情報処理学会論文誌　数理モデル化と応用　Vol. 3　No. 1　13–24 (Jan. 2010)

多端子情報理論に基づくセンサネットワークのモデル化と信頼度評価

野　村　　亮[†1]　　松　嶋　敏　泰[†2]

センサネットワークとは，多くのセンサデバイスをネットワークで接続し，情報通信を行うことによりセンシングの高度化を図る技術である．センサネットワークは，センシング，情報理論，制御理論など様々な技術を基盤としているが，本研究では，センサネットワークを支える基礎理論の 1 つである多端子情報理論に着目する．従来の多端子情報理論における研究では情報源の確率構造，通信路の確率構造が既知という条件がおかれていた．これらはセンサネットワークにおいて，観測信号の生起確率が既知であることとネットワークにおけるエラーの生起確率が既知であることに相当するが，センサネットワークにおいてこの双方の生起確率が既知である保証はない．多端子情報理論の視点からこれら生起確率が未知であるセンサネットワークを研究するためには，情報源や通信路の確率構造が未知の条件下で研究を進める必要があるが，多端子情報理論においてはこれら確率構造が未知という条件下での研究は少ない．そこで本研究では，多端子情報理論において情報源の確率構造が未知の条件下で誤りなく伝送可能な条件を示すことを目的とする

A Modeling and Evaluation of Sensor Network Based on Multiterminal Information Theory

Ryo Nomura[†1] and Toshiyasu Matsushima[†2]

Sensor network is one of the main topics in communication systems. Recently, a theoretical analysis of sensor network based on multiterminal information theory was discussed. On the other hand in multiterminal information theory, a probability distribution of information signal and channel structure are assumed to be known. However, in practical use such as sensor network, the probability of occurence of signals or the probability of occurence of noise are not always known. So in this paper, we assume that the probability distribution of information signal is not known and we show the achievable condition that shows the existence of a code with small error probability.

1. はじめに

センサネットワークは，センシング，情報理論，制御理論など様々な技術を基盤としている[1)] が，本研究では，センサネットワークを支える基礎理論の 1 つである多端子情報理論に着目する．多端子情報理論は複数の情報源，複数の通信路を対象とした符号化システムをモデル化したもので，ネットワークの構造において様々なモデルを考えることができる[2),3)]．

一方センサネットワークも様々な種類を考えることができるが，本研究では最も基本的なモデルの 1 つである，1 つの事象から発生する信号を複数のセンサで観測し，得られた情報を複数の通信路を用いて 1 つの受信者へ送信する場合を考える．**図 1** に対象とするセンサネットワークの一例を示す．

多端子情報理論を用いてこの問題をモデル化する際に最も適しているモデルは相関を許した情報源をともなう多重アクセス通信路モデルと考えられる．相関を許した情報源をともなう多重アクセス通信路とは，情報源から確率的に発生する複数の系列を別々に符号化し，それぞれ異なる通信路を通じて受信者へと伝達する通信システムである．ここで通信路では

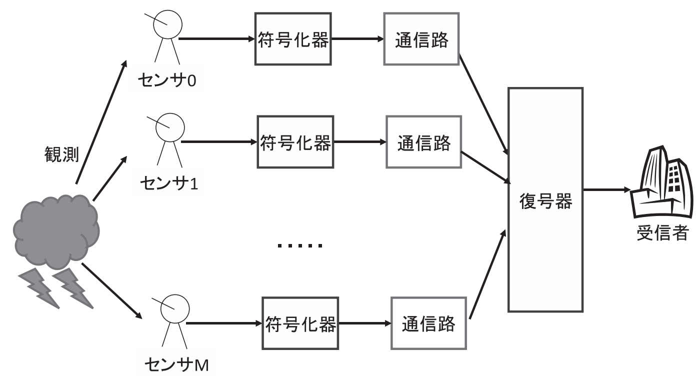

図 1　センサネットワークの一例
Fig. 1　A sensor network.

†1 青山学院大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Aoyama Gakuin University
†2 早稲田大学理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University

確率的に雑音が混入するモデルを考える．ここでセンサネットワークにおいて情報源とは観測事象に相当し，通信路とは白色雑音の混入など，周囲の雑音の影響を表す．また，符号化とは観測事象から出力される信号を観測し，別の信号へ変換することを意味している．

この相関を許した情報源をともなう多重アクセス通信路モデルに対しては従来，Cover らが情報源の確率分布が定常独立分布かつ通信路の確率構造も定常独立分布の際に，誤りなく伝送可能な条件を示している[4]．また近年，Iwata らは情報源，通信路を一般情報源，一般通信路というきわめて広いクラスの確率分布を仮定したとき，微小の誤りを許容したもとでの符号化システムの存在条件を示した[5]．しかしながらこれらの結果は情報源，通信路の確率構造が既知の場合の結果となっている．相関を許した情報源をともなう多重アクセス通信路に限らず，従来の多端子情報理論における研究のほとんどは情報源の確率構造，通信路の確率構造が既知という条件をおいている[2),3),6]．これらはセンサネットワークにおいて，観測信号の生起確率が既知であることとネットワークにおけるエラーの生起確率が既知であることに相当するが，センサネットワークにおいてこの双方の生起確率が既知である保証はない．相関を許した情報源をともなう多重アクセス通信路モデルを用いて，これら生起確率が未知であるセンサネットワークを研究するためには，情報源や通信路の確率構造が未知の条件下で研究を進める必要があるが，従来これらが未知の仮定をおいた研究は見られない．そこで本研究では，相関を許した情報源をともなう多重アクセス通信路モデルにおいて情報源の確率構造が未知の条件下で誤りなく伝送可能な条件を示すことを目的とする．

本論文の構成は以下のとおりである．2 章で対象とする情報源・通信路を述べ，合わせて誤り確率を定義し，従来研究を述べる．3 章では情報源の確率構造が未知の場合における達成可能性について定義し，4 章で情報源の確率構造が未知の場合の達成可能性を評価する．最後に 5 章でまとめを述べる．

2. 準　　備

2.1 相関を許した一般情報源と一般多重アクセス通信路

$\mathcal{V}_k^n$（$n \in \mathcal{N} \equiv \{1, 2, \cdots\}$）を情報源アルファベットとする．ここで $\mathcal{V}_k^n$ は有限あるいは加算無限個のアルファベット集合であり，k は情報源に対するインデックス，すなわちネットワークの数を表すが，本研究では簡単のため，$k = 2$ の場合のみを考える．また一般情報源を $\mathbf{V} = \{V^n\}_{n=1}^{\infty} = \{(V_1^n, V_2^n)\}_{n=1}^{\infty}$ で表す．ここで

$$(V_1^n, V_2^n) = (V_{11}, V_{21}), (V_{12}, V_{22}), \cdots, (V_{1n}, V_{2n}),$$

