

2012年C&C賞受賞記念講演

小林久志
プリンストン大学電気工学科
独立行政法人情報通信研究機構

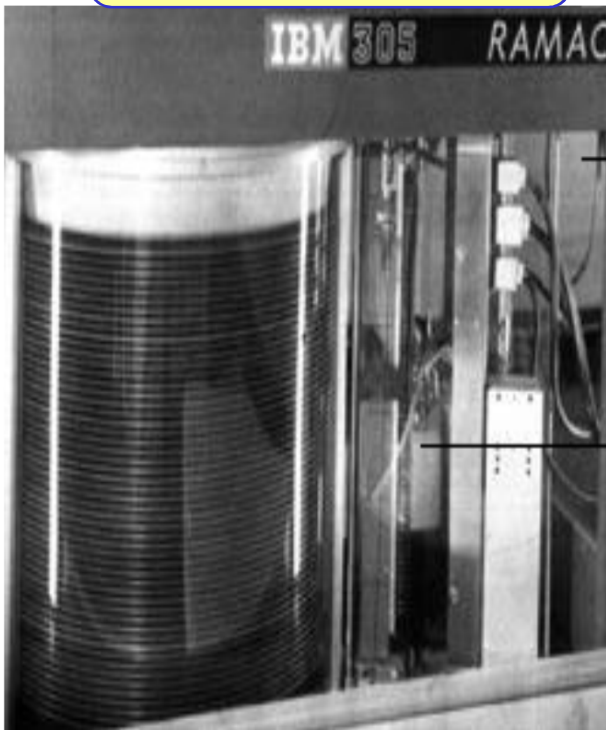
平成24年11月28日

謝辞

- 公益財団法人NEC C&C財団
- C&C賞選考委員会諸氏
- 益田隆司博士(船井情報科学振興財団)
- 宮原秀夫博士(独立行政法人情報通信研究機構)
- 金田武雄教授(カーネギー・メロン大学)
- Dr. Donald T. Tang (IBMワトソン研究所)
- Dr. François Dolivo (IBMチューリッヒ研究所)
- Dr. Evangelos Eleftheriou (IBMチューリッヒ研究所)
- Dr. Martin Reiser (IBMワトソン研究所)
- IBM Research Division
- Princeton University
- 独立行政法人情報通信研究機構

大容量記憶装置技術の遍歴

1956 IBM RAMAC
メガバイトの値段:
約 \$10,000



4.4 Mbyte

1999 IBM Microdrive
メガバイトの値段:
約 \$ 0.4



340 Mbyte

2005 Microdrive
メガバイトの値段:
約\$ 0.03



8 Gbyte

ハード・ディスク・ドライブ(HDD)の市場:

2011年 \$32B (320億ドル) → 2012年 \$38B(380億ドル) (19%増加)

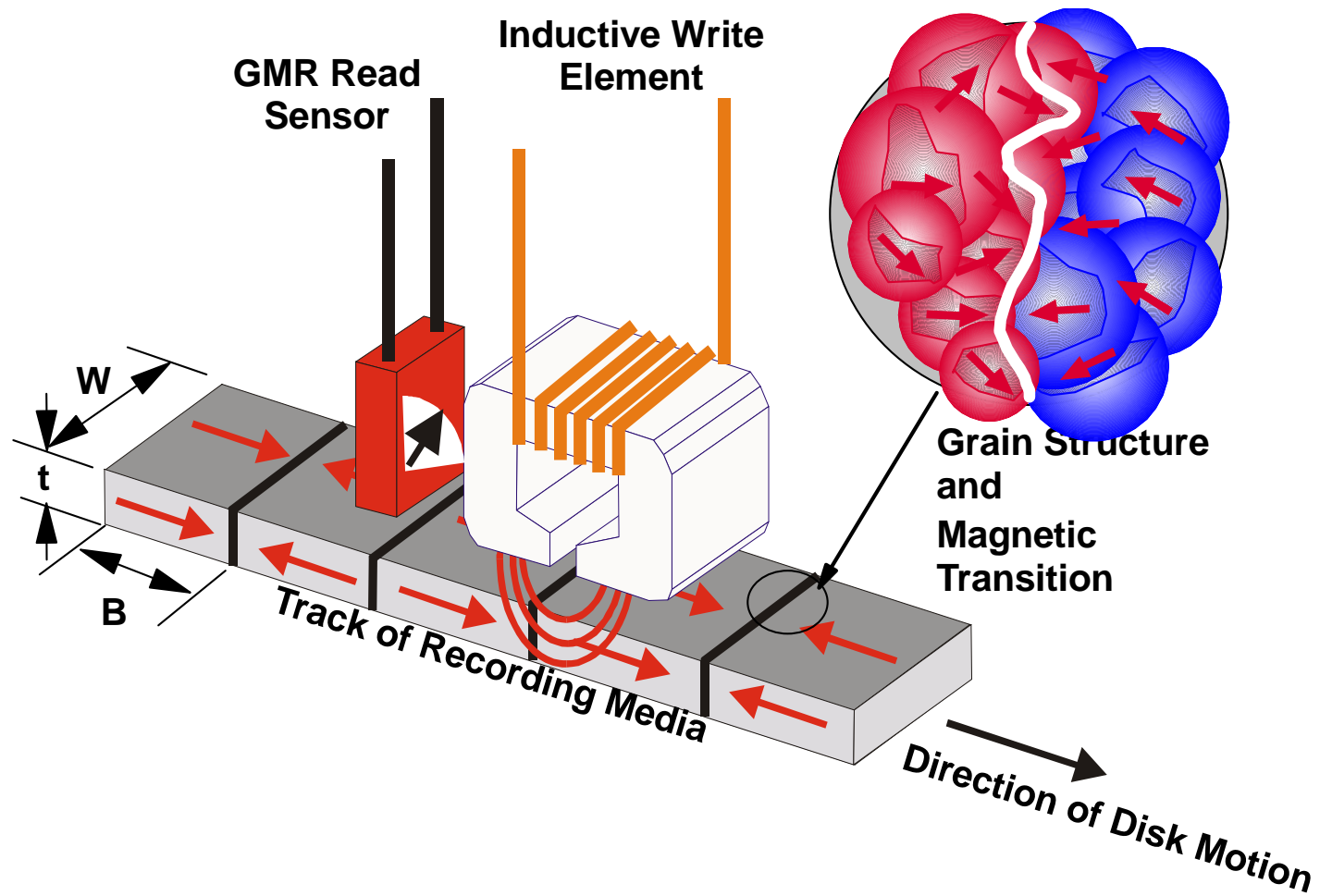
- コンピュータ
- パーソナル・ストレージ
- モバイル・ラップトップ
- Consumer electronics



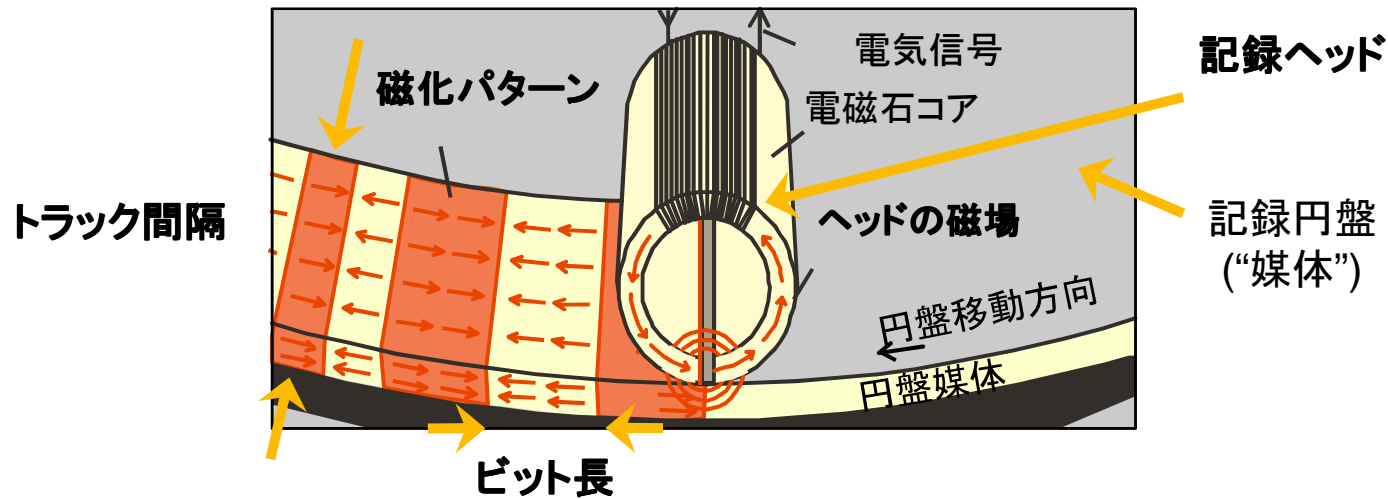
近年フラッシュ・メモリーを使った
SSD(Solid State Drive)が肉薄



