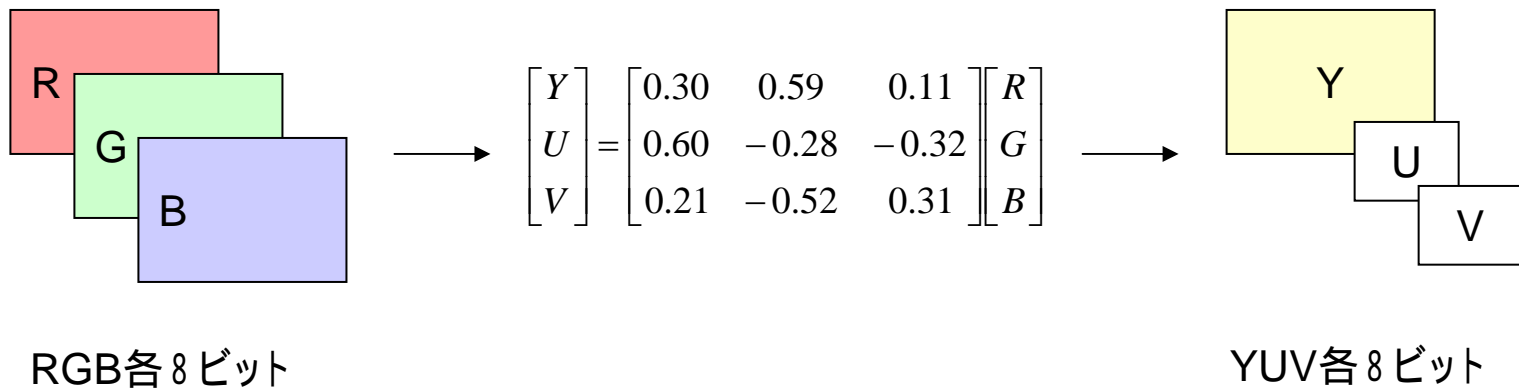
ビデオ圧縮

デジタル動画

- 時間方向・空間方向のサンプリング

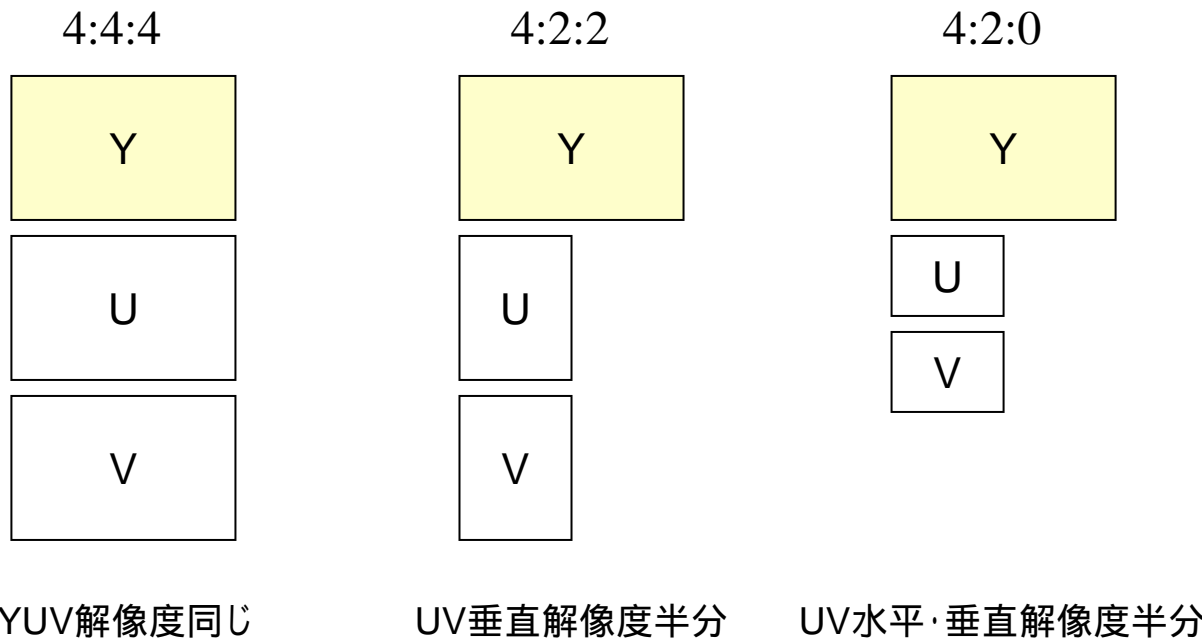


- RGB / YUV 変換



デジタル動画

- CCIR 601 フォーマット

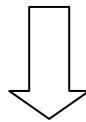


- 通常のビデオ圧縮： 4:2:0 フォーマット
- 高画質ビデオ圧縮： 4:2:2 フォーマット

デジタル動画

- 莫大な情報量 (RGB各8ビット無圧縮の場合)

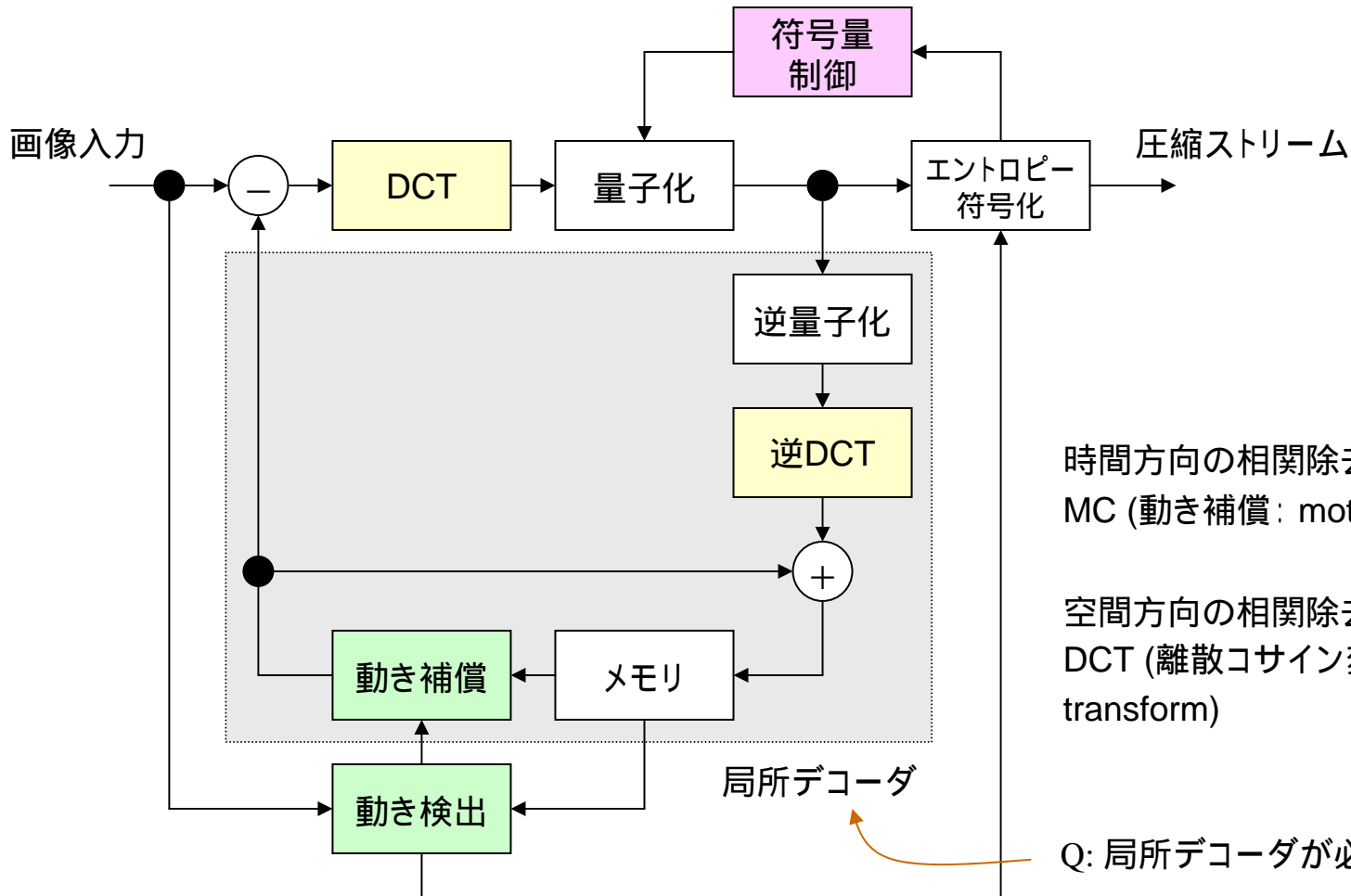
用途	解像度	データ量
TV会議	352x240	21Mbit/s
TV	720x480	83Mbit/s
HDTV	1920x1080	498Mbit/s



データ圧縮の必要性

ビデオ圧縮の仕組み

- MC+DCT ハイブリッド予測符号化 (20年間変わらない方式)



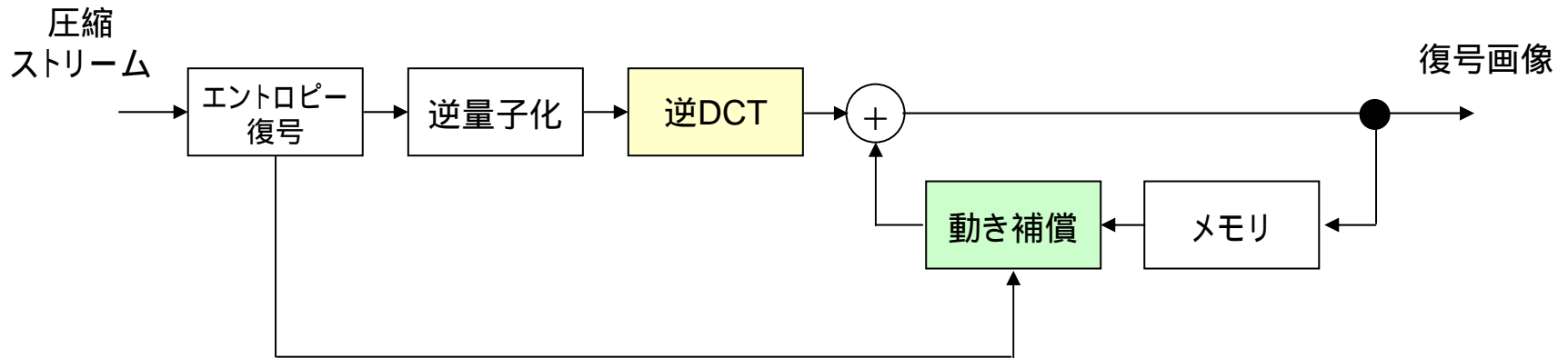
時間方向の相関除去:
MC (動き補償: motion compensation)

空間方向の相関除去:
DCT (離散コサイン変換: discrete cosine transform)