は情報源 $\mathbf{V}$ より出現する確率変数であり，その実現値を

$$(\mathbf{v_1}, \mathbf{v_2}) = (v_{11}, v_{21}), (v_{12}, v_{22}), \cdots, (v_{1n}, v_{2n})$$

と書く．さらに系列 $(\mathbf{v_1}, \mathbf{v_2})$ の確率分布を $P_{V^n}(\mathbf{v_1}, \mathbf{v_2})$ と表す．ここで相関を許した情報源を考えているため，V_1^n と V_2^n は任意の相関を有してよいとする．一般情報源とは，整合性条件すら仮定しないきわめて一般的な情報源であり，すべての非定常，非エルゴードな情報源を含んでいる[3),7]．

次に一般多重アクセス通信路を定義する．$\mathcal{X}^n = \mathcal{X}_1^n \times \mathcal{X}_2^n$ と $\mathcal{Y}^n$ をそれぞれ通信路入力，出力アルファベットとする．$X_k^n = X_{k1}, X_{k2}, \cdots, X_{kn}$ と $Y^n = Y_1, Y_2, \cdots, Y_n$ を k 番目の通信路への入力，出力の確率変数とし，それぞれの実現値を $\mathbf{x_k}$，$\mathbf{y}$ とする．以上のもとで次の条件付き確率分布を考える．

$$W^n = W^n(\mathbf{y}|\mathbf{x_1}, \mathbf{x_2}).$$

ここで，条件付き確率分布は次を満たす任意の分布とする．

$$\sum_{\mathbf{y} \in \mathcal{Y}^n} W^n(\mathbf{y}|\mathbf{x_1}, \mathbf{x_2}) = 1, (\forall n = 1, 2, \cdots, ; \forall \mathbf{x_1} \in \mathcal{X}_1^n, \mathbf{x_2} \in \mathcal{X}_2^n). \tag{1}$$

このとき，上記の条件付き確率分布の系列 $\mathbf{W} = \{W^n\}_{n=1}^{\infty}$ を一般（2 入力）多重アクセス通信路と呼ぶ．一般多重アクセス通信路は式 (1) を満たしていることのみを要請するため，非常に一般的ですべての非定常や非エルゴードな通信路を含んでいる[3),8]．

2.2 達成可能性の定義

上で定義した相関のある情報源と多重アクセス通信路における符号化システムの存在条件を示す達成可能性を定義する．まず符号器，復号器を定義する．関数の組 $\phi_n^{(1)} : \mathcal{V}_1^n \to \mathcal{X}_1^n$，$\phi_n^{(2)} : \mathcal{V}_2^n \to \mathcal{X}_2^n$ を符号器とし，$\psi_n : \mathcal{Y}^n \to \mathcal{X}_1^n \times \mathcal{X}_2^n$ を復号器とする．ここで，符号器 $\phi_n^{(k)}$ は情報源系列 $\mathbf{v_k}$ のみを観測し，$\mathbf{v_k}$ を $\mathbf{x_k}$ へと符号化する．それぞれの符号器は別々に情報源系列を観測し，符号化することに注意されたい．復号器は通信路出力 $\mathbf{y}$ より情報源系列の推定値 $(\hat{\mathbf{v_1}}, \hat{\mathbf{v_2}})$ を出力する．**図 2** にこの符号化システムを示す．

このとき符号器復号器 $(\phi_n^{(1)}, \phi_n^{(2)}, \psi_n)$ が与えられた際の誤り確率 ϵ_n は次式で定義される．

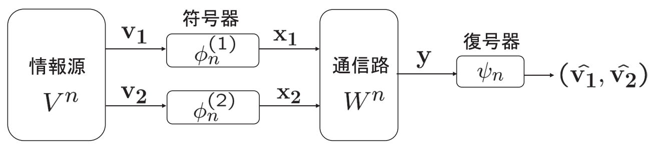

図 2　相関のある情報源と多重アクセス通信路
Fig. 2　2 input multiple access channel with correlated sources.

$$\epsilon_n \equiv \Pr\{V^n \neq \psi_n(Y^n)\} = \sum_{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n} P_{V^n}((\mathbf{v_1},\mathbf{v_2}))W^n(\mathcal{D}_n^c(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})|\phi_n^{(1)}(\mathbf{v_1}),\phi_n^{(2)}(\mathbf{v_2})), \tag{2}$$

ここで $\mathcal{D}_n((\mathbf{v_1},\mathbf{v_2}))$ は $(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})$ の復号領域と呼ばれ

$$\mathcal{D}_n((\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})) \equiv \{\mathbf{y}\in\mathcal{Y}^n|\psi(\mathbf{y})=(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\},$$

で定義される．また c は補集合を表す．さらに誤り確率 ϵ_n を持つ符号器復号器 $(\phi_n^{(1)},\phi_n^{(2)},\psi_n)$ を (n,ϵ_n) 符号と呼ぶ．

以上のもとで伝送可能な条件を示す達成可能性を定義する．

定義 2.1　任意の $0\le\epsilon<1$ が与えられたもとで，次を満たす (n,ϵ_n) が存在するとき，相関のある情報源 $\mathbf{V}$ は多重アクセス通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能と呼ぶ．

$$\limsup_{n\to\infty}\epsilon_n\le\epsilon.$$

ここで，ϵ は許容可能な誤り確率を表す．

本研究では簡単のため，情報源 $\mathbf{V}$ は通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能であると呼ぶことにする．情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能であるとはすなわち，漸近的に誤り確率が ϵ 以内で情報を伝送可能な符号器復号器が存在することを示している．

2.3　従 来 研 究

Cover らは情報源の確率分布 $P_{V^n}(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})$ が定常独立分布，すなわち

$$P_{V^n}(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})=\prod_{i=1}^n P_V(v_{1i},v_{2i})$$

が成立し，また通信路の確率分布が定常独立分布，すなわち $(\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2)$ が与えられた際に

$$W^n=(\mathbf{y}|\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2)=\prod_{i=1}^n W_i(y_i|x_{1i},x_{2i}), \tag{3}$$

が成立する通信路を考え，このとき情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して 0-達成可能な条件を求めた[4]．

一方近年 Iwata らが一般情報源と一般通信路に対して ϵ-達成可能な条件を求めた[5]．この結果を述べる前に次の補助変数を定義する．

$$l=\begin{cases}1 & k=2\\ 2 & k=1\\ 0 & k=0.\end{cases}$$

さらに $k=1$，2 に対して次の量を定義する．

$$i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\equiv\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_l^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_l^n)}{P_{Y^n|X_l^nV_l^n}(Y^n|X_l^n,V_l^n)},$$

$$h(V_k^n|V_l^n)\equiv\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V_k^n|V_l^n}(V_k^n|V_l^n)},$$