磁気記録の原理



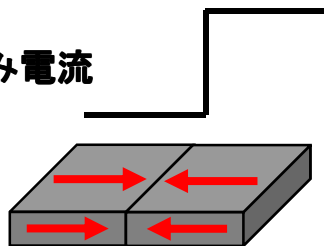
記録された“磁石” から 電気信号へ



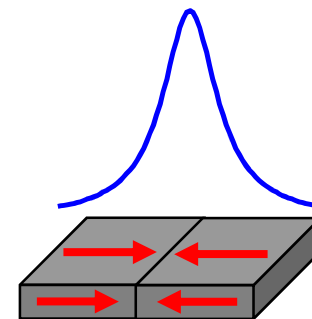
情報ビットは誘導ヘッドにより円盤上に小さな磁化された領域として書き込まれる。

磁化された領域からの磁場が磁気抵抗(MR)センサーの抵抗を変化させる際の電圧の変化として情報ビットを再生する。

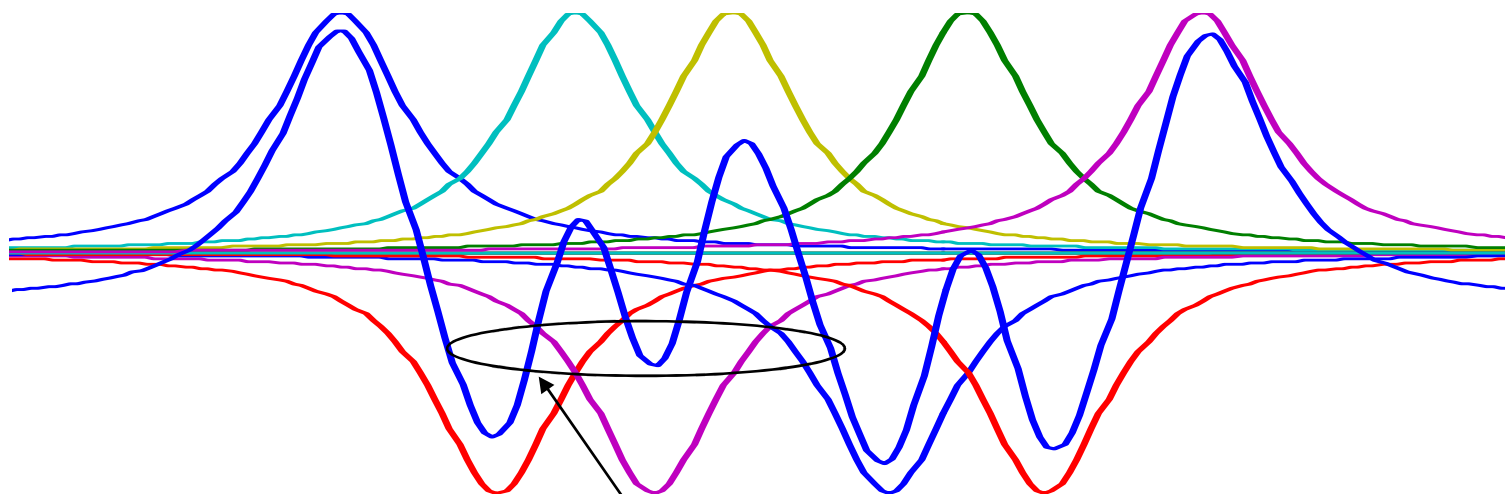
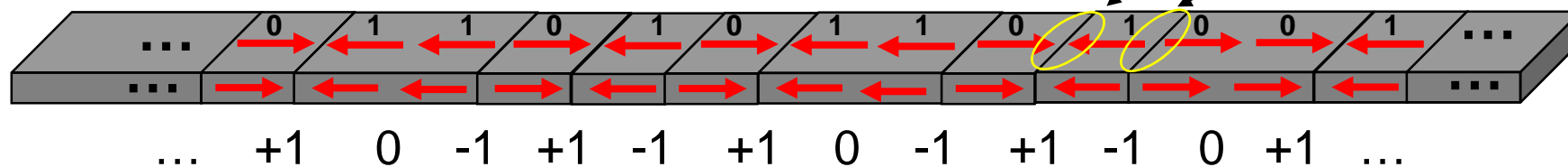
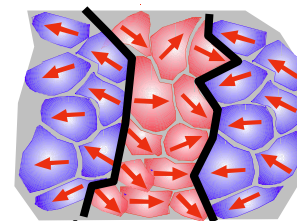
書き込み電流



再生信号

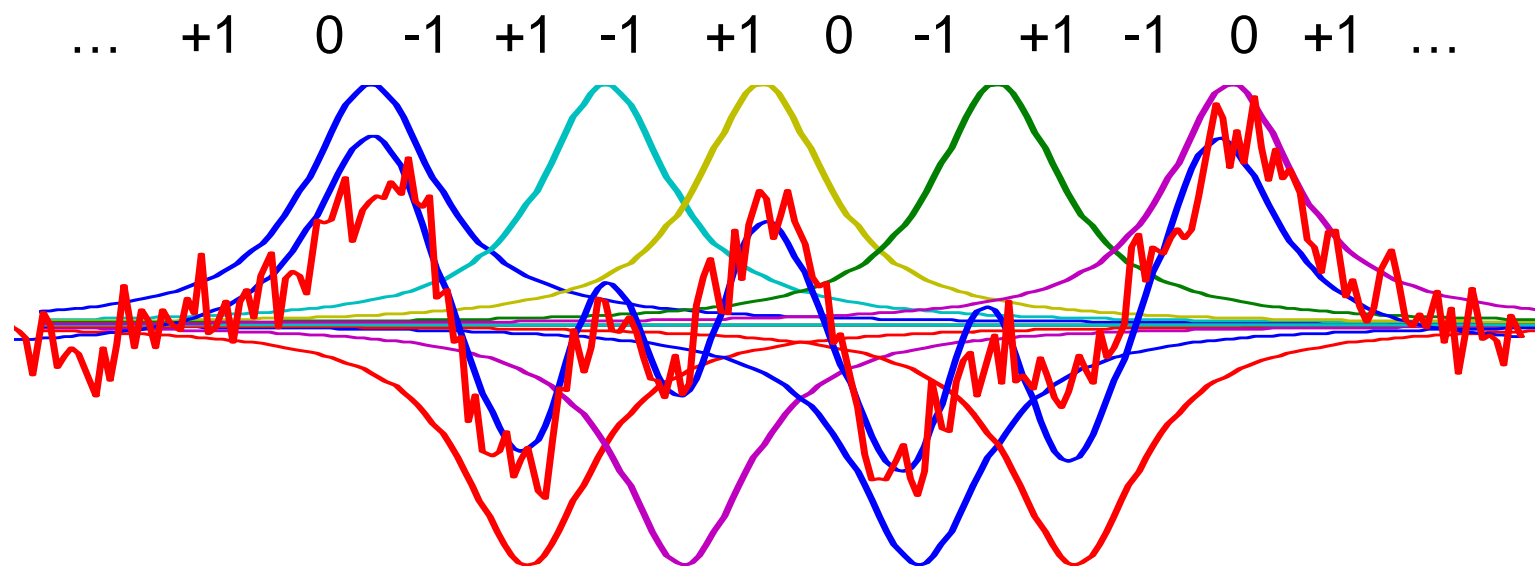


符号間干渉(Inter-symbol Interference)



符号間干渉で波形が歪んでいる

雑音(ノイズ)の影響



“パーシャル・レスポンス”の定義:

- 高速データ伝送の分野で提唱されたデュオ・バイナリー信号に端を發す (Adam Lender, 1964)。
- パーシャル・レスポンスはそれを一般化した概念 (E. R. Kretzmer, 1966)

上図: “フル・レスポンス”