Q: 局所デコーダが必要な理由を説明せよ

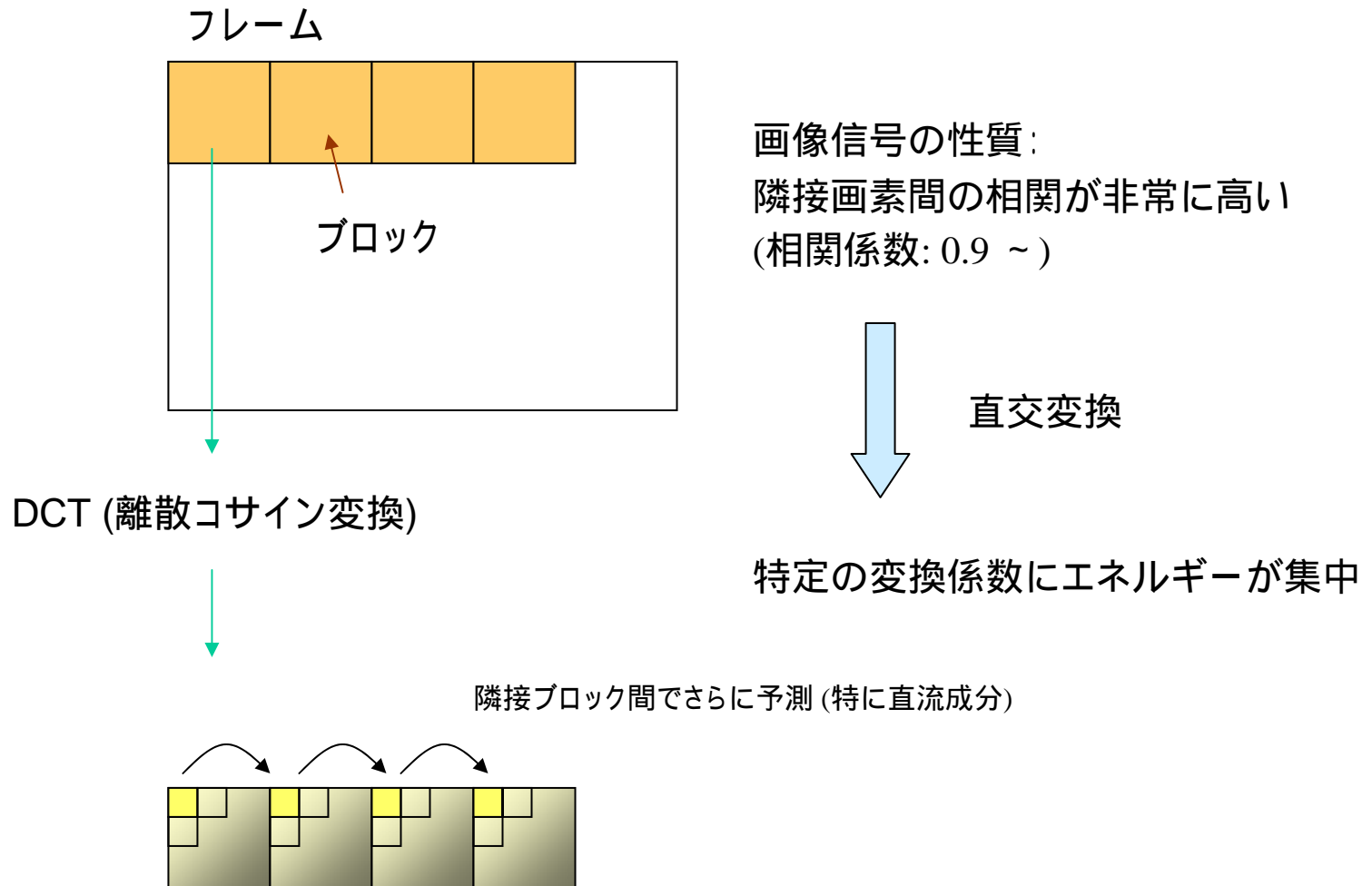
ビデオ復号の仕組み

- エンコーダのローカルデコードと同じ



フレーム内符号

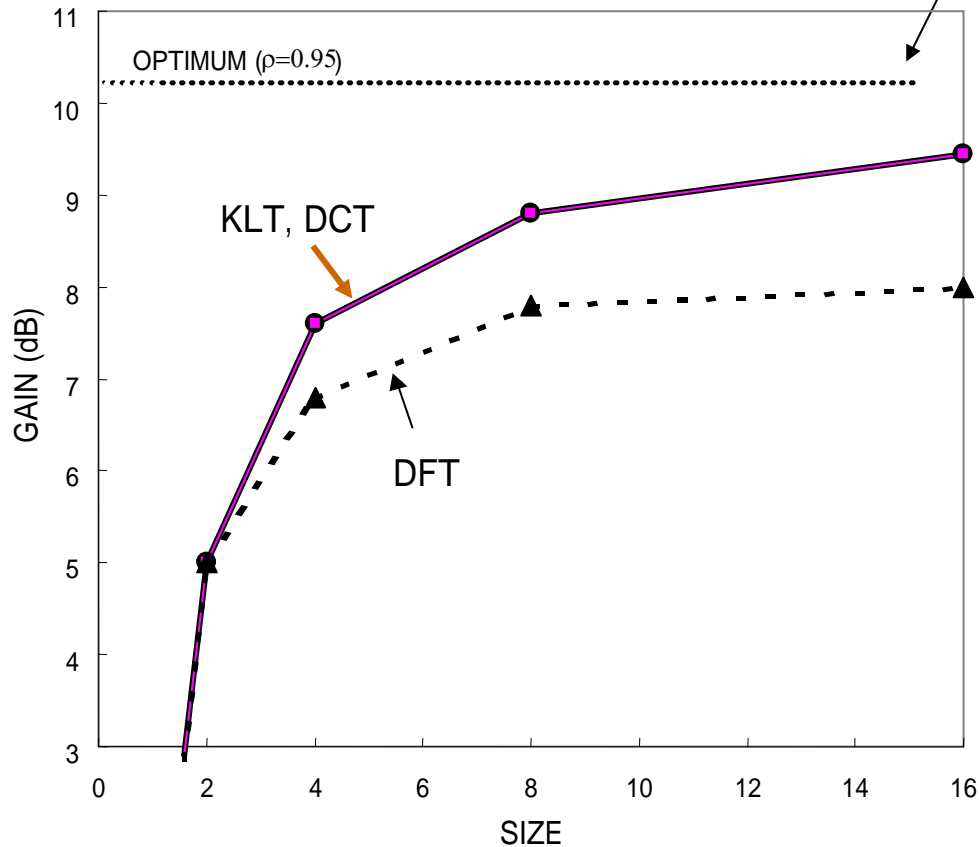
- DCT



直交変換

• DCTが使われる理由

圧縮効率 KLT, DCT, DFT の符号化利得の比較 理論的最適値



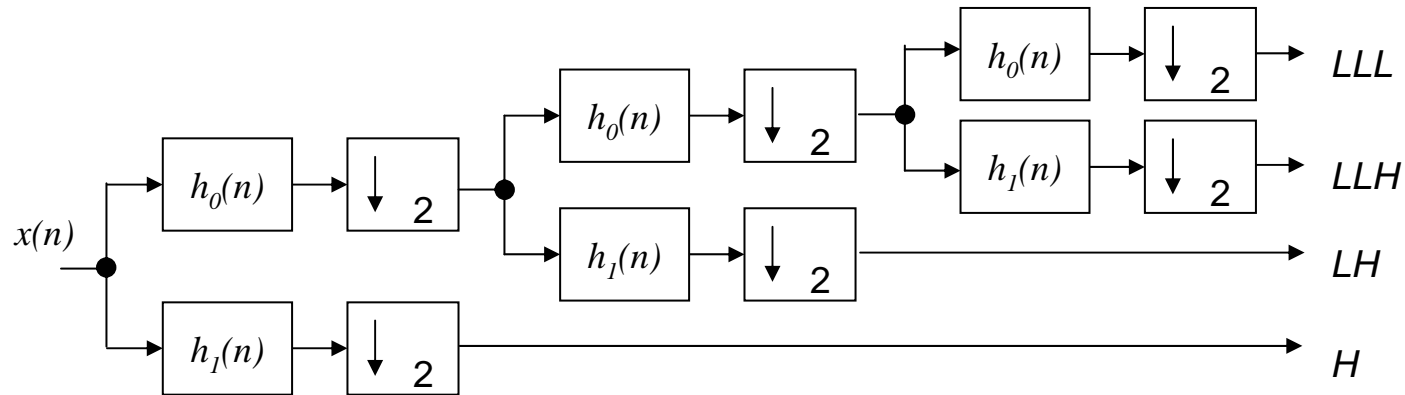
KLT: 理論的に最適な直交変換。

DCT: 相関の高い入力に対する KLT への漸近性、及び高速アルゴリズムが存在。通常は 8x8 サイズの DCT を使用。

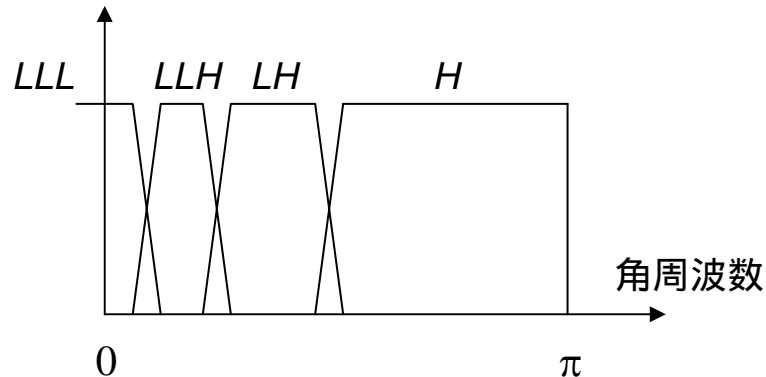
→ 直交変換の
ブロックサイズ

直交変換

• Wavelet 変換 (対抗)