ここで $k=0$（すなわち $l=0$）のとき同様に次の量を定義する．

$$i(X_0^n;Y^n|X_0^n,V_0^n)\equiv\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n}(Y^n)},$$

$$h(V_0^n|V_0^n)\equiv\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_1^n,V_2^n)},$$

ここで，確率変数 V_1^n，V_2^n，X_1^n，X_2^n，Y^n は次の性質を満たす．すなわち，任意の $(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2,\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2,\mathbf{y})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n\times\mathcal{X}_1^n\times\mathcal{X}_2^n\times\mathcal{Y}^n$ に対して

$$P_{V_1^nV_2^nX_1^nX_2^nY^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2,\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2,\mathbf{y}) = P_{V_1^nV_2^n}(\mathbf{v}_1\mathbf{v}_2)P_{X_1^n|V_1^n}(\mathbf{x}_1|\mathbf{v}_1)P_{X_2^n|V_2^n}(\mathbf{x}_2|\mathbf{v}_2)W^n(\mathbf{y}|\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2), \tag{4}$$

がすべての $n=1,2,\cdots$ で成立する．以上のもとで Iwata らは次の定理を示した[5]．

定理 2.1（順定理）[5]　ある通信路入力 $\{(X_1^n,X_2^n)\}_{n=1}^\infty$ とある $\gamma>0$ に対して

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^2[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)+\gamma]\right\}\le\epsilon, \tag{5}$$

が成立すれば情報源 $\mathbf{V}$ は通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能である．ただし，Y^n は入力 (X_1^n,X_2^n) に対する通信路出力である．□

定理 2.2（逆定理）[5]　情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能であれば，ある通信路入力 $\{(X_1^n,X_2^n)\}_{n=1}^\infty$ と任意の $\gamma>0$ に対して

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^2[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)-\gamma]\right\}\le\epsilon, \tag{6}$$

が成立する．ただし，Y^n は入力 (X_1^n,X_2^n) に対する通信路出力である．□

順定理とは，誤り確率が ϵ 以内の符号器復号器が存在するための十分条件を示しており，

また逆定理は必要条件を示している．上記の結果は相関を許した一般情報源と一般多重アクセス通信路というきわめて広いクラスに対して成立していることに注意されたい．

一方で，この結果は情報源 $\mathbf{V}$ と通信路 $\mathbf{W}$ の確率分布が既知の場合の結果となっている．前述のとおり実用面から考えると情報源 $\mathbf{V}$，通信路 $\mathbf{W}$ の確率分布は未知である場合も多く考えられる．そこで本研究では情報源 $\mathbf{V}$ の確率分布が未知である場合を考える．

3. ϵ-ユニバーサル達成可能性

3.1 対象とする情報源と通信路

情報理論において，情報源あるいは通信路の確率分布が未知である場合の符号化をユニバーサル情報源符号化，ユニバーサル通信路符号化と呼ぶ[9),10)]．これらは 1 対 1 通信における符号化定理を述べたもので，すでに述べたように多端子情報理論においてユニバーサルな符号化を考えた研究は少ない．そのような状況の中で韓は相関を許す情報源に対する情報源符号化において複合情報源に対する結果を得ている[3)]．複合情報源とは情報源の確率分布を規定するパラメータが存在する状況を考え，パラメータ集合は既知であるが，実際のパラメータは未知である情報源を表す．複合情報源は実際のパラメータが未知であるという意味でユニバーサル情報源符号化の 1 つと考えられる．

本研究でも同様に情報源として複合情報源を考える．パラメータ集合を M とし，μ（$\mu \in M$）で規定される相関を許した情報源を定常独立分布と仮定する．すなわち，M は任意の定常独立な相関を許した情報源の集合となる．パラメータ μ（$\mu \in M$）で規定される定常独立な相関を許した情報源を

$$\mathbf{V}_\mu = \{V_\mu^n\}_{n=1}^\infty = \{(V_{\mu 1}^n, V_{\mu 2}^n)\}_{n=1}^\infty$$

と書くことにする．さらに μ の事前確率として $w(\mu)$ を定義し，これが既知であるとする．

注意 3.1　センサネットワークに限らず一般にパラメトリックな情報源における事前分布 $w(\mu)$ が既知でない場合も多々考えられる．この場合には，無情報事前分布を用いることで対応可能である[11)]．無情報事前分布の代表的なものとしてはパラメータ空間 M が離散集合の場合は一様分布，連続の場合は Jeffreys' 事前分布などがある．□

情報源アルファベット $\mathcal{V}_1$，$\mathcal{V}_2$ は有限を仮定する．

また通信路は一般の多重アクセス通信路を考える．μ が与えられたもとでの誤り確率は次のように定義される．

$$\epsilon_n^{(\mu)} = \sum_{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2}) \in \mathcal{V}_1^n \times \mathcal{V}_2^n} P_{V_\mu^n}((\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})) W^n(\mathcal{D}_n^c(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2}) | \phi_n^{(1)}(\mathbf{v_1}), \phi_n^{(2)}(\mathbf{v_2})), \qquad (7)$$

3.2 ϵ-達成可能性の再定義

式 (7) で表されるように誤り確率は μ に依存している．そのため，符号化システムの評価に前章で定義した ϵ-達成可能性を用いると，μ に依存した評価となってしまう．これはつまり，ある $\mu \in M$ においては ϵ-達成可能であっても別の $\mu' \in M$ に対しては ϵ-達成可能でない可能性があることを示している．一方で符号化システムの安定した運用の面から考えると M に含まれるどの情報源に対しても，平均的に性能の良い符号化システムが望まれる．すなわち式 (7) がパラメータ空間 M に対して平均的に小さいことが望まれる．そこで次のような達成可能性を考える．

定義 3.1　任意の $0 \le \epsilon < 1$ が与えられたもとで，次を満たす $(n, \epsilon_n^{(\mu)})$ が存在するとき，相関のある情報源 $\mathbf{V}$ は多重アクセス通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能と呼ぶ．

$$\limsup_{n \to \infty} \int_{\mu \in M} \epsilon_n^{(\mu)} w(\mu) \le \epsilon.$$

本研究では簡単のため，情報源 $\mathbf{V}$ は通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能であると呼ぶことにする．上記の定義における $\int_{\mu \in M} \epsilon_n^{(\mu)} w(\mu)$ は定常独立な相関のある情報源のクラス M に含まれる μ に対する平均的な誤り確率を表す．ゆえに ϵ-ユニバーサル達成可能性とは，情報源のクラス M に対する平均的な誤り確率が漸近的に ϵ 以下であることを要請したものである．

注意 3.2　$w(\mu) = 1$ の場合を考えると

$$\limsup_{n \to \infty} \int_{\mu \in M} \epsilon_n^{(\mu)} w(\mu) = \limsup_{n \to \infty} \epsilon_n^{(\mu)},$$