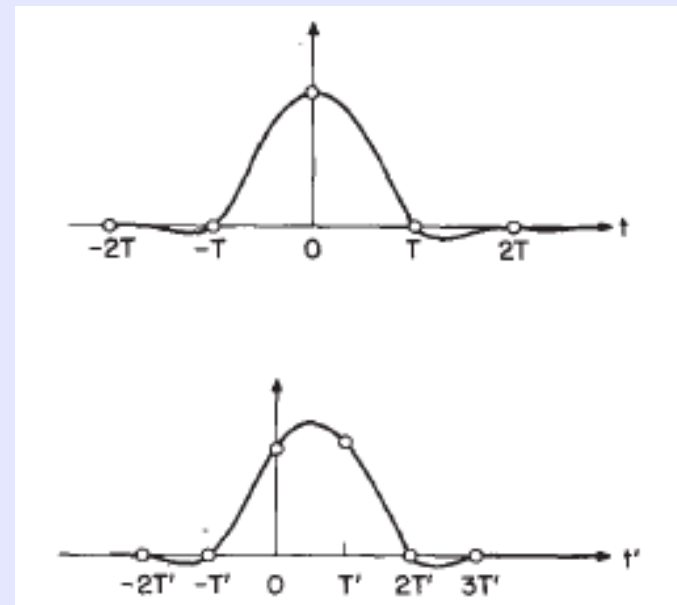
$$H(D)=1$$

下図: “パーシャル・レスポンス”

システム応答関数

$$H(D)=1 + D$$

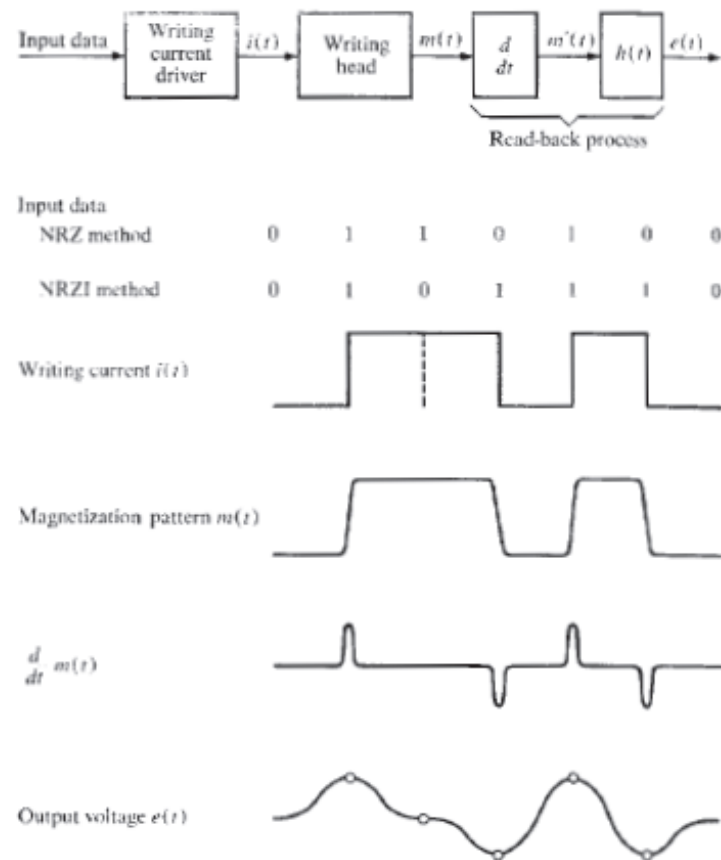
入力が $\{+1, -1\}$ の2値の場合、出力は $\{+1, 0, -1\}$ の3値になる。



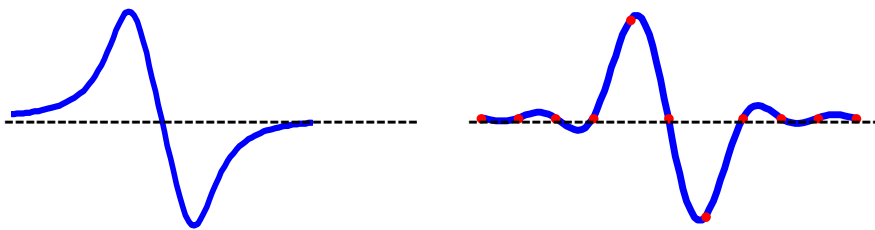
H. Kobayashi and D. T. Tang, "Application of Partial Channel Coding to Magnetic Recording System," IBM Journal of R & D, July 1970.

- ❖ 読み出し過程は線形システムとして扱える。
- ❖ 高密度記録方式は高速データ伝送システムと数学的には同等である。
- ❖ デジタル磁気記録システムは $H(D)=1-D$ なるパーシャル・レスポンスシステムとみなせる。

Figure 1 The NRZ and NRZI recording methods and the waveforms at various stages.



高密度のデジタル磁気記録方式の提唱(上記論文、1970)



- ❖ Shaping Filter (波形形成フィルター)を挿入することにより、システム応答関数を上図右側のように $H(D) = 1 - D^2$ とするシステムを提案しInterleaved NRZI と命名。

- ❖ Interleaved NRZIシステムは従来のNRZI システムより記録線密度を約50%上昇。

❖ 特許

H. Kobayashi and D. T. Tang, "Magnetic Data Storage System with Interleaved NRZI Coding," U.S. Patent No. 3,648,265, March 7, 1972