2分割フィルタバンクのツリー接続



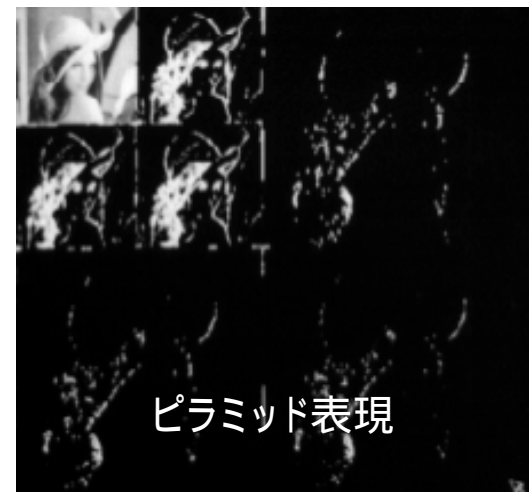
長所: ブロックひずみが少ない

短所: ブロック動き補償と相性が悪い

LL

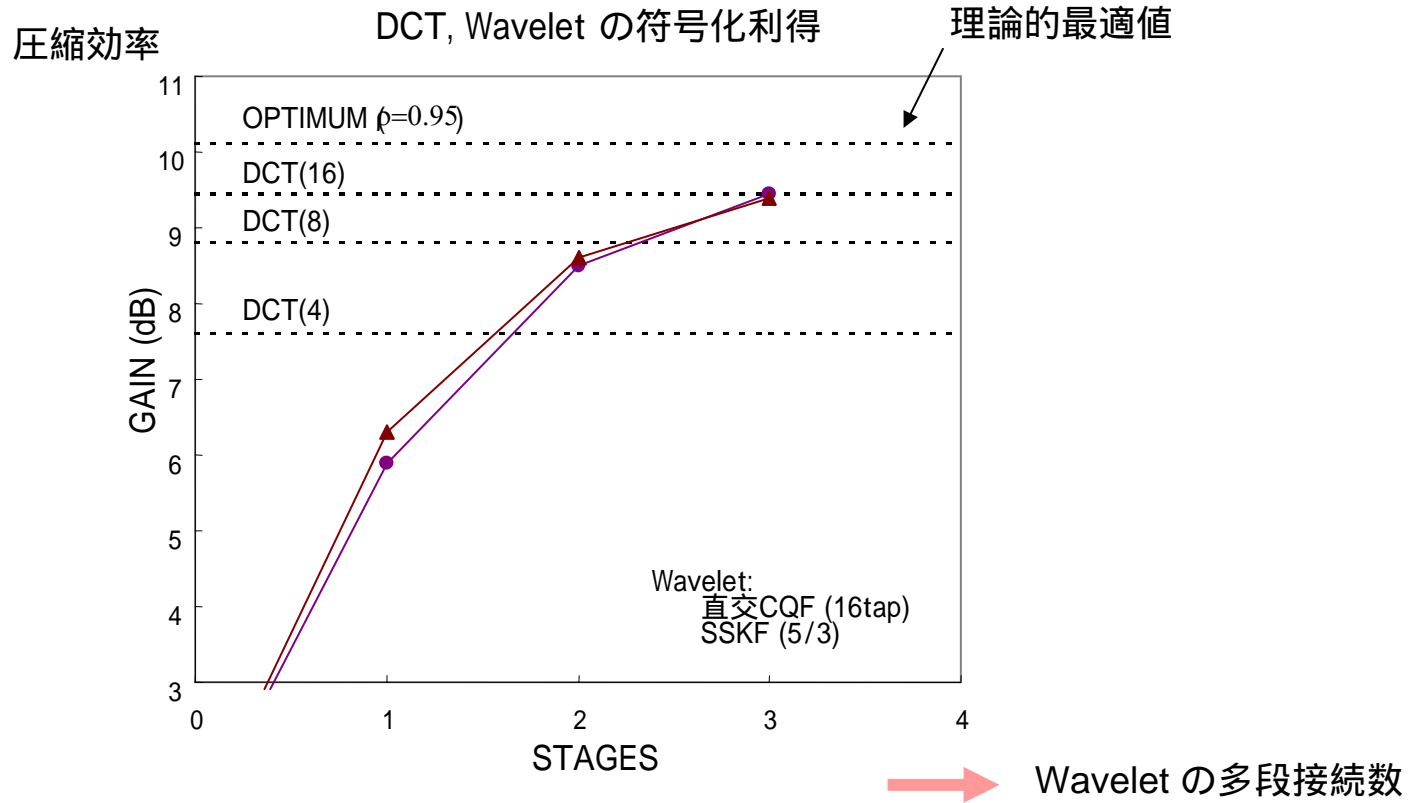
LH

H



直交変換

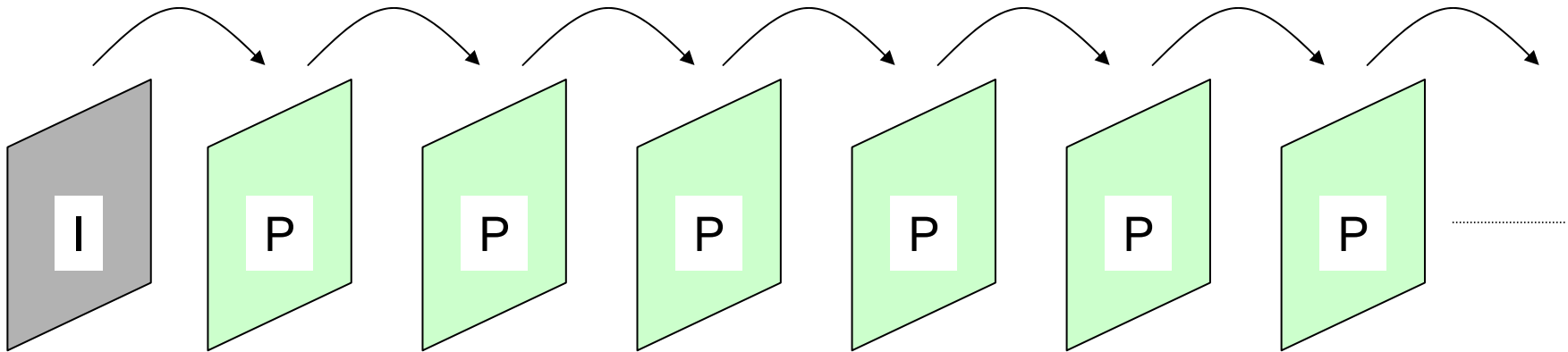
• DCT と Wavelet の比較



- DCT: 動画 (ビデオ) 圧縮
- Wavelet: 静止画圧縮 (JPEG-2000)

フレーム間符号化

• IP 予測



ビデオ信号の性質:

隣接フレーム間の相関が非常に高い
(相関係数: 0.9 ~)



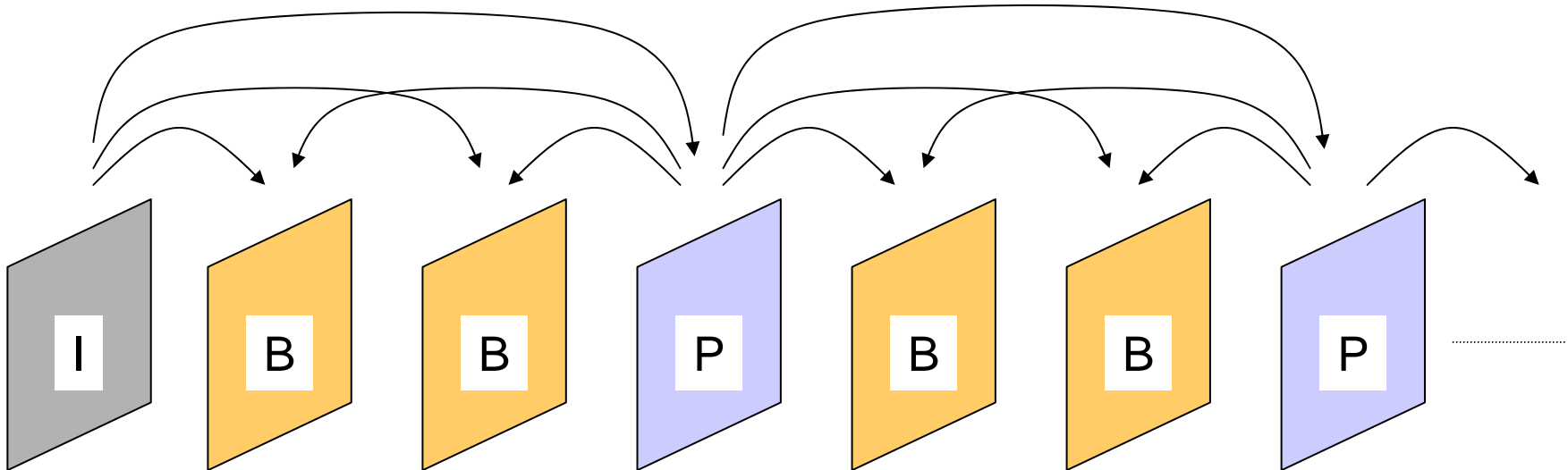
フレーム間の予測誤差がほとんどゼロ

- I: I ピクチャ (フレーム内符号化)
- P: P ピクチャ (フレーム間符号化)

さらに動き検出・動き補償予測

フレーム間符号化

• IPB 予測



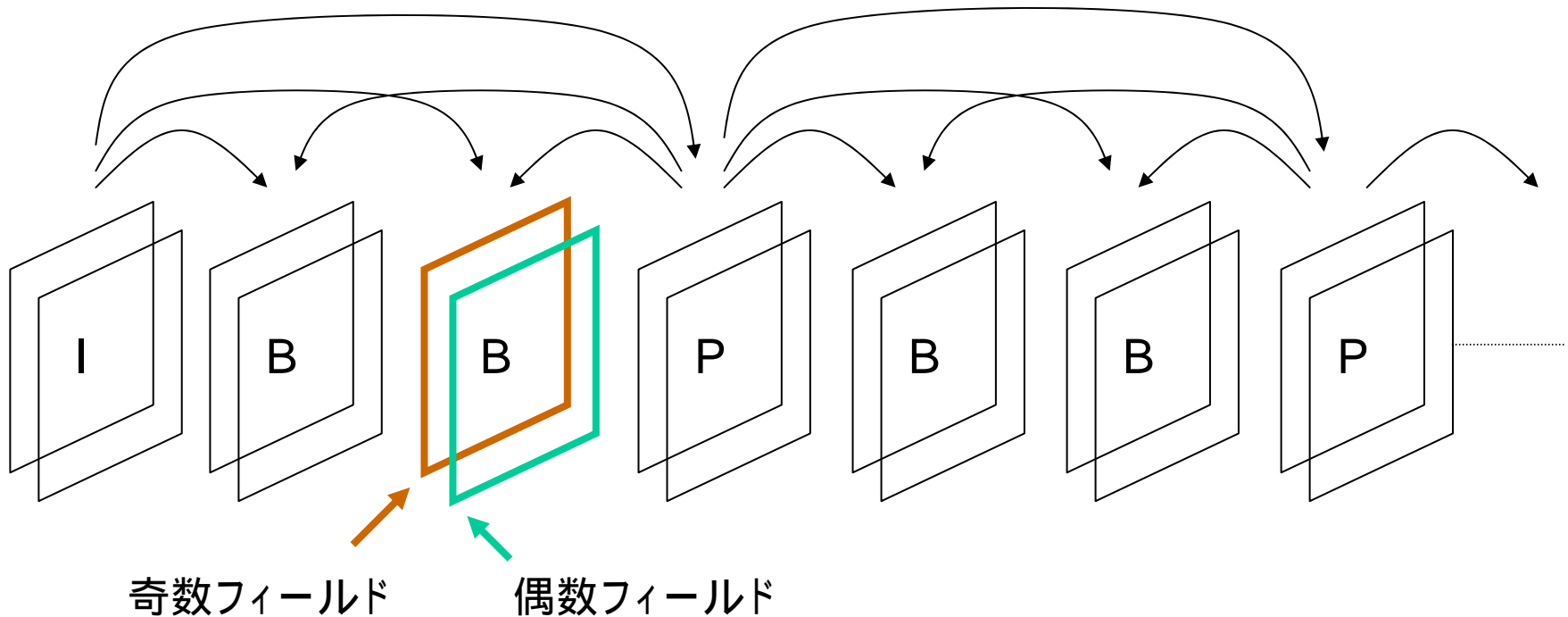
片方向で予測を行うより、両方向で予測を行うほうが予測効率が高い (ただし、フレーム間の距離に依存)



- I: I ピクチャ (フレーム内符号化)
- P: P ピクチャ (片方向予測)
- B: B ピクチャ (両方向予測)

フレーム間符号化

• フィールド予測



デジタルTV放送に対応 (MPEG-2)