となり ϵ-ユニバーサル達成可能条件は従来の ϵ-達成可能条件と一致する．このことより ϵ-ユニバーサル達成可能条件は ϵ-達成可能条件の一般化となっていると考えることもできる．

4. ϵ-ユニバーサル達成可能性の必要条件と十分条件

4.1 主　定　理

本章では，前章で定義した ϵ-ユニバーサル達成可能性の必要十分条件を求める．まず，本研究で重要な役割を持つ量をいくつか定義する．μ が与えられたもとで次で定義される量を（条件付き）エントロピーと呼ぶ[2),3)]．

$$H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}) \equiv E[h(V_{\mu1}^n|V_{\mu2}^n)] = \sum_{\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2} P_{V_\mu^n}(V_1^n,V_2^n)\log\frac{1}{P_{V_{\mu1}^n|V_{\mu2}^n}(V_1^n|V_2^n)},$$

$$H_\mu(\mathbf{V}_2|\mathbf{V}_1) \equiv E[h(V_{\mu2}^n|V_{\mu1}^n)] = \sum_{\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2} P_{V_\mu^n}(V_1^n,V_2^n)\log\frac{1}{P_{V_{\mu2}^n|V_{\mu1}^n}(V_{\mu2}^n|V_{\mu1}^n)},$$

$$H_\mu(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2) \equiv E[h(V_{\mu1}^nV_{\mu2}^n)] = \sum_{\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2} P_{V_\mu^n}(V_1^n,V_2^n)\log\frac{1}{P_{V_{\mu1}^nV_{\mu2}^n}(V_{\mu1}^n,V_{\mu2}^n)}.$$

さらに μ が与えられたもとで，次の量を（条件付き）相互情報量スペクトル上限/下限と呼ぶ[3)]．

$$\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu2}) \equiv \text{p-}\limsup_{n\to\infty} i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)$$
$$= \text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu2}^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)},$$
$$\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu2}) \equiv \text{p-}\liminf_{n\to\infty} i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n),$$
$$\overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\mathbf{V}_{\mu1}) \equiv \text{p-}\limsup_{n\to\infty} i(X_2^n;Y^n|X_1^n,V_{\mu1}^n)$$
$$= \text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_2^nX_1^nV_{\mu1}^n}(Y^n|X_2^n,X_1^n,V_{\mu1}^n)}{P_{Y^n|X_1^nV_{\mu1}^n}(Y^n|X_1^n,V_{\mu1}^n)},$$
$$\underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\mathbf{V}_{\mu1}) \equiv \text{p-}\liminf_{n\to\infty} i(X_2^n;Y^n|X_1^n,V_{\mu1}^n),$$
$$\overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}) \equiv \text{p-}\limsup_{n\to\infty} i(X_0^n;Y^n|X_0^n,V_0^n)$$
$$= \text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n}(Y^n)}.$$
$$\underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}) \equiv \text{p-}\liminf_{n\to\infty} i(X_0^n;Y^n|X_0^n,V_0^n).$$

ここで，任意の実数値確率変数列 $\{Z_n\}_{n=1}^\infty$ に対して

$$\text{p-}\limsup_{n\to\infty} Z_n, \quad \text{p-}\liminf_{n\to\infty} Z_n,$$

はそれぞれ $\{Z_n\}_{n=1}^\infty$ の確率的上極限/下極限と呼ばれる$\star$1．上記の量は韓によって定義された量で，条件付き相互情報量の自然な拡張となっている．さらに $k=1$，2 の場合

$$\overline{I}(\mathbf{X}_k;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_l,\overline{\mathbf{V}}_l) = w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}\overline{I}(\mathbf{X}_k;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_l,\mathbf{V}_{\mu l}),$$
$$\underline{I}(\mathbf{X}_k;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_l,\underline{\mathbf{V}}_l) = w\text{-ess.}\inf_{\mu\in M}\underline{I}(\mathbf{X}_k;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_l,\mathbf{V}_{\mu l}),$$

とする．ここで w-ess. $\sup_{\mu\in M}$，w-ess. $\inf_{\mu\in M}$ はそれぞれ確率測度 $w(\mu)$ に対する本質的上極限/下極限と呼ばれる[3), ⋆2]．以上のもとで次の定理が成立する．

定理 4.1　任意の小さい定数 $\gamma>0$ に対して

$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\}}dw(\mu)+\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\underline{\mathbf{V}}_1)-\gamma\}}dw(\mu)$$
$$+\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})-\gamma\}}dw(\mu)\leq\epsilon, \tag{8}$$

が成立するとき情報源 $\mathbf{V}$ は通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能である．ただし，Y^n は (X_1^n,X_2^n) に対する通信路出力である．

上記の定理は ϵ-ユニバーサル達成可能性の十分条件を表している．次の定理は ϵ-ユニバーサル達成可能性の必要条件を示している．

定理 4.2　情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能であるとする．このときある通信路入力 $\{(X_1^n,X_2^n)\}_{n=1}^\infty$ と任意の $\gamma>0$ に対して

$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})\geq\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+\gamma\}}dw(\mu)\leq\epsilon, \tag{9}$$

$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1})\geq\overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\overline{\mathbf{V}}_1)+\gamma\}}dw(\mu)\leq\epsilon, \tag{10}$$

$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2})\geq\overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})+\gamma\}}dw(\mu)\leq\epsilon, \tag{11}$$

が成立する．

定理の証明は次節に記す．上の定理より情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能であるための必要条件と十分条件は一致しないことが分かる．

上の定理を用いて $\epsilon=0$ の場合にただちに次の系を得る．

系 4.1　次が成立するとき情報源 $\mathbf{V}$ は通信路 $\mathbf{W}$ に対して 0-ユニバーサル達成可能であ

$\star$1 $\{Z_n\}_{n=1}^\infty$ の確率的上極限/下極限はそれぞれ次で定義される．
$\text{p-}\limsup_{n\to\infty} Z_n = \inf\{\alpha|\lim_{n\to\infty}\Pr\{Z_n>\alpha\}=0\}$,
$\text{p-}\liminf_{n\to\infty} Z_n = \sup\{\beta|\lim_{n\to\infty}\Pr\{Z_n<\beta\}=0\}$.

$\star$2 μ の可測関数 Z_μ に対して，本質的上極限/下極限はそれぞれ次で定義される．w-ess. $\sup_{\mu\in M} Z_\mu \equiv \inf\{\alpha|\Pr\{Z_\mu>\alpha\}=0\}$,
w-ess. $\inf_{\mu\in M} Z_\mu \equiv \inf\{\beta|\Pr\{Z_\mu<\beta\}=0\}$.