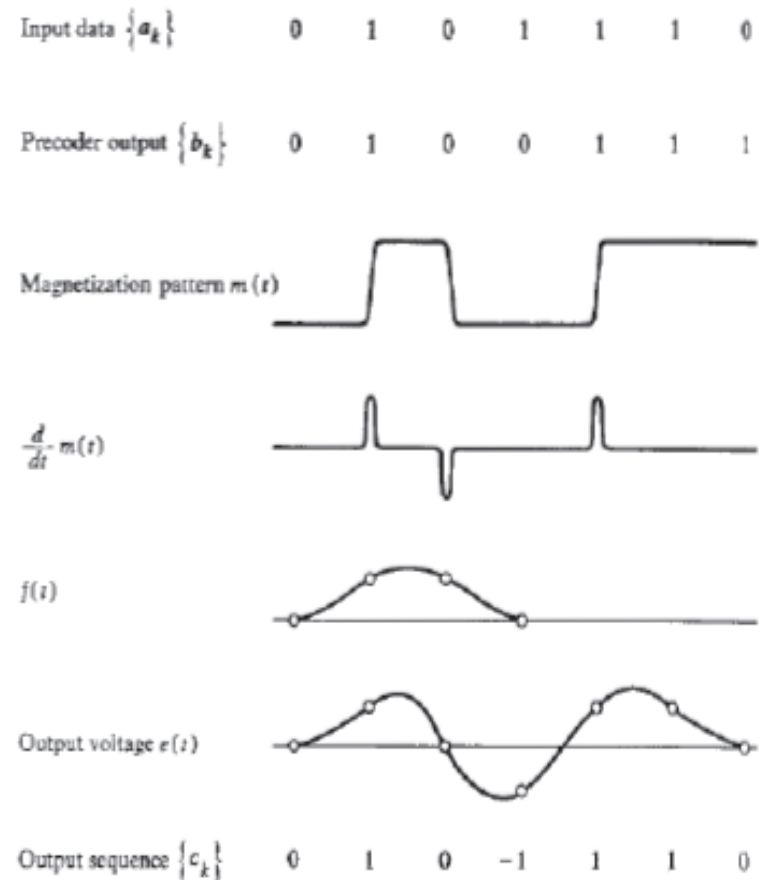
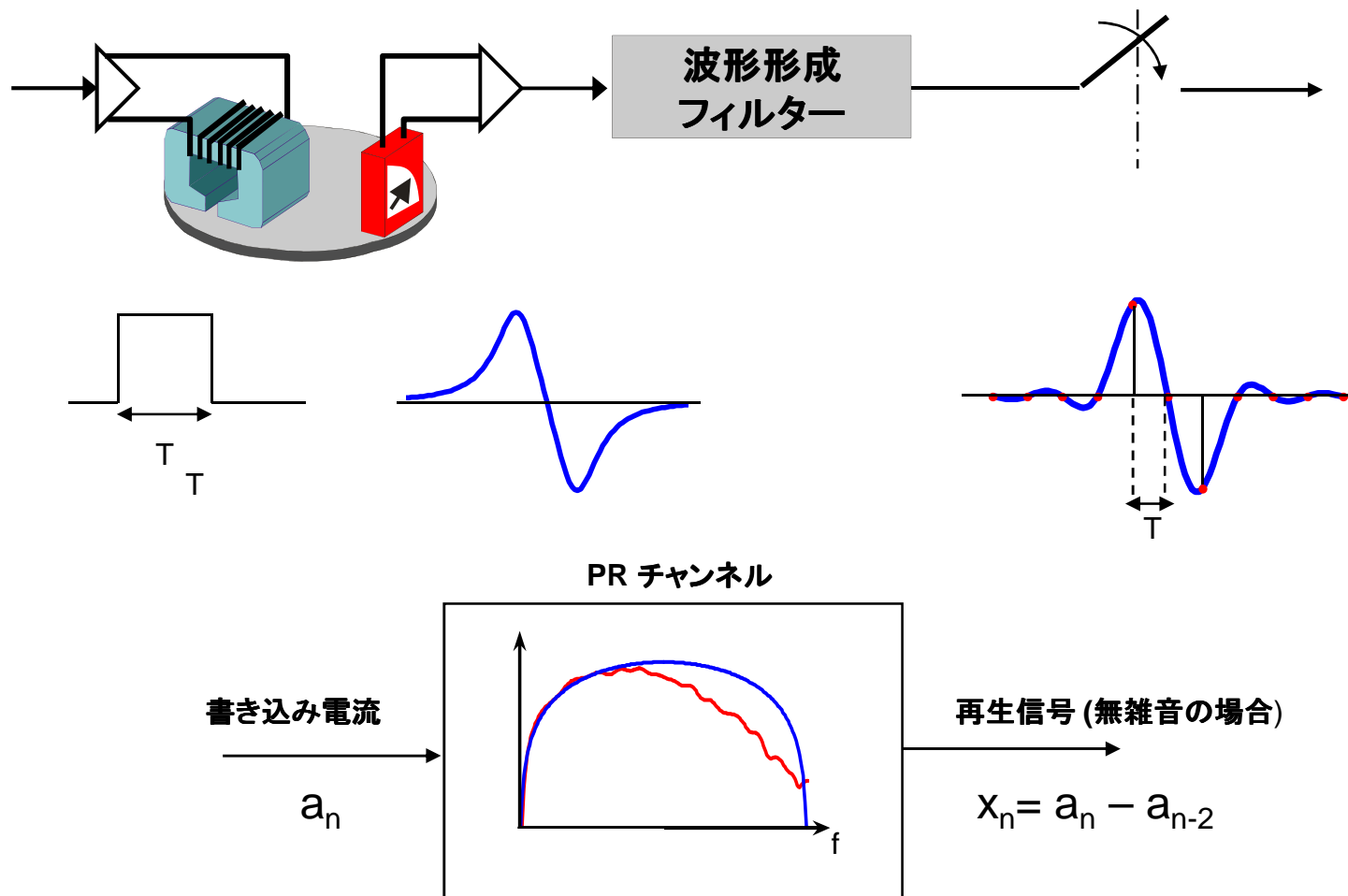


Figure 6 Waveforms at various stages in the Interleaved NRZI recording system.

パーシャル・レスポンス(PR) 波形の形成



ML (Maximum Likelihood:最尤) :

受信した信号を基に、送信された確立が最も大きい送信メッセージを推定することを指す。

1967年: Andrew J. Viterbi教授 (UCLA)が畳み込み符号化された受信信号から送信情報を最適に復号するアルゴリズムを発表。

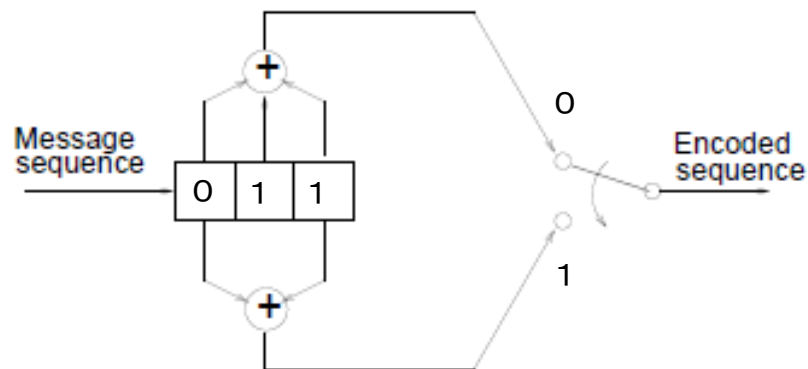
A. J. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and asymptotically optimum decoding algorithm," IEEE Information Theory, 1967.

1969年: Jim K. Omura助教授がViterbi Algorithm は Bellman のダイナミック・プログラミング (1953) と等価であると指摘。

J. K. Omura, "On the Viterbi decoding algorithm," IEEE Information Theory, 1969.

“畳み込み符号”(convolutional code) とパーシャル・レスポンス・システムとの類似性

■ Convolutional encoder の例

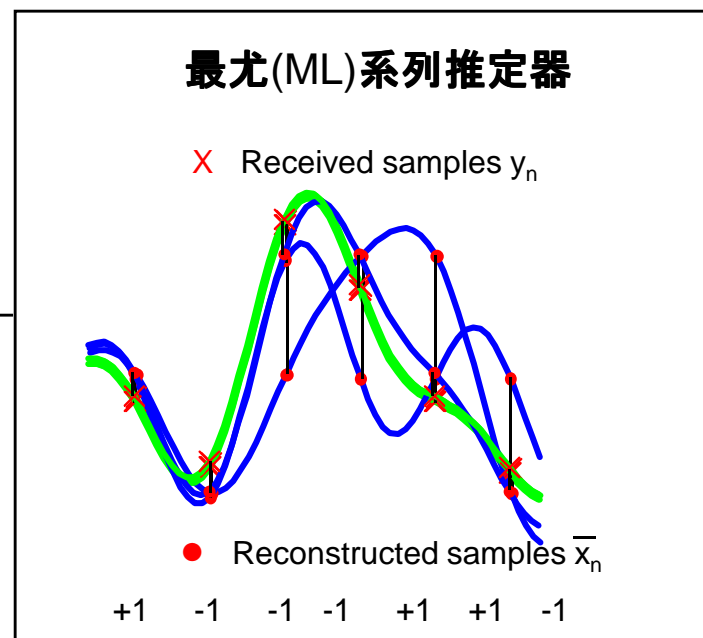
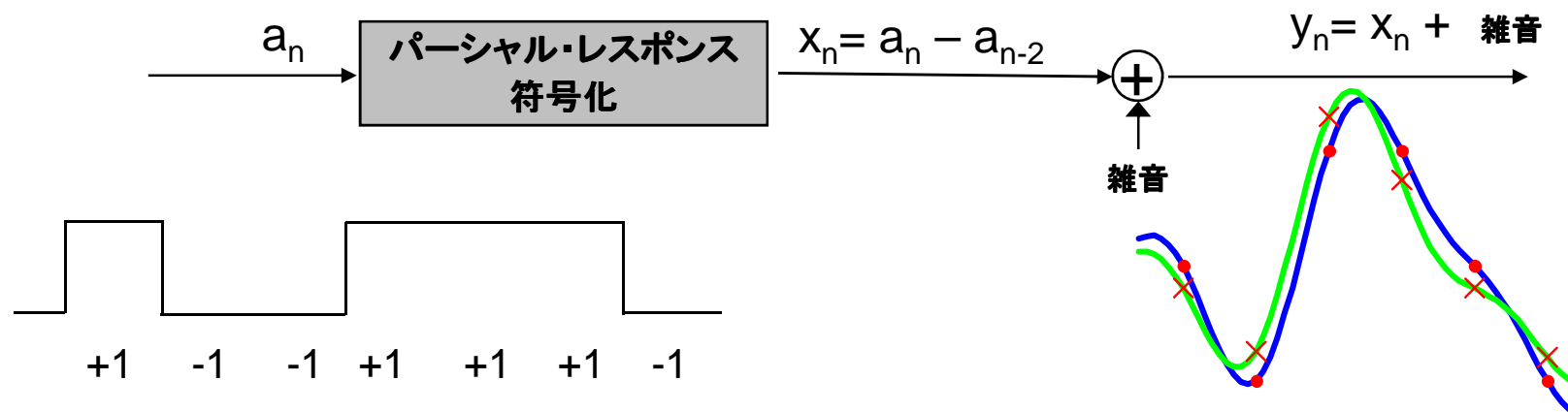