- 動き補償: フィールド予測、フレーム予測、デュアルプライム予測
- DCT: フレームDCT、フィールドDCT

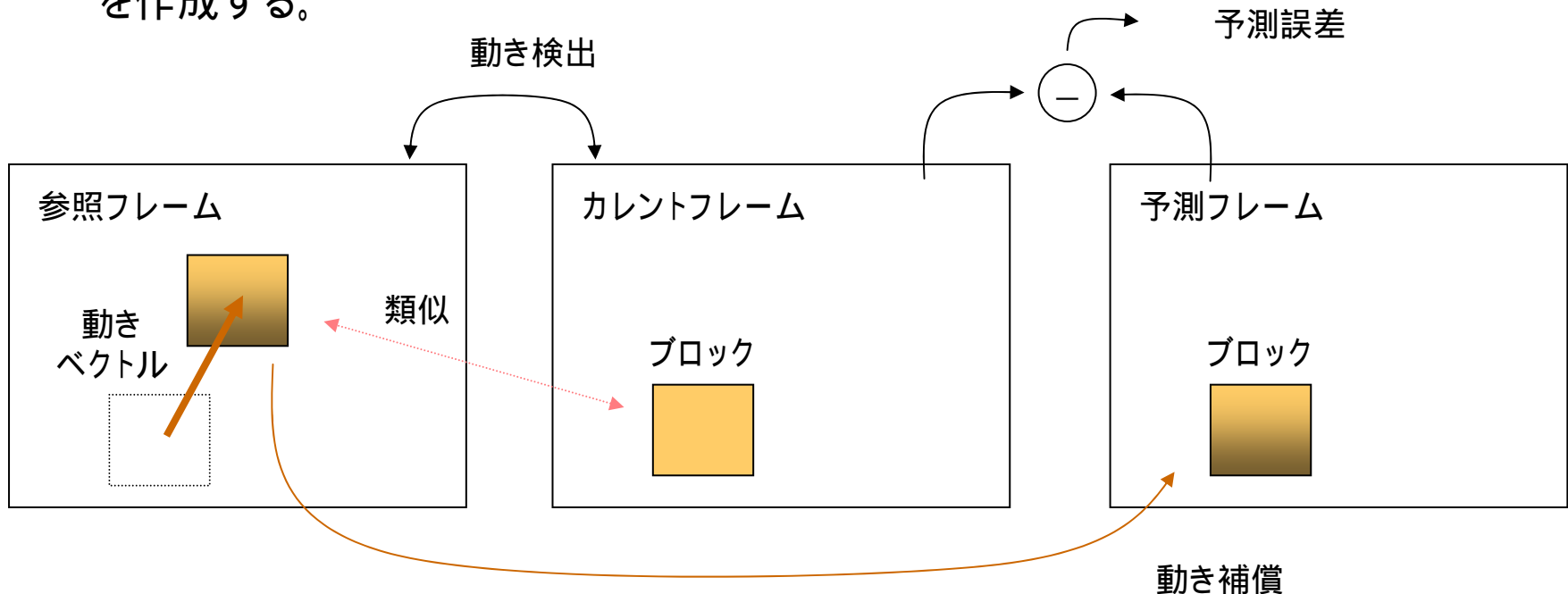
動き検出と動き補償

- 動き検出 (ブロックマッチング):

過去の画像 (参照フレーム) から、現在の画像 (カレントフレーム) に最も類似しているブロックを探索し、動きベクトルを求める。

- 動き補償:

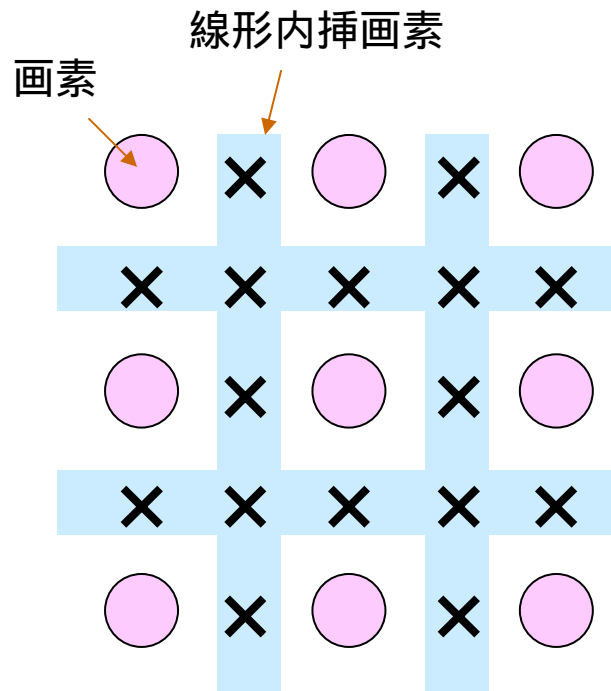
動き検出で求めた動きベクトルから、カレントフレームの予測画像 (予測フレーム) を作成する。



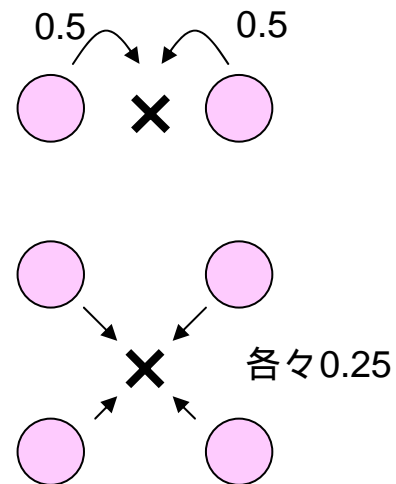
動き検出と動き補償

- 半画素精度動き補償:

線形内挿を行い、0.5 画素精度の動きベクトルを算出し、予測画像を作成。



内挿フィルタ:



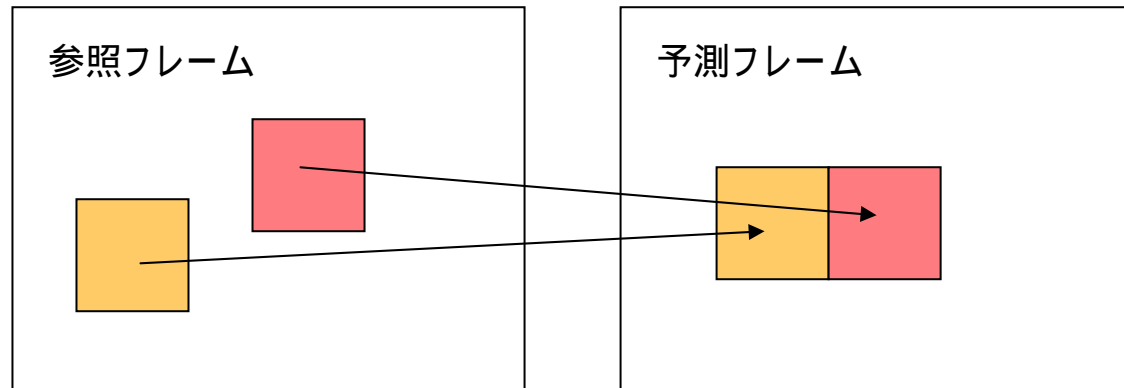
(注) 1/4精度、1/8精度の効果はほぼ飽和

動き検出と動き補償

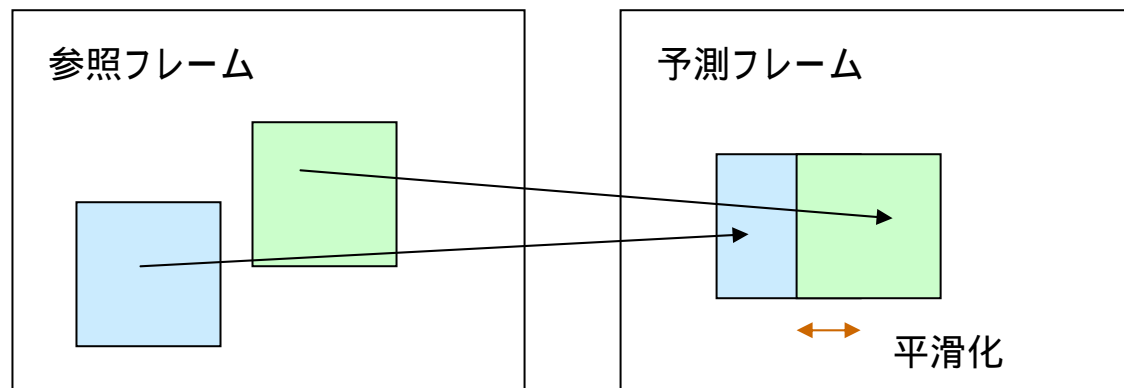
- オーバーラップ動き補償:

隣接ブロックの動きベクトルも利用し、ブロックの平滑化加算によって予測画像を作成。

通常ブロックマッチング



オーバーラップ動き補償



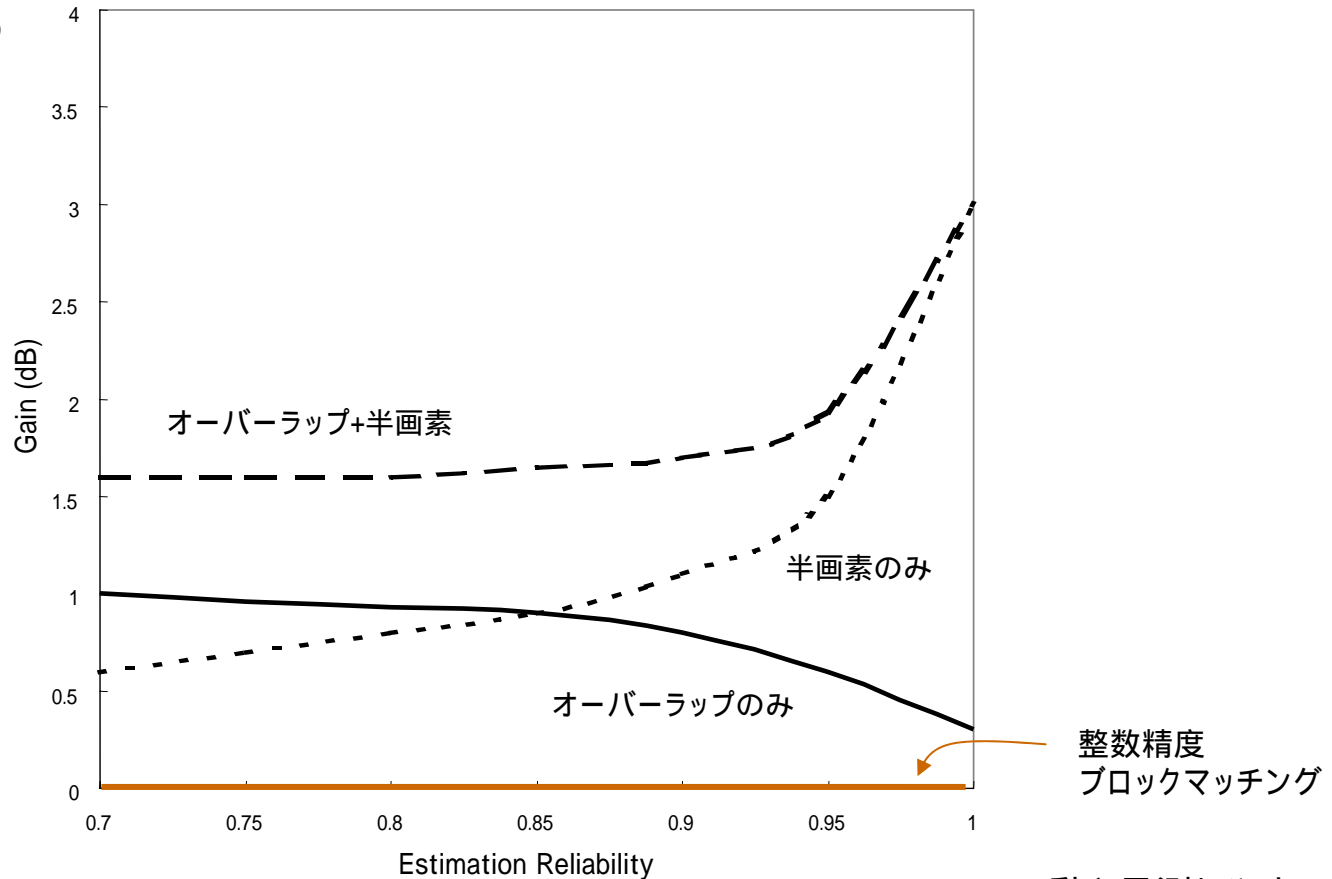
平滑化: 台形ウィンドウ、
コサインウィンドウなど。

動き検出と動き補償

• 特性比較

整数画素精度・ブロック動き補償に対する
半画素精度・オーバーラップ動き補償の予測利得

予測誤差の
低減効果



動き予測しにくい
画像の場合

動き予測しやすい
画像の場合

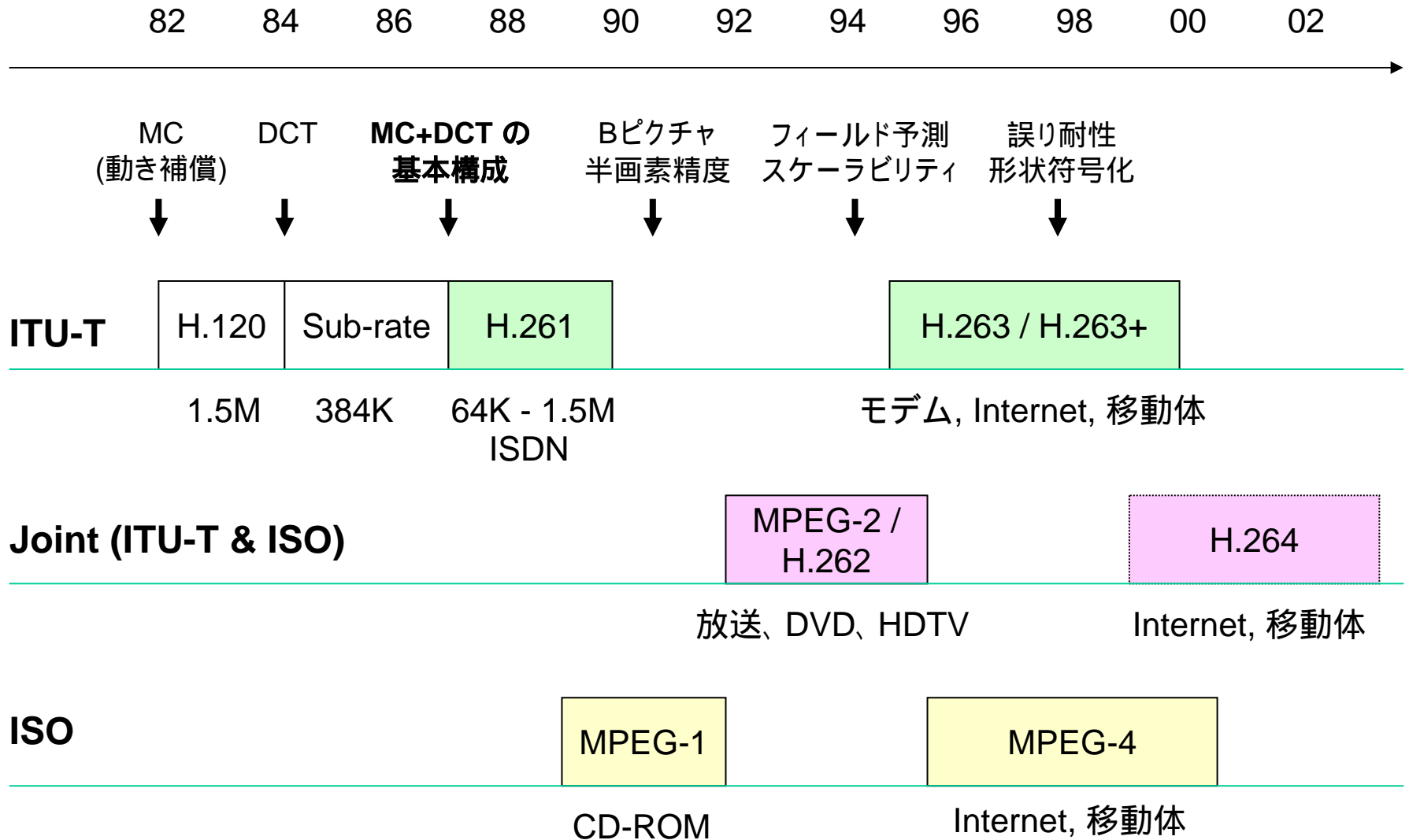
國際標準方式

国際標準方式

団体	名称	時期	符号化レート	当初の用途
ITU-T	H.261	1990年	64kb/s ~ 2Mb/s	ISDN用テレビ電話
	H.263	1996年	数十kb/s ~	アナログ回線用テレビ電話
	H.263+	1998年	数十kb/s ~	インターネット、移動体
	H.264	2003年	数十kb/s ~	インターネット、移動体
ISO	MPEG-1	1992年	~ 1.5Mb/s	CD-ROM
	MPEG-2*	1995年	数Mb/s ~ 数十Mb/s	デジタル放送
	MPEG-4	1999年	数十kb/s ~	インターネット、移動体

* MPEG-2/H.262、H.264 (MPEG-4 Part 10) はISOとITU-Tのジョイント規格

国際標準方式



国際標準方式

• 代表的な機能の比較

名称	MC+DCT	1/2画素	IPB予測	フィールド	形状符号化	再同期	スケーラビリティ
H.261		-	-	-	-	-	-
H.263				-	-	-	-
MPEG-1				-	-		-
MPEG-2					-		
H.263+				-			
MPEG-4							
H.264				-			

インターネット放送で有
+ 符号量制御 (後述)

ISO/IEC MPEG-4

MPEG-4 の特

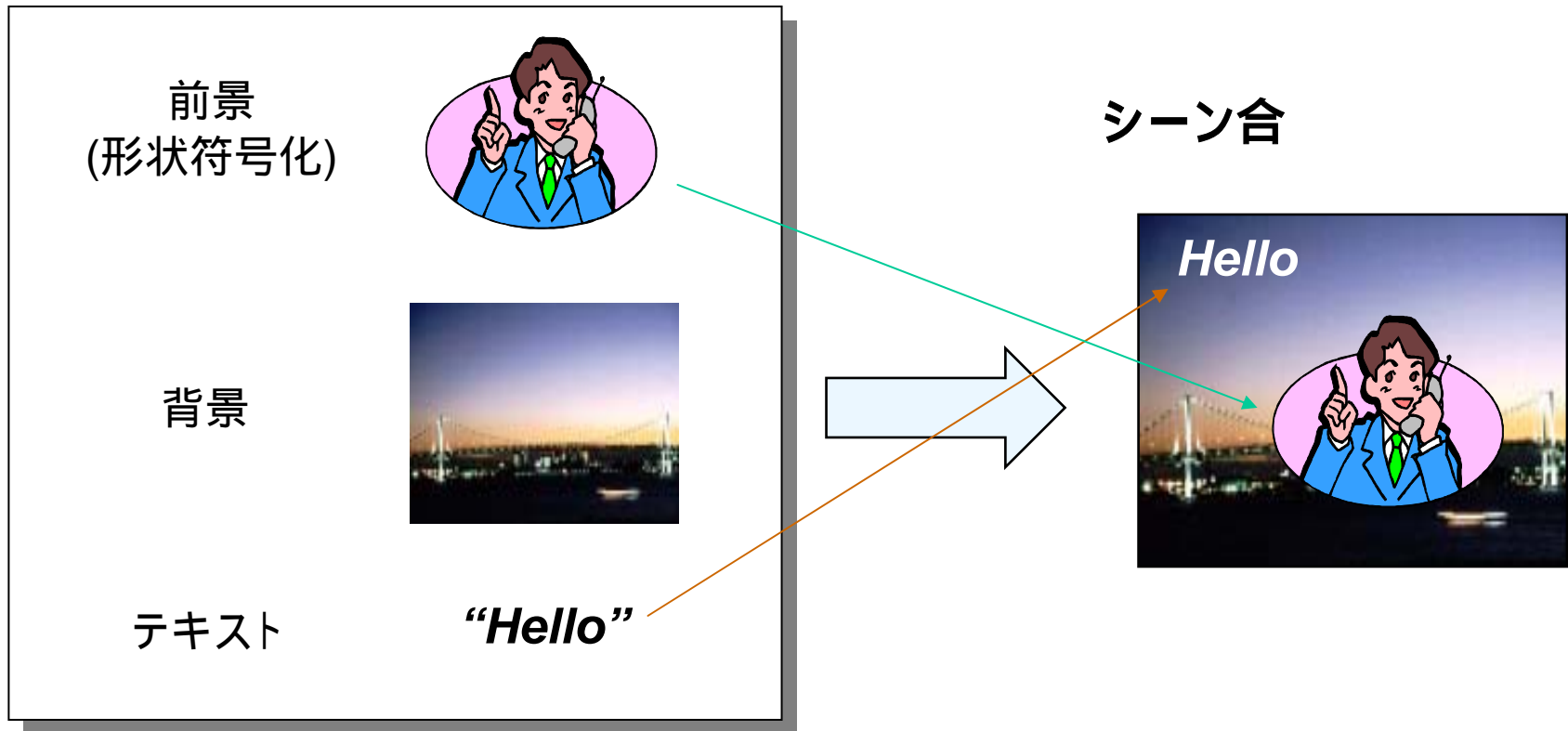
- 機能拡張 (誤り耐性とオブジェクトベース符号化)

誤り耐性ツール (アダプテーション)	:	シンプルプロファイル
形状符号化ツール (シーン合成)	:	コア・メインプロファイル
スプライト符号化	:	メインプロファイル

静止画像符号化 (Wavelet 変換)	:	ハイブリッドプロファイル
顔画像・胴体アニメーション	:	ハイブリッドプロファイル
メッシュ符号化	:	ハイブリッドプロファイル

形状符号化

- オブジェクト合成

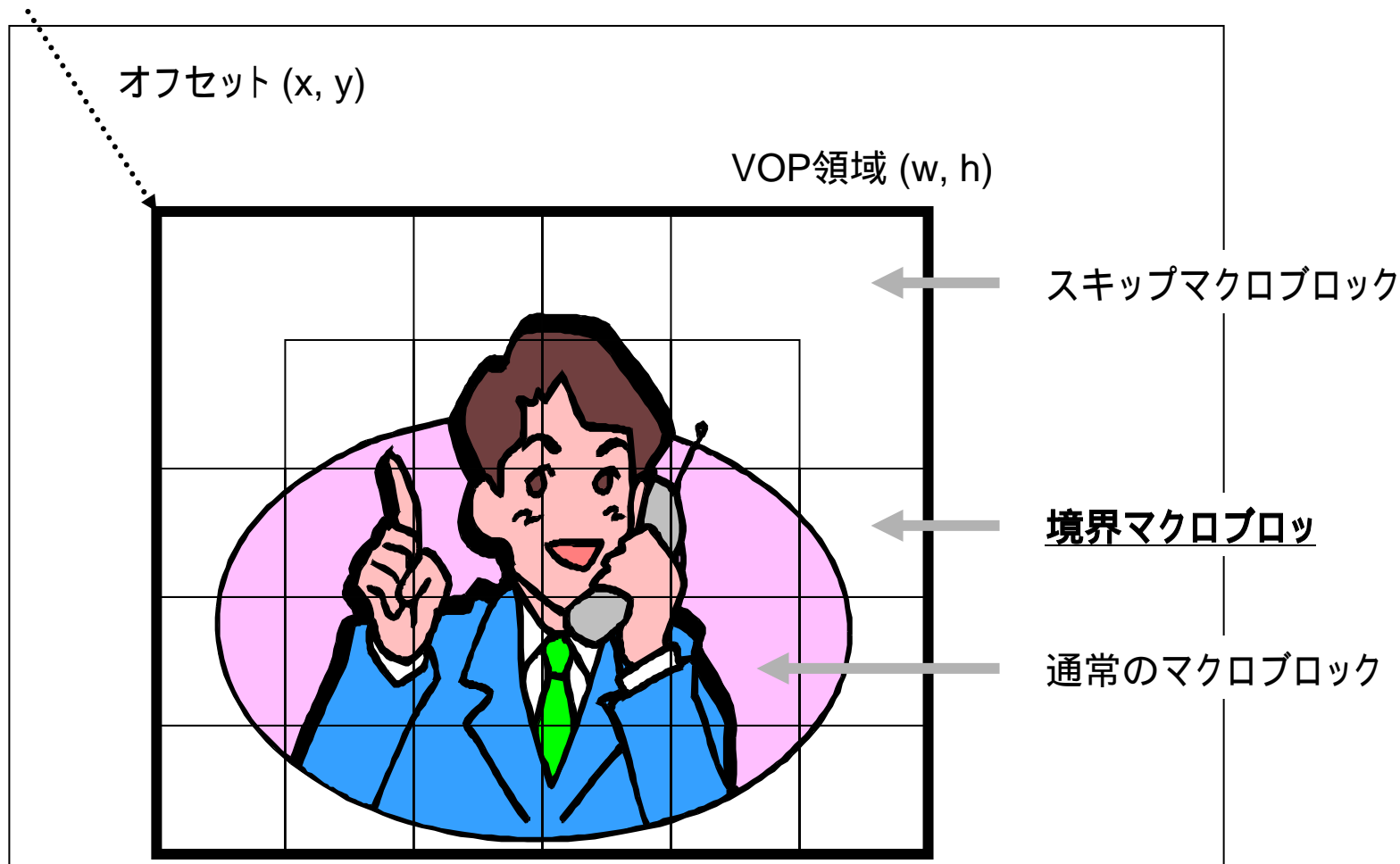


(注) 形状取得方法 (領域分割方法) は標準化の対象外

形状符号化

- 境界マクロブロック

通常のフレーム (CIF, QCIF, ...)