る．ただし，Y^n は (X_1^n, X_2^n) に対する通信路出力である．

$$w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M} H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}) < \underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2),$$
$$w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M} H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1}) < \underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\underline{\mathbf{V}}_1),$$
$$w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M} H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2}) < \underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}).$$

証明：定理 4.1 は，任意の小さい定数 $\gamma > 0$ に対して

$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\}} dw(\mu) = 0,$$
$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\underline{\mathbf{V}}_1)-\gamma\}} dw(\mu) = 0,$$
$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})-\gamma\}} dw(\mu) = 0,$$

を意味する．これは系の成立を示す．□

系 4.2　情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して 0-ユニバーサル達成可能であるとする．このときある通信路入力 $\{(X_1^n, X_2^n)\}_{n=1}^\infty$ に対して

$$w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M} H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2),$$
$$w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M} H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1}) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\overline{\mathbf{V}}_1),$$
$$w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M} H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2}) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}),$$

が成立する．

証明：系 4.1 の証明と同様．□

例 4.1　A，B 2 つの地点の天候を観測し，センタに送信することを考える．A，B の距離が近接しているときそれぞれの天候には相関があると考えられる．簡単のため $\mathcal{V} = \{$ 晴，雨 $\}$ とし，それぞれの同時確率分布を**表 1** とする．ここで，μ は未知であるとし，$M = \{\mu|0 \leq \mu \leq 0.05\}$，とする．この表は A，B 2 地点の天候が同一である確率は $0.9 - 2\mu$ であることを示している．このとき log の底を 2 とすると，簡単な計算から

$$H_{\mu=0}(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2) = H_{\mu=0}(\mathbf{V}_2|\mathbf{V}_1) \approx 0.469,$$
$$H_{\mu=0.05}(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2) = H_{\mu=0.05}(\mathbf{V}_2|\mathbf{V}_1) \approx 0.258,$$

で $H_\mu(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2)$ は M の範囲で μ に関して単調減少であることが分かる．同様に

表 1　2 地点の天候の同時確率分布
Table 1　A joint distribution of the weather in two points.

$P_V(v_1, v_2)$	A 地点 晴	A 地点 雨
B 地点		
晴	$0.45 - \mu$	$0.05 + \mu$
雨	$0.05 + \mu$	$0.45 - \mu$

$$H_{\mu=0}(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2) \approx 1.469$$
$$H_{\mu=0.05}(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2) \approx 1.722$$

であることと $H_\mu(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2)$ は M の範囲で μ に関して単調増加であることも確かめられる．

このことと系 4.1 より

$$0.469 < \underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2),$$
$$0.469 < \underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\underline{\mathbf{V}}_1),$$
$$1.722 < \underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}),$$

が成立すればこの情報源 $\mathbf{V}$ は通信路 $\mathbf{W}$ に対して 0-ユニバーサル達成可能であることが分かる．

次に同様の条件で 0.2-ユニバーサル達成可能であるための必要条件を考えてみる．簡単のため，$w(\mu)$ を $0 \leq \mu \leq 0.05$ 上の一様分布とする．このとき，定理 4.2 より

$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})\geq\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+\gamma\}} dw(\mu) \leq \epsilon,$$
$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1})\geq\overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\overline{\mathbf{V}}_1)+\gamma\}} dw(\mu) \leq \epsilon,$$
$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2})\geq\overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})+\gamma\}} dw(\mu) \leq \epsilon,$$

が必要条件となる．

ここで上で述べたように $H_\mu(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2)$ と $H_\mu(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2)$ が M の範囲で μ に対してそれぞれ単調減少，単調増加であることより

$$0.2 = \int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})\geq H_{\mu=0.01}(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})\}} dw(\mu),$$

を得る．ゆえに任意の $\gamma > 0$ に対して

$\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+\gamma \geq H_{\mu=0.01}(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}) \approx 0.407,$

という条件を得るが，これは

$$\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2) \geq H_{\mu=0.01}(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}) \approx 0.407, \tag{12}$$

を意味する．同様に

$$\overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\overline{\mathbf{V}}_1) \geq H_{\mu=0.01}(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1}) \approx 0.407, \tag{13}$$

$$\overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}) \geq H_{\mu=0.04}(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2) \approx 1.68, \tag{14}$$

を得る．結局，情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して 0.2-ユニバーサル達成可能であるならば式 (12)，(13)，(14) が成立する．□

4.2　定理の証明

本節で定理の証明を与える．

4.2.1　定理 4.1 の証明

まず次の混合情報源 $\mathbf{V}$ を考える．

$$P_{V^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2)=\int_{\mu\in M} P_{V_\mu^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2)dw(\mu). \tag{15}$$

ここで V_μ^n は 3 章で示した μ で規定される定常独立な相関を許した情報源を表す．この混合情報源と一般多重アクセス通信路に対する誤り確率は式 (2)，(15) より次のようになる．

$$\begin{aligned}\epsilon_n &= \sum_{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n} P_{V^n}((\mathbf{v_1},\mathbf{v_2}))W^n(\mathcal{D}_n^c(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})|\phi_n^{(1)}(\mathbf{v_1}),\phi_n^{(2)}(\mathbf{v_2}))\\ &= \sum_{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n}\int_{\mu\in M} P_{V_\mu^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2)dw(\mu)W^n(\mathcal{D}_n^c(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})|\phi_n^{(1)}(\mathbf{v_1}),\phi_n^{(2)}(\mathbf{v_2})).\end{aligned}$$

これはさらに

$$\begin{aligned}\epsilon_n &= \sum_{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n}\int_{\mu\in M} P_{V_\mu^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2)dw(\mu)W^n(\mathcal{D}_n^c(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})|\phi_n^{(1)}(\mathbf{v_1}),\phi_n^{(2)}(\mathbf{v_2}))\\ &= \int_{\mu\in M}\sum_{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n} P_{V_\mu^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2)W^n(\mathcal{D}_n^c(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})|\phi_n^{(1)}(\mathbf{v_1}),\phi_n^{(2)}(\mathbf{v_2}))dw(\mu)\\ &= \int_{\mu\in M}\epsilon_n^\mu w(\theta),\end{aligned}$$

と書くことができる．これは，式 (15) で定義される混合情報源を考えた際，その誤り確率は式 (7) と等しいことを示している．すなわち，情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能である条件と式 (15) で定義される混合情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能である条件は本質的に同一であることが分かる．ゆえに式 (15) で定義される混合情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能である十分条件を求める．