- ❖ 左から1ビットが入って来る毎に、符号器からは2ビットが出る。
- ❖ n ビットの入力系列に対し、 $2n$ ビットの系列が送信される。
- ❖ 受信側では 2^{2n} 個の系列の中、 2^n 個のみの系列が合法的な送信系列を利用し、送信中に導入された誤りを訂正できる。
- ❖ $n=10$ 、 $2^n=1024$ 、
 $2^{2n}=1,048,576$

パーシャル・レスポンスとの類似性と相違性

- ❖ 両システムも線形であり、出力は入力と $H(D)$ との畳み込み(convolution)として表せる。
- ❖ パーシャル・レスポンスは実数体(real number field)で定義されるのに対し、畳み込み符号化はガロア体(Galois field) $GF(2)$ 上で定義される。
- ❖ 両出力共、冗長度(redundancy)を持つ系列であるから誤り訂正能力を有する。

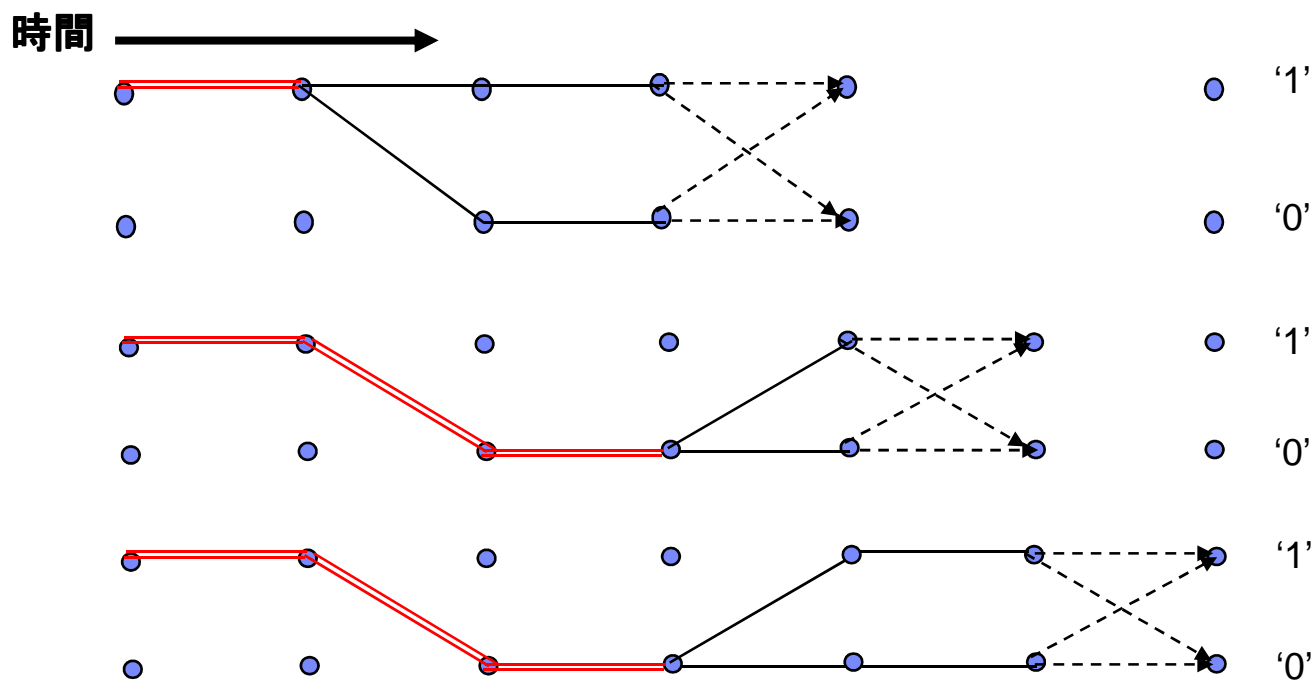
パーシャル・レスポンス最尤 (PRML)法



最尤データ系列 $\{\hat{a}_n\}$ は $\sum (y_n - x_n)^2$ を最小にする $\{x_n\}$ 系列を求めることにより得られる。

ヴィタービ・アルゴリズム (Viterbi Algorithm:VA)

- 最尤系列の判断(Maximum Likelihood Sequence Estimation) を力づくでやると計算量は系列長の指数関数的に増大する。
- VAアルゴリズムをPR信号に適用すれば、二乗距離 $\sum (y_n - (a_n - a_{n-2}))^2$ を最小にするML系列 $\{\hat{a}_n\}$ を簡単な再帰的アルゴリズムで求められる。



H. Kobayashi, "Application of Probabilistic Decoding to Digital Magnetic Recording Systems," *IBM Journal of R&D*, January 1971.

H. Kobayashi, "Correlative Level Coding and Maximum Likelihood Decoding," *IEEE Trans. on Information Theory*, September 1971.

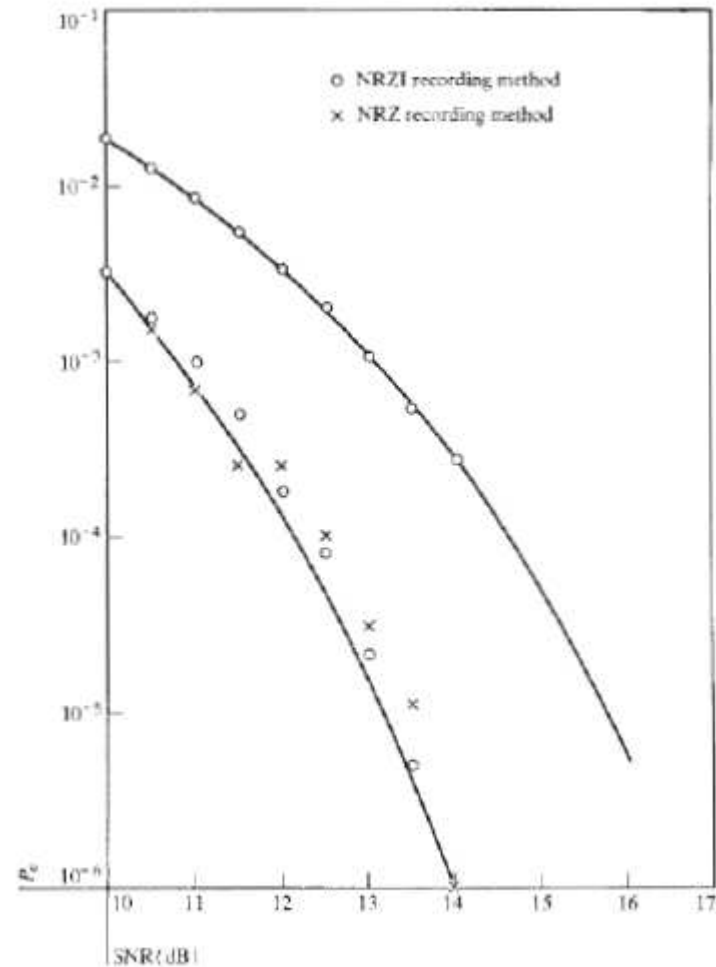


Figure 8 Simulation results of the maximum likelihood decoding method and the bit-by-bit detection method.

1970年:PRMLの理論確立

H. Kobayashi

Application of Probabilistic Decoding to Digital Magnetic Recording Systems

Abstract: A digital magnetic recording system is viewed in this paper as a linear system that inherently includes a correlative encoder. This encoder can be regarded as a linear finite-state machine like a convolutional encoder. The maximum likelihood decoding method recently devised by Viterbi to decode convolutional codes is then applied to digital magnetic recording systems. The algorithm and its implementation are discussed in detail.

Expressions for the decoding error probability are obtained and confirmed by computer simulations. It is shown that a significant improvement in the performance with respect to other methods is achievable by the maximum likelihood decoding method. For example, under the Gaussian noise assumption the proposed technique can reduce raw error rates in the 10^{-3} to 10^{-4} range by a factor of 50 to 300. These results indicate that the maximum likelihood decoding method gains as much as 2.5 dB in signal-to-noise ratio over the conventional bit-by-bit detection method.