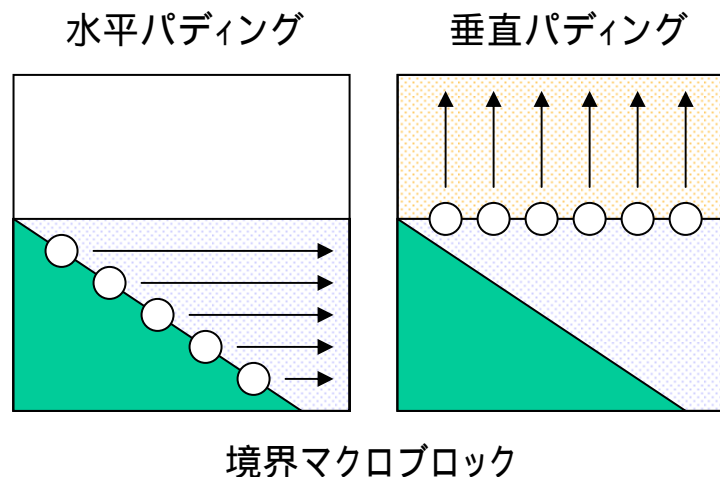


形状符号化

• 境界マクロブロックにおけるパディング処理

境界MBの動き検出・動き補

- (1) 形状範囲外をパディング
- (2) ポリゴンマッチング
- (3) 予測画像作成

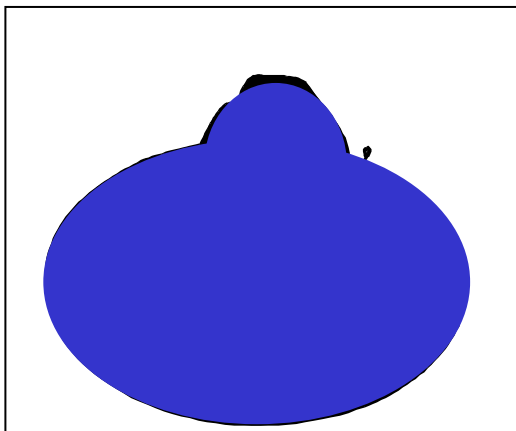


境界MBのテクスチャ符号

- (1) I-ピクチャ: ブロック内平均値でパディングしたブロックに DCT
- (2) P-ピクチャ: 形状範囲外を0でパディングしたブロックに DCT

形状符号化

- 形状の符号化



(1) バイナリ符号化

2値画像 (0,1) として符号化

(2) グレyscale符号化

(0, 255) の画素とみなして符号化 (DCT)

(参考) (R, G, B, A)、(Y, U, V, A) フォーマット

A: アルファマップ (コンピュータグラフィックス用語)

A = 0: 透過、形状無し (transparent)

A = 255: 形状あり (opaque)

A = 1 ~ 254: アルファブレンディング (前景と背景の混合)

ITU-T H.264 (MPEG-4 Part 10)

H.264の特

- 圧縮効率の改善 (MPEG-4 の 70%)

動き補償予測、イントラ予測の改善 (多モード化)

可変ブロックサイズ (Sub-macroblock prediction)

1/4・1/8 画素精度 (1/4, 1/8 pel interpolation)

複数参照ピクチャ (Multiframe prediction)

アダマール変換 (SAT: sum of absolute transformed differences)

適応イントラ予測 (Adaptive intra prediction)

適応ブロックサイズDCT (Adaptive block-size transform)

エントロピー符号化の改善

CABAC (Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding)