混合情報源は一般情報源に含まれることに注意すると，定理 2.1 を適用可能であることに注意されたい．

さらに次の補題を使用する．

補題 4.1[3]　［補題 7.5］情報源アルファベット $\mathcal{V}_1$，$\mathcal{V}_2$ は有限とする．各 $\mathbf{V}_\mu$ が定常無記憶情報源であれば，$\forall R \geq 0$ に対して次が成立する．

$$\begin{aligned}\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2)>R\}} dw(\mu) &\leq \liminf_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_{\mu1}^n|V_{\mu2}^n)}\geq R\right\}dw(\mu)\\ &\leq \limsup_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_{\mu1}^n|V_{\mu2}^n)}\geq R\right\}dw(\mu)\\ &\leq \int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2)\geq R\}} dw(\mu),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_2|\mathbf{V}_1)>R\}} dw(\mu) &\leq \liminf_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_{\mu2}^n|V_{\mu1}^n)}\geq R\right\}dw(\mu)\\ &\leq \limsup_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_{\mu2}^n|V_{\mu1}^n)}\geq R\right\}dw(\mu)\\ &\leq \int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_2|\mathbf{V}_1)\geq R\}} dw(\mu),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2)>R\}} dw(\mu) &\leq \liminf_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_1^n,V_2^n)}\geq R\right\}dw(\mu)\\ &\leq \limsup_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_1^n,V_2^n)}\geq R\right\}dw(\mu)\\ &\leq \int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2)\geq R\}} dw(\mu).\end{aligned}$$

□

定理 2.1 と上の補題を用いて証明を進める．定理 2.1 より式 (8) が成立するときに式 (5) が成立することを示せば十分である．まず定理 2.1 と Fatou の補題より

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^{2}[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)+\gamma]\right\}$$
$$\le\limsup_{n\to\infty}\sum_{k=0}^{2}\Pr\Big\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)+\gamma\Big\}$$
$$\le\sum_{k=0}^{2}\limsup_{n\to\infty}\Pr\Big\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)+\gamma\Big\}, \tag{16}$$

が成立する．またここで任意の $R_k>0$ に対して

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\{[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)+\gamma]\}$$
$$\le\limsup_{n\to\infty}\Pr\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le R_k\}+\limsup_{n\to\infty}\Pr\{R_k\le h(V_k^n|V_l^n)+\gamma\},$$

が成立する．

ここでまず $k=1$ の場合を考える．$R_1=\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)$ とし上式に代入すると

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\{[i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)+\gamma]\}$$
$$\le\limsup_{n\to\infty}\Pr\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)\}$$
$$+\limsup_{n\to\infty}\Pr\{\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)\le h(V_1^n|V_2^n)+\gamma\}, \tag{17}$$

となる．すると $\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)$ の定義より式 (17) 右辺第 1 項は

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)\}=0, \tag{18}$$

と評価できる．

次に式 (17) 右辺第 2 項を評価する．混合情報源の定義と補題 4.1 より

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\{\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)\le h(V_1^n|V_2^n)+\gamma\}$$
$$=\limsup_{n\to\infty}\Pr\{h(V_1^n|V_2^n)\ge\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\}$$
$$=\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_1^n|V_2^n)}\ge\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\right\}$$
$$=\limsup_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_{\mu1}^n|V_{\mu2}^n)}\ge\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\right\}dw(\mu)$$
$$\le\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2)\ge\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\}}dw(\mu),$$

となる．上式と式 (18) を式 (17) に代入すると

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\{[i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)+\gamma]\}$$
$$\le\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2)\ge\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\}}dw(\mu),$$

を得る．$k=0$，$k=2$ の場合も同様に評価すると，

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\{[i(X_2^n;Y^n|X_1^n,V_1^n)\le h(V_2^n|V_1^n)+\gamma]\}$$
$$\le\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_2|\mathbf{V}_1)\ge\underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\underline{\mathbf{V}}_1)-\gamma\}}dw(\mu),$$

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\{[i(X_0^n;Y^n|X_0^n,V_0^n)\le h(V_0^n|V_0^n)+\gamma]\}$$
$$\le\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1\mathbf{V}_2)\ge\underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})-\gamma\}}dw(\mu),$$

を得る．これらを式 (16) に代入すると，結局式 (8) が成立するときに式 (5) が成立することが分かる．これは定理の成立を示している．□

4.2.2　定理 4.2 の証明

定理 4.1 の証明と同様に，式 (15) で定義される混合情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-達成可能である必要条件を求めればよい．ここでは，定理 2.2 と補題 4.1 を用いる．

まず次式が $k=0$，1，2 に対して成立することに注意する．

$$\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^{2}[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)-\gamma]\right\}$$
$$\ge\Pr\Big\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)-\gamma\Big\}. \tag{19}$$

さらに $k=0$，1，2 に対して次の集合を定義する．

$$K_n^k=\left\{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n\ \Big|h(V_k^n|V_l^n)\ge\overline{I}(\mathbf{X}_k;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_l,\overline{\mathbf{V}}_l)+2\gamma\right\},$$

ここで $\gamma>0$ は任意に小さい定数とする．式 (19) と K_n^1 を用いて，まず式 (6) が成立すると仮定したときに，式 (9) が成立することを示す．

初めに

$$
\begin{aligned}
&\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma\Big\}\\
&=\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|\,V^n\in K_n^1\Big\}\Pr\Big\{V^n\in K_n^1\Big\}\\
&\quad+\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|\,V^n\notin K_n^1\Big\}\Pr\Big\{V^n\notin K_n^1\Big\}\\
&\ge\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|\,V^n\in K_n^1\Big\}\Pr\Big\{V^n\in K_n^1\Big\},
\end{aligned}
\tag{20}
$$

が成立する．ここで K_n^1 の定義より任意の $(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in K_n^1$ に対して

$$h(V_1^n|V_2^n)\ge\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+2\gamma,$$

が成立する．ゆえに任意の $(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in K_n^1$ に対して

$$
\begin{aligned}
&\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|V^n\in K_n^1\Big\}\\
&\ge\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)-\gamma+2\gamma\Big\}\\
&=\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+\gamma\right\},
\end{aligned}
\tag{21}
$$

が成立する．

一方で確率的上極限 p-$\limsup$，本質的上極限 w-ess. sup の性質より $\gamma>0$ が与えられたとき任意の $\nu>0$ に対して

$$\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+\gamma\right\}>1-\nu,\tag{22}$$

が十分大きい n で成立する．

式 (21)，式 (22) を式 (20) に代入すると

$$\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma\right\}>\Pr\{V_n\in K_n^1\}-\nu',\tag{23}$$

が十分大きい n で成立する．ここで

$$\nu'=\nu\Pr\left\{V_n\in K_n^1\right\},$$

とおいた．さらに $\nu>0$ が任意に小さい数であるので ν' も任意に小さくできることに注意すると式 (23) と K_n^1 の定義より

$$
\begin{aligned}
&\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma\right\}\\
&\ge\limsup_{n\to\infty}\Pr\{V_n\in K_n^1\}\\
&=\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{h(V_1^n|V_2^n)\ge\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+2\gamma\right\},
\end{aligned}
$$

