

[招待講演]

分散アンテナネットワークにおける多重波電波伝搬 を用いた高精度デバイスフリー測位法の開発

○金 ミンソク、騰 格斯、西 圭太
(新潟大学)



本研究の一部は、総務省電波利用拡大のための研究開発(JPJ000254)によって実施した成果を含みます

■ 受託研究費

- KDDI 財団の研究助成 (2019-2022)
- 総務省 SCOPE「ミリ波無線通信を用いたデバイスフリー人動線可視化技術の研究開発」(#195004002)(2019)
- JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 “障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発” (JPJA22P22683407) (2022-2024)
- 総務省 電波利用拡大のための研究開発 “ミリ波・サブテラヘルツ波を用いた近距離超高速無線ネットワーク構成技術” (JPMI240410003) (2024-2027)

■ 代表的な成果

- Togo Ikegami, Minseok Kim, Yuto Miyake, Hibiki Tsukada, “Multipath RTI: Millimeter-Wave Radio Based Device-Free Localization,” **IEEE Access**, Vol. 12, pp. 42042-42054, 2024
- Minseok Kim, Gesi Teng, Nishi Keita, Togo Ikegami, Masamune Sato, “Device-Free Localization Using Multi-Link MIMO Channels in Distributed Antenna Networks,” **IEEE J. Sel. Top. Electromagn. Antennas Propag. (JSTEAP)**, ISAC special issue (early access)

■ スマートホーム・スマートビルディング

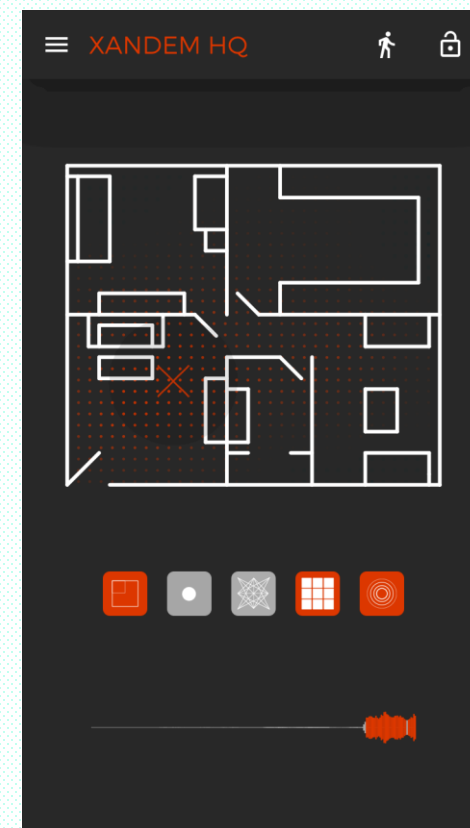
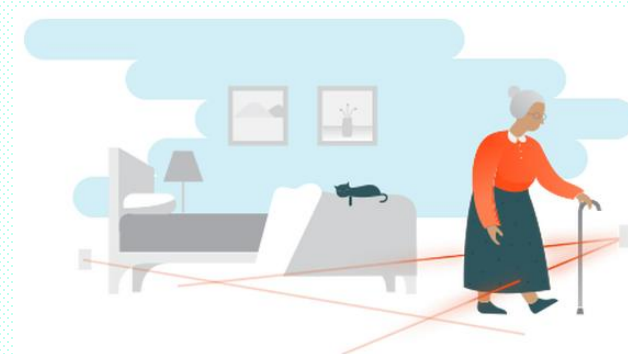
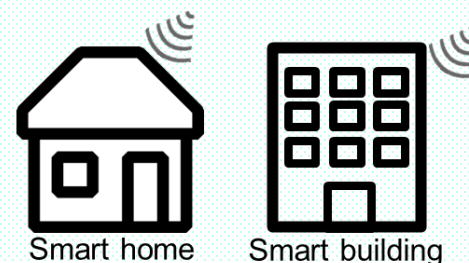
- 第5世代移動通信の登場・IoT技術の発展
- より快適な住居環境の提供
- 安全・安心な業務環境を支援

■ 人の位置情報のデータ化

- 居場所
- 動線(移動経路)

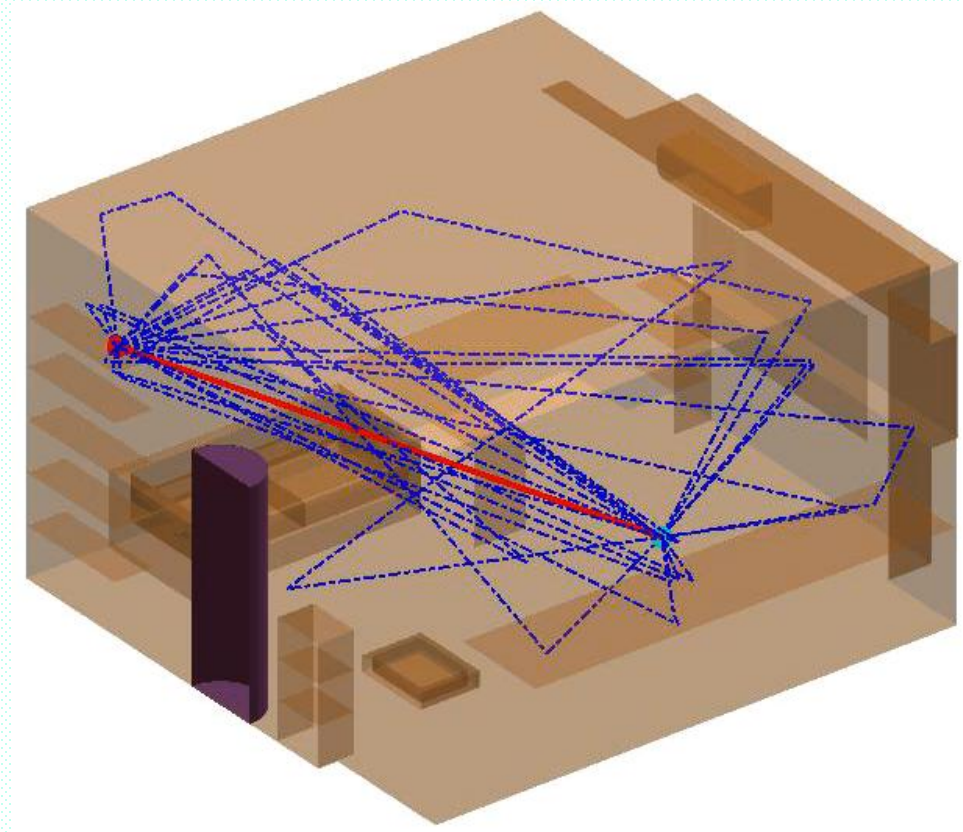
■ デバイスフリー測位法

- 監視カメラ・映像を用いる手法
 - 照明の影響・適用エリアの制限
 - プライバシー侵害
- 電波を用いる手法
 - 電波トモグラフィイメージング(Radio Tomographic Imaging: RTI)法



- 多重経路伝搬をいかに制御し活用するか

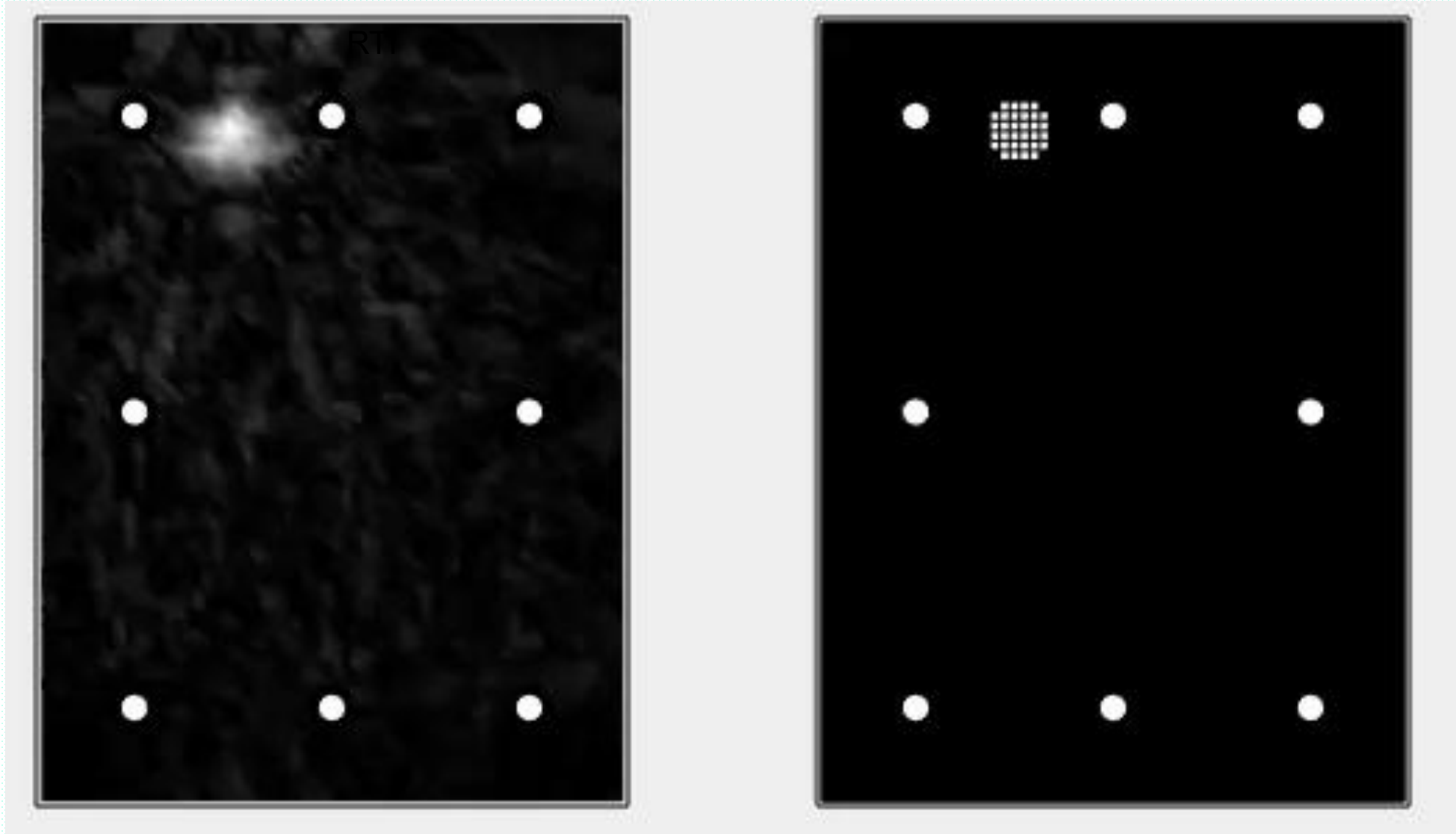
多重波伝搬を用いた侵入者検知 [1]