符号化レイヤとネットワークレイヤの分離

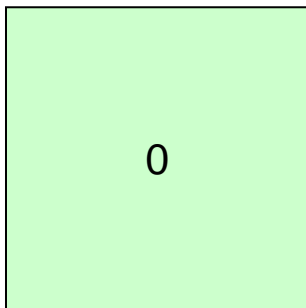
VCL: Video Coding Layer

NAL: Network Adaptation Layer

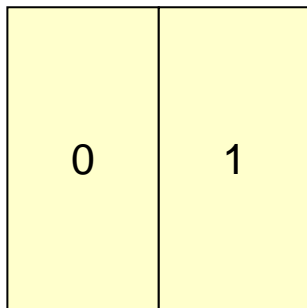
RTP Packetization

可変ブロック動き補

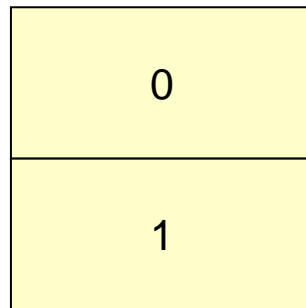
mode 1
16x16 block
1 vector



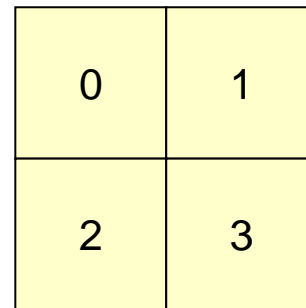
mode 2
8x16 block
2 vectors



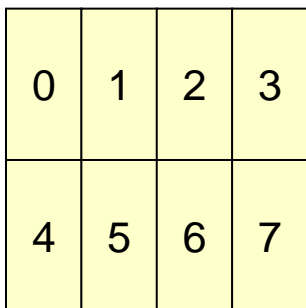
mode 3
16x8 block
2 vectors



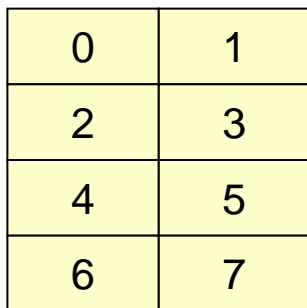
mode 4
8x8 block
4 vectors



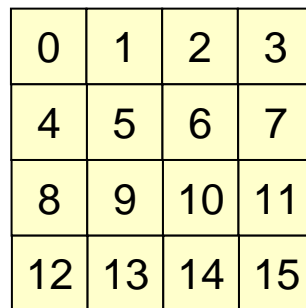
mode 5
4x8 block
8 vectors



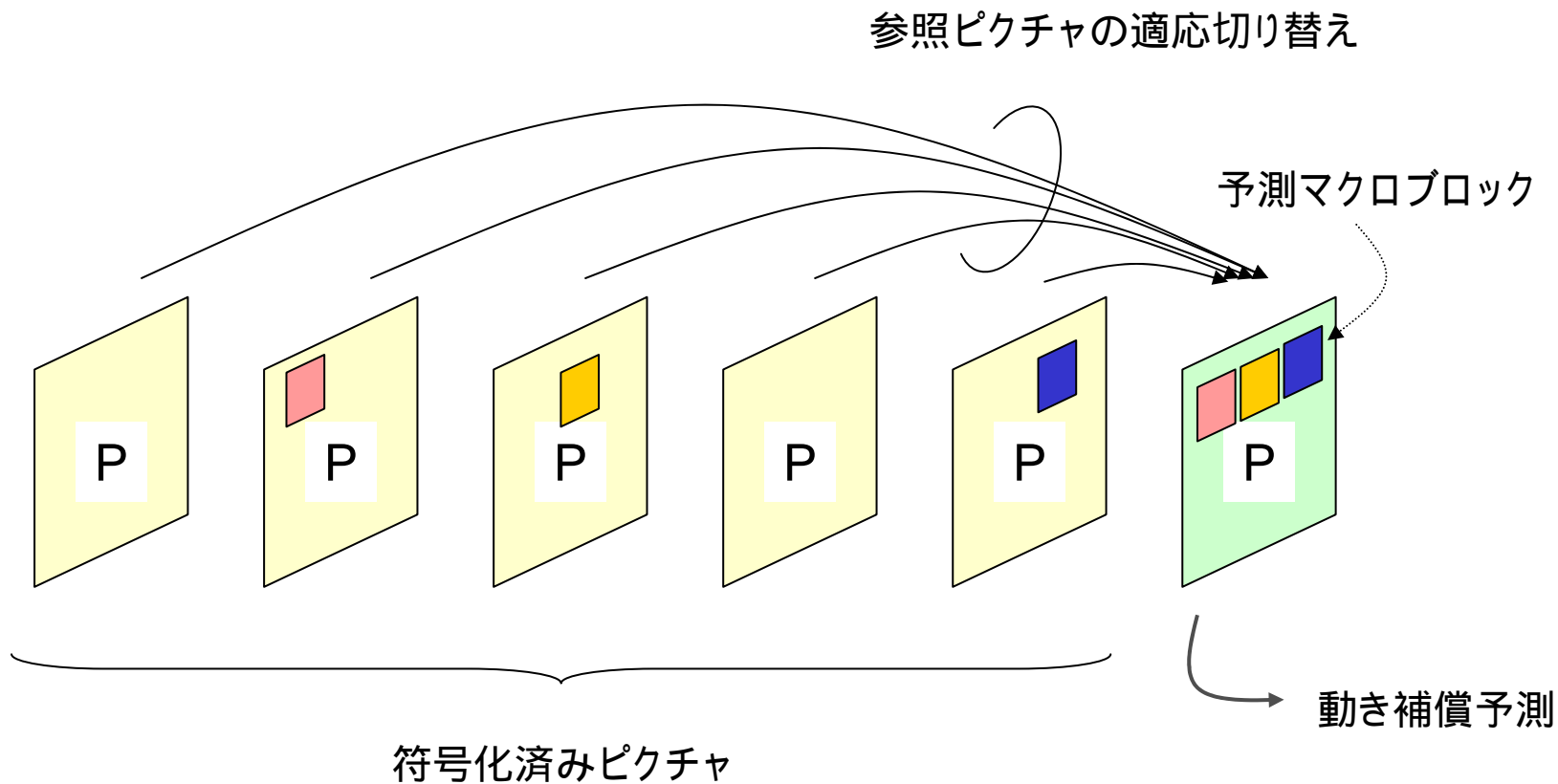
mode 6
8x4 block
8 vectors



mode 7
4x4 block
16 vectors

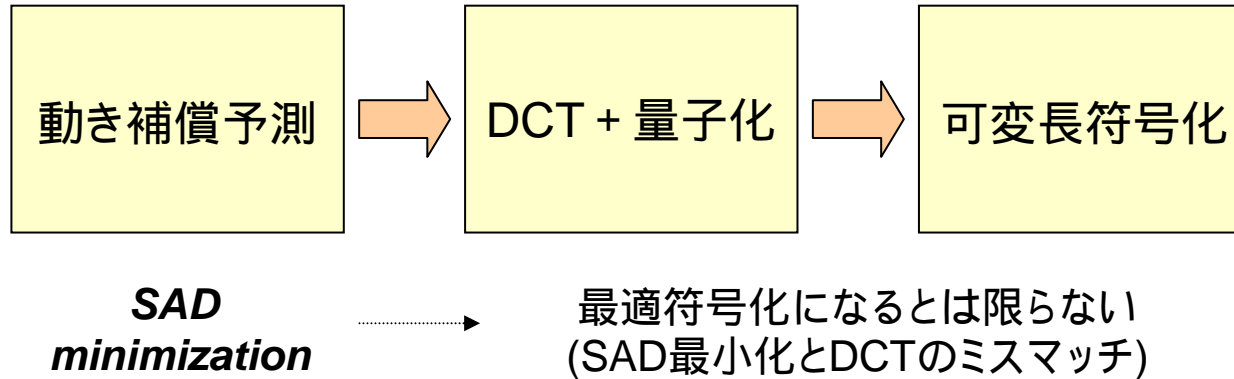


複数参照ピクチャ

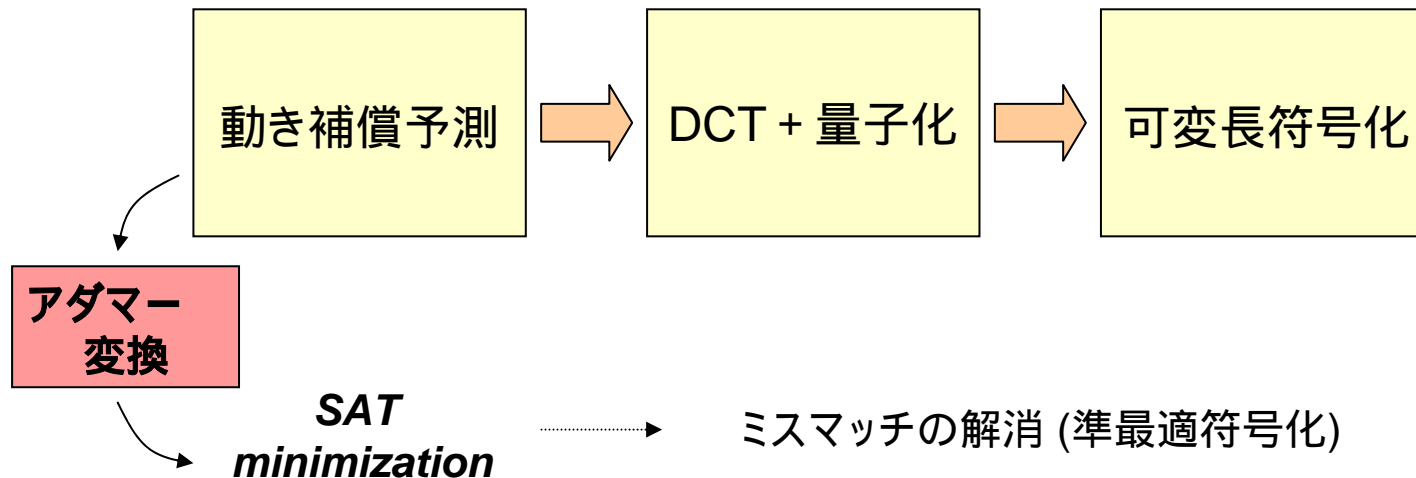


SAT (アダマール変換)

SAD minimization (空間領域の予測誤差最小化):



SAT minimization (変換領域の予測誤差最小化):

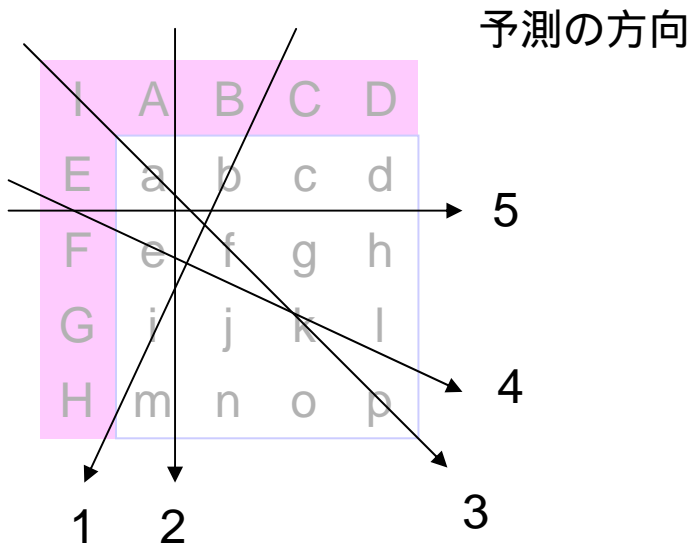


SAD: sum of absolute differences, SAT: sum of absolute transformed differences

多モード・イントラ予

I	A	B	C	D	← 符号化済み画素
E	a	b	c	d	
F	e	f	g	h	← 未符号化画素
G	i	j	k	l	
H	m	n	o	p	

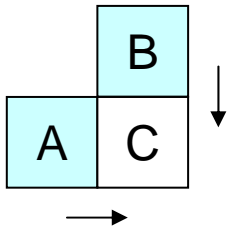
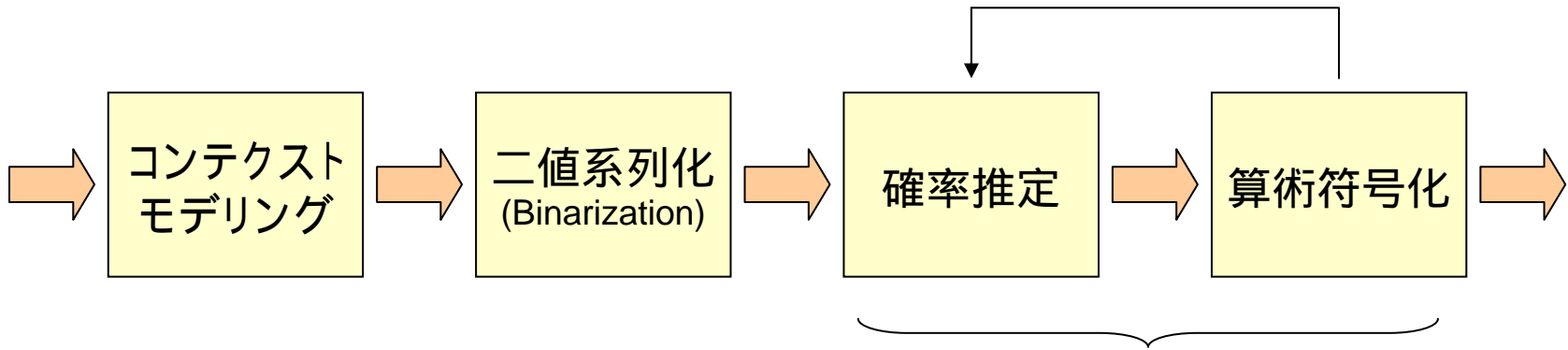
- mode 0: DC prediction
- mode 1: Vertical/Diagonal prediction
- mode 2: Vertical prediction
- mode 3: Diagonal prediction
- mode 4: Horizontal prediction
- mode 5: Horizontal/Diagonal prediction



例: mode 0:
 予測値 = $(A+B+C+D+E+F+G+H) / 8$

mode 1:
 $a = (A+B) / 2$
 $e = B$
 $b = i = (B+C) / 2$
 $f = m = C$
 $c = j = (C+D) / 2$
 $d = g = h = k = l = n = o = p = D$

CABAC



Binarization の例 (unary)

index	binarization
0	1
1	01
2	001
3	0001
4	00001
5	000001

選択された確率モデルに従い、
二値系列を算術符号化

さらに、入力結果に従って確率
モデルを更新

A, B: 符号化済みブロック

符号化済みブロックの結果に
応じて確率モデルを切り替え

C: 符号化対象ブロック

vs. ハフマン符号 (従来)

圧縮効率の改善効果 (非公式)

手法	効果
CABAC	10 ~ 15%
可変ブロック動き補償	~ 5%
アダマール変換	~ 5%
複数参照ピクチャ	~ 5%
R-D最適化 (後述)	10 ~ 15%
総計	30%以上

最近の話題

- Rate-Distortion Optimization
- Multiple Distortion Coding
- Wyner-Zip Coding

- ハードウェアの話

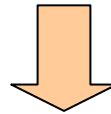
R-D最適化

Lagrange の未定乗数法 (Rate-Constrained

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

最適化問題

ビデオ圧縮の多モード化への対応



ひずみとレート (D, R) の設定方法に応じてさまざまな応用:

- 動き補償における予測モード・動きベクトル選択 (圧縮効率)
- 量子化におけるマクロブロックの INTRA/INTER モード選択 (圧縮効率)
- 量子化におけるマクロブロックの INTRA/INTER/SKIP モード選択 (誤り対策)
- 複数参照フレームにおける参照フレーム選択 (圧縮効率)
- ストリーミングにおけるパケット送出スケジューリング (FastStreaming)

R-D最適化

の設定例 (DCT係数の量子化)

(1) J の最小化

$$\frac{dJ}{dR} = \frac{dD}{dR} + \lambda \quad \longrightarrow \quad \lambda_{MODE} = -\frac{dD}{dR}$$

(2) レートひずみ関数

$$R(D) = a \log_2 \left(\frac{b}{D} \right)$$

(3) ひずみと量子化ステップサイズの関係式

$$D = \frac{(2Q)^2}{12} = \frac{Q^2}{3}$$

$$\lambda_{MODE} = c \cdot Q^2 \quad (\text{H.263})$$

$$\lambda_{MODE} = c \cdot 2^{\frac{Q}{3}} \quad (\text{H.264})$$

$$c = \frac{\ln 2}{3a} \approx 0.85$$

R-D最適化

使用例

従来方式:

【動き補償予測】

動きベクトルの選択:

$$D_{motion} \rightarrow \min$$

動き補償予測誤差が最小となるモードと動きベクトルを選択

【量子化】

符号化モードの選択:

$$D_{mode} \rightarrow \min$$

量子化誤差が最小となるモードを選択

RD 最適化:

【動き補償予測】

動きベクトルの選択:

$$J_{motion} = D_{motion} + \lambda_{motion} \cdot R_{motion} \rightarrow \min$$

コスト (動き補償予測誤差とベクトルオーバーヘッドの和) が最小となるモードと動きベクトルを選択

【量子化】

符号化モードの選択:

$$J_{mode} = D_{mode} + \lambda_{mode} \cdot R_{mode} \rightarrow \min$$

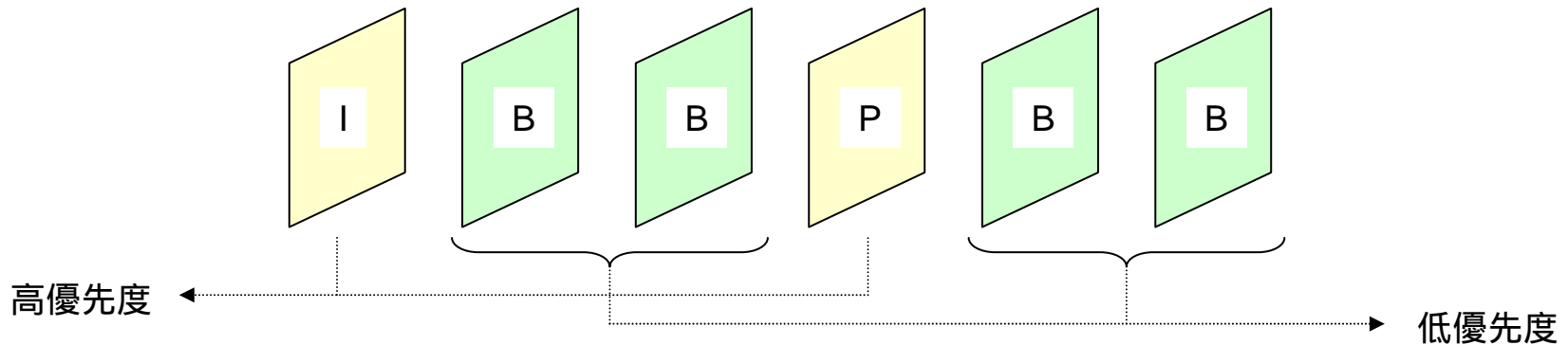
コスト (量子化誤差とヘッダ情報、ベクトル情報等の各種オーバーヘッドと可変長符号の和) が最小となるモードを選択

課題: 演算量の増加をどのように抑えるか?