が成立する．上式を式 (19) へ代入すると結局

$$
\begin{aligned}
&\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^{2}[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)-\gamma]\right\}\\
&\ge\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{h(V_1^n|V_2^n)\ge\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+2\gamma\right\},
\end{aligned}
$$

を得る．ここで混合情報源の定義と補題 4.1 より

$$
\begin{aligned}
&\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{h(V_1^n|V_2^n)\ge\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+2\gamma\right\}\\
&=\limsup_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_{\mu1}^n|V_{\mu2}^n)}\ge\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+2\gamma\right\}dw(\mu)\\
&=\liminf_{n\to\infty}\int_{\mu\in M}\Pr\left\{\frac{1}{n}\log\frac{1}{P_{V^n}(V_{\mu1}^n|V_{\mu2}^n)}\ge\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+2\gamma\right\}dw(\mu)\\
&\ge\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V}_1|\mathbf{V}_2)>\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+2\gamma\}}dw(\mu),
\end{aligned}
$$

が成立する．最後に 2γ を γ で置き換えれば，これは式 (6) が成立すると仮定したときに，式 (9) が成立することを示している．同様に $k=0$，2 の場合も K_n^k を用いて展開すれば式 (6) が成立すると仮定したときに式 (10)，(11) が成立することを得る．これは定理の成立を示している． □

5. 考　　察

5.1 必要条件と十分条件の一致条件

前章で示したとおり，情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能であるための必要条件と十分条件は一般には一致しない．一方，本研究で求めた条件付きエントロピーや相互情報量スペクトルを用いた表現を使用すると例 4.1 のように計算が容易になるという利点がある．

本章では $\epsilon=0$ の場合，すなわち 0-ユニバーサル達成可能であるためのこれらの条件について考察する．まず，系 4.1，系 4.2 より

$$\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)=\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2),\tag{24}$$

$$\overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\overline{\mathbf{V}}_1)=\underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\underline{\mathbf{V}}_1),\tag{25}$$

$$\overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})=\underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}). \tag{26}$$

が成立する場合，任意に小さい $\gamma>0$ を除いて必要条件と十分条件が一致することが分かる．

ここで次の通信路を考える．

定義 5.1[3)]　次を満たすとき通信路 $\mathbf{W}$ は定常無記憶と呼ばれる．すなわち任意の $\mathbf{x}_1$，$\mathbf{x}_2$ と $\mathbf{y}$ に対して

$$W^n(\mathbf{y}|\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2)=\prod_{i=1}^{n}W(y_i|x_{1i},x_{2i}), \tag{27}$$

が成立する．

ここでさらに $\mathcal{X}_1$ と $\mathcal{X}_2$ の組あるいは $\mathcal{Y}$ のいずれか一方が有限であると仮定する．すると文献 3)，定理 3.1 の証明における議論と同様の議論より $i(X_0^n;Y^n|X_0^n,V_0^n)$ が $E[i(X_0^n;Y^n|X_0^n,V_0^n)]$ へ確率収束することが分かる．これは，式 (26) が成立することを示している．ゆえに $\mathbf{W}$ が定常無記憶通信路であれば式 (26) が成立する．

次に式 (24) が成立する条件を考察する．この場合一般的に成立する条件を考えることは難しいが，たとえば次の仮定が満たされる状況を考える．

仮定 5.1

- $\mathbf{W}$ は定常無記憶通信路である．
- $\mathbf{V}_1$，$\mathbf{V}_2$ が独立である．

□

このとき，式 (4) より

$$\begin{aligned}i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)&=\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu2}^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)}\\&=\frac{1}{n}\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)},\end{aligned}$$

である．また $\mathbf{V}_1$ と $\mathbf{V}_2$ が独立であることより $\mathbf{X}_1$ と $\mathbf{V}_2$ が独立であることが分かるので上式はさらに

$$\begin{aligned}i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)&=\frac{1}{n}\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)}\\&=\frac{1}{n}\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n|X_2^n}(Y^n|X_2^n)},\end{aligned}$$

と書ける．すると，

$$\begin{aligned}\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)&=w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu2})\\&=w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}\text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu2}^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu2}^n)}\\&=w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}\text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n|X_2^n}(Y^n|X_2^n)}\\&=\text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n|X_2^n}(Y^n|X_2^n)},\end{aligned}$$

となる．同様に，

$$\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)=\text{p-}\liminf_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n|X_2^n}(Y^n|X_2^n)},$$

を得る．ここで，定常無記憶通信路を考えているため，

$$\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n|X_2^n}(Y^n|X_2^n)}=\sum_{j=1}^{n}\log\frac{W(Y_j|X_{j1},X_{j2})}{P_{Y_j|X_{j2}}(Y_j|X_{j2})}$$

である．ゆえに先の $i(X_0^n;Y^n|X_0^n,V_0^n)$ の議論と同様の議論より

$$\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)=\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2),$$

となる．これは，式 (24) の成立を示している．同様に式 (25) も成立する，これらの議論より，仮定 5.1 が成立するとき，情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して ϵ-ユニバーサル達成可能であるための必要条件と十分条件は任意に小さい定数 $\gamma>0$ を除いて一致することが分かる．

5.2　従来研究との関連

本節では $w(\mu^*)=1$ である場合を考える．このとき ϵ-ユニバーサル達成可能条件は従来の ϵ-達成可能条件と一致する．さらに $\mathbf{W}$ が定常無記憶通信路かつ $\epsilon=0$ と仮定すると本研究の問題設定は文献 4) と同様となる．本節では本研究の結果より，文献 4) の結果を導くことで，本研究の結果が従来の一般化となっていることを示す．まず $w(\mu^*)=1$ であることより

$$\begin{aligned}&w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})=H_{\mu^*}(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}),\\&w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1})=H_{\mu^*}(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1}),\\&w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2})=H_{\mu^*}(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2}),\end{aligned}$$

である．さらに

$$\begin{aligned}\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2) &= w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu 2})\\ &= w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}\text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu 2}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu 2}^n)}{P_{Y^n|X_2^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu 2}^n)}\\ &= \text{p-}\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu^*2}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu^*2}^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu^*2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu^*2}^n)}\\ &= \overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu^*2}),\end{aligned}$$

も成立する．同様に

$$\begin{aligned}\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2) &= \text{p-}\liminf_{n\to\infty}\frac{1}{n}\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu^*2}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu^*2}^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu^*2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu^*2}^n)}\\ &= \underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu^*2}),\end{aligned}$$