Correlative Level Coding and Maximum-Likelihood Decoding

HISASHI KOBAYASHI, MEMBER, IEEE

Abstract—Modems for digital communication often adopt the so-called correlative level coding or the partial-response signaling, which attains a desired spectral shaping by introducing controlled intersymbol interference terms. In this paper, a correlative level encoder is treated as a linear finite-state machine and an application of the maximum-likelihood decoding (MLD) algorithm, which was originally proposed by Viterbi to decode convolutional codes, is discussed. Asymptotic expressions for the probability of decoding error are obtained for a class of correlative level coding systems, and the results are confirmed by computer simulations. It is shown that a substantial performance gain is attainable by this probabilistic decoding method.

Manuscript received August 6, 1970.
The author is with the IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, N.Y. 10598.

I. INTRODUCTION

A TECHNIQUE in digital data communication developed in recent years is the so-called correlative level coding (Lender [1]) or the partial-response channel signaling (Kretzmer [2]). This signaling method is different from the conventional pulse-amplitude modulation (PAM) system in that a controlled amount of intersymbol interference is introduced to attain a certain beneficial spectral shaping. Such a system possesses in general the property of being relatively insensitive to channel imperfections and to variations in transmission rate [3], [4]. Recently it has been pointed out [5] that a digital magnetic recording channel

1990: PRML が現実のものとなる。

38

IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 10, NO. 1, JANUARY 1992

A PRML System for Digital Magnetic Recording

Roy D. Cideciyan, *Member, IEEE*, François Dolivo, *Member, IEEE*, Reto Hermann, *Member, IEEE*,
Walter Hirt, *Member, IEEE*, and Wolfgang Schott, *Member, IEEE*

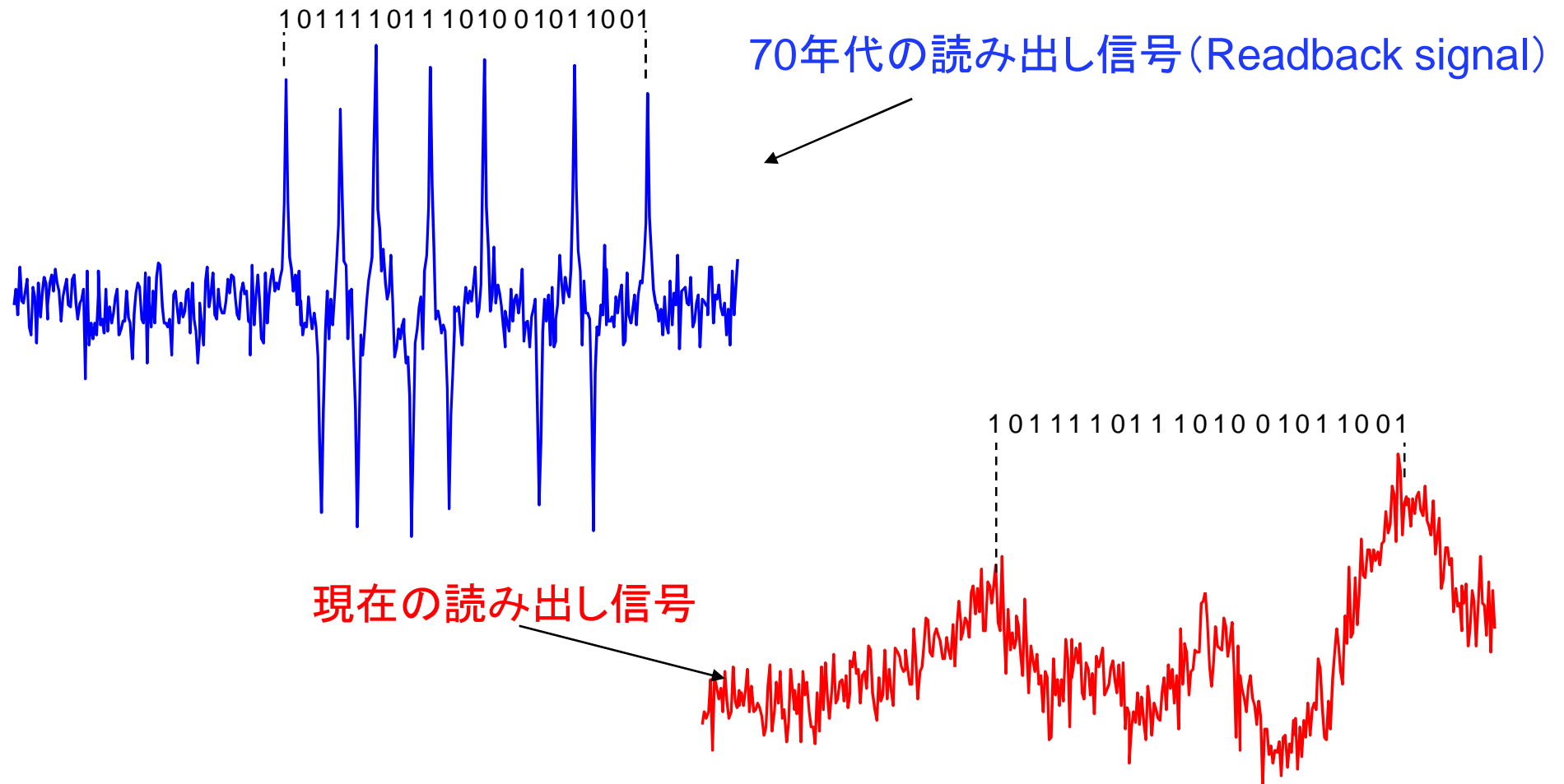
Abstract—Application of partial-response (PR) signaling and maximum-likelihood sequence detection (MLSD) to digital magnetic recording has been shown in theory and practice to further increase the storage densities and reliability that systems using run-length limited (RLL) coding and peak detection (PD)—still the prevalent signal processing techniques today—can currently achieve. In this paper, the realization of a digital

In saturation recording [18]—the method used almost universally for storing digital information—the data are recorded by switching the current in the recording head coil, which reverses the head fringing field while the magnetic medium is in motion, and thereby orients the magnetization along a track either in the direction of motion

**IBM ships the Industry's
first HDD based on PRML Technology**

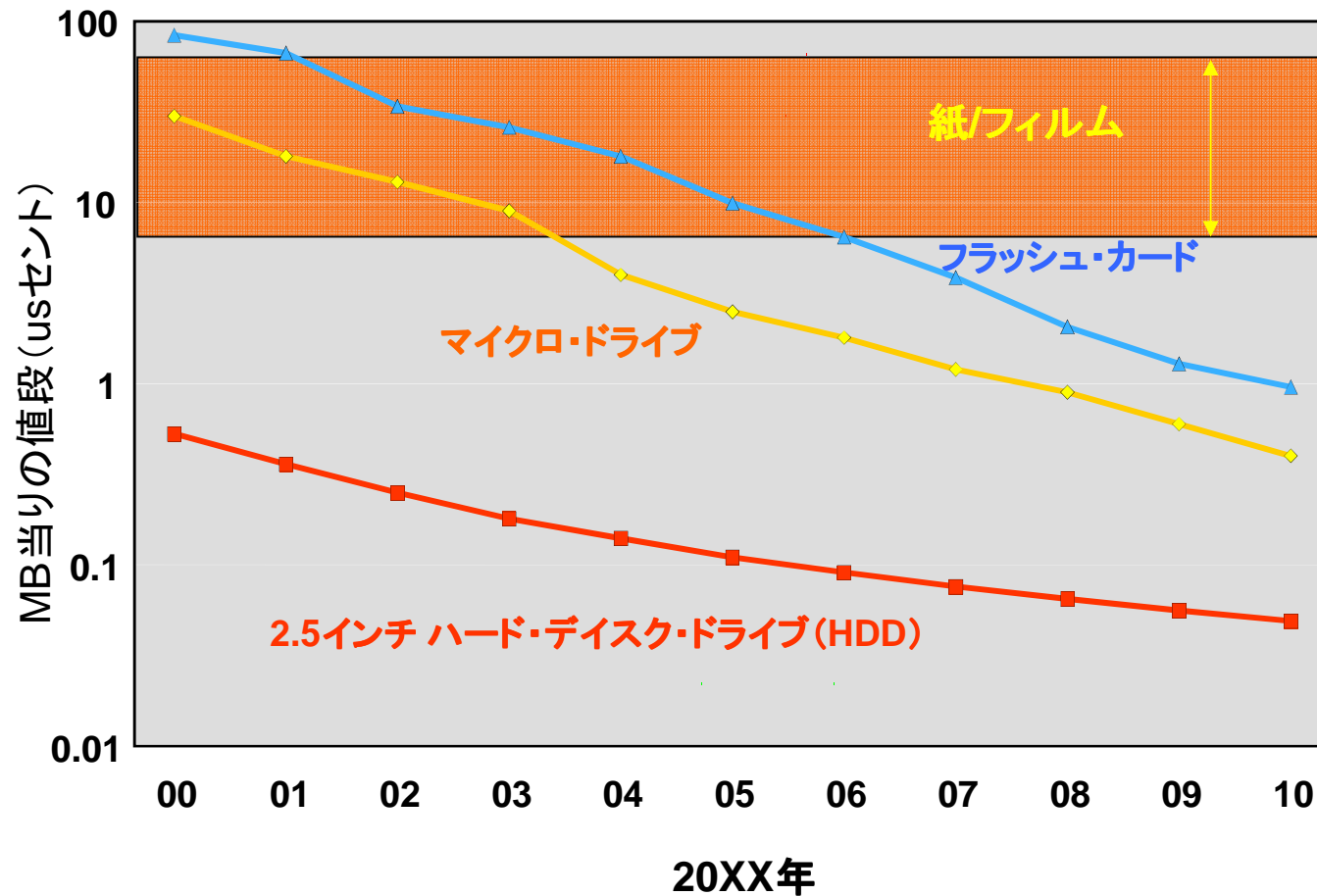
... PRML becomes de facto industry standard