Multiple Description Coding

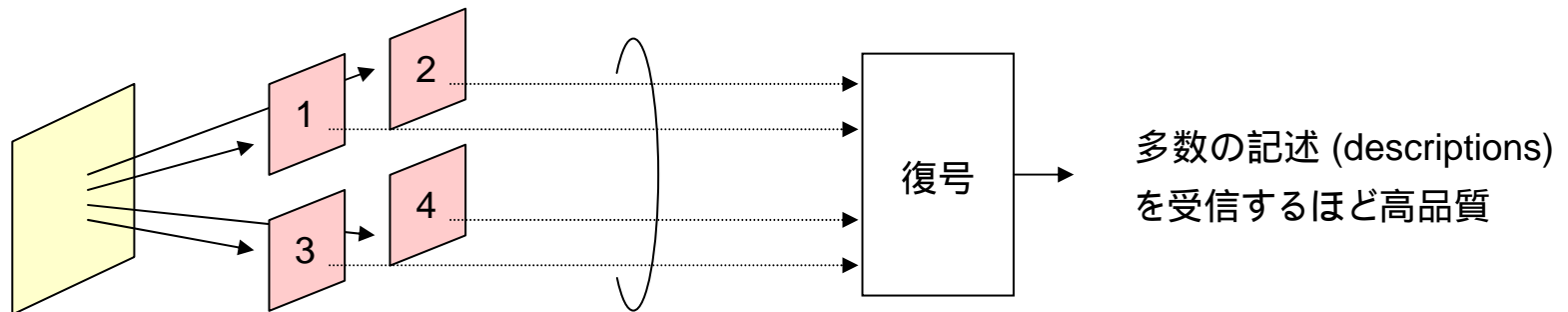
スケーラブル符号化 (従来)

(例) Temporal scalability: 各種ストリーミング



Multiple Description Coding:

例: 空間サンプリング、複数コーデック、...

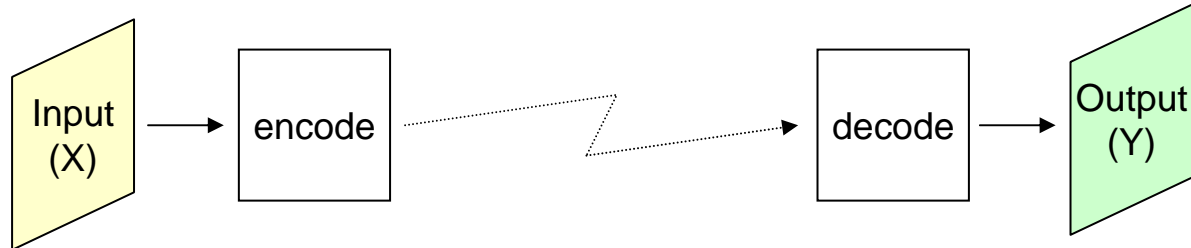


同一優先度 + マルチパス伝送

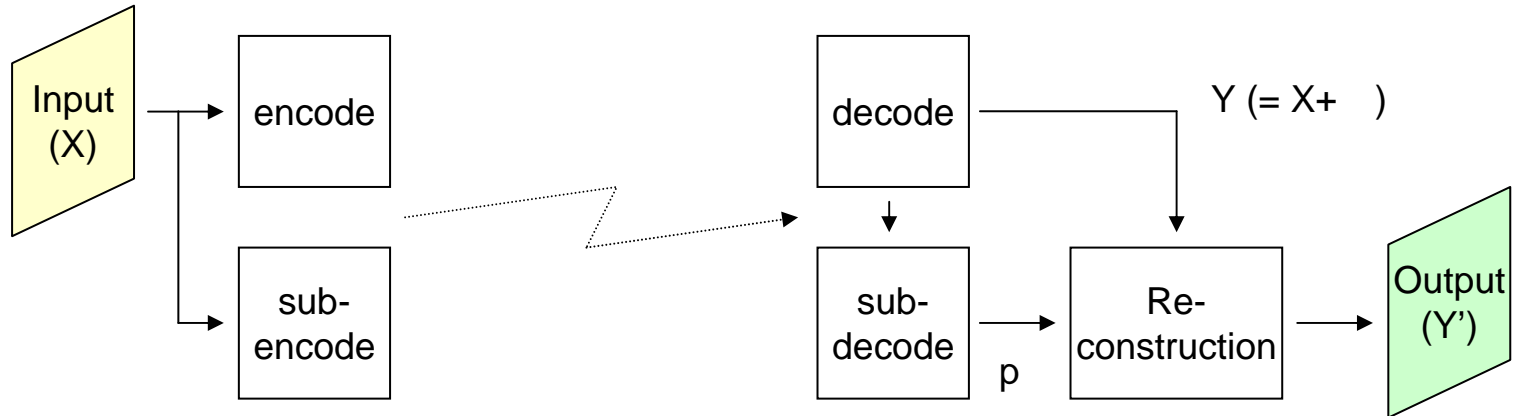
課題: 「記述」をどう定めるか?

Wyner-Ziv Coding

従来の符号化



Distributed Source Coding (Wyner-Ziv Coding):

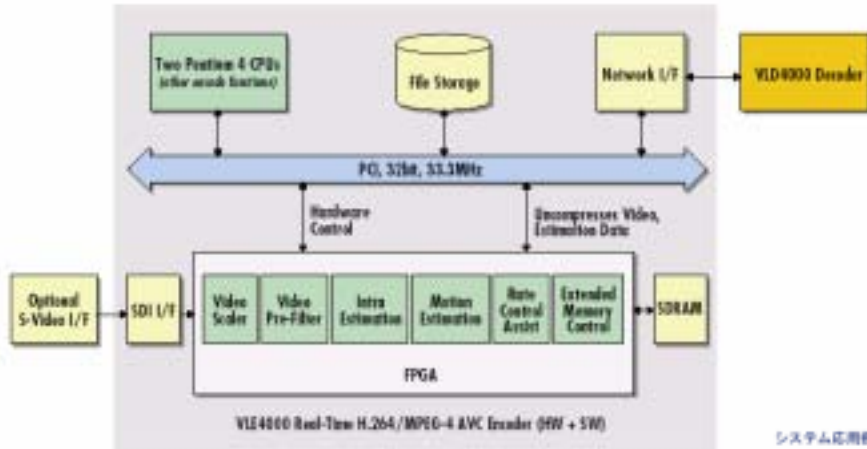


MAP推定: $Y' = \arg \max P(X | Y, p)$

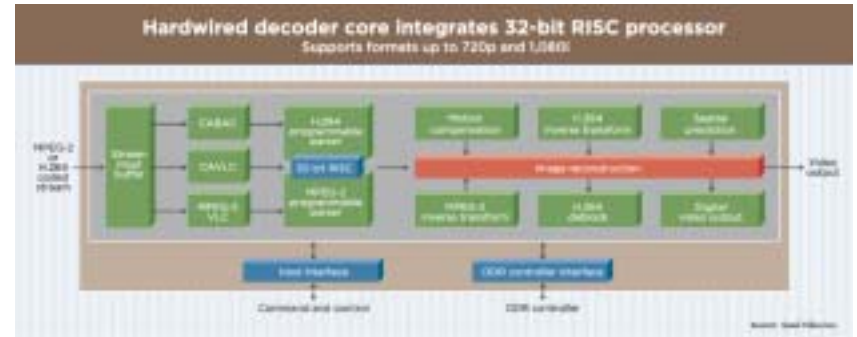
課題: 補助情報 p (sub-information) をどのように定めるか?

H.264 関連ハードウェア

LSI Logic, VLE4000:
H.264 SDTV encoder (FPGA)

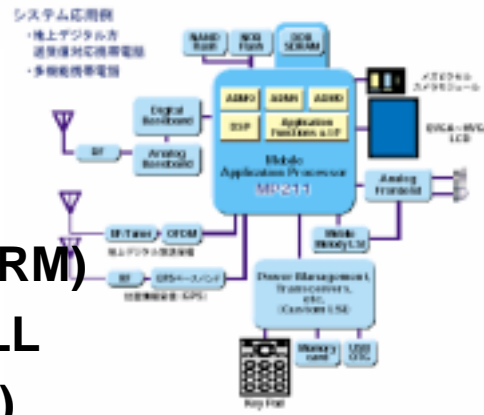


Sand Video (Broadcom), SV-D011:
H.264 HDTV decoder (core)



H.264 SDTV decoder:

- NECEL: MP211 (DSP & 3CPU/ARM)
- Sony: PSPチップ (HW core)、CELL
- Renesas: SH-Mobile4 (HW core)



携帯電話関連 アプリケーションプロセッサ

Qualcomm: MSM7000シリーズ

1 チップ・ソリューション



【ベースバンド処理】

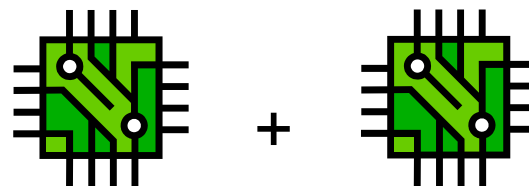
- RF-CMOS
- 2G/3G マルチモード
- WLAN 対応 (将来)

【アプリケーション処理】

- プロトコル
- マルチメディア
- Brew
- 3D-CG (ATI core)

NTT DoCoMo さ

2 チップ・ソリューション



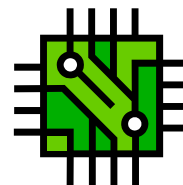
ベースバンド
プロセッサ

アプリケーション
プロセッサ
(OMAP, SH-Mobile)



Jul.2004



1 チップ・ソリューションに移行



TI (OMAP ext.)
Renesas (SH-Mobile ext.)

ViXS Systems Inc. (MPEG & 802.11)

2つのLSIだけで活躍するファブレスベンチャー

製品	技術仕様
<p>XCode II</p> 	<p>マルチチャンネル対応 MPEG-2/4 エンコード・トランスコード用 LSI</p> <ul style="list-style-type: none">アナログ入力インタフェースを備え、SDTV 4 チャンネルの同時エンコード、8 チャンネルの同時デコードが可能。HDTV は1チャンネル。トランスレート、トランスコード技術の優位性を主張していた。フレームごとに、画像内の特徴に応じた適応的な処理の選択 (さぼり) を行っている。【応用】多チャンネル対応 HDD レコーダ
<p>Matrix</p> 	<p>IEEE 802.11a/e 準拠デュアルベースバンド処理用 LSI</p> <ul style="list-style-type: none">802.11a/e チャンネルを同時に2本使用可能 (54 * 2 = 最大 108Mb/s)。これによって、無線 LAN 上の HDTV 配信を実現。MAC 層でチャンネルの特性 (遅延、パケット廃棄率、等) を測定するための独自拡張を加えている。【応用】情報家電 AV 無線伝送 (e.g. HDDレコーダ to ディスプレイ)
<p>ABFM (配信制御ソフト)</p>	<p>ストリーム配信制御ソフトウェア (Adaptive Bandwidth Footprint Management)</p> <ul style="list-style-type: none">Matrix で得られるチャンネル特性に従い、動的に圧縮レートや圧縮アルゴリズムを更新し、XCode II に処理を指示する。無線 LAN チャンネルをビデオ配信に占有