

# 卒業研究報告書

## 題目

Augmented-MIMO: 身体表面に展開するマルチアンテナシステムの研究

---

## 報告者

学籍番号：1240143

氏名：前田 耀斗

---

## 指導教員

野田 聡人 准教授

---

令和6年2月16日

高知工科大学 システム工学群  
電子光工学専攻

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景 . . . . .	1
1.2	課題 . . . . .	1
1.3	研究目的 . . . . .	2
1.4	提案システムの概要 . . . . .	2
1.5	構成 . . . . .	3
<b>第 2 章</b>	<b>伝送路の表現と評価方法の基礎</b>	<b>4</b>
2.1	伝送路の表現方法 . . . . .	4
2.2	チャンネル相関 . . . . .	7
2.3	チャンネル容量 . . . . .	9
<b>第 3 章</b>	<b>提案システムと実験の詳細</b>	<b>13</b>
3.1	衣服上に展開する提案システムのモックアップ . . . . .	13
3.2	MIMO の伝搬実験環境の詳細 . . . . .	13
<b>第 4 章</b>	<b>チャンネル相関の実験評価</b>	<b>18</b>
4.1	実験目的 . . . . .	18
4.2	チャンネル相関計測実験の概要 . . . . .	18
4.3	チャンネル相関計測実験の結果 . . . . .	21
4.4	考察 . . . . .	24
<b>第 5 章</b>	<b>チャンネル容量の実験評価</b>	<b>25</b>
5.1	実験目的 . . . . .	25
5.2	チャンネル容量測定実験の概要 . . . . .	25
5.3	チャンネル容量測定実験の結果 . . . . .	26

5.4	考察 . . . . .	31
第 6 章	まとめ	32
謝辞		33
参考文献		34

# 目次

1.1	提案システム の概念図 . . . . .	2
2.1	SISO の伝搬環境 . . . . .	5
2.2	マルチパスでの MIMO 伝搬環境 . . . . .	6
2.3	MIMO チャンネルと特異値で等価表現された MIMO チャンネル [4] . . . . .	7
2.4	チャンネル相関 $\rho_{12}$ の導出のイメージ . . . . .	8
2.5	SISO のチャンネル容量特性 [3] . . . . .	10
2.6	$2 \times 2$ MIMO の伝搬環境 . . . . .	11
3.1	提案システム のモックアップ . . . . .	14
3.2	実験室 (A351) の実験環境の模式図 . . . . .	15
3.3	実際の実験環境 . . . . .	15
3.4	図 3.3 の TX,RX の詳細 リニアアクチュエータに装着したジグにアンテナを乗せている. アンテナに接続している水色のケーブルは VNA に接続されている. . . . .	16
3.5	実験に使用したチップアンテナ チップアンテナ: 8 mm $\times$ 3 mm, PCB: 40 mm $\times$ 30 mm . . . . .	16
3.6	図 3.1 の近接アンテナとデバイス内のアンテナによる近接接合部に相当する系 図中右側のジグに固定されているアンテナは小型デバイス内のアンテナ, 左側のジグに固定されているアンテナは袖口の近接アンテナを想定している. . . . .	17
3.7	図 3.6 の近接接合部の詳細 PCB の間隔を 5 mm に設定し, 近接接合を行なっている. . . . .	17

4.1	条件 (1) の実験系: 図中の各アンテナは図 3.1 の各アンテナに対応しており, 条件 (2) の受信アンテナの先にチップアンテナによる近接接合部分を加えたものである. . . . .	19
4.2	条件 (2) の実験系: 送受信アンテナそれぞれを 2 本ずつ用意した 典型的な $2 \times 2$ MIMO である. . . . .	20
4.3	条件 (3) の実験系: 図 4.1 から緑色で示した部分がないものである. . . . .	20
4.4	条件 (2): チップアンテナによる中継がない系の チャネル相関の測定結果	22
4.5	条件 (1): 小型デバイスに組み込む $2 \times 2$ MIMO のチャネル相関の測定結果	23
4.6	条件 (3): 外部アンテナに相当するアンテナがない系の測定結果 . . . . .	23
4.7	条件 1 と条件 2 のチャネル相関の比較 . . . . .	24
5.1	本実験で用いた送信アンテナの離隔 (Td) の条件 . . . . .	26
5.2	条件 2: チップアンテナによる中継がない系のチャネル容量の測定結果 (受信 SNR= 10dB) . . . . .	27
5.3	条件 2: チップアンテナによる中継がない系のチャネル容量の測定結果 (受信 SNR= 13dB) . . . . .	28
5.4	条件 2: チップアンテナによる中継がない系のチャネル容量の測定結果 (受信 SNR= 20dB) . . . . .	28
5.5	条件 1: 小型デバイスに組み込む $2 \times 2$ MIMO のチャネル容量の測定結果 (受信 SNR= 10dB) . . . . .	29
5.6	条件 1: 小型デバイスに組み込む $2 \times 2$ MIMO のチャネル容量の測定結果 (受信 SNR= 13dB) . . . . .	30
5.7	条件 1: 小型デバイスに組み込む $2 \times 2$ MIMO のチャネル容量の測定結果 (受信 SNR= 20dB) . . . . .	31

# 表目次

2.1	式 2.9 のパラメータ . . . . .	8
4.1	各条件での式 (2.9) の各パラメータ . . . . .	21

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景

近年スマートウォッチ等の小型デバイスで手軽に脈拍や血圧等のセンシングが可能となっている。これを発展させ身体中に装着したセンサで構築された身体表面センサネットワークからの生体情報を即時にセンシングするシステムを考える。このセンシングした大量のデータを外部に送信するには大きな伝送容量が必要となる。送受信間の伝送容量を拡大するために、複数アンテナを用いて通信する MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) が有効である。

MIMO は送受信アンテナに複数のアンテナを用いることで、伝送可能な bit 数の上限であるチャンネル容量を増大させる通信方法である。1970 年頃に後の MIMO に繋がるデジタル制御で信号処理をする研究がされていた [1]。1990 年代に MIMO 技術の研究開発が始まり、チャンネル容量の観点から送受信アンテナ数を増加させると伝送速度が倍増することの証明がされ、世の中に MIMO が大きく普及するきっかけとなった [2]。2000 年代以降、携帯電話や無線 LAN の発達と共に研究や商用向けのサービス化が急速に進んできた [3]。2010 年代には Wi-Fi アクセスポイントや携帯電話の通信規格の LTE(Long Term Evolution) に使われており、現在も無線通信システムで必要不可欠な技術となっている。

### 1.2 課題

MIMO による通信路容量増大の効果を得るために必要となる十分なアンテナ間隔の確保が必要である。しかしスマートウォッチ等の小型デバイスでは大きさゆえに十分なアンテナ間隔の確保は困難である。

### 1.3 研究目的

本研究は小型デバイスと非接触に結合する身体表面上で任意に配置できる外付けのアンテナ (以降, 提案システム) を用いることで十分なアンテナ間隔を確保し, デバイスのサイズにとらわれず MIMO による通信を可能にすることを旨とする。

本論文では提案システムによって小型デバイス内で近接して受信アンテナを配置せざるを得ないチャンネルであっても, チャンネル相関の低減と, MIMO による伝送路容量増大の効果を得られることを示す。

### 1.4 提案システムの概要

提案システムは小型デバイスと組み合わせて使用することを前提としている。本研究では図 1.1 のように小型デバイスの近くで大きな離隔を取れる肩に外付けのアンテナを装着して得られたデータを外部の機器と通信する。また外付けのアンテナと小型デバイス内のアンテナを結合するための伝送路を衣服上に構築する系を考える。



図 1.1: 提案システムの概念図



## 1.5 構成

本論文の構成を以下に述べる。2章ではMIMOとチャネル相関、チャネル容量の数学的表現について述べる。3章では提案システムの概要と4章、5章で使用した実験系と実験環境について述べる。4章では提案システムと $2 \times 2$  MIMOで受信信号のチャネル相関の測定実験について述べる。5章では提案システムと $2 \times 2$  MIMOでチャネル容量の測定実験について述べる。6章で本論文のまとめを行う。

## 第 2 章

# 伝送路の表現と評価方法の基礎

### 2.1 伝送路の表現方法

#### 2.1.1 SISO の伝送路の表現

図 2.1 に示すもっとも基本的な送信アンテナが 1 本, 受信アンテナ 1 本の通信路の SISO(Single-Input Single-Output) において受信信号  $x(t)$  は次式で表される.

$$x(t) = \sqrt{P}hs(t) + n(t) \quad (2.1)$$

$P$  は送信電力であり,  $s(t)$ ,  $n(t)$  はそれぞれ送信信号と熱雑音であり共に時間の関数である. また  $s(t)$ ,  $n(t)$ ,  $x(t)$  は複素数である.

$h$  は送信アンテナと受信アンテナのチャネルの複素振幅利得であり次式で表される [4].

$$h = r \exp(j\theta) \quad (2.2)$$

また上式 (2.2) より  $h$  は振幅  $r$  と位相  $\theta$  を持つ複素量 ( $j$  は虚数単位) であり伝搬チャネル係数と呼ばれる. なお  $h$  は時間によって変化しないものとする.

#### 2.1.2 MIMO の伝送路の表現

送信アンテナ (Tx)1 本, 受信アンテナ (Rx)1 本の SISO から送信アンテナ (Tx) を  $M$  本, 受信アンテナ (Rx) を  $N$  本に拡大した  $M \times N$  MIMO の伝搬路を図 2.2 に示す. ここでアンテナから直接届く電波を直接波, 周囲の壁や地面の障害物で反射して届く電波を反射波とする.

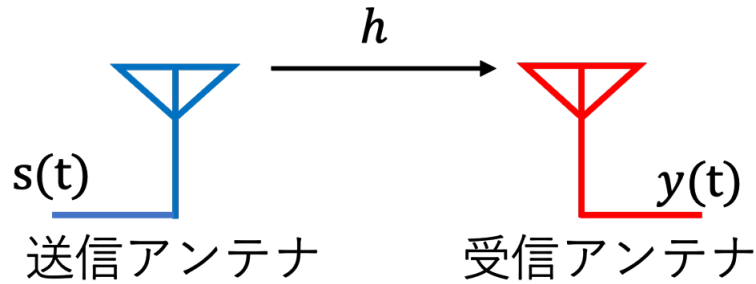


図 2.1: SISO の伝搬環境

$M \times N$  MIMO の伝搬路でのチャネル応答行列を次式で表す.

$$\mathbf{H} \equiv \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1m} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2m} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nm} & \dots & h_{nM} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{Nm} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ここで式 (2.3) の行列  $\mathbf{H}$  の要素  $h_{nm}$  は  $m$  番目の送信アンテナと  $n$  番目の受信アンテナ間 ( $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$ ) の伝搬チャネル係数を表している.

式 (2.1) より各送信アンテナから独立したストリームを送信するとき、 $N$  次元の受信信号ベクトル  $\mathbf{x}(t)$  を次式で表す.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2.4)$$

式 (2.4) を書き下せば次式のようにになる.

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{P}s_1(t) \\ \sqrt{P}s_2(t) \\ \vdots \\ \sqrt{P}s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

また式 (2.4) の  $\mathbf{P}$  は対角行列であり  $\sqrt{P}$  を対角成分にもつ.  $\mathbf{s}(t)$  は  $M$  次元の送信信号ベクトル,  $\mathbf{n}(t)$ ,  $\mathbf{x}(t)$  は各受信アンテナに加わる  $N$  次元の熱雑音ベクトルと受信信号ベクトルであり次式で表される [3]. なお式中の  $\mathbf{T}$  は転置を表している.

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^{\mathbf{T}} \quad (2.6a)$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^{\mathbf{T}} \quad (2.6b)$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^{\mathbf{T}} \quad (2.6c)$$

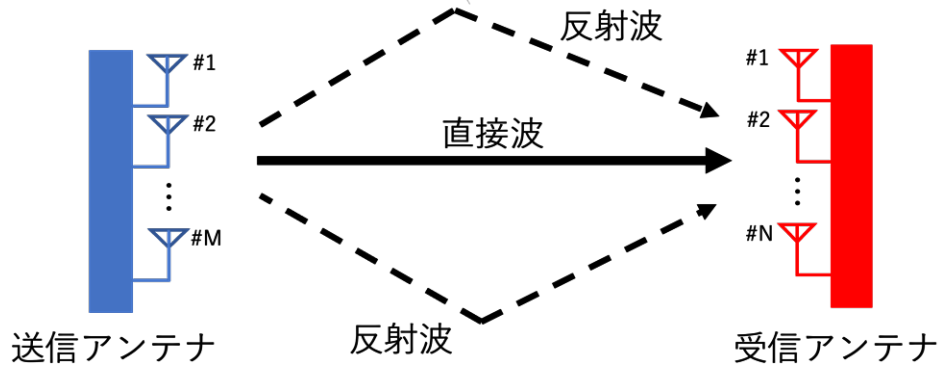


図 2.2: マルチパスでの MIMO 伝搬環境

### 2.1.3 特異値分解による MIMO の伝送路

式 (2.3) で表されるチャネル応答行列の特徴を把握するために次式の特異値分解を行う [4]. なお式中の  $\mathbf{H}$  はエルミート転置を表している.

$$\mathbf{H} = \mathbf{E}_r \mathbf{D} \mathbf{E}_t^H = \sum_{i=1}^p \sqrt{\lambda_i} \mathbf{e}_{r,i} \mathbf{e}_{t,i}^H \quad (2.7)$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_p}) \quad (2.8a)$$

$$\mathbf{E}_t = (\mathbf{e}_{t,1}, \mathbf{e}_{t,2}, \dots, \mathbf{e}_{t,p}) \quad (2.8b)$$

$$\mathbf{E}_r = (\mathbf{e}_{r,1}, \mathbf{e}_{r,2}, \dots, \mathbf{e}_{r,p}) \quad (2.8c)$$

$$p \equiv \min(M, N) \quad (2.8d)$$

ここで式 (2.8a) の  $\lambda_i$  は行列  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  または  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  の  $i$  番目の固有値であり  $i$  は固有値  $\lambda$  の大きい順に  $(1, 2, \dots, p)$  とする. 式 (2.8b) の  $\mathbf{e}_{t,i}$  は固有値  $\lambda_i$  に属す  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  の固有ベクトルを表す. また式 (2.8c) の  $\mathbf{e}_{r,i}$  は固有値  $\lambda_i$  に属す  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  の固有ベクトルを表す [4].

式 (2.3) より MIMO のチャネルとチャネル応答行列を特異値分解して得られた特異値による MIMO のチャネルの等価表現を図 2.3 に示す. 図 2.3 より図右側の特異値で表された MIMO のパスは最大  $p$  ( $\equiv \min(M, N)$ ) 個の独立した通信路が形成されている. なおそれぞれの固有パスの振幅利得は  $\sqrt{\lambda_i}$  で表される. したがって固有値  $\lambda_i$  の大きさによって, 固有パスの振幅利得は異なるが, MIMO は  $p$  個の独立した信号が混信することなく送ることをできる.

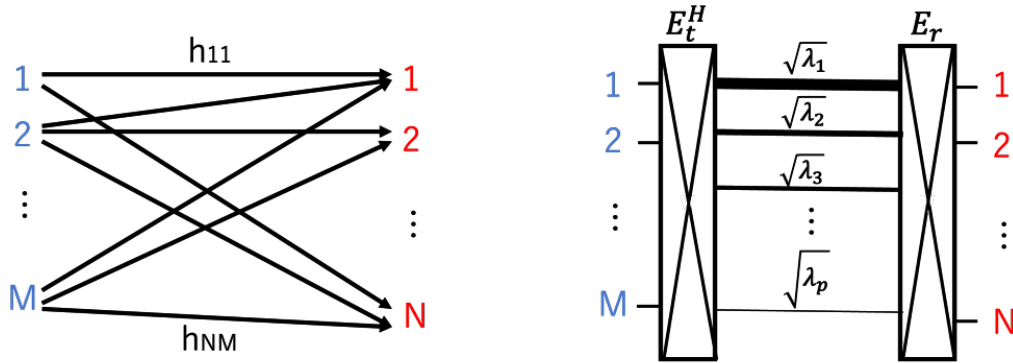


図 2.3: MIMO チャンネルと特異値で等価表現された MIMO チャンネル [4]

## 2.2 チャンネル相関

送信アンテナ 1 本と受信アンテナ 1 本を用いてチャンネル相関を次のように求める [5, 6]. 図 2.4 より受信アンテナをある位置に固定し, 送信アンテナ位置をさまざまに変化させてその位置ごとに測定した伝搬チャンネル係数を  $h_{1k}$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) とする. 受信アンテナの位置を変更して同様にチャンネル係数  $h_{2k}$  を測定する. このとき, これら 2 つの受信アンテナ位置に対してチャンネルの相関  $\rho_{12}$  が定義できる. これを基本として受信アンテナ位置をさまざまに変化させる. この受信アンテナ位置のインデックスを  $i$  ( $= 1, 2, \dots, N$ ),  $j$  ( $= 1, 2, \dots, N$ ) として  $\rho_{ij}$  を次式で求める [5, 6].

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K h_{ik}^*(f) h_{jk}(f)}{\sqrt{\sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K |h_{ik}(f)|^2} \sqrt{\sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K |h_{jk}(f)|^2}} \quad (2.9)$$

式 (2.9) の \* は複素共役を表している. また分子には周波数選択性フェージングと位置に依存したフェージングの影響が反映されている, 分母は伝搬チャンネル係数の  $h_{ik}, h_{jk}$  の分散から分子を正規化する役割を持っている.

表 2.1 に式 (2.9) の各パラメータの定義を示す. なおチャンネル相関  $\rho_{ij}$  は複素数で  $0 \leq |\rho_{ij}| \leq 1$  である.

表 2.1: 式 2.9 のパラメータ

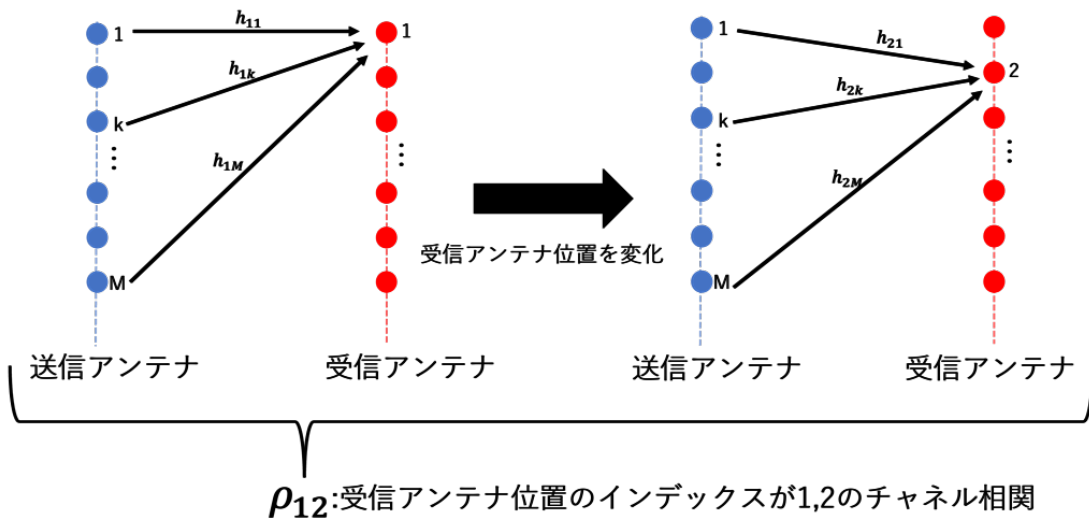
	意味
$\rho_{ij}$	チャンネル相関
$i, j$	受信アンテナ位置のインデックス
$k$	送信アンテナ位置のインデックス
$f$	測定周波数のインデックス
$h_{ik}, h_{jk}$	伝搬チャンネル係数 (S パラメータ, $s_{21}$ )

この  $|\rho_{ij}|$  を要素とする受信相関行列  $\mathbf{R}$  を次式に表す.

$$\mathbf{R} \equiv \begin{bmatrix} |\rho_{11}| & |\rho_{12}| & \dots & |\rho_{1N}| \\ |\rho_{21}| & |\rho_{22}| & \dots & |\rho_{2N}| \\ \vdots & \vdots & |\rho_{ij}| & \vdots \\ |\rho_{N1}| & |\rho_{N2}| & \dots & |\rho_{NN}| \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

式 (2.10) より  $|\rho_{ij}| = |\rho_{ji}|$  となるので, 受信相関行列  $\mathbf{R}$  は対称行列になる [6]. また行列  $\mathbf{R}$  の対角成分は同じ受信アンテナ位置のインデックスの相関なので値は 1 となる.

したがって, MIMO のチャンネル相関を求めることで, その特性を知ることができ, 複数の受信アンテナが独立した信号を受信できるアンテナ間隔を求めることができる.

図 2.4: チャンネル相関  $\rho_{12}$  の導出のイメージ

## 2.3 チャネル容量

### 2.3.1 SISO のチャネル容量

シャノンの情報理論より単位周波数あたりのチャネル容量は次式で表される [4].

$$C = \log_2(1 + \gamma) \quad (2.11)$$

ここで単位は bps/Hz であり,  $\gamma$  は受信 SNR を表している.

また式 (2.1) より  $s(t)^2 = 1$ ,  $n(t)^2 = P_n$  とする. なお雑音電力との区別のために送信電力  $P$  を  $P_s$  とする. このとき受信 SNR は次式で表される.

$$\gamma = \frac{P_s |h|^2}{P_n} \quad (2.12)$$

したがって式 (2.11), 式 (2.12) より SISO のチャネル容量は次式で求められる [3].

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{P_s |h|^2}{P_n} \right) \quad (2.13)$$

ここで,  $1 \ll \gamma$  のとき, 式 (2.13) は  $\log_2(\gamma)$  と近似できる.

図 2.5 に SISO のチャネル容量特性を示す. SISO では送信電力を 2 倍 (受信 SNR を 3dB 増加) にしてもチャネル容量を約 1bit/Hz しか大きくできない. したがって送信電力を増加させても伝送速度の向上への寄与は小さい [3].

### 2.3.2 MIMO のチャネル容量

送信アンテナ  $M$  本, 受信アンテナ  $N$  本の  $M \times N$  MIMO  $M \times N$  MIMO での単位周波数あたりのチャネル容量は以下 2 つの方式によって異なる式で表される [4].

方式 (1) : 受信側のみが MIMO チャネル応答行列の情報 (CSI) を持つ場合

方式 (2) : (事前の測定等などにより) 送受信側双方で CSI を共有している場合

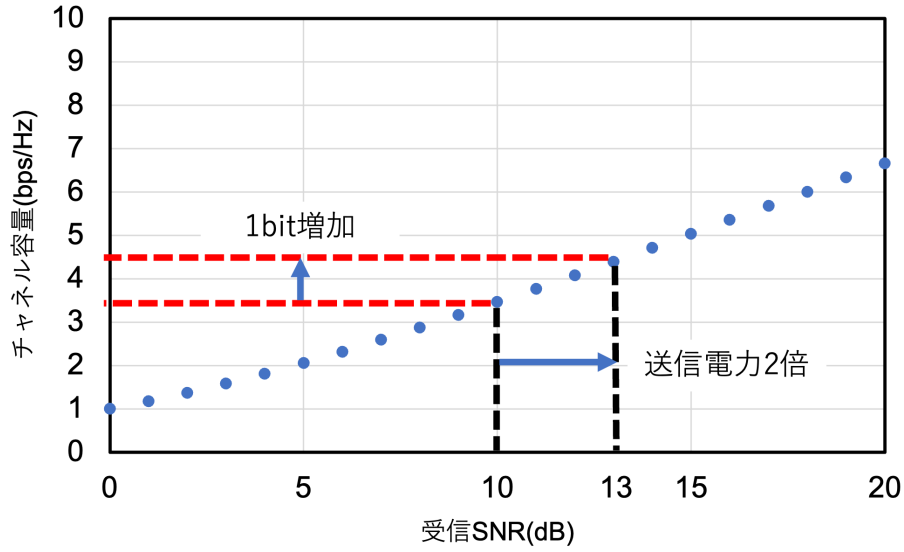


図 2.5: SISO のチャンネル容量特性 [3]

方式 (1), 方式 (2) のチャンネル容量をそれぞれ  $C_1, C_2$  として次式に表す. なお式 (2.4) より  $E|s(t)|^2 = 1$ ,  $E|n(t)|^2 = P_n$  ( $E|\cdot|$  はアンサンブル平均) とする.

$$C_1 = \log_2 \det \left( \mathbf{I} + \frac{P_s}{MP_n} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (2.14a)$$

$$= \sum_{i=1}^p \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{MP_n} \lambda_i \right) \quad (2.14b)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^p \log_2 (1 + \lambda_i \gamma_i) \quad (2.14c)$$

式 (2.14c) において

$$\sum_{i=1}^p \gamma_i = \frac{P_s}{P_n} \quad (2.14d)$$

ここでの  $P_s$  は送信側の全電力を表している. MIMO は SISO と同じ周波数帯, 同じ送信電力で通信を行うとき SISO よりもチャンネル容量を増大させる通信方法である. また式 (2.14b) の  $\lambda_i$  の項は MIMO 全体の受信 SNR を表している. したがって送信側で通信路の様子がわからない方式 1 では, 全アンテナで均等に電力分配をすると最大のチャンネル容量が得られる. 方式 2 では式 (2.14c) より各固有パスには, 固有値  $\lambda_i$  に応じた電力が注水定理に従い分配される [4]. また式 (2.14d) より式 (2.14c) 中の各固有パスの受信 SNR



の  $\gamma_i$  は、すべて足し合わせると全アンテナで均等に電力分配をしたときの受信 SNR の  $P_s/P_n$  と等しくなる。

以降本稿では特別な断りがない場合、MIMO の単位周波数あたりのチャンネル容量の導出は方式 (1) を使用する。

### 2.3.3 $2 \times 2$ MIMO のチャンネル容量の最大値, 最小値

図 2.6 に MIMO の最小構成である  $2 \times 2$  MIMO の伝搬環境を示す。

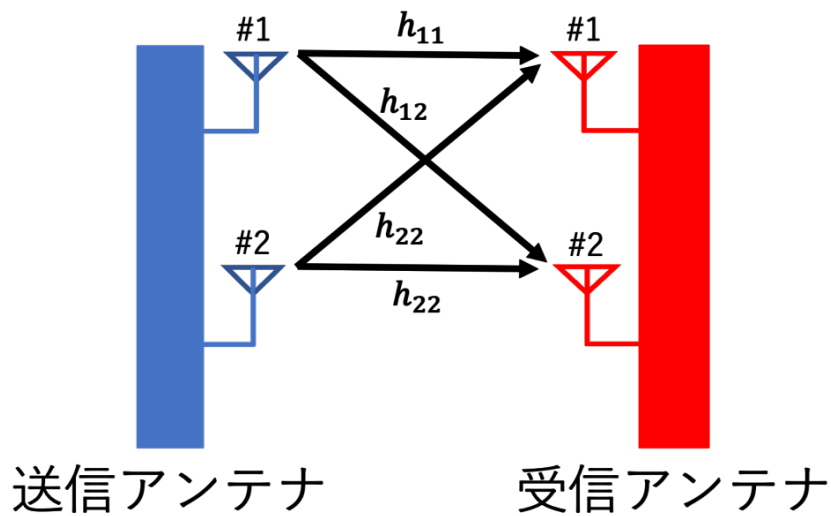


図 2.6:  $2 \times 2$  MIMO の伝搬環境

$2 \times 2$  MIMO のチャンネル容量を  $C_{\text{MIMO}}$  として式 (2.14b) を次式のように変形する。

$$\begin{aligned}
 C_{\text{MIMO}} &= \sum_{i=1}^2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} \lambda_i \right) \\
 &= \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} \lambda_1 \right) + \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} \lambda_2 \right) \\
 &= \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} (\lambda_1 + \lambda_2) + \left( \frac{P_s}{2P_n} \right)^2 \lambda_1 \lambda_2 \right)
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

ここで  $\log$  中の  $(\lambda_1 + \lambda_2)$  の項は  $2 \times 2$  MIMO 全体の受信 SNR の合計であり、SISO のチャンネル容量の式 (2.13) 中の受信 SNR ( $\gamma$ ) と対応している。  $D$  を定数とすると  $D = \lambda_1 + \lambda_2$  であり、  $D$  のとる範囲は  $0 < D < 1$ ,  $D < 2\lambda_1$  である。なお式 (2.15) を定数  $D$  を使って

表すと次式になる.

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} D + \left( \frac{P_s}{2P_n} \right)^2 \lambda_1 \lambda_2 \right) \quad (2.16)$$

式 (2.16) より  $C_{\text{MIMO}}$  の最大値と最小値を求める. ここで,  $\lambda_1, \lambda_2$  は  $0 < \lambda_1 < 1$ ,  $0 < \lambda_2 < 1$ ,  $\lambda_2 < \lambda_1$  である.

$\lambda_1 = \lambda_2$  のとき  $C_{\text{MIMO}}$  が最大になるので,  $D \approx 2\lambda_1$ ,  $\lambda_1 \lambda_2 \approx (\lambda_1)^2$  と近似できる. このときの  $C_{\text{MIMO}}$  を次式に表す.

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} D + \left( \frac{P_s}{4P_n} D \right)^2 \right) \quad (2.17)$$

$\lambda_2 \ll \lambda_1$  のとき  $C_{\text{MIMO}}$  が最小になるので,  $D \approx \lambda_1$ ,  $\lambda_1 \lambda_2 \approx 0$  と近似できる. このときの  $C_{\text{MIMO}}$  を次式に表す.

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} D \right) \quad (2.18)$$

式 (2.17), 式 (2.18) より  $C_{\text{MIMO}}$  が取る値の範囲を次式に表す.

$$\log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} D \right) \leq C_{\text{MIMO}} \leq \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} D + \left( \frac{P_s}{4P_n} D \right)^2 \right) \quad (2.19)$$

式 (2.19) の関係より  $C_{\text{MIMO}}$  は式 (2.18) の  $C_{\text{MIMO}}$  の最小値に比べて式 (2.17) の  $\log$  中の第3項の分チャンネル容量は大きくなる. なお  $C_{\text{MIMO}}$  が最大になるとき  $\log$  中の第3項の固有値の積は  $D^2/4$  となる.

したがって MIMO のチャンネル容量増大の効果は式 (2.16) の  $\log$  中の第3項にある. このチャンネル容量増大の効果は SISO のチャンネル容量との比を求めることで, 定量的に評価することができる. また式 (2.18), 式 (2.19) より  $2 \times 2$  MIMO での効果の上限と下限が求められる.

## 第 3 章

# 提案システムと実験の詳細

### 3.1 衣服上に展開する提案システムのモックアップ

1 章より, 小型デバイスと組み合わせて, デバイスの大きさにとらわれず MIMO による通信を可能とするための提案システムのモックアップを図 3.1 に示す. この提案システムを搭載した衣服を身につけて小型デバイスと共に使用することを想定している.

以下に提案システムのモックアップについて示す. 本研究では図 3.1 より MIMO 用の 2 つのチップアンテナが小型デバイス内に内蔵されている状況を想定した. 小型デバイス内のアンテナと近接結合するチップアンテナを衣服上の袖口に設けた (図 3.1 では袖口のアンテナと表記). このとき小型デバイスと袖口のアンテナの近接接合部の間隔はアンテナ間の通信が外部からの影響よりも強くなるようにそれぞれのアンテナ間隔よりも小さく設定した. 左右の肩に搭載したアンテナは十分な離隔が確保できるように文献 [7] より人間の肩幅の約 40 cm に設定した. この肩口のアンテナをそれぞれ導電布伝送路 (図 3.1 では衣服上の胸あたりから左袖へ伸びるグレーの線にて表記) で袖口のアンテナと接続した. 以降, 肩に搭載したアンテナを外部アンテナ, 袖口のアンテナを近接アンテナとする.

### 3.2 MIMO の伝搬実験環境の詳細

図 3.2, 図 3.3 に実験環境の模式図と実際の実験環境を示す. 本研究の実験は A 棟 3 階の A351 の実験室で行った. 実験では送受信アンテナ間の直接届く電波だけでなく周囲の壁や天井, 物体から反射した電波が多数存在するマルチパス環境を想定した. 図 3.2 に示すとおり送信アンテナ (TX) と受信アンテナ (RX) 間は実際に使用することを仮定して 2 m 開けて配置した. また周囲の壁や机と実験系を構築した机の間は約 2 m~2.5 m ほど空



図 3.1: 提案システムのモックアップ

いており、前述の送受信アンテナ間とほぼ同じかそれ以上の離隔を確保した。

図 3.3 中の TX, RX について図 3.4 に示す。本稿の実験は連続的にアンテナ位置を変化させて複数の位置での伝搬チャネル係数をベクトルネットワークアナライザ (ADVANTEST R3768) で測定した。このとき図 3.4 のアンテナをリニアアクチュエータにつけた治具へ乗せてアンテナ位置を変化させた。また送受信アンテナをそれぞれ 2 本ずつ用いて実験を行う場合は、リニアアクチュエータに乗せるアンテナのほかに、位置を固定したアンテナを用意した。

図 3.2 中の Table には、図 3.1 の提案システムに示す近接アンテナとデバイス内のアンテナの近接接合部分に相当する系を設置した。この系を図 3.6 に示す。図 3.5 の図中左側の白く小さいものがチップアンテナである。チップアンテナの大きさは  $8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  である。これを同軸 SMA (Sub Miniature Type A) コネクタのついた  $40\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  のプリント回路基板 (PCB) に載せて使用した。ここではチップアンテナのある面を表、チップアンテナのない面を裏とする。図 3.6 の近接接合部分に相当する系はこのアンテナの表面同士を向かい合わせに配置して治具に固定した。このとき近接接合部を拡大した図 3.7 のように向かい合わせたチップアンテナを載せた PCB の間隔は近接接合部での通信を強くするため小型デバイス内のアンテナ離隔よりも小さい約  $5\text{ mm}$  に設定した。

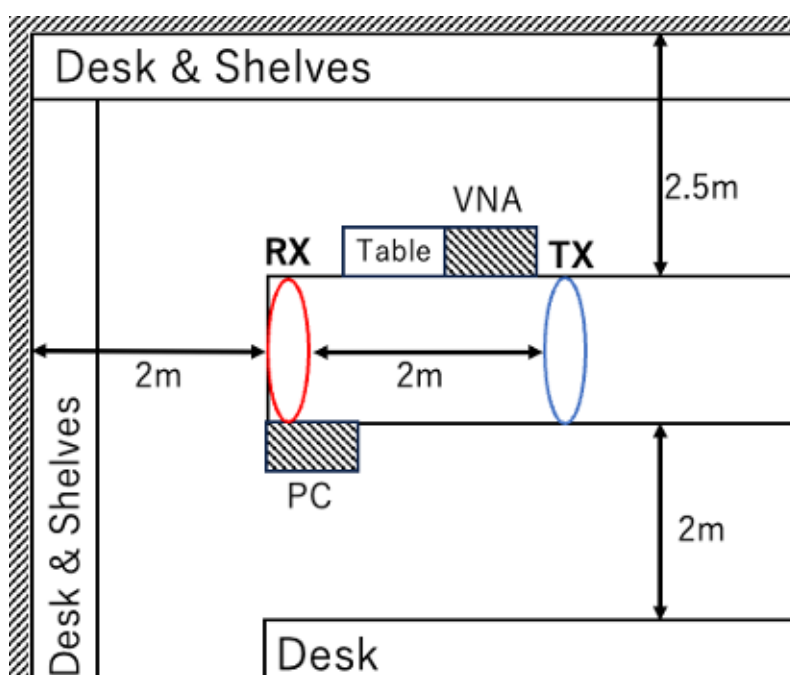


図 3.2: 実験室 (A351) の実験環境の模式図

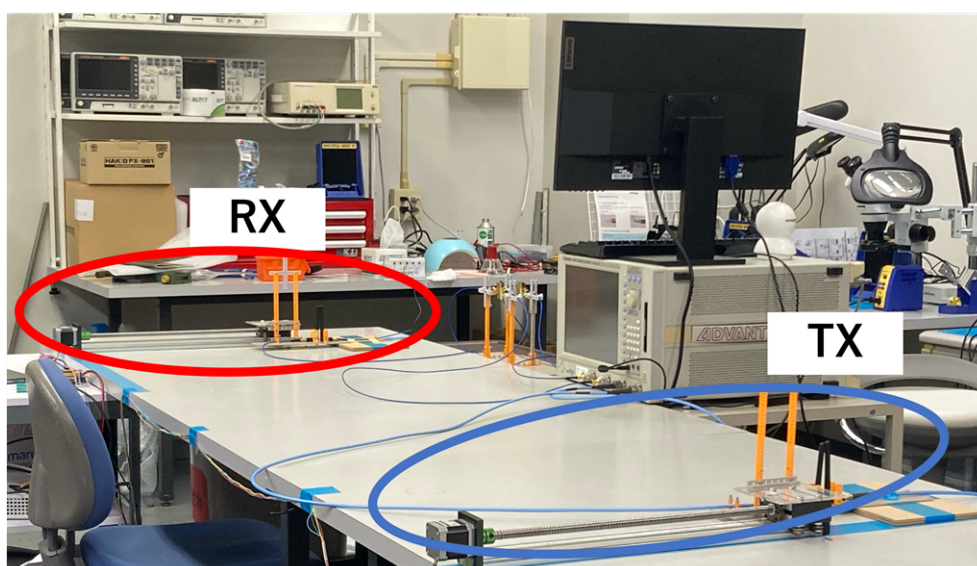


図 3.3: 実際の実験環境

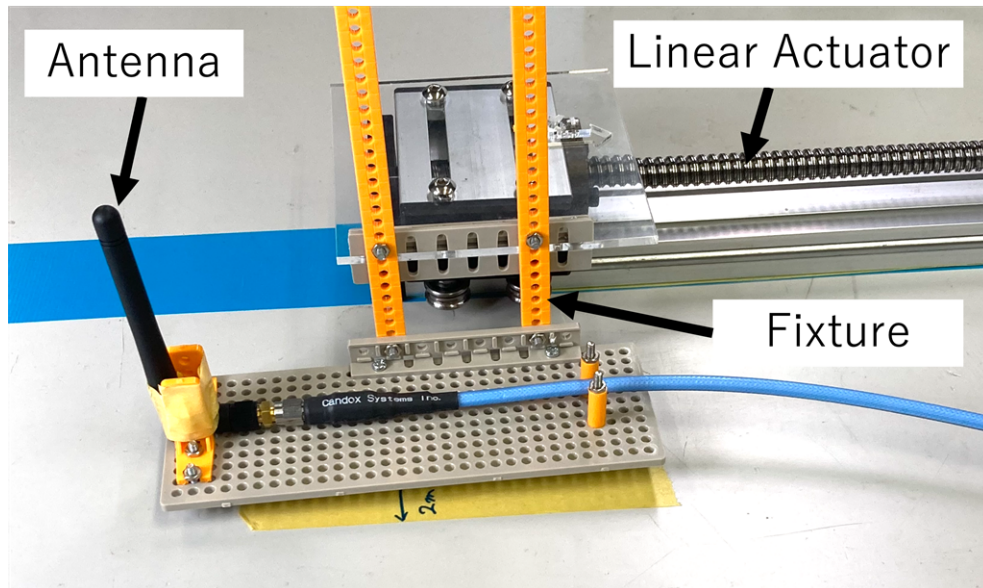


図 3.4: 図 3.3 の TX,RX の詳細

リニアアクチュエータに装着したジグにアンテナを乗せている。  
アンテナに接続している水色のケーブルは VNA に接続されている。

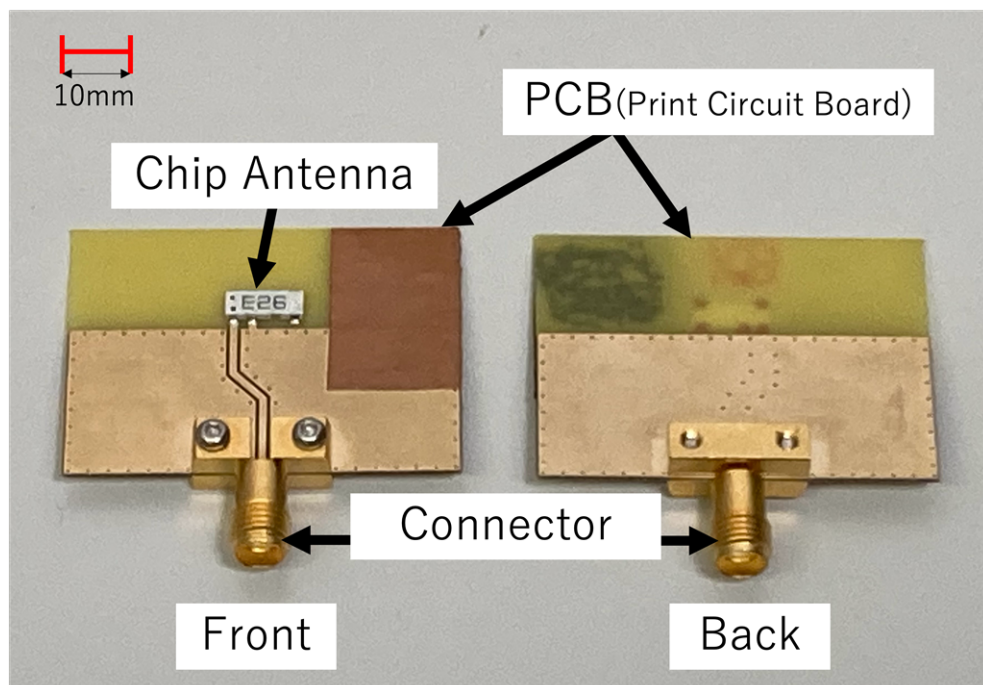


図 3.5: 実験に使用したチップアンテナ

チップアンテナ: 8 mm × 3 mm, PCB: 40 mm × 30 mm

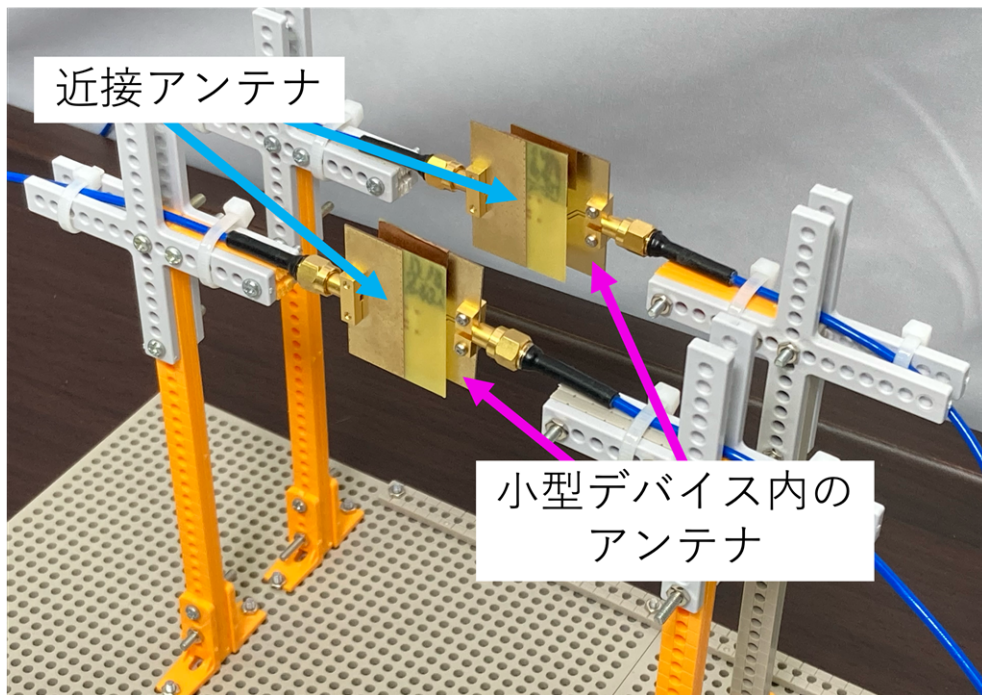


図 3.6: 図 3.1 の近接アンテナとデバイス内のアンテナによる近接接合部に相当する系  
 図中右側のジグに固定されているアンテナは小型デバイス内のアンテナ，左側のジグに固  
 定されているアンテナは袖口の近接アンテナを想定している。

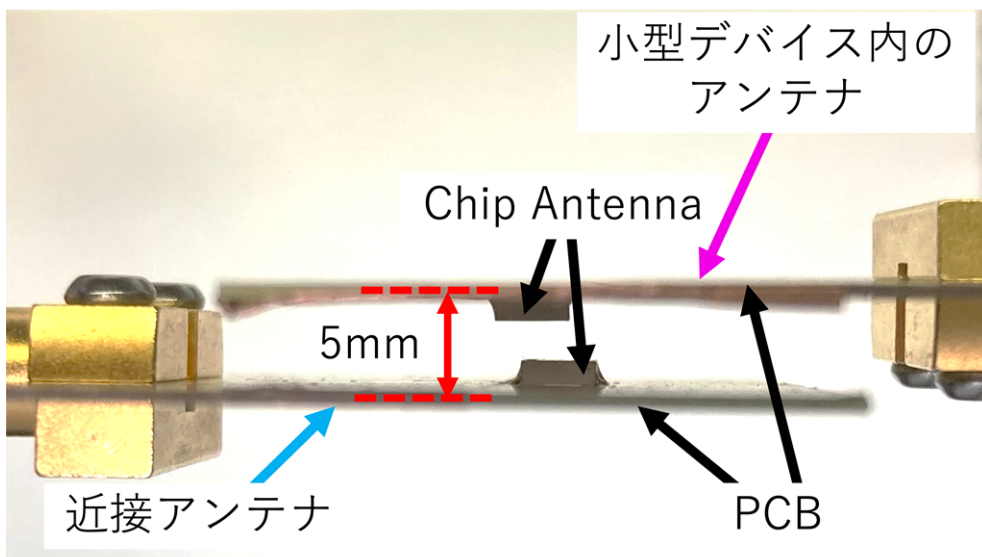


図 3.7: 図 3.6 の近接接合部の詳細  
 PCB の間隔を 5 mm に設定し，近接接合を行なっている。

## 第4章

# チャンネル相関の実験評価

### 4.1 実験目的

本実験では、以下に示す3つの条件でチャンネル相関を求め、3つの条件の測定結果から小型デバイス内で近接して配置せざるを得ない受信アンテナを介するチャンネルであっても、小型デバイスに組み込む $2 \times 2$  MIMO が典型的な MIMO 受信系と同様にチャンネル相関が低減できることを実験的に示す。

条件 (1) : 小型デバイスに組み込む $2 \times 2$  MIMO (提案システム)

条件 (2) : チップアンテナによる中継がない系 (典型的な MIMO 受信系を想定)

条件 (3) : 外部アンテナに相当するアンテナがない系 (受信系が小型デバイスのみを想定)

また、それぞれの実験系の模式図を図 4.1~4.3 に示す。

### 4.2 チャンネル相関計測実験の概要

各受験の実験系にて送信アンテナ1本と受信アンテナ1本をリニアアクチュエータに搭載して走査した。そしてVNA(ベクトルネットワークアナライザ)でsパラメータ(伝搬チャンネル係数)を測定しチャンネル相関を求めた。測定に用いた周波数帯は2.4 GHz帯(1波長=約12cm, 中心周波数2.45GHz)である。なお2.4 GHz~2.5 GHzの100 MHzの帯域で0.1 MHz刻みの201点を周波数のインデックスとした。

条件 (1) の小型デバイスに組み込む $2 \times 2$  MIMO と条件 (2) のチップアンテナによる中継がない系では、3.1章より人間の肩幅は約40cm [7]であることを考慮して、0cm~35cm(約3波長)でアンテナをリニアアクチュエータで1cm刻みに走査した。式



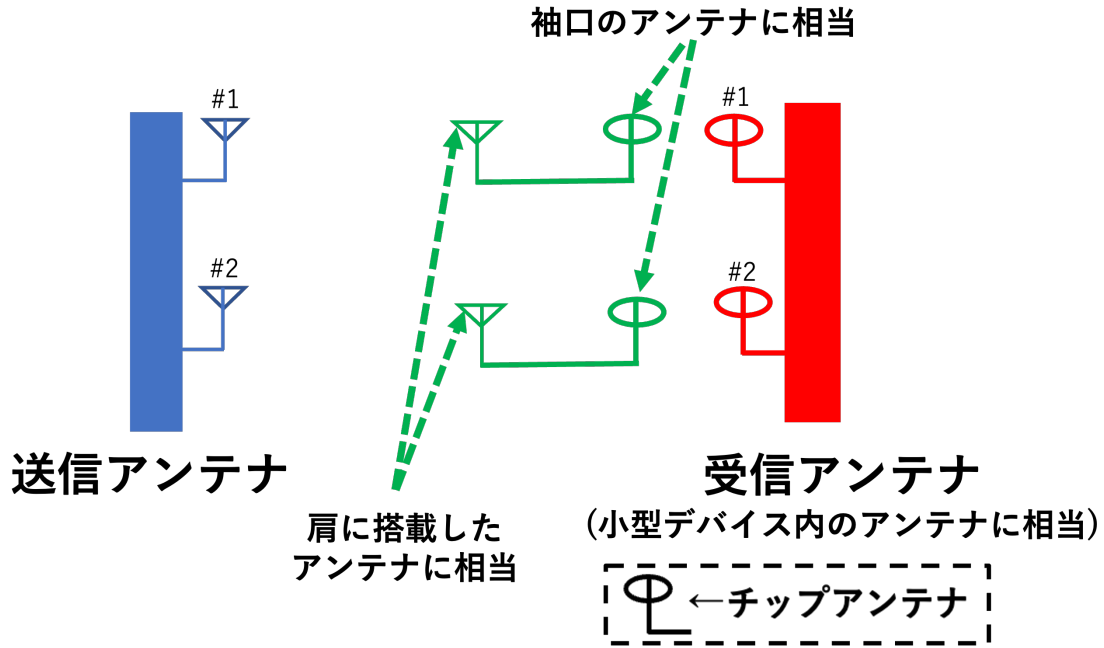


図 4.1: 条件 (1) の実験系: 図中の各アンテナは図 3.1 の各アンテナに対応しており, 条件 (2) の受信アンテナの先にチップアンテナによる近接接合部分を加えたものである.

(2.9) のチャネル相関の式の各パラメータに上記の内容を代入したものを表 4.1 と次式に示す.

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{f=1}^{201} \sum_{k=1}^{36} h_{ik}^*(f) h_{jk}(f)}{\sqrt{\sum_{f=1}^{201} \sum_{k=1}^{36} |h_{ik}(f)|^2} \sqrt{\sum_{f=1}^{201} \sum_{k=1}^{36} |h_{jk}(f)|^2}} \quad (4.1)$$

条件 (3) の外部アンテナに相当するアンテナがない系では受信系が小型デバイスのみを想定しているので走査する範囲をデバイスの大きさを考慮して, 0 cm~5 cm でこの範囲での相関の変化を詳しく見るためにアンテナをリニアアクチュエータ 0.5 cm 刻み走査した. 式 (2.9) のチャネル相関の式の各パラメータに上記の内容を代入したものを表 4.1 と次式に示す.

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{f=1}^{201} \sum_{k=1}^{11} h_{ik}^*(f) h_{jk}(f)}{\sqrt{\sum_{f=1}^{201} \sum_{k=1}^{11} |h_{ik}(f)|^2} \sqrt{\sum_{f=1}^{201} \sum_{k=1}^{11} |h_{jk}(f)|^2}} \quad (4.2)$$

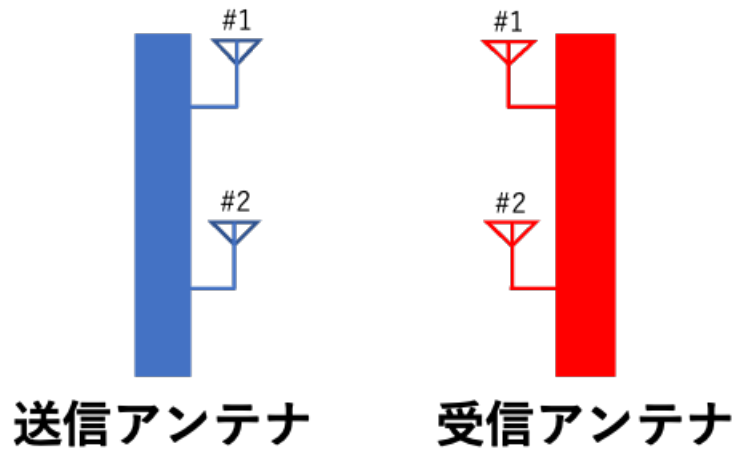
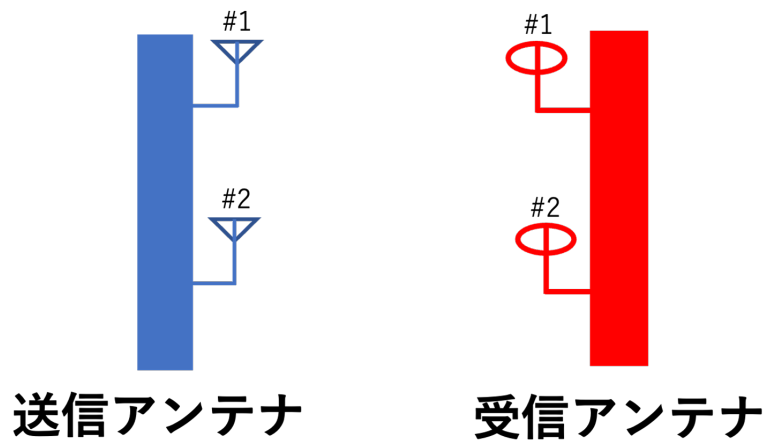


図 4.2: 条件 (2) の実験系: 送受信アンテナそれぞれを 2 本ずつ用意した典型的な  $2 \times 2$  MIMO である.



(受信アンテナは小型デバイス内のアンテナに相当)

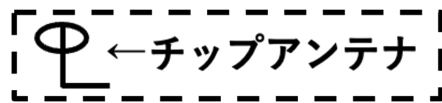


図 4.3: 条件 (3) の実験系: 図 4.1 から緑色で示した部分がないものである.

表 4.1: 各条件での式 (2.9) の各パラメータ

	意味	値の範囲
$\rho_{ij}$	チャンネル相関	
$i, j$	受信アンテナ位置のインデックス	$1 \leq i, j \leq 36$ (条件 (1),(2)) $1 \leq i, j \leq 11$ (条件 (3))
$k$	送信アンテナ位置のインデックス	$1 \leq k \leq 36$ (条件 (1),(2)) $1 \leq k \leq 11$ (条件 (3))
$f$	測定周波数のインデックス	$1 \leq f \leq 201$
$h_{ik}, h_{jk}$	伝搬チャンネル係数 (S パラメータ, $s_{21}$ )	

### 4.3 チャンネル相関計測実験の結果

3つの条件で伝搬チャンネル係数を測定し、式 (4.1) および式 (4.2) で求めたチャンネル相関の結果を図 4.4~図 4.6 に示す。いずれの図も左側 (a) は受信アンテナ位置のインデックス  $i, j$  のうちの  $i = 1$  のとき  $j$  とのアンテナ間の距離に対するチャンネル相関の絶対値  $|\rho_{ij}|$  を表している。ここでアンテナ間距離とは条件 (1), 条件 (3) では図中の赤で示されたアンテナのこと、条件 (2) では図中の肩に搭載したアンテナ間のことである。右側 (b) は受信アンテナ位置のインデックス  $i, j$  におけるチャンネル相関の絶対値  $|\rho_{ij}|$  を色の濃淡で表したヒートマップである。なお式 (2.10) より対象行列の性質よりヒートマップは対角成分で対称である。アンテナ位置のインデックス  $i, j$  は条件 (1), 2 では  $36 \times 36$  の 1926 点、条件 (3) では  $11 \times 11$  の 121 点である。

図 4.4 に示す条件 (2) では、図 4.4a よりアンテナ距離が 0 cm のとき相関  $|\rho_{ij}|$  は 1 となった。アンテナ距離が半波長の 6 cm になると相関  $|\rho_{ij}|$  は 0.5 程度になった。アンテナ距離が半波長以上になると約 6 点の周期で相関は徐々に低下し、最大の 35 cm のとき 0.3 程度になった。とくにアンテナ距離が 16 cm のとき相関がもっとも小さく約 0.1 となった。また図 4.4b では図中の対角成分は 2 本の受信アンテナが同じ位置 (位置のインデックス  $i, j$  が  $i = j$ ) のときである。このとき相関は 1 であり、ヒートマップはもっとも濃い色を示した。アンテナ距離が半波長の 6 cm 以下 (位置のインデックス  $i, j$  が  $j \leq i + 5$ ) のとき相関が  $0.5 < |\rho_{ij}| < 1$  の値を示した。アンテナ距離が半波長の 6 cm 以上 (位置のインデックス  $i, j$  が  $i + 5 < j$ ) のとき相関が  $0 \leq |\rho_{ij}| \leq 0.5$  の値を示した。とくにアンテナ距離が 15 cm 付近 (位置のインデックス  $i, j$  が  $i + 15 = j$ ) のとき相関は低く、ヒートマップは白色に近いを示した。さらに  $i < 15$  の範囲において、 $j = 15, 16$  のときヒートマップは白色を示した。

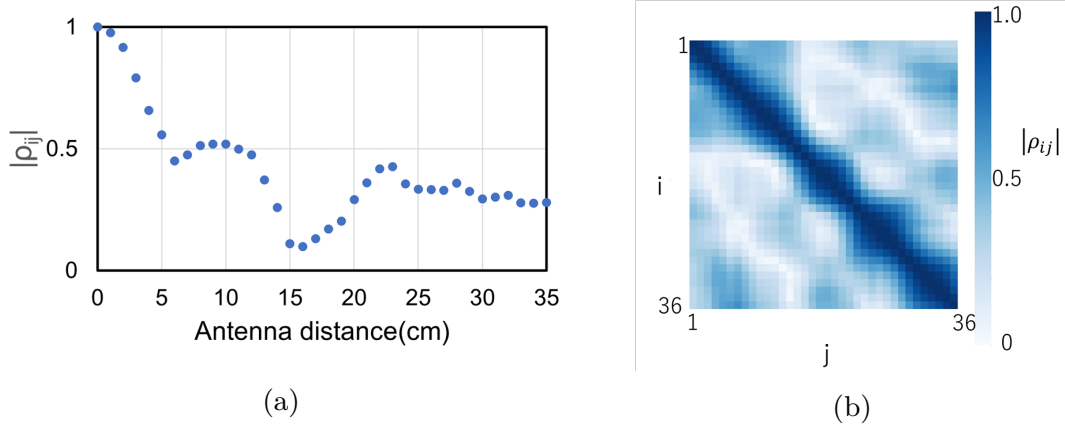


図 4.4: 条件 (2): チップアンテナによる中継がない系の  
チャネル相関の測定結果

図 4.5 に示す条件 (1) では, 図 4.5a よりアンテナ距離が 0 cm のとき相関  $|\rho_{ij}|$  は 1 となった. アンテナ距離が半波長の 6 cm になると相関  $|\rho_{ij}|$  は 0.4 程度になった. アンテナ距離が半波長以上になると約 6 点の周期で相関は変化し, 最大の 35 cm のとき 0.5 程度になった. とくにアンテナ距離が 21 cm のとき相関がもっとも小さく約 0.25 となった. さらにアンテナ距離が 27 cm のとき一時的に相関が大きくなり約 0.55 となった. また図 4.5b では前述の条件 (1) と同様に 2 本の受信アンテナが同じ位置 (位置のインデックス  $i, j$  が  $i = j$ ) の対角成分では相関は 1 であり, ヒートマップはもっとも濃い色を示した. アンテナ距離が半波長の 6 cm 以下 (位置のインデックス  $i, j$  が  $j \leq i + 5$ ) のときも条件 (1) と同様に相関が  $0.5 < |\rho_{ij}| < 1$  の値を示した. アンテナ距離が半波長の 6 cm 以上 (位置のインデックス  $i, j$  が  $i + 5 < j$ ) のとき相関が  $0.3 \leq |\rho_{ij}| \leq 0.5$  の値となりヒートマップは所々で白色を示しているが, 全体的に  $|\rho_{ij}| = 0.3$  程度の水色となった.

図 4.6 に示す条件 (3) では, 図 4.6a よりアンテナ距離が 0 cm のとき条件 (1), 2 と同様に相関  $|\rho_{ij}|$  は 1 となった. アンテナ距離が最大の 5 cm でも相関  $|\rho_{ij}|$  はほとんど 1 のままであった. なおアンテナを走査して計測した他の点でも相関は  $0.9 < |\rho_{ij}| < 1$  となり, 上記の半波長以下のときのように相関が大きく変化することはなかった. 図 4.6b では条件 (1), (2) と同様に 2 本の受信アンテナが同じ位置 (位置のインデックス  $i, j$  が  $i = j$ ) の対角成分では相関は 1 であり, ヒートマップはもっとも濃い色を示した. 前述のように 0 cm~5 cm の範囲でアンテナを走査して計測しても, 相関が 1 から大きく変化することはなかったので, ヒートマップは全体的に濃い色を示した.

以上の 3 つの条件での結果から外部アンテナに相当するアンテナがない系では 2 つの受

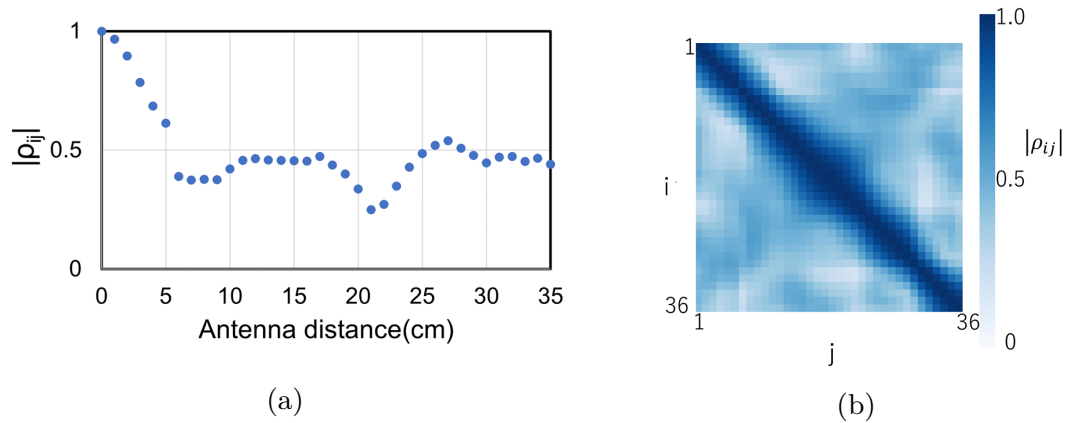


図 4.5: 条件 (1): 小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO のチャネル相関の測定結果

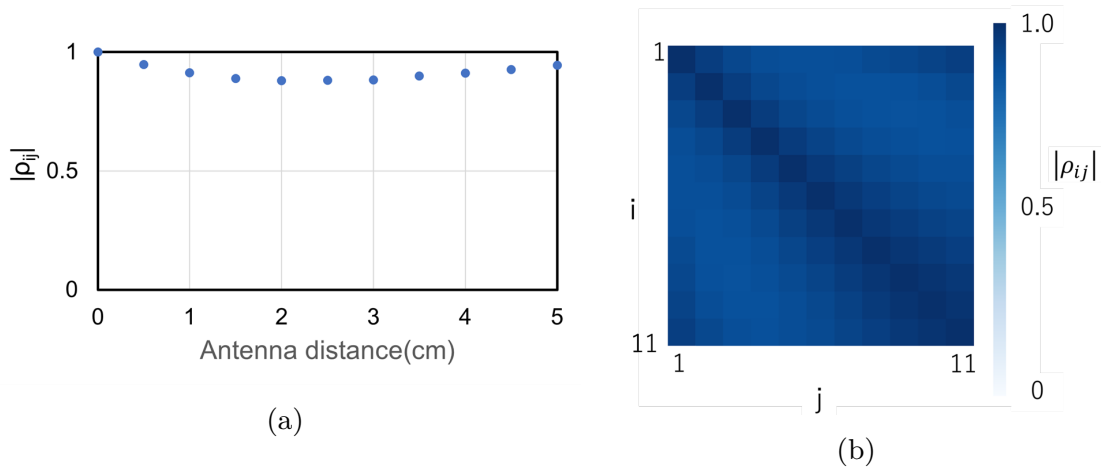


図 4.6: 条件 (3): 外部アンテナに相当するアンテナがない系の測定結果

信アンテナの離隔が小さいためチャネル相関は高いままであった。しかし小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO では中継箇所のチップアンテナ位置は固定されているが、近接結合を介した先のアンテナ位置に依存して相関係数が変化した。また条件 1 と条件 2 のチャネル相関を比較した図 4.7 よりチップアンテナによる中継がない系と同様に 2 つの受信アンテナの間隔を半波長の 6 cm 以上確保することでチャネル相関が低減することも確認できた。なおチャネル相関がアンテナ距離に比例して小さくならず、約 6 点ごとの周期でチャネル相関が変化した。これは本実験環境のマルチパスによる定在波の影響のためである。

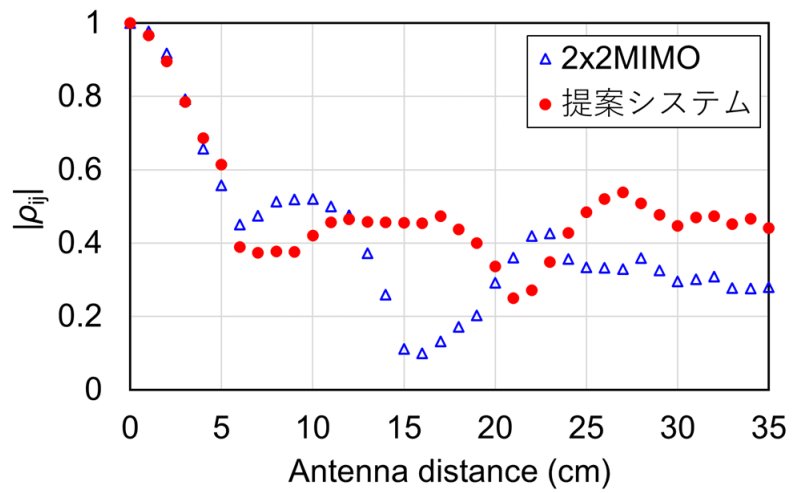


図 4.7: 条件 1 と条件 2 のチャネル相関の比較

#### 4.4 考察

2本の受信アンテナ位置が半波長以上離れている時に、条件(1)の小型デバイスに組み込む $2 \times 2$  MIMOのチャネル相関が条件(2)のチップアンテナによる中継がない系の相関より大きくなったのは、小型デバイスに組み込む $2 \times 2$  MIMOは受信系にホイップアンテナの他に近接接合部のチップアンテナが電波を受信したためと考えられる。

## 第 5 章

# チャンネル容量の実験評価

### 5.1 実験目的

本実験では以下に示す 2 つの条件でチャンネル容量を測定する。2 つの条件の測定結果から小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO が典型的な MIMO 受信系と同様に MIMO による伝送路容量増大の効果があることを実験的に示す。なお、各条件の実験系は前章の図 4.1, 4.2 と同じである。

条件 (1) : 小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO (提案システム)

条件 (2) : チップアンテナによる中継がない系 (典型的な MIMO 受信系を想定)

### 5.2 チャンネル容量測定実験の概要

各条件の実験系で送信、受信アンテナを 2 本ずつ用いて実験を行った。なお 2 本の受信アンテナのうち、片方はリニアアクチュエータに乗せて走査した。

まず 4 章のチップアンテナによる中継がない系の結果より本実験で設定した送信アンテナの離隔 (Td) を図 5.1 に示す。

図 5.1 中の (a) は 2 本のアンテナ間が 1 cm で相関が高くなった点である。(b) はアンテナ間が半波長の 6 cm 離れており、相関が約 0.5 となった点である。(c) は相関が 0.1 程度に小さくなった点で、このときアンテナ間は 15 cm である。このとき (a) で、容量のもっとも高くなったアンテナ間が 0 cm の点を選ばなかったのは、実際に 2 本のアンテナをまったく同じ位置に配置するのは不可能だからである。

次に式 (2.15) からチャンネル容量を求めた。それを次式に示す SISO のチャンネル容量との

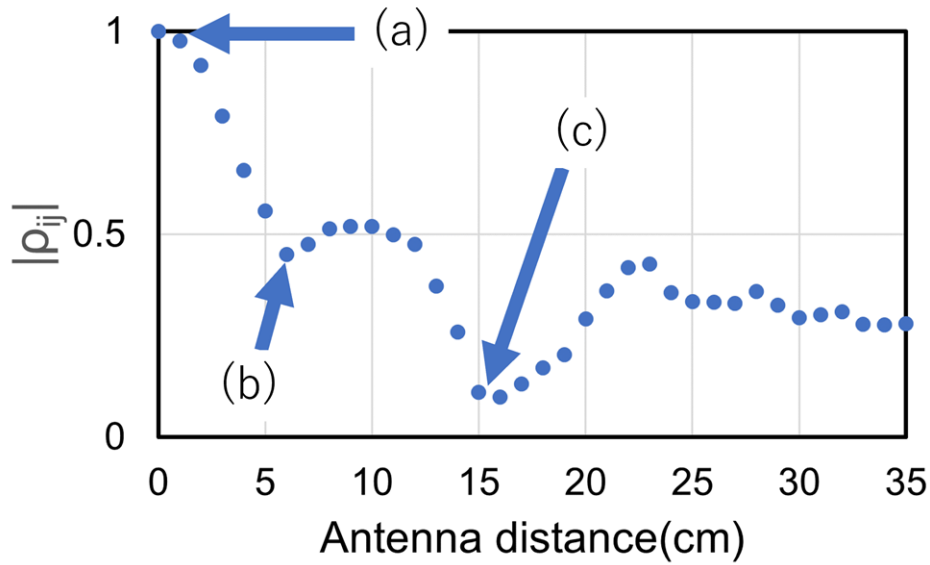


図 5.1: 本実験で用いた送信アンテナの離隔 (Td) の条件

比  $q$  で 2 つの条件の MIMO によるチャネル容量増大の効果を評価した. このとき SISO と MIMO の受信 SNR は同一にした.

$$q = \frac{C_{\text{MIMO}}}{C_{\text{SISO}}} = \frac{\sum_{i=1}^2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{2P_n} \lambda_i \right)}{\log_2(1 + \gamma)} \quad (5.1)$$

### 5.3 チャネル容量測定実験の結果

2 つの条件で伝搬チャネル係数を測定し, 式 (2.15) で求めたチャネル容量の結果を図 5.2~図 5.7 に示す. いずれの図も 2 本の受信アンテナ間距離に対するチャネル容量比を表している.

図 5.2 に条件 2 のチップアンテナによる中継がない系での測定結果を示す. このとき受信 SNR は 10dB であり,  $C_{\text{SISO}} \approx 3.46(\text{bps/Hz})$  である.  $T_d=1 \text{ cm}$  でのチャネル容量比  $q$  は受信アンテナ間距離が 1 cm のとき  $q = 1$  と最小になった. 受信アンテナ間距離が半波長の 6 cm のとき  $q \approx 1.4$  となった. 受信アンテナ間距離が 26 cm のとき  $q \approx 1.56$  と最大になった. また受信アンテナ間距離が最大の 36 cm のとき  $q \approx 1.4$  となった.

$T_d=6 \text{ cm}$  でのチャネル容量比  $q$  は受信アンテナ間距離が 1 cm のとき  $q = 1$  と最小に



なった。受信アンテナ間距離が半波長の 6 cm のとき  $q \approx 1.43$  となった。受信アンテナ間距離が 25 cm のとき  $q \approx 1.8$  と最大になった。また受信アンテナ間距離が最大の 36 cm のとき  $q \approx 1.58$  となった。

$T_d=15$  cm でのチャンネル容量比  $q$  は受信アンテナ間距離が 1 cm のとき  $q = 1.02$  と最小になった。受信アンテナ間距離が半波長の 6 cm のとき  $q \approx 1.6$  となった。受信アンテナ間距離が 16 cm と 31 cm のとき  $q = 2$  と最大になった。また受信アンテナ間距離が最大の 36 cm のとき  $q \approx 1.78$  となった。

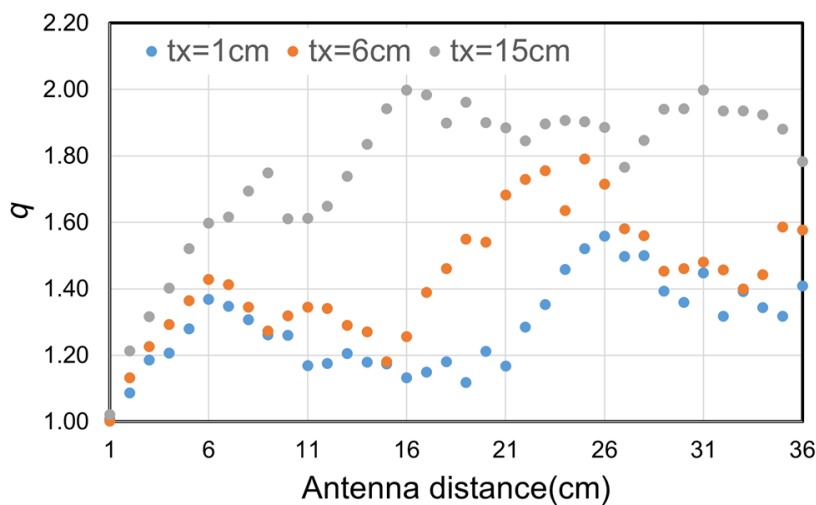


図 5.2: 条件 2: チップアンテナによる中継がない系のチャンネル容量の測定結果  
(受信 SNR= 10dB)

以上より同じ受信 SNR で送信アンテナの離隔を変化させたとき、MIMO によるチャンネル容量増大の効果は図 5.1 で相関が低く  $|\rho_{ij}| \approx 0.1$  となった  $T_d=15$  cm のとき大きく現れた。とくに受信アンテナ間距離が 16 cm と 31 cm のとき MIMO のチャンネル容量は SISO のチャンネル容量の 2 倍になった。またいずれの場合でも約 6 点ほどの周期でチャンネル容量比が変化した。

受信 SNR を変化させ 10dB のときと同様にチャンネルを求めた結果を図 5.3, 図 5.4 に示す。図 5.3 では受信 SNR を 13dB, 図 5.4 では受信 SNR を 20dB とした。このときの  $C_{\text{SISO}}$  は, 4.39(bps/Hz), 6.67(bps/Hz) である。いずれの受信 SNR においても  $T_d=1$  cm のときはチャンネル容量比が最大で  $q \approx 1.6$  になり  $T_d=6$  cm のときはチャンネル容量比が最大で  $q \approx 1.8$  になり  $T_d=15$  cm のときはチャンネル容量比が最大で  $q = 2$  となった。また他の点において受信 SNR を変化させても、受信 SNR が 10dB のときと同様の変化が見ら

れた。さらに、10dB と 20dB の時を比較すると、いずれの送信アンテナの離隔においてもチャネル容量比  $q$  が、10dB のときより 20dB の方が大きくなった。

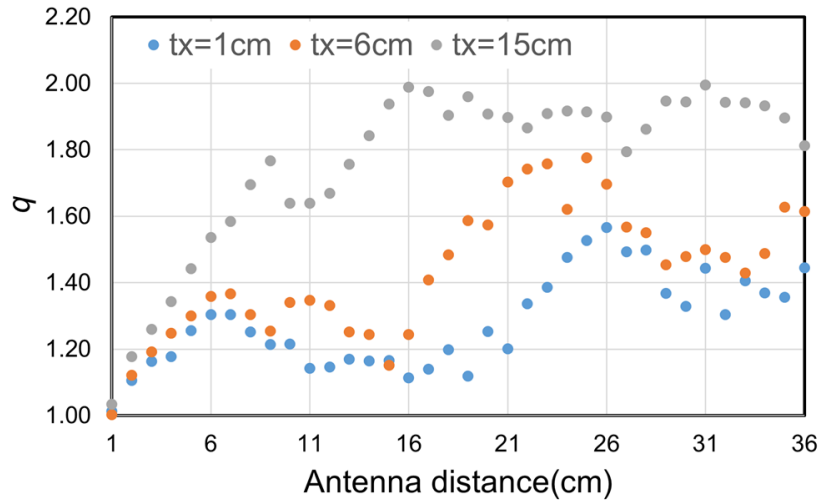


図 5.3: 条件 2: チップアンテナによる中継がない系のチャネル容量の測定結果  
(受信 SNR= 13dB)

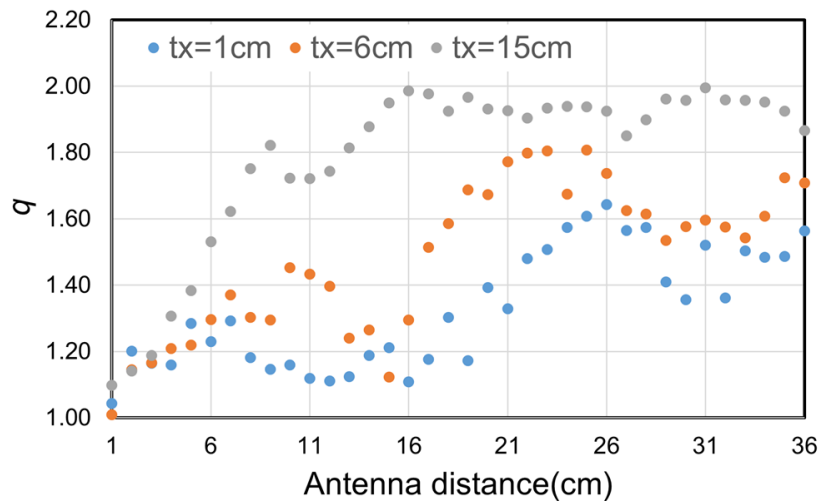


図 5.4: 条件 2: チップアンテナによる中継がない系のチャネル容量の測定結果  
(受信 SNR= 20dB)

図 5.5 に条件 1 の小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO での測定結果を示す。このと

き受信 SNR は 10dB であり,  $C_{\text{SISO}} \approx 3.46(\text{bps/Hz})$  である.

$T_d=1\text{ cm}$  でのチャンネル容量  $q$  は受信アンテナ間距離が 1 cm のとき  $q \approx 1.18$  となった. 受信アンテナ間距離が半波長の 6 cm のとき  $q \approx 1.65$  と最大になった. 受信アンテナ間距離が 22 cm のとき  $q \approx 1.1$  と最小になった. また受信アンテナ間距離が最大の 36 cm のとき  $q \approx 1.18$  となった.

$T_d=6\text{ cm}$  でのチャンネル容量比  $q$  は受信アンテナ間距離が 1 cm のとき  $q = 1$  と最小になった. 受信アンテナ間距離が半波長の 6 cm のとき  $q \approx 1.5$  となった. 受信アンテナ間距離が 35 cm のとき  $q \approx 2$  と最大になった. また受信アンテナ間距離が最大の 36 cm のとき  $q \approx 1.85$  となった.

$T_d=15\text{ cm}$  でのチャンネル容量比  $q$  は受信アンテナ間距離が 1 cm のとき  $q = 1.2$  と最小になった. 受信アンテナ間距離が半波長の 6 cm のとき  $q \approx 1.9$  となった. 受信アンテナ間距離が 7 cm のとき  $q \approx 1.95$  と最大になった. 受信アンテナ間距離が 11 cm~27 cm にかけて  $q \approx 1.75 \sim q \approx 1.85$  のあたりを示していた. 受信アンテナ間距離が 28 cm から急激にチャンネル容量比  $q$  が小さくなり最大の 36 cm のとき  $q \approx 1.6$  となった.

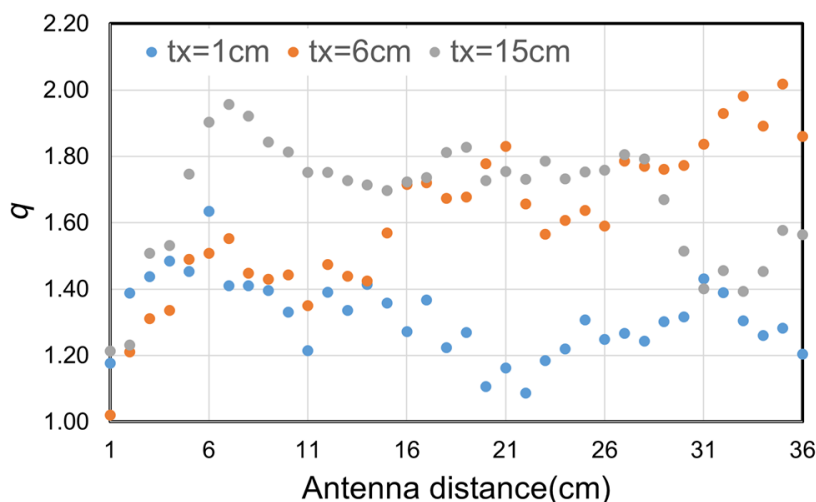


図 5.5: 条件 1: 小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO のチャンネル容量の測定結果 (受信 SNR= 10dB)

以上より同じ受信 SNR で送信アンテナの離隔を変化させたとき, MIMO によるチャンネル容量増大の効果は  $T_d$  が半波長の 6 cm のとき大きく現れた. とくに受信アンテナ間距離が 35 cm のとき MIMO のチャンネル容量は SISO のチャンネル容量の 2 倍になった. またいずれの場合でも条件 2 のチップアンテナによる中継がない系と同様に約 6 点ほどの周

期でチャネル容量比が変化した。

受信 SNR を変化させ同様に チャネルを求めた結果を図 5.6, 図 5.7 に示す. 条件 2 のときと同様に図 5.6 では受信 SNR を 13dB, 図 5.7 では受信 SNR を 20dB とした. このときの  $C_{\text{SISO}}$  は, 4.39(bps/Hz), 6.67(bps/Hz) である. いずれの受信 SNR においても  $T_d=1\text{ cm}$  のときはチャネル容量比が最大で  $q \approx 1.7$  程度になり  $T_d=6\text{ cm}$  のときはチャネル容量比が最大で  $k \approx 2$  になり  $T_d=15\text{ cm}$  のときはチャネル容量比が最大で  $q \approx 1.9$  となった. また他の点において受信 SNR を変化させても, 受信 SNR が 10dB のときと同様の変化が見られた.

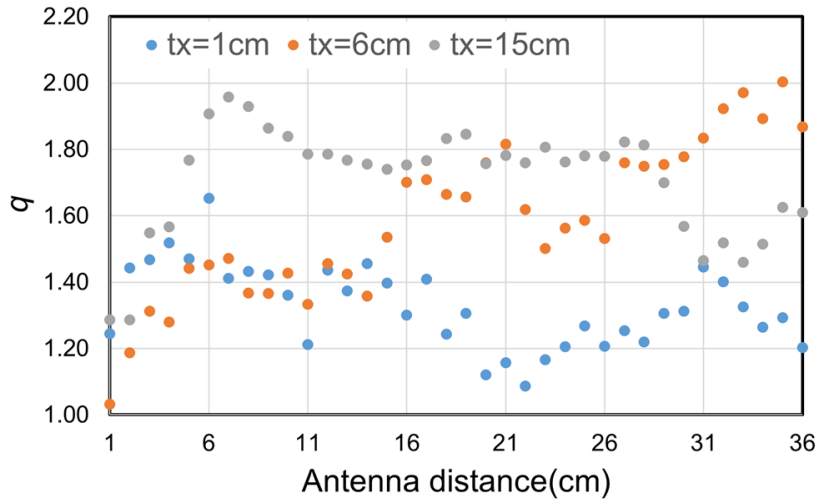


図 5.6: 条件 1: 小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO のチャネル容量の測定結果 (受信 SNR= 13dB)

以上の 2 つの条件での結果から条件 2 のチップアンテナによる中継がない系は図 5.1 より相関の大きさが小さくなるほどチャネル容量比が大きくなり,  $T_d=15\text{ cm}$  のときに最大となった. しかし条件 1 の小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO は,  $T_d=15\text{ cm}$  のときチャネル容量比は平均的に大きかったが, 最大となったのは  $T_d=6\text{ cm}$  のときである. また条件 2 のチップアンテナによる中継がない系ではいずれの送信アンテナ離隔においてもチャネル容量比  $q$  が最小となったのは受信アンテナ距離が  $1\text{ cm}$  のときであったが, 条件 1 の小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO では, チャネル容量比  $q$  が最小になったのは,  $T_d=6\text{ cm}, 15\text{ cm}$  のときは受信アンテナ距離が  $1\text{ cm}$  のときであったが,  $T_d=1\text{ cm}$  では受信アンテナ距離が  $22\text{ cm}$  のときとなった. なお条件 (1), 条件 (2) のいずれの受信 SNR でも  $2 \times 2$  MIMO のチャネル容量は最小で SISO とほとんど等しくなり, 最大で SISO の 2

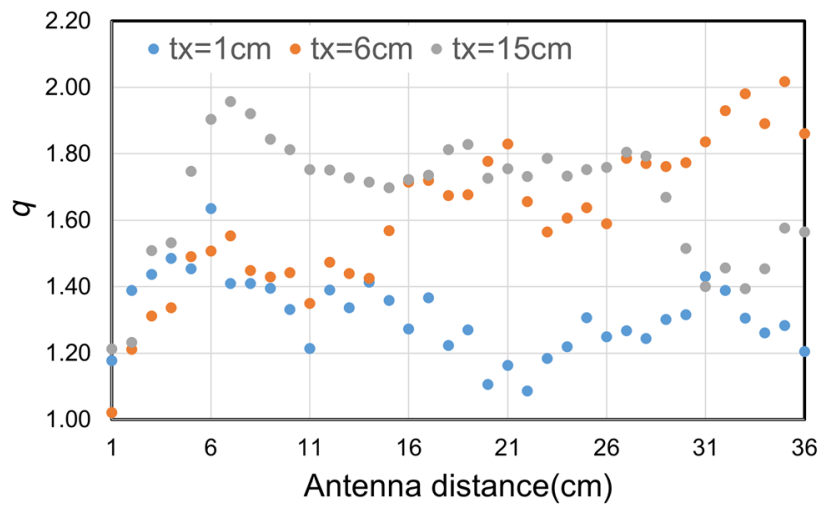


図 5.7: 条件 1: 小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO のチャンネル容量の測定結果 (受信 SNR= 20dB)

倍となった。

## 5.4 考察

チャンネル容量比の変化が条件 (2) のチップアンテナによる中継がない系ではいずれの受信 SNR でも送信アンテナ離隔 (Td) に対して, Td=1 cm では  $q = 1.6$  程度が最大になり, Td=6 cm, 15 cm では多少上下はしながら最大の  $q = 2$  になっているのに対して, 条件 (1) の小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO では, Td=6 cm, 15 cm のときチャンネル容量比の変化が不規則なのは, 図 3.6 近接接合部のチップアンテナが, 近接接合部での通信の他に外部からの電波を受信したからと考えられる。

## 第6章

### まとめ

本論文では、提案システムを模した小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO と典型的な MIMO の受信系をチャンネル相関、チャンネル容量の評価手法から性能を比較した。チャンネル相関の比較から小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO は典型的な MIMO の受信系と同様に 2 本のアンテナが受信した信号の相関は低くなることが確認できた。またチャンネル容量の比較から近接接合部でマルチパスの影響が見られたが、小型デバイスに組み込む  $2 \times 2$  MIMO は典型的な MIMO の受信系と同様に送信アンテナの離隔が半波長以上のとき受信アンテナの間隔を確保することで MIMO によるチャンネル容量増大の効果が得られることを確認できた。したがって図 3.1 に示す小型デバイスと組み合わせることで MIMO による通信を可能とする提案システムの有効性が示唆された。

本研究の成果から、提案システムを小型デバイスに組み込んで実際にウェアラブルシステムとして実装できることが期待できる。

# 謝辞

本論文の作成にあたり，研究を進めていく中で実験や解析に適切な助言と厳しくも丁寧で的確な指導をしてくださった野田准教授に心より感謝いたします。また同研究室のメンバーには常に精神的にとっても支えられました。ありがとうございます。最後に，私を支えていただいたすべての方々へ，この場をお借りしまして感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] – MIMO技術-アドバイザーリーボード委員 平成29年度特許出願技術動向調査, 「平成29年度 標準技術集 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 関連技術」, Accessed on December 20, 2023, URL:[https://www.jpo.go.jp/resources/report/sonota/document/hyoujun\\_gijutsu/h29\\_mimo.pdf](https://www.jpo.go.jp/resources/report/sonota/document/hyoujun_gijutsu/h29_mimo.pdf), 2017.
- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, “On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas,” *Wireless personal communications*, vol. 6, pp. 311–335, 1998.
- [3] 西森健太郎, 平栗健史, 『超進化 802.11 高速無線 LAN 教科書 MIMO から Massive MIMO を用いた伝送技術とクロスレイヤ評価手法』. 東京: コロナ社, Nov. 2017.
- [4] 唐沢好男, 『デジタル移動通信の電波伝搬基礎』. 東京: コロナ社, Mar. 2016.
- [5] H. Ozcelik, M. Herdin, H. Hofstetter, and E. Bonek, “Capacity of different mimo systems based on indoor measurements at 5.2 GHz,” pp. 463–466, 2003. DOI: [10.1049/cp:20030298](https://doi.org/10.1049/cp:20030298).
- [6] 西本浩, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武雄, “屋内伝搬実験に基づく 2x2 mimo-sdm の特性評価,” 『電子情報通信学会 (B)』, vol. J87-B, no. 9, pp. 1442–1453, 2004.
- [7] 人工知能研究センター, 「AIST 人体寸法データベース 1991-92」, Accessed on December 8, 2023, URL:<https://www.soumu.go.jp/soutsu/hokuriku/resarch/tm/hokokusho.html>, 2002.