Then and Now

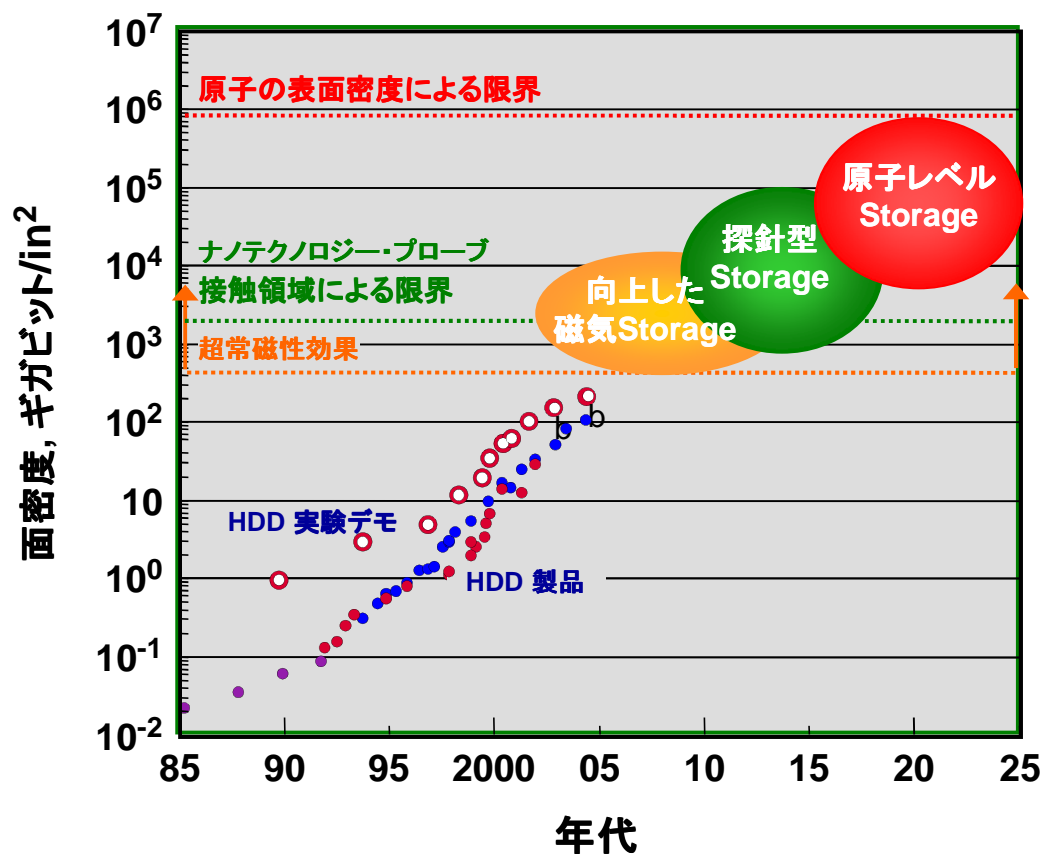


... 10^{15} ビット中で誤りを1ビット以下に抑えて情報を再生することが可能。

Cost of Storage



将来の予想



信号処理と符号化技術は過去40年、ストレージ密度をの目覚しい進歩に役立ってきた。物理的限界に近づくにつれ、益々本質的に重要となるであろう。

PRML理論の更なるインパクト

- ❖ 光学的デジタル記憶システムへの応用、CD, DVD 等
- ❖ 垂直磁気記録方式への応用
- ❖ PRMLの成功を契機として、多数の通信理論、情報理論の研究者がデジタル記録の分野に参入。
Turbo coding, BCJR decoding,
LDPC (Low density parity check)

他の関連文献

- 1) H. Kobayashi, “Partial-response coding, maximum-likelihood decoding: capitalizing on the analogy between communications and recording,” *IEEE Communications Magazine*, 2009.
- 2) G. D. Forney, Jr., “Maximum likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference,” *IEEE Trans. Information Theory*, 1972.
- 3) G. D. Forney, Jr., “The Viterbi Algorithm (invited paper),” *Proc. IEEE*, 1973.
- 4) H. Kobayashi, B. L. Mark and W. Turin, *Probability, Random Processes and Statistical Analysis*, Cambridge University Press, 2012, Chapter 20: *Hidden Markov models and applications*

Part II

- コンピュータおよび通信ネットワークの性能評価理論と手法に関する研究



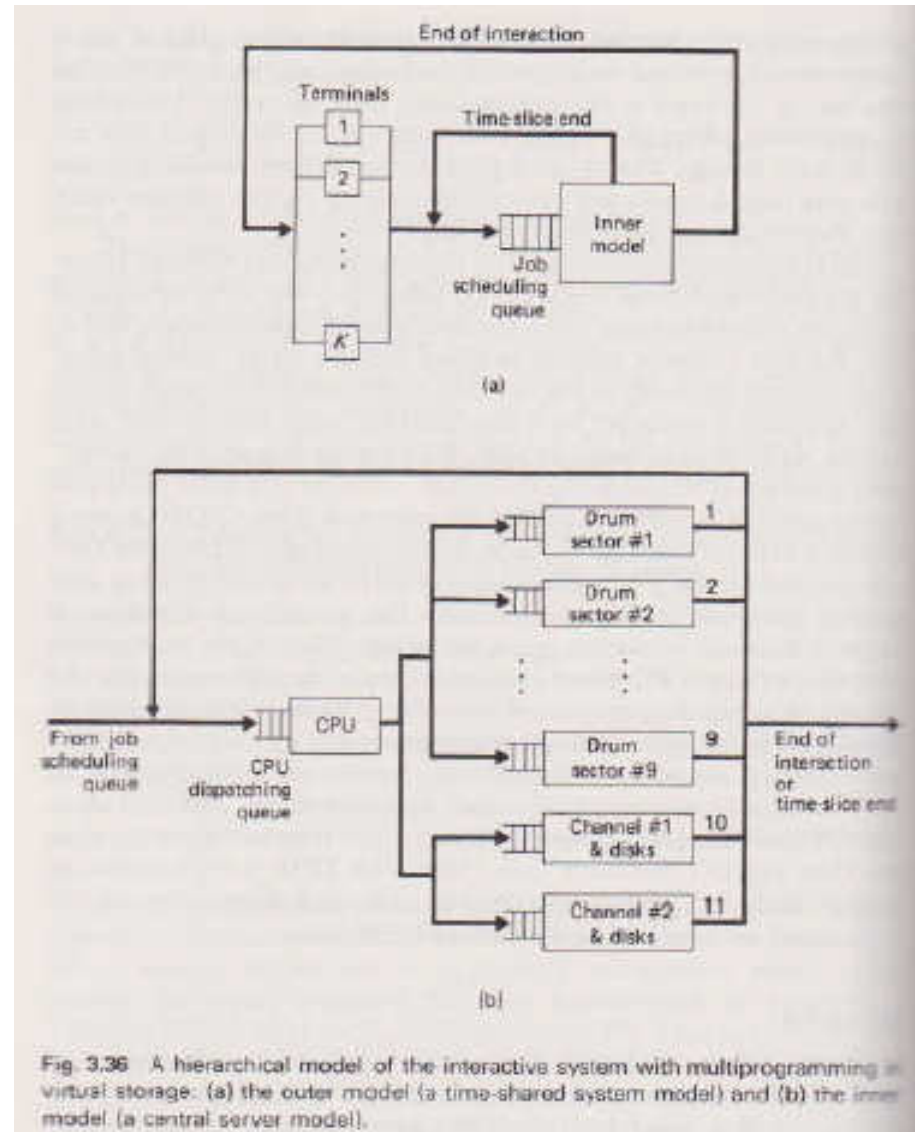
コンピュータ性能評価手法

- 1960年代後半のIBM360/MFT, 1970年代のIBM370/MVTの導入により、仮想記憶装置に基づく多重プログラミング・システムが趨勢となる。
- システム設計、開発、コンフィギュレーション, チューニングに役立つ性能評価、予測の手法の開拓が必須となる
- シミュレーション・プログラムはその開発に膨大な時間を要する割りには、役に立たぬことが多い。