このようなことができる

5

8 anchor nodes



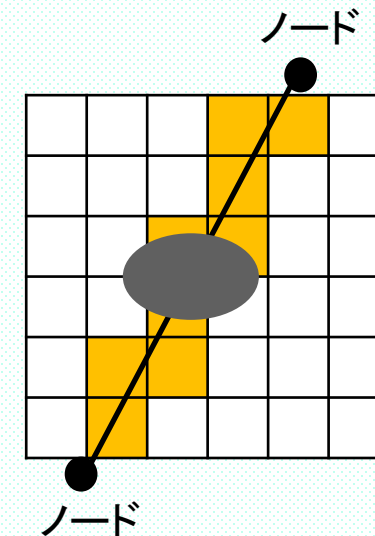
■ トモグラフィーイメージング法

- 対象エリアを取り囲む形で走査線を配置し、内部の物性の分布を調べる逆解析技術
- 物理探査や医療診断(CT)等で用いられている

■ 電波トモグラフィーイメージング(Radio Tomographic Imaging: RTI)法

- 対象エリアを画素(voxel)として表し,
「ノード間RSS=見通し経路上の画素値の重み付き和」と仮定し,
画素値を観測したRSS値から逆に推定
- 人体遮蔽によりRSSの変化が生じた場合にその位置が同定できる

見通し波(LOS)線の遮蔽による
RSS変化を用いる



RSS: Received Signal Strength

■ RSSと画素値([dB])の変換関係

$$y = Wx + n$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L1} & \cdots & w_{LM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_L \end{bmatrix}$$

RSSベクトル (Lx1)
重み行列 (LxM)
画素ベクトル (Mx1)
ノイズベクトル

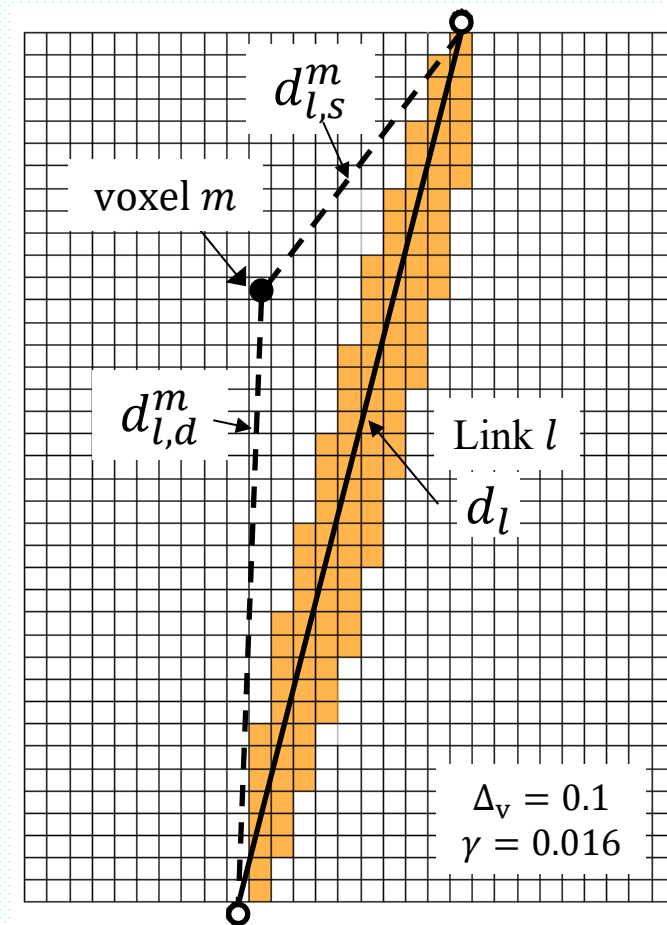
■ 重み行列, W

$$w_{lm} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,d}^m + d_{l,s}^m < d_l + \gamma \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

■ 画素ベクトルの変化量 Δx を求める

$$y(t_2) - y(t_1) = \Delta y = W\Delta x + \Delta n \rightarrow \widehat{\Delta x}$$

未知数の数が方程式の数より多い
 $\Rightarrow$ 不定悪条件(ill-posed) 線形方程式の逆問題の解



■ : 重みづけされた画素
 d : ノード間の距離
 $d_{l,s}^m, d_{l,d}^m$: x_l とノードの距離

- RSSと画素値([dB])の変換関係

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$

$$\begin{array}{c} \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix} \\ \text{RSSベクトル} \\ \text{(Lx1)} \end{array} = \begin{array}{c} \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L1} & \cdots & w_{LM} \end{bmatrix} \\ \text{重み行列} \\ \text{(LxM)} \end{array} \begin{array}{c} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} \\ \text{画素ベクトル} \\ \text{(Mx1)} \end{array} + \begin{array}{c} \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_L \end{bmatrix} \\ \text{ノイズベクトル} \end{array}$$

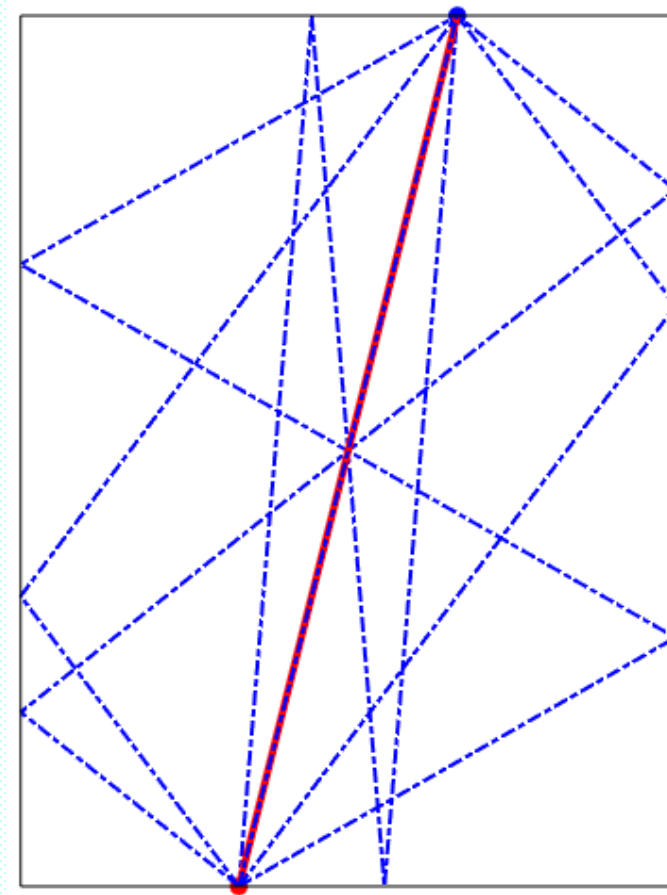
- 重み行列, $\mathbf{W}$

$$w_{lm} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,d}^m + d_{l,s}^m < d_l + \gamma \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 画素ベクトルの変化量 $\widehat{\Delta\mathbf{x}}$ を求める

$$\mathbf{y}(t_2) - \mathbf{y}(t_1) = \Delta\mathbf{y} = \mathbf{W}\Delta\mathbf{x} + \Delta\mathbf{n} \rightarrow \widehat{\Delta\mathbf{x}}$$

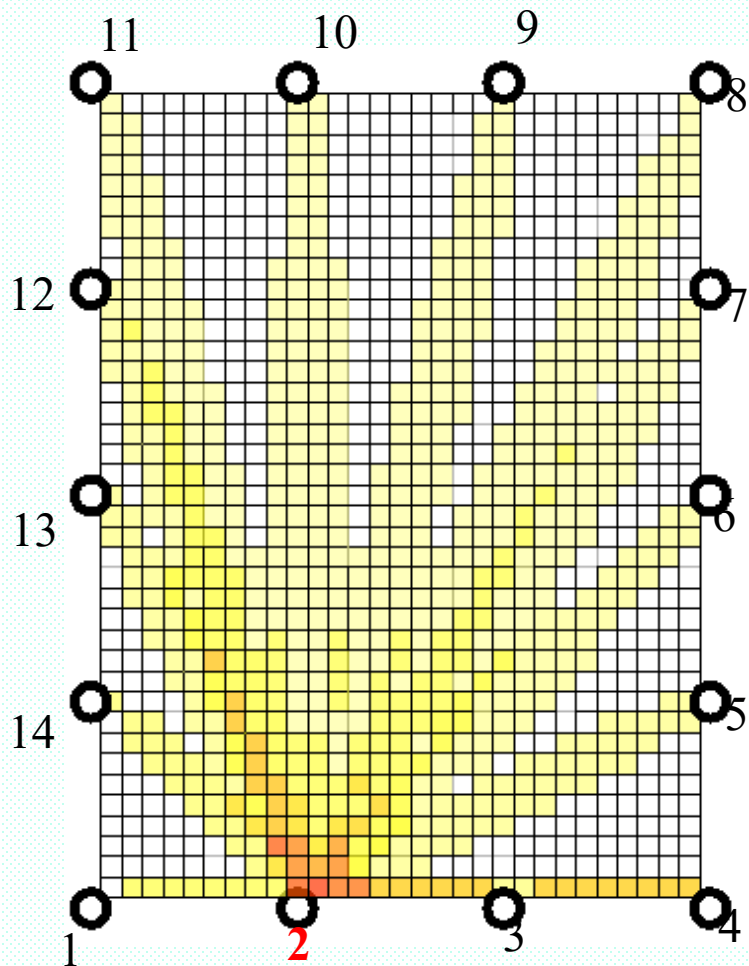
未知数の数が方程式の数より多い
⇒不定悪条件(ill-posed) 線形方程式の逆問題の解



画素の重み付け

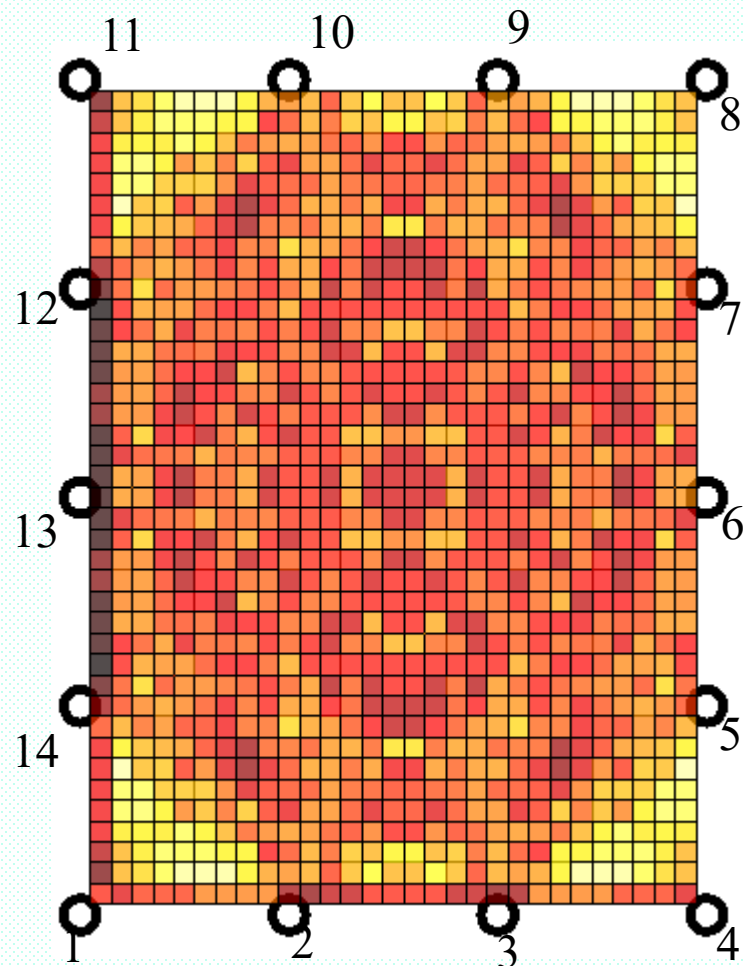
■ RSS-RTI法(ノード数:14個)

片方のノードを2番に固定



$$w_{lm} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,d}^m + d_{l,s}^m < d_l + \gamma \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

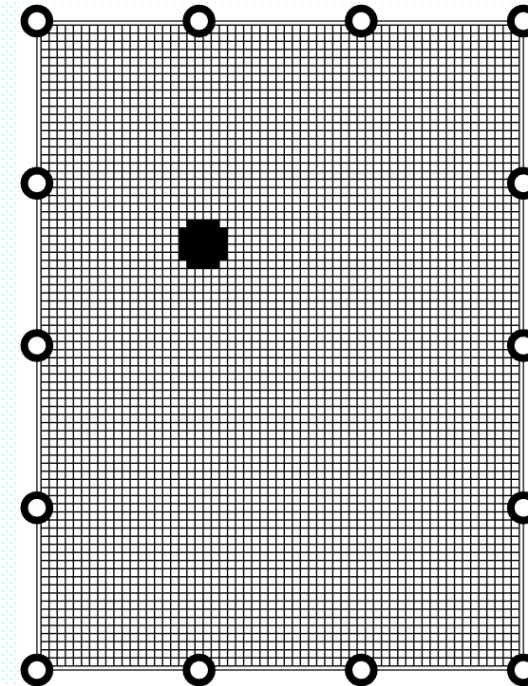
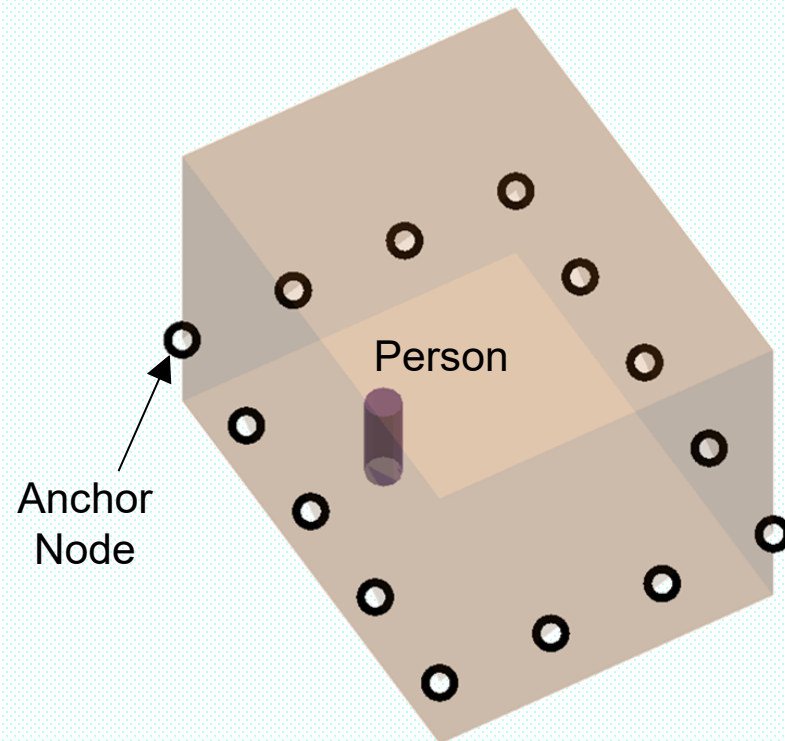
すべてのリンク



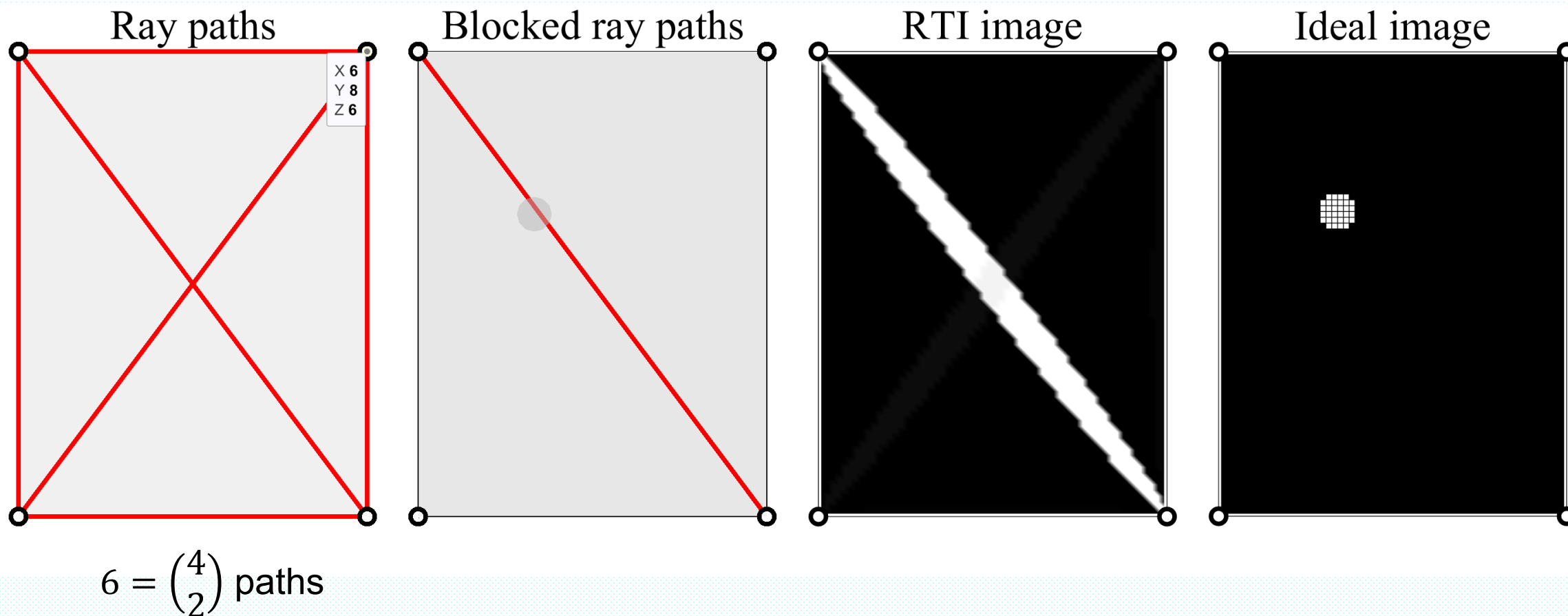
■ Simulation setup

- Direct path
- Reflection
(up to double-bounce)

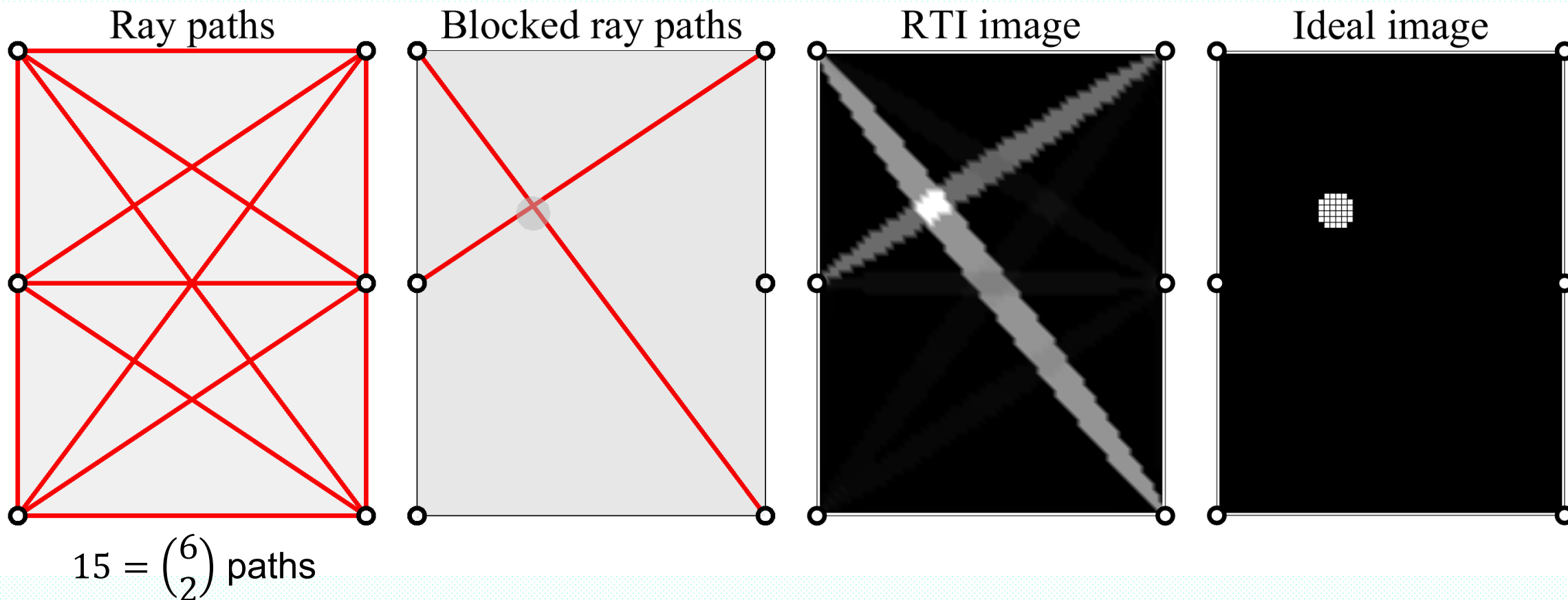
Model	$6 [m] \times 8 [m] \times 3 [m]$
Person	H:1.7 m, Radius: 0.3 m
Voxel size	$\Delta_v = 0.1 [m]$
No. voxels	4800 (10 cm interval 60×80)
Margin	$\gamma = 0.016 [m]$



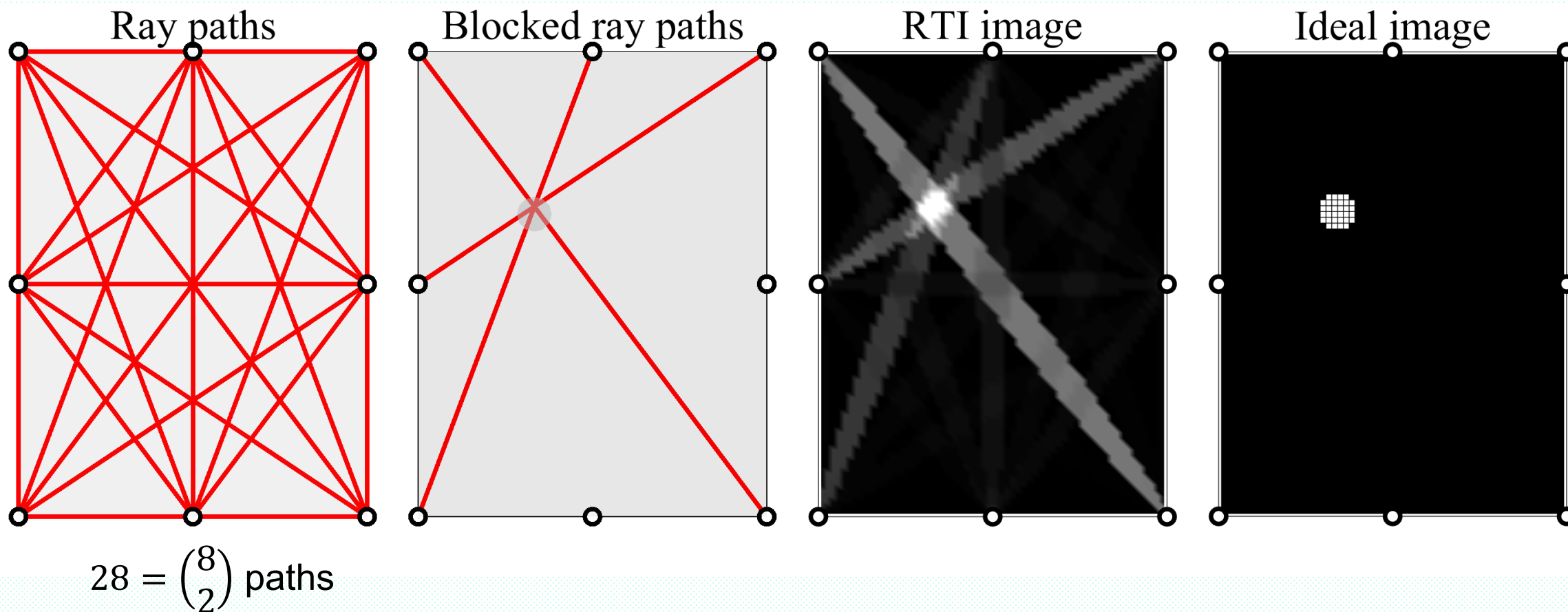
- 4 Anchors, 1 Person (direct path is only considered)



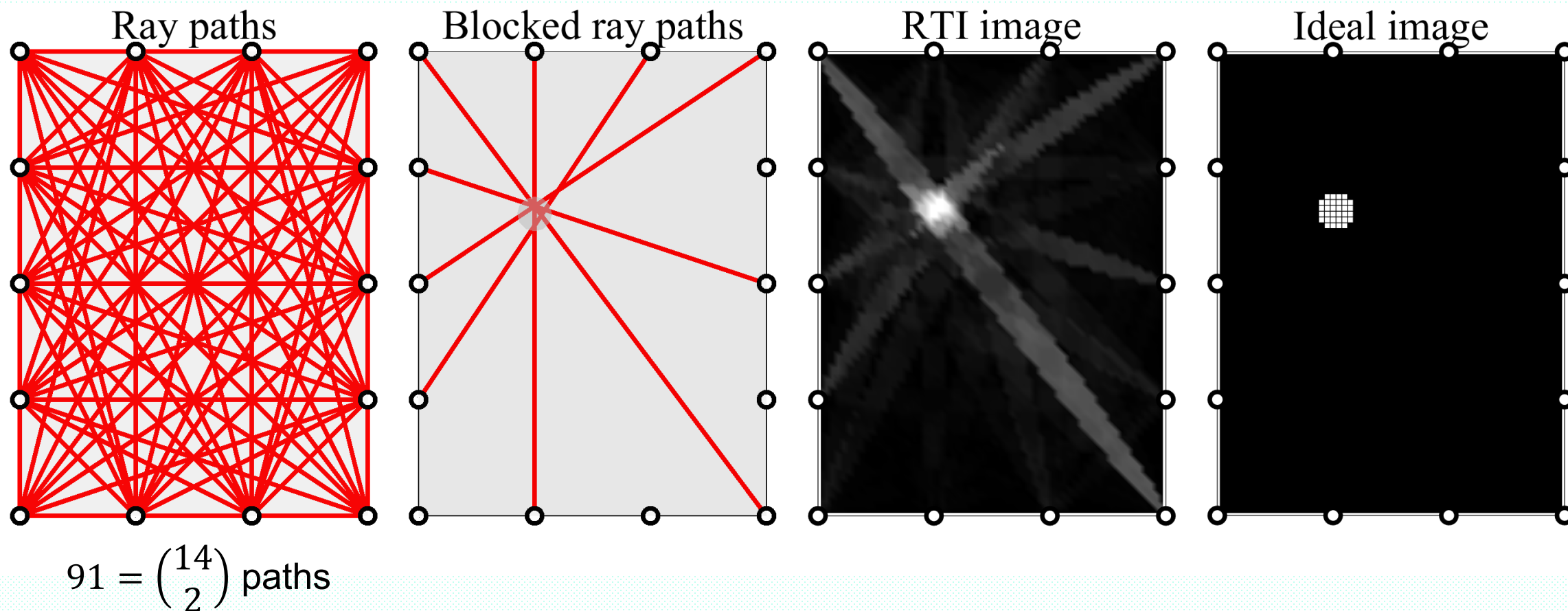
- 6 Anchors, 1 Person (direct path is only considered)

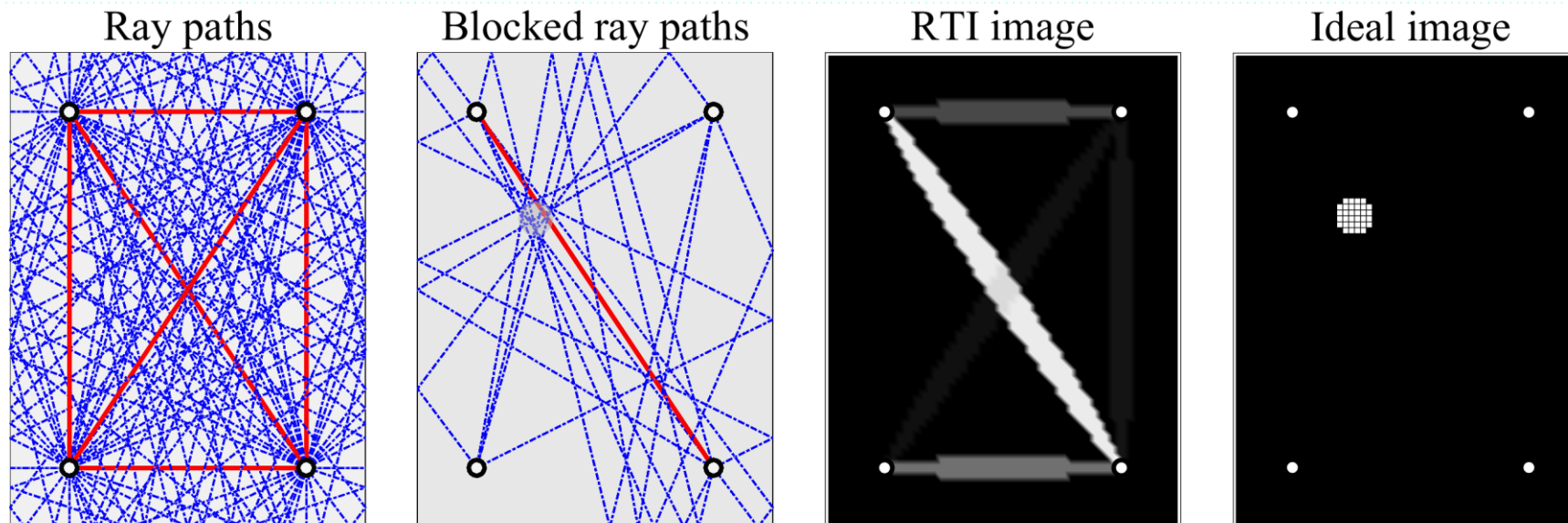
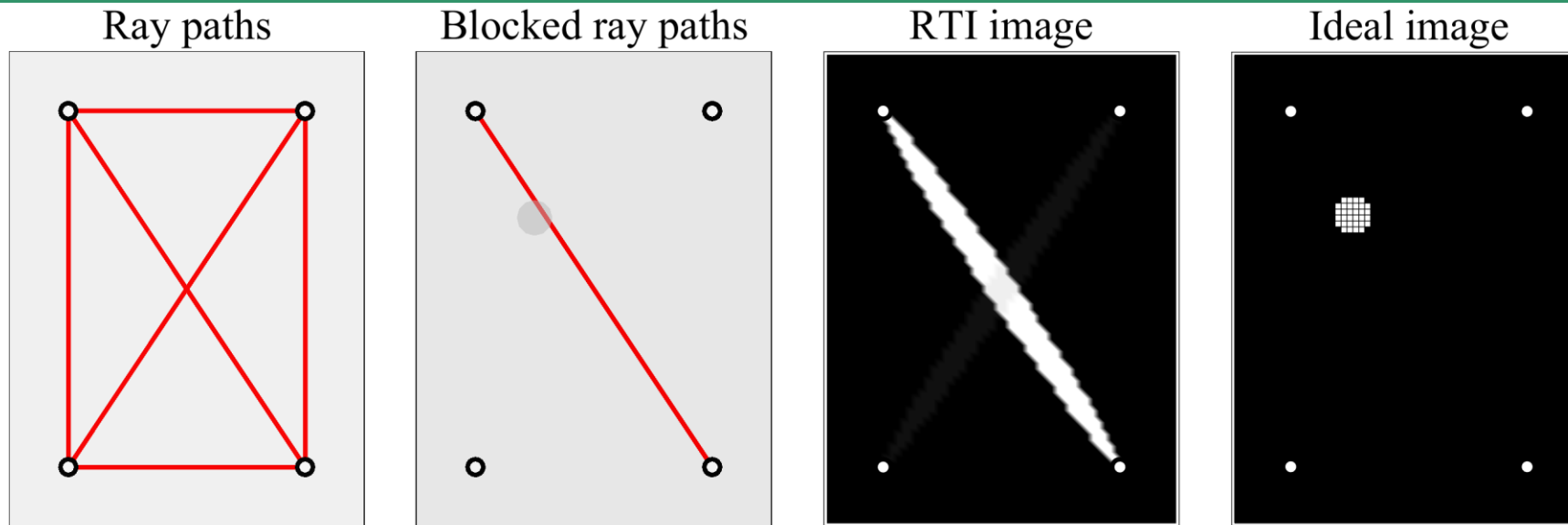


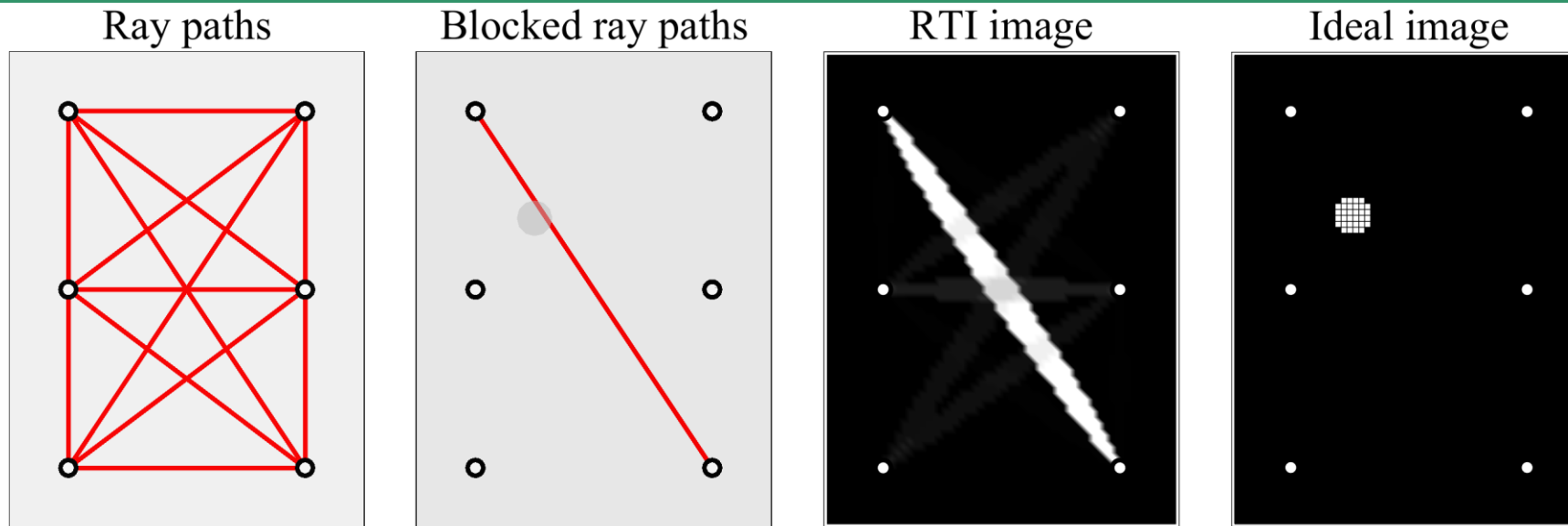
- 8 Anchors, 1 Person (direct path is only considered)



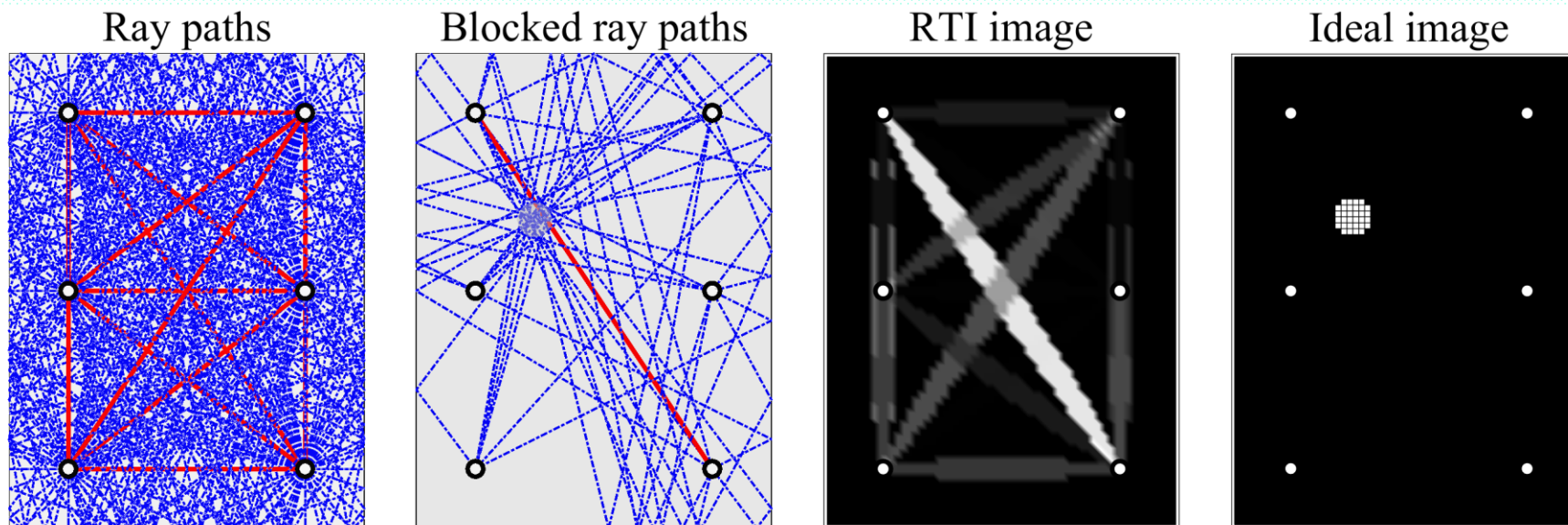
- 14 Anchors, 1 Person (direct path is only considered)

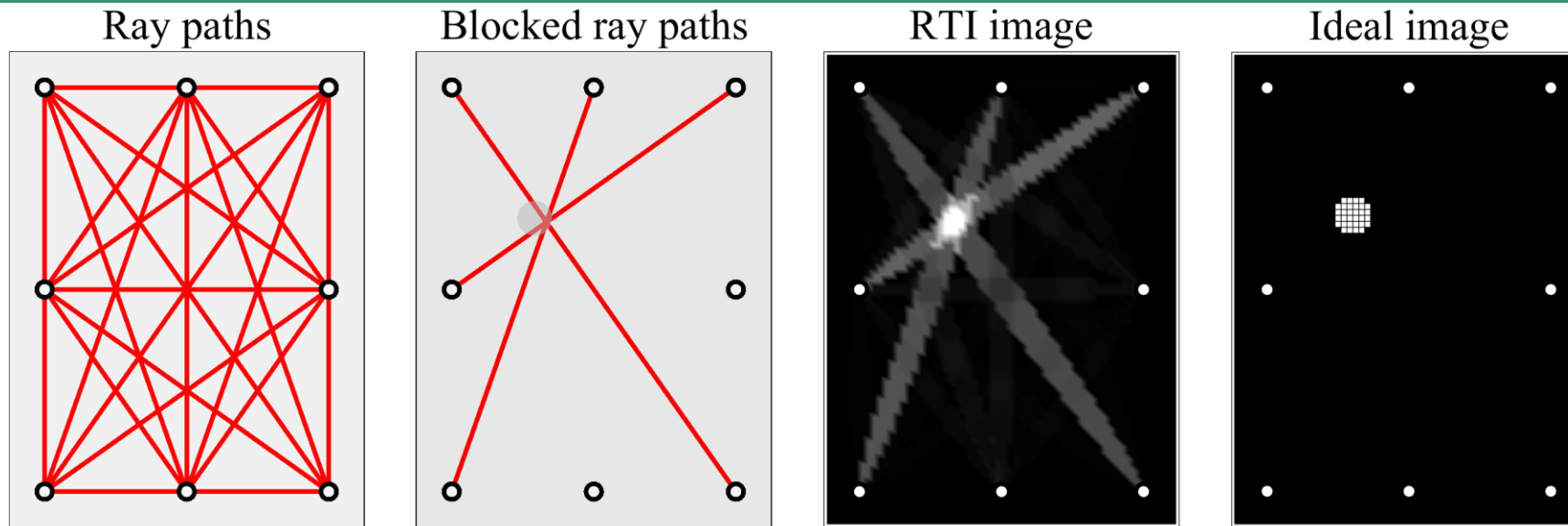
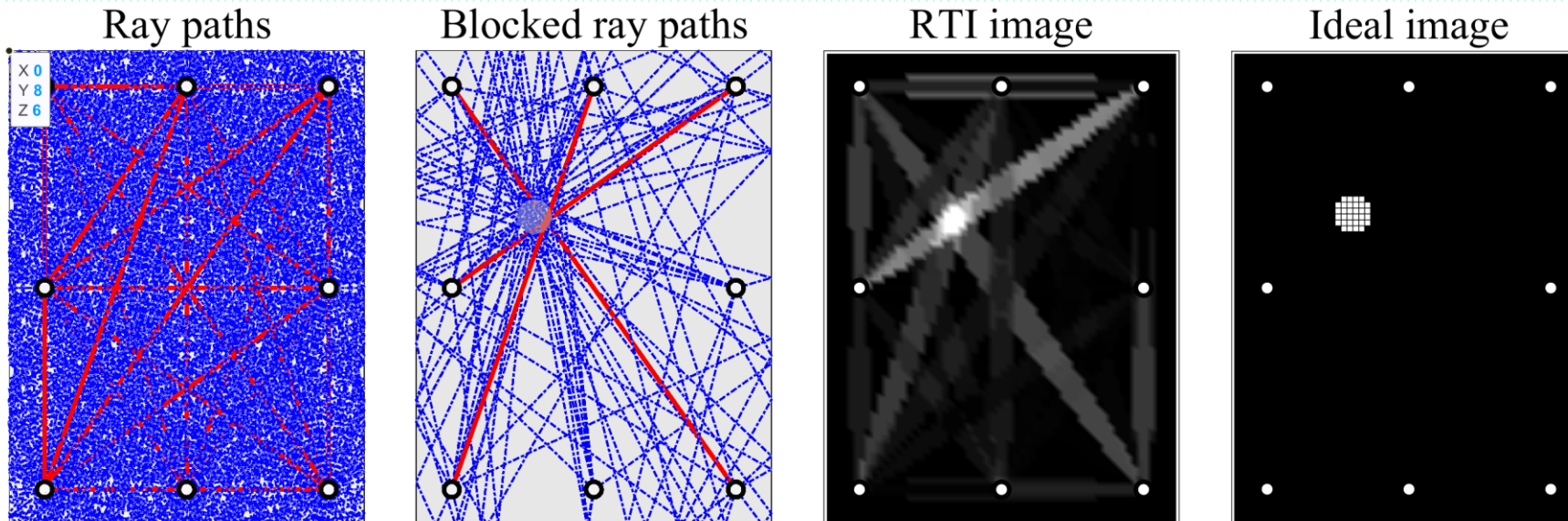




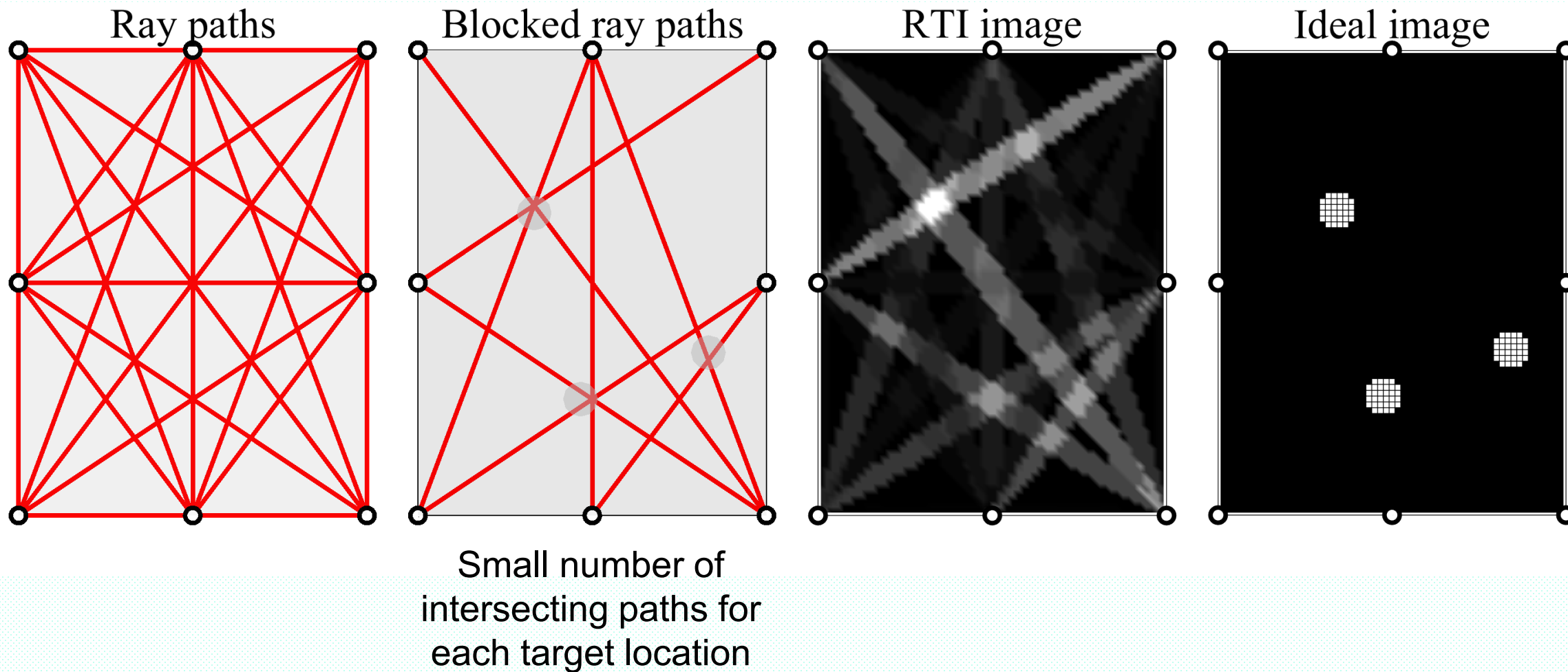


6 Anchors, 1 Persons, Multi-paths (2nd order)

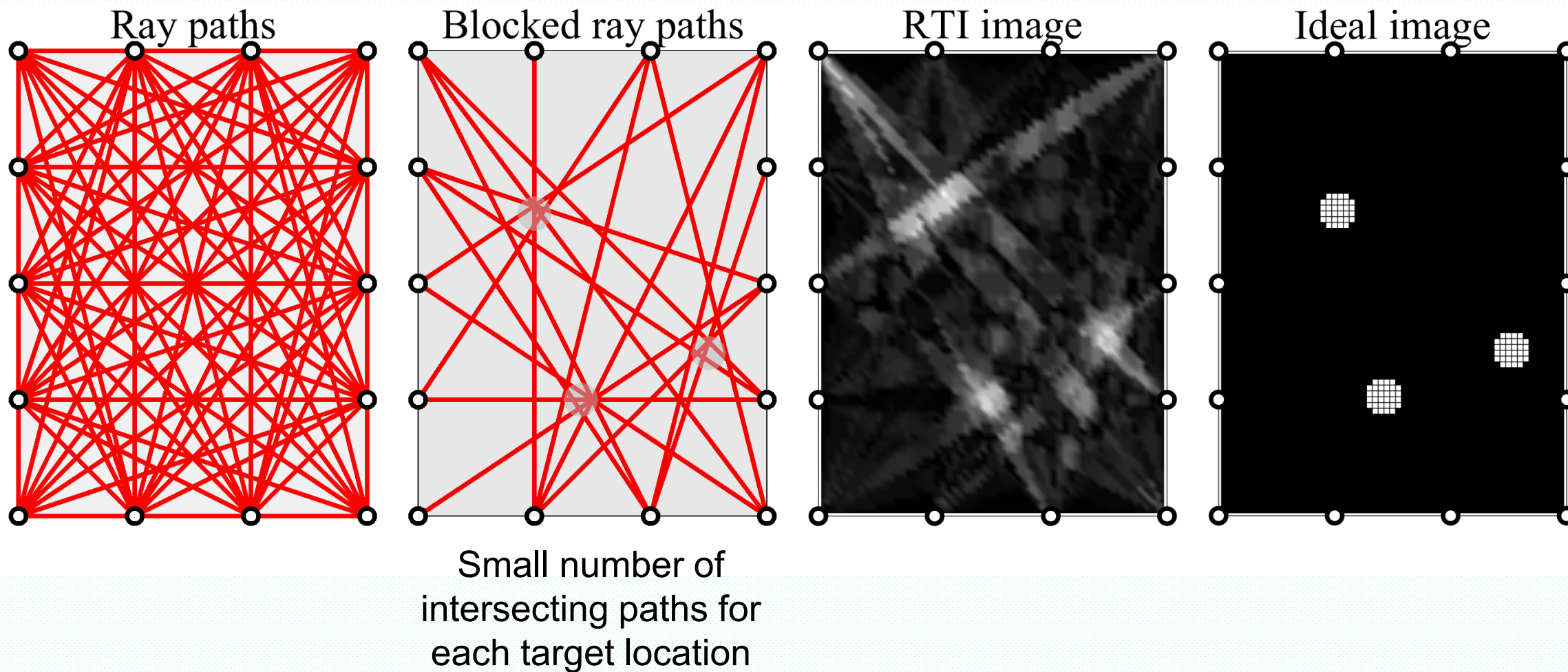


8 Anchors, 1 Persons, Multi-paths (2nd order)

- 8 Anchors, 3 Persons



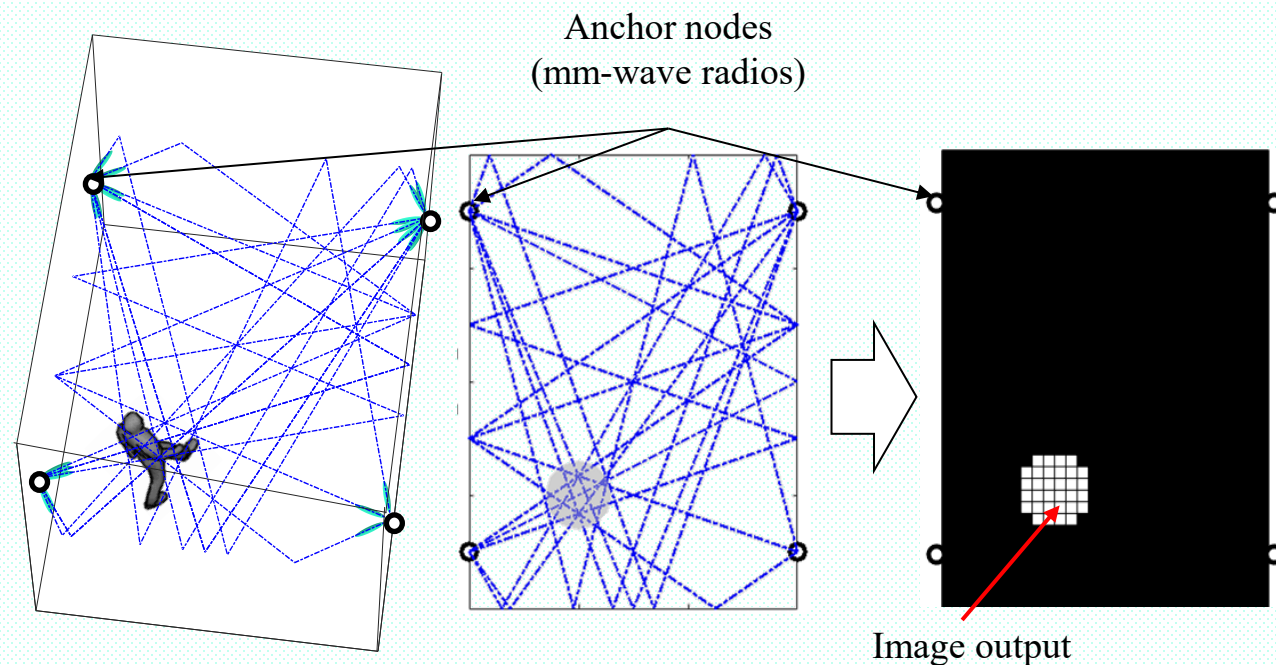
- 14 Anchors, 3 Persons



- 狭帯域無線: ZigBee@2.4 GHzなど
- 直接経路のRSS変化に注目 (RSS-RTI) [*]
- 多重波伝搬により性能が劣化
- 多くのノードが必要
 - 多重波の影響低減
 - マルチターゲット: 性能劣化が顕著

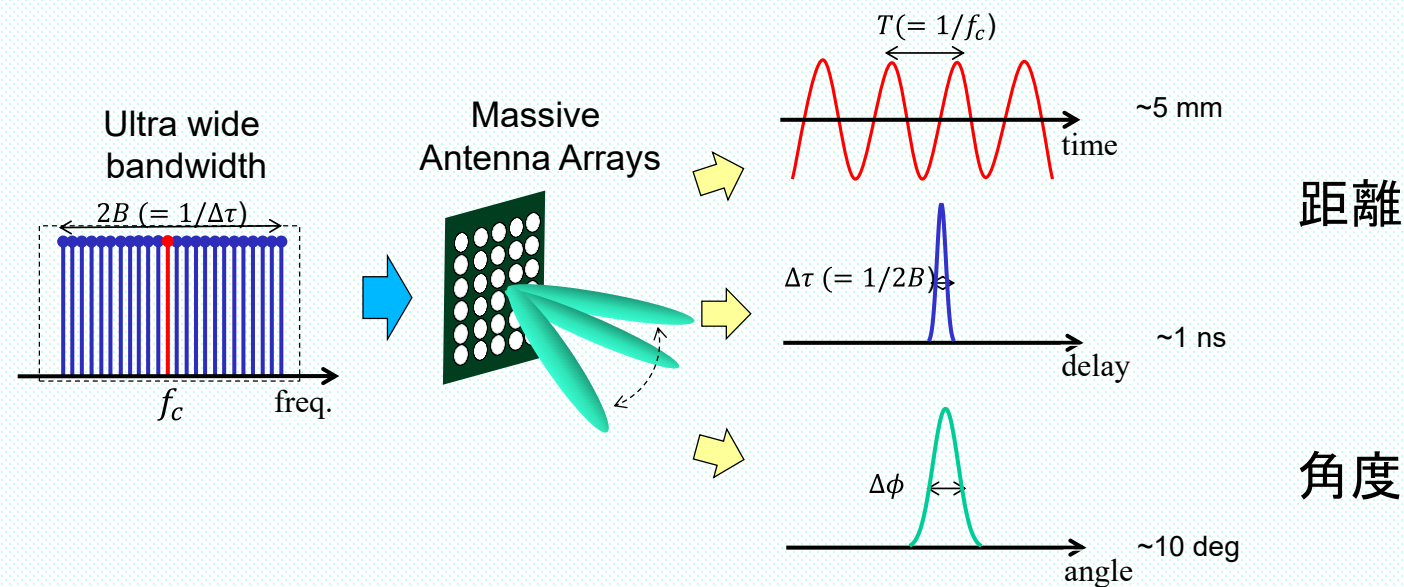
[*] J. Wilson, N. Patwari, “Radio Tomographic Imaging with Wireless Networks,”
IEEE Trans. Mobile Computing, Vol. 9, No. 5, pp. 621-632, May 2010.

- 広帯域無線: WiGig@60 GHzなど
- 個別多重波(反射)経路の RSS 変化に注目 [*]
- 反射経路を仮想ノードとしてノード数の増大効果
- 多重波の影響を受けず逆に活用する



[*] Togo Ikegami, Minseok Kim, Yuto Miyake, Hibiki Tsukada, "Multipath RTI: Millimeter-Wave Radio Based Device-Free Localization," IEEE Access, Vol. 12, pp. 42042-42054, 2024

- 超高速無線LAN (IEEE802.11ad/ay: WiGig)
 - 高周波数帯: 60 GHz帯 特定小電力
 - 広帯域幅: ~ 7 GHz
 - 高い角度分解能: 超多素子アレーによるビームフォーミング
- 距離・遅延時間・角度領域で高い分解能 $\rightarrow$ 高精度センシング・測位が実現可能



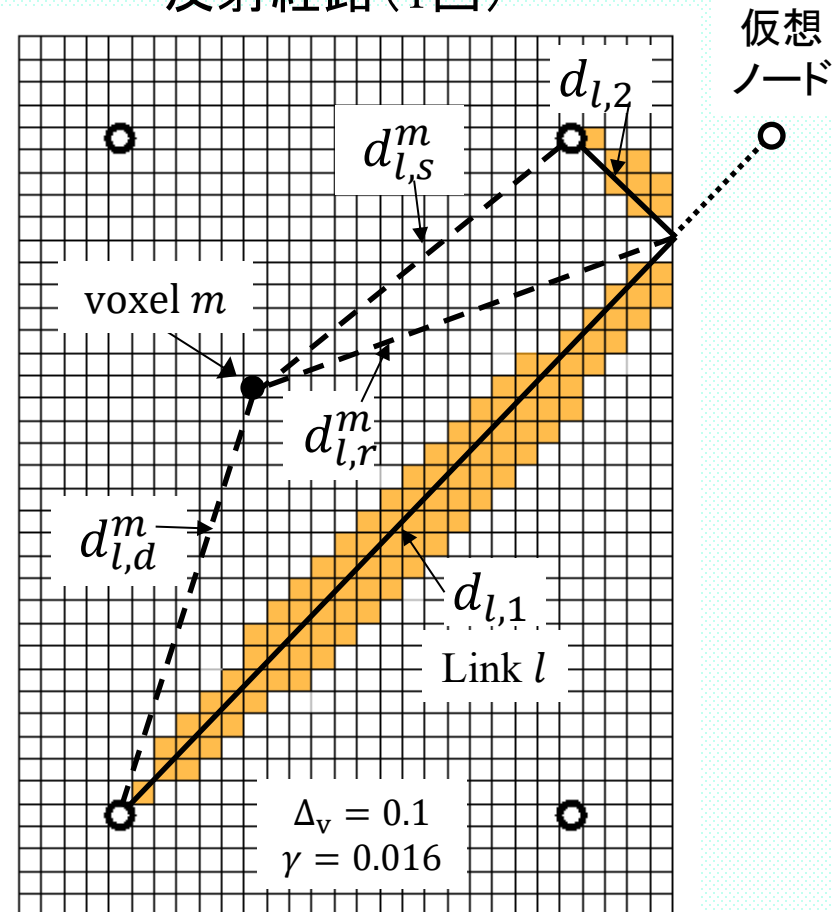
■ 特徴

- 多重波経路を分離し個別に扱う
- 仮想ノードの活用により実ノード数軽減が図れる
- 多重波の制御

■ 仮想ノード

- 長方形2次元空間において最大12個(2回反射まで)が存在
- ミリ波の電波伝搬測定[*]から, 7~14パスが観測されている

反射経路(1回)



$d_l (= \sum_k d_{l,k})$: ノード間伝搬距離

$d_{l,s}^m$: voxel m と始点間の距離

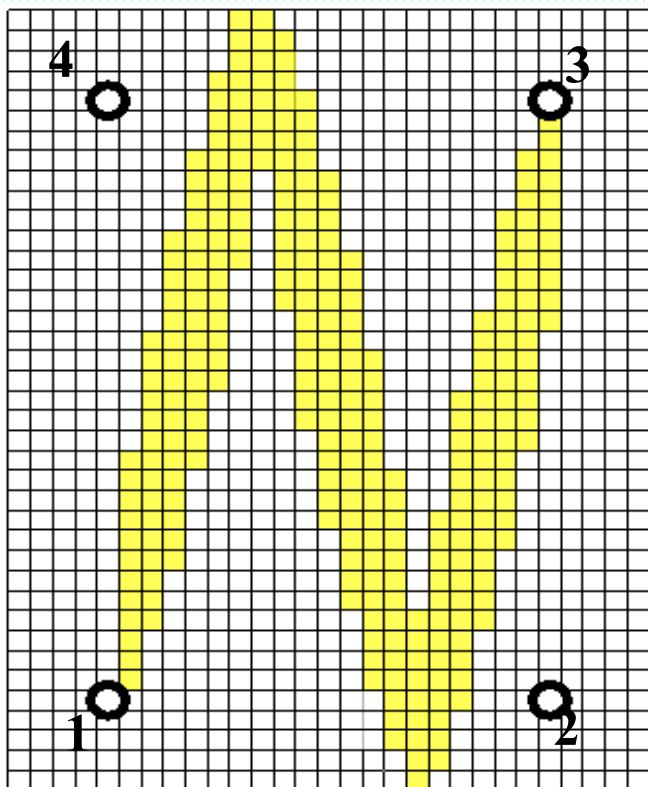
$d_{l,d}^m$: voxel m と終点間の距離

$d_{l,r}^m$: voxel m と反射点間の距離

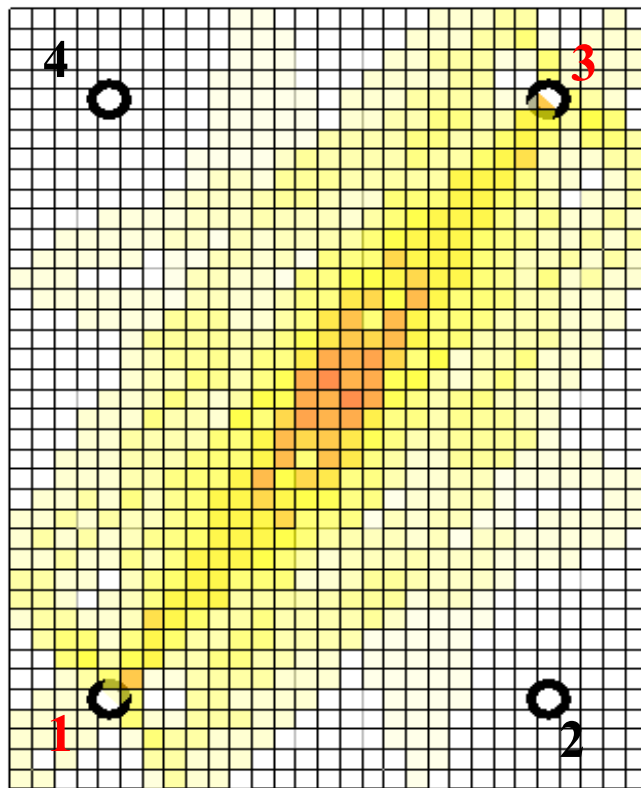
[*] 岸本, 金, 「ミリ波帯屋内超高速無線アクセス回線における準決定論的伝搬経路モデル」, 2019総大B-1-30

- Multipath-RTI (ノード数: 4個)

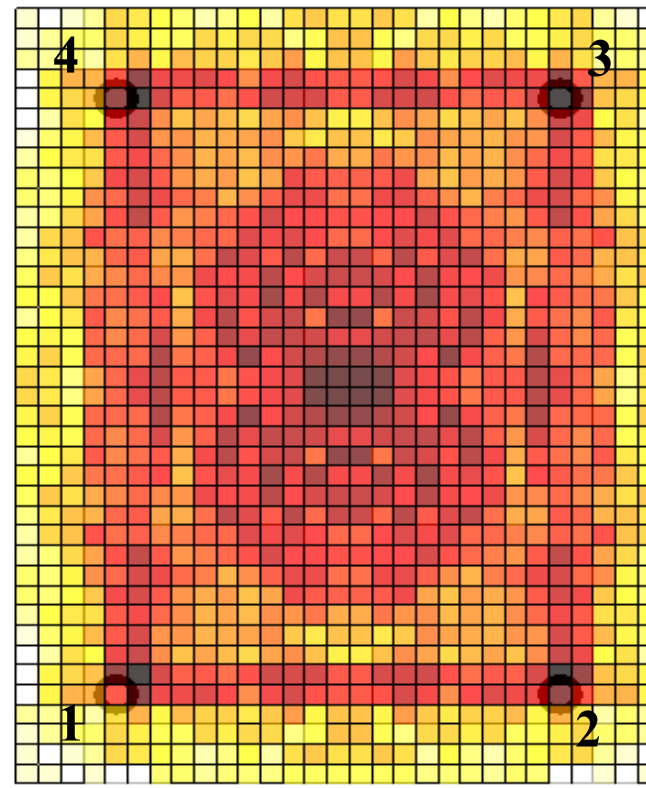
- 2回反射
(Node 1- Node 3)



- すべての経路
(Node 1- Node 3)



- すべての経路
(すべてのリンク)

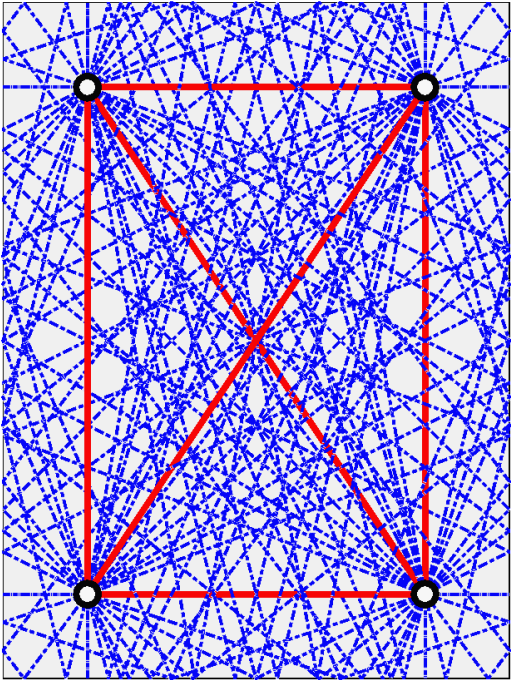


Multipath-RTI : Example (1)

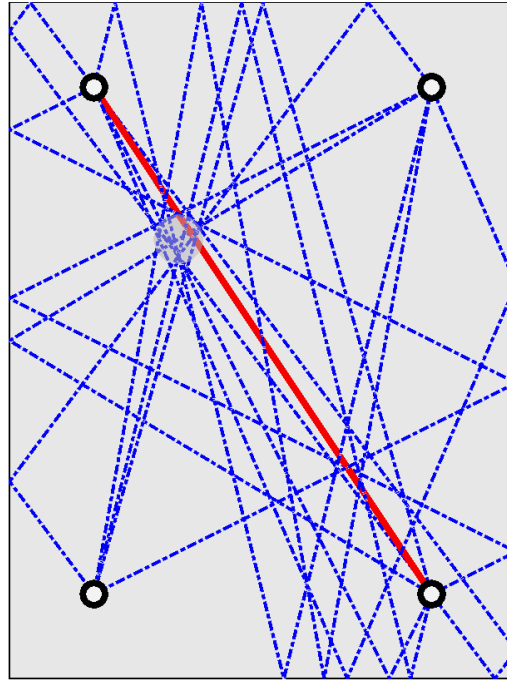
25

- 4 Anchors, 1 Person

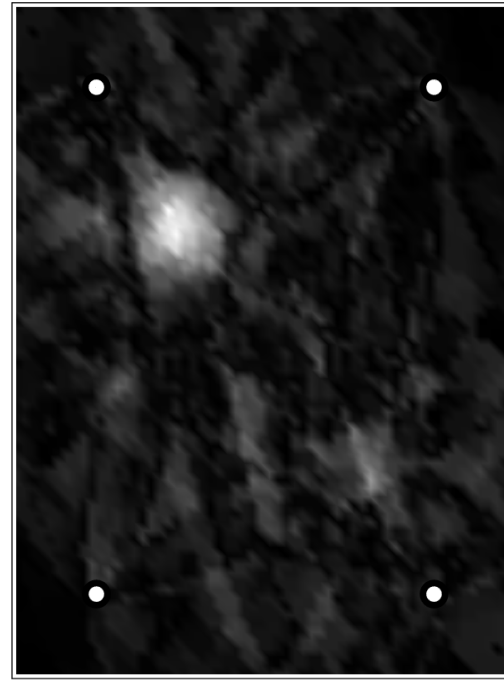
Ray paths



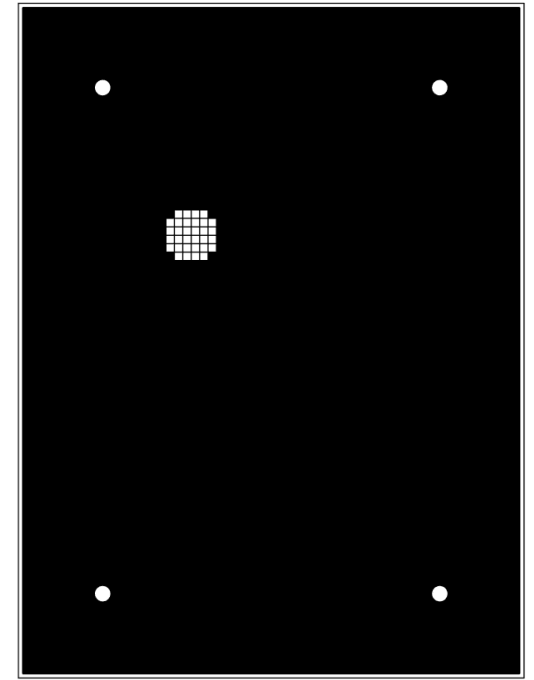
Blocked ray paths



RTI image



Ideal image



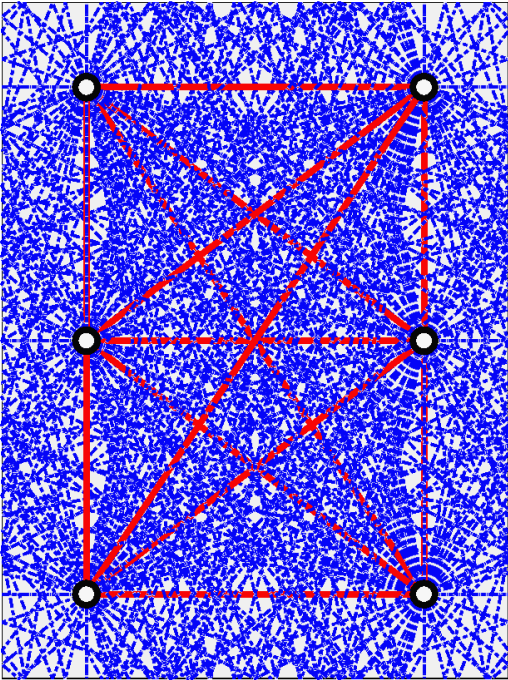
78 paths from 6 links

Multipath-RTI : Example (2)

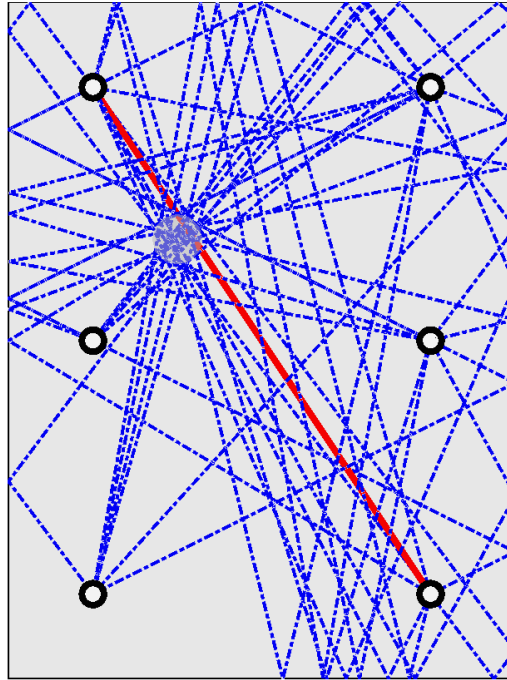
26

- 6 Anchors, 1 Person

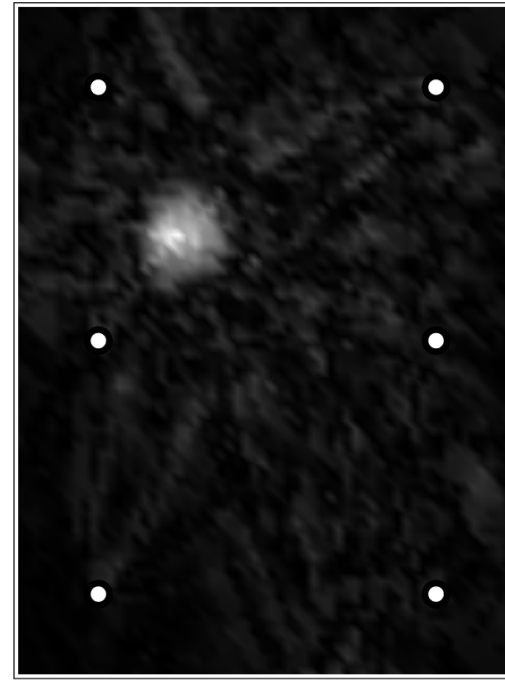
Ray paths