を得る．ここで，

$$I(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n) = E_{X_1^nX_2^nV_{\mu^*2}^nY^n}\left[\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu^*2}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu^*2}^n)}{P_{Y^n|X_2^nV_{\mu^*2}^n}(Y^n|X_2^n,V_{\mu^*2}^n)}\right],$$

$$I(X_2^n;Y^n|X_1^n,V_1^n) = E_{X_1^nX_2^nV_{\mu^*1}^nY^n}\left[\log\frac{P_{Y^n|X_1^nX_2^nV_{\mu^*1}^n}(Y^n|X_1^n,X_2^n,V_{\mu^*1}^n)}{P_{Y^n|X_1^nV_{\mu^*1}^n}(Y^n|X_1^n,V_{\mu^*1}^n)}\right],$$

$$I(X_1^nX_2^n;Y^n) = E_{X_1^nX_2^nY^n}\left[\log\frac{W(Y^n|X_1^n,X_2^n)}{P_{Y^n}(Y^n)}\right],$$

とすると，文献 3) の補題 7.6 と同様の議論により

$$\liminf_{n\to\infty} I(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n) \geq \underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu^*2})$$
$$\liminf_{n\to\infty} I(X_2^n;Y^n|X_1^n,V_1^n) \geq \underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\mathbf{V}_{\mu^*1}),$$

を得る．また同様に

$$\limsup_{n\to\infty} I(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu^*2}),$$
$$\limsup_{n\to\infty} I(X_2^n;Y^n|X_1^n,V_1^n) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\mathbf{V}_{\mu^*1}),$$

を得る．また前節同様，定常無記憶通信路を考えているため，

$$\lim_{n\to\infty} I(X_1^nX_2^n;Y^n) = \overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}) = \underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}),$$

である．

以上をまとめると系 4.1，系 4.2 より $w(\mu^*)=1$ の場合に対応した次の系を得る．

系 5.1　次が成立するとき情報源 $\mathbf{V}$ は通信路 $\mathbf{W}$ に対して 0-ユニバーサル達成可能である．ただし，Y^n は (X_1^n,X_2^n) に対する通信路出力である．

$H_{\mu^*}(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}) < \underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu^*2})$,
$H_{\mu^*}(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1}) < \underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\mathbf{V}_{\mu^*1})$,
$H_{\mu^*}(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2}) < \underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})$.

系 5.2　情報源 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して 0-ユニバーサル達成可能であるとする．このときある通信路入力 $\{(X_1^n,X_2^n)\}_{n=1}^{\infty}$ に対して

$H_{\mu^*}(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2}) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\mathbf{V}_{\mu^*2})$,
$H_{\mu^*}(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1}) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\mathbf{V}_{\mu^*1})$,
$H_{\mu^*}(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2}) \leq \overline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})$.

が成立する．

上記の系は文献 4) における Theorem 2 と同様の結果を示している．

6. ま と め

本研究では，まず情報源の確率構造が未知のもとで情報源 $\mathbf{V}$ の通信路 $\mathbf{W}$ に対する達成可能性について定義を行った．センサネットワークなどの応用を考えた際に情報源の確率分布が未知の場合は少なくないと考えられる．その意味で本研究のように確率分布が未知の場合の条件を考えることは重要である．そして，その定義した達成可能性について従来研究を用いて評価を行った．本研究では 2 つの相関を許した情報源を対象としたが，その必要条件，十分条件は情報源から出力される確率変数と通信路入出力の確率変数の条件付き確率分布，同時確率分布を用いて書けることが分かった．本研究で得られた結果は，一般的には必要条件と十分条件が一致しないため従来より緩い条件となっているが，従来と異なり計算が容易であるという利点を持つ．さらに m 個の相関を許した情報源に拡張することも可能である．

また本研究では通信路の確率構造が既知であることを仮定したが，これを未知にした設定を考えることもできる．この場合，補題 4.1 と同様の補題を示す必要がある．しかし，確率変数 V_1^n，V_2^n が定常で独立な確率変数であっても，確率変数 X_1^n，X_2^n が定常で独立である

保証はない．そのため，補題 4.1 の証明と同様の手法では示すことができない．この点は今後の課題である．

謝辞　本研究の一部は科研費（21760298）の助成による．

参 考 文 献

1) 小川　明：センサネットワーク—総論，電子情報通信学会誌，Vol.89, No.5, pp.362–366 (2006).
2) Cover, T.M. and Thomas, J.A.: *Elements of Information Theory*, Wiley (1991).
3) 韓　太瞬：情報理論における情報スペクトル的方法，培風館 (1996).
4) Cover, T.M., Gamal, A.E. and Salehi, M.: Multiple Access Channels with Arbitrary Correlated Sources, *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.26, No.6, pp.396–412 (1983).
5) Iwata, K. and Oohama, Y.: Information-Spectrum Characterization of Multiple-Access Channels with Correlated Sources, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E88-A, No.11, pp.3196–3202 (2005).
6) 大濱靖匡：センサネットワークと多端子情報理論，情報処理学会研究報告—オーディオビジュアル複合情報処理，Vol.2006, No.102, pp.1–6 (1992).
7) Miyake, S. and Kanaya, F.: Coding Theorems on Correlated General Sources, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E78-A, No.9, pp.1063–1070 (1995).
8) Han, T.S.: An Information-Spectrum Approach to Capacity Theorems for the General Multiple-Access Channel, *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.44, No.7, pp.2773–2795 (1998).
9) 韓　太瞬，小林欣吾：情報と符号化の数理，岩波書店 (1994).
10) 植松友彦：現代シャノン理論，培風館 (1998).
11) Berger, J.O.: *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*, Springer (1980).

(平成 21 年　8 月 12 日受付)
(平成 21 年 10 月　1 日再受付)
(平成 21 年 10 月 15 日採録)

野村　　亮

平成 8 年早稲田大学理工学部工業経営学科卒業．平成 10 年同大学大学院修士課程修了．平成 13 年同大学院博士後期課程満期退学．平成 12 年同大学理工学部助手．平成 16 年青山学院大学理工学部助手，平成 20 年同大学助教，現在に至る．博士（工学）．情報理論，特にシャノン理論，情報源符号化に関する研究に従事．IEEE，電子情報通信学会，情報理論とその応用学会各会員．

松嶋　敏泰（正会員）

昭和 53 年早稲田大学理工学部工業経営学科卒業．昭和 55 年同大学大学院修士課程修了．同年日本電気（株）入社．昭和 61 年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程入学．平成元年横浜商科大学講師．平成 3 年同大学助教授．平成 4 年早稲田大学理工学部工業経営学科（現経営システム工学科）助教授，平成 9 年同大学教授．平成 20 年早稲田大学理工学部基幹理工学部応用数学科教授，現在に至る．博士（工学）．知識情報処理および情報理論とその応用に関する研究に従事．平成 13 年ハワイ大学客員研究員．IEEE，情報理論とその応用学会，人工知能学会，電子情報通信学会，OR 学会，日本経営工学会等各会員．