解析的性能評価モデル:

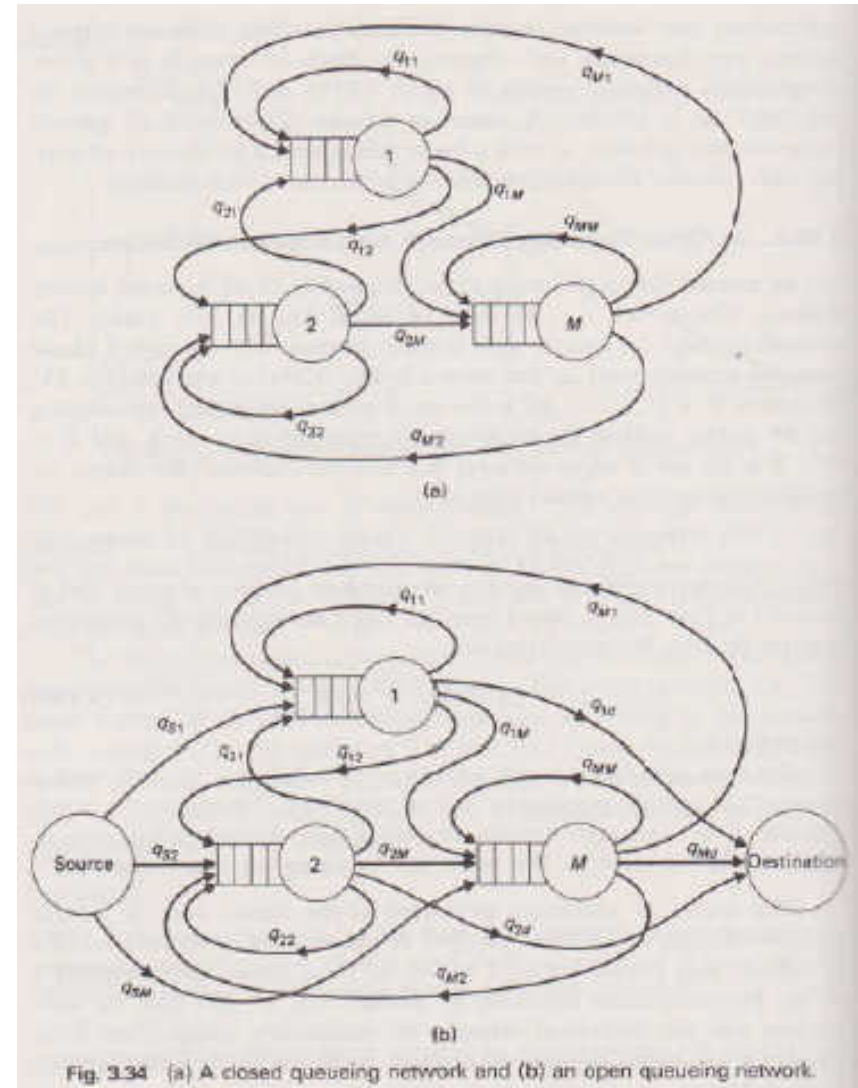
❖ 上層のモデル(outer model)は
タイムシェアリング・システム・モデル。

❖ 下層のモデル(inner model)は
セントラル・サーバー・モデル。



H. Kobayashi, *Modeling and Analysis: An Introduction to System Performance Evaluation Methodology* (Addison Wesley, 1978)

- ❖ マルコフ型の待ち行列網は同時平衡分布(Joint equilibrium distribution)は積形式解(Product-form solution)を持つ。
- ❖ 正規化定数(normalization constant) $G(N, M)$ を効率良く計算するアルゴリズムが重要。
- ❖ すべての性能指数が $G(N, M)$ で表せる。
 例へば;
 サーバ- M の利用率 $= 1 - G(N, M-1)/G(N, M)$
 サーバ- i のスループット $= G(N-1, M)e_i/G(N, M)$
- ❖ 小林とReiser は母関数(Generating Function)手法を駆使して $G(N, M)$ を効率良く計算するアルゴリズムを開拓。



QNET4 とRESQ: コンピュータの性能解析のための モデリング・パッケージ

開発者: Dr. Martin Reiser, Dr. Charles Sauer,
Mr. Ed MacNair

- ❖ ユーザーはシステム構成、ジョブのルーチング、
確率分布パラメータを簡単な記述言語で入力。
- ❖ 問題に応じて、解析的に解くか、シミュレーションにするか、
指定する。
- ❖ シミュレーションのランタイムの長さを統計解析的に推
定する。
- ❖ IBM社内は勿論、多くの大学での研究・教育にも使われた。

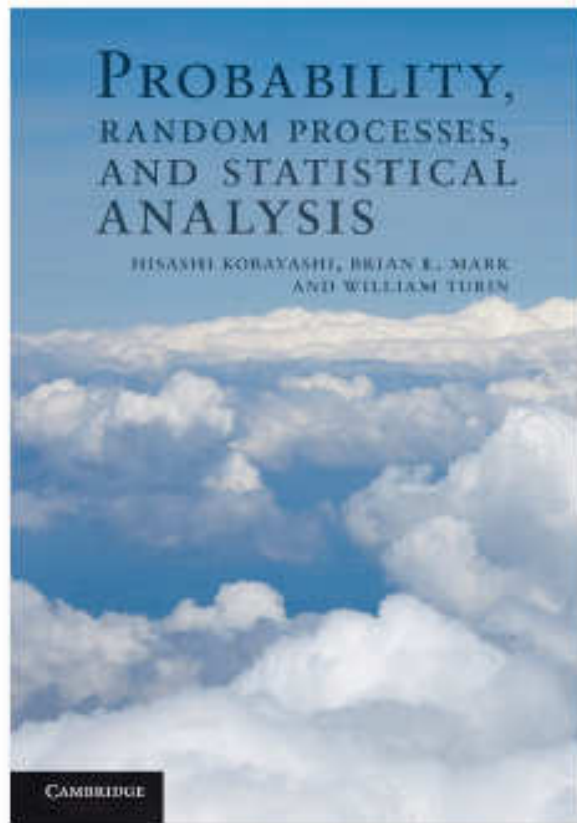
性能評価理論の分野の変遷と展望

- 大型システムからPC, サーバー・クライアント・パラダイムからピア・ツー・ピア(peer-to-peer)にシフトするに伴い従来の性能評価手法へのニーズ薄れる。
- インターネットでは、性能保障の概念がなく、ベスト・エフォートで満足する文化が支配。
- コンピューティング・パワー、ストレージ、通信大域幅のコストが激減。オーバー・デイメンショニングで問題を解決。
- フューチャア・インターネットやクラウド・コンピューティングでは評価理論やツールの重要性が再認識されるだろう。
<http://hp.hisashikobayashi.com/241/>

コマーシャル

CAMBRIDGE

www.cambridge.org/us/9780521895446



Probability, Random Processes, and Statistical Analysis

Applications to Communications, Signal Processing, Queueing Theory and Mathematical Finance

Hisashi Kobayashi
Princeton University, New Jersey

Brian L. Mark
George Mason University, Virginia

William Turin
AT&T Bell Laboratories, New Jersey