Vol.2009-MPS-75 No.9
2009/9/10

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は，センシング，情報理論，制御理論等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一つである（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置かれていた．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為には，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 condtion 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，制御理論等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一つである（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一つである，一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一つの受信者へ送信する場合を考える．図**??**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伴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伴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伴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，岩田らは情報源，通信路を一般情報源，一般通信路という極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伴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置いている[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

†1 青山学院大学理工学部
Aoyama Gakuin University
†2 早稲田大学理工学術院
Waseda University

Vol.2009-MPS-75 No.9
2009/9/10

した情報源を伴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為には，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伴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．

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極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 (1) 式を満たしていることのみを要請するため，非常に一般的で全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 1 にこの符号化システムを示す．

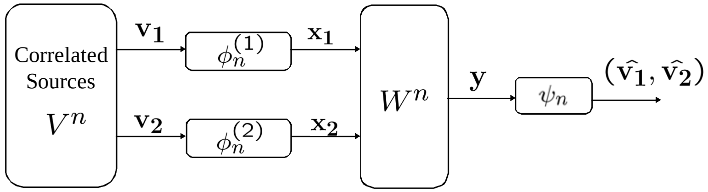

図 1 相関のある情報源と多重アクセス通信路
Fig. 1 2 input multiple access channel with correlated sources

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．

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

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

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

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 $0 \leq \epsilon < 1$ 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．

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

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)]．

一方近年岩田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．

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

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

以上のもとで岩田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

$$\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^{2}[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)+\gamma]\right\}\le\epsilon, \tag{4}$$

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

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

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極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)]．これらは一対一通信における符号化定理を述べたもので，既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一つと考えられる．

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，$\mu(\mu\in M)$ 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 $\mu(\mu\in M)$ で規定される定常独立な相関を許した情報源を

$$\mathbf{V}_\mu=\{V_\mu^n\}_{n=1}^{\infty}=\{(V_{\mu1}^n,V_{\mu2}^n)\}_{n=1}^{\infty}$$

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．

Vol.2009-MPS-75 No.9
2009/9/10

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．

$$\epsilon_n^{(\mu)} = \sum_{(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})\in\mathcal{V}_1^n\times\mathcal{V}_2^n} P_{V_\mu^n}((\mathbf{v_1},\mathbf{v_2}))W^n(\mathcal{D}_n^c(\mathbf{v_1},\mathbf{v_2})|\phi_n^{(1)}(\mathbf{v_1}),\phi_n^{(2)}(\mathbf{v_2})), \tag{6}$$

3.2 ϵ-達成可能性の再定義

上記で定義される相関を許した情報源と多重アクセス通信路における符号化においては M に含まれるどの情報源に対しても，平均的に性能のよい符号化が望まれる．すなわち (6) 式が任意の $\mu \in M$ 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．

4. ϵ-ユニバーサル達成可能性の必要十分条件

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)]．

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

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

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

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

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

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[⋆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

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

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

⋆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．
$\text{p-}\limsup_{n\to\infty} Z_n = \inf\{\alpha|\lim_{n\to\infty}\Pr\{Z_n>\alpha\}=0\}$,
$\text{p-}\liminf_{n\to\infty} Z_n = \sup\{\beta|\lim_{n\to\infty}\Pr\{Z_n<\beta\}=0\}$.

Vol.2009-MPS-75 No.9
2009/9/10

とする．ここで $w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M}, w\text{-ess.}\inf_{\mu\in M}$ 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)⋆1]．以上のもとで次の定理が成立する．

定理 4.1 (順定理) 任意の小さい定数 $\gamma > 0$ に対して

$$\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}|\mathbf{V_2})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)-\gamma\}} dw(\mu)+\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_2}|\mathbf{V_1})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_2;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_1,\underline{\mathbf{V}}_1)-\gamma\}} dw(\mu)$$
$$+\int_{\{\mu|H_\mu(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2})\geq\underline{I}(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2;\mathbf{Y})-\gamma\}} dw(\mu)\leq\epsilon, \tag{7}$$

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 (逆定理) 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

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

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

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

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為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 $\epsilon = 0$ の場合に直ちに次の系を得る

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．

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

□

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． □

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．

$$P_{V^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2)=\int_{\mu\in M} P_{V_\mu^n}(\mathbf{v}_1,\mathbf{v}_2)dw(\mu). \tag{11}$$

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 (2),(11) 式より次のようになる．

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

これはさらに

⋆1 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．$w\text{-ess.}\sup_{\mu\in M} Z_\mu \equiv \inf\{\alpha|\Pr\{Z_\mu > \alpha\}=0\}$,
$w\text{-ess.}\inf_{\mu\in M} Z_\mu \equiv \inf\{\beta|\Pr\{Z_\mu < \beta\}=0\}$.

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

と書くことが出来る．これは，(11) 式で定義される混合情報源を考えた際，その誤り確率は (6) 式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 (11) 式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わかる．ゆえに (11) 式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 (7) 式が成立するときに (4) 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

$$
\begin{aligned}
&\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^{2}[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\leq h(V_k^n|V_l^n)+\gamma]\right\}\\
&\leq \limsup_{n\to\infty}\sum_{k=0}^{2}\Pr\left\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\leq h(V_k^n|V_l^n)+\gamma\right\}\\
&\leq \sum_{k=0}^{2}\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\leq h(V_k^n|V_l^n)+\gamma\right\},
\end{aligned}
\tag{12}
$$

が成立する．またここで任意の $R_k>0$ に対して

$$
\begin{aligned}
&\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\leq h(V_k^n|V_l^n)+\gamma]\right\}\\
&\leq \limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\leq R_k\right\}+\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{R_k\leq h(V_k^n|V_l^n)+\gamma\right\},
\end{aligned}
$$

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

$$
\begin{aligned}
&\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{[i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\leq h(V_1^n|V_2^n)+\gamma]\right\}\\
&\leq \limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\leq \underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)\right\}\\
&\quad+\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{\underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)\leq h(V_1^n|V_2^n)+\gamma\right\},
\end{aligned}
\tag{13}
$$

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 (13) 式右辺第一項は

$$
\limsup_{n\to\infty}\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\leq \underline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\underline{\mathbf{V}}_2)\right\}=0,
\tag{14}
$$

と評価できる．

次に (13) 式右辺第二項を評価する．混合情報源の定義と補題 4.1 より

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

となる．上式と (14) 式を (13) 式に代入すると

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

を得る．$k=0,k=2$ の場合も同様に評価すると，

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

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

を得る．これらを (12) 式に代入すると，結局 (7) 式が成立するときに (4) が成立することがわかる．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) の証明と同様にに (11) 式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．

$$
\begin{aligned}
&\Pr\left\{\bigvee_{k=0}^{2}[i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)-\gamma]\right\}\\
&\ge\Pr\Big\{i(X_k^n;Y^n|X_l^n,V_l^n)\le h(V_k^n|V_l^n)-\gamma\Big\}. \qquad (15)
\end{aligned}
$$

さらに $k=0,1,2$ に対して次の集合を定義する．

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

ここで $\gamma>0$ は任意に小さい定数とする．(15) 式と K_n^1 を用いてまず (5) 式が成立すると仮定したときに, (8) 式が成立することを示す．

始めに

$$
\begin{aligned}
&\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma\Big\}\\
&=\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|\,V^n\in K_n^1\Big\}\Pr\Big\{V^n\in K_n^1\Big\}\\
&\quad+\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|\,V^n\notin K_n^1\Big\}\Pr\Big\{V^n\notin K_n^1\Big\}\\
&\ge\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|\,V^n\in K_n^1\Big\}\Pr\Big\{V^n\in K_n^1\Big\}, \qquad (16)
\end{aligned}
$$

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

$$
h(V_1^n|V_2^n)\ge\overline{I}(\mathbf{X_1};\mathbf{Y}|\mathbf{X_2},\overline{\mathbf{V}}_\mathbf{2})+2\gamma,
$$

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

$$
\begin{aligned}
&\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma|V^n\in K_n^1\Big\}\\
&\ge\Pr\Big\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)-\gamma+2\gamma\Big\}\\
&=\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+\gamma\right\}, \qquad (17)
\end{aligned}
$$

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

$$
\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le\overline{I}(\mathbf{X}_1;\mathbf{Y}|\mathbf{X}_2,\overline{\mathbf{V}}_2)+\gamma\right\}>1-\nu, \qquad (18)
$$

が十分大きい n で成立する．

(17) 式，(18) 式を (16) に代入すると

$$
\Pr\left\{i(X_1^n;Y^n|X_2^n,V_2^n)\le h(V_1^n|V_2^n)-\gamma\right\}>\Pr\{V_n\in K_n^1\}-\nu', \qquad (19)
$$

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 (19) 式と 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 (15) 式へ代入すると結局

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

を得る．ここで混合情報源の定義と補題 4.1 より

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

が成立する．最後に 2γ を γ で置き換えれば，これは (5) 式が成立すると仮定したときに，(8) 式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 を用いてを展開すれば (5) 式が成立すると仮定したときに (9), (10) 式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. 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 $\mathbf{V}$ が通信路 $\mathbf{W}$ に対して情報源の確率分布が未知の場合の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わかった．さらに m 個の相関を許した情報源に拡張することも考えられる．

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は今後の課題である．

謝辞　本研究の一部は科研費（No.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) T.M.Cover and J.A.Thomas: *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) T.M.Cover, A.E.Gamal and M.Salehi: Multiple Access Channels with Arbitrary Correlated Sources, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. 26, No. 6, pp. 396–412 (1983).
5) K.Iwata and Y.Oohama: 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) S.Miyake and F.Kanaya: Coding Theorems on Correlated General Sources, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E78-A, No.9, pp.1063–1070 (1995).
8) T.S.Han: An Information-Spectrum Approach to Capacity Theorems for the General Multiple-Access Channel, *IEEE Trans. Information 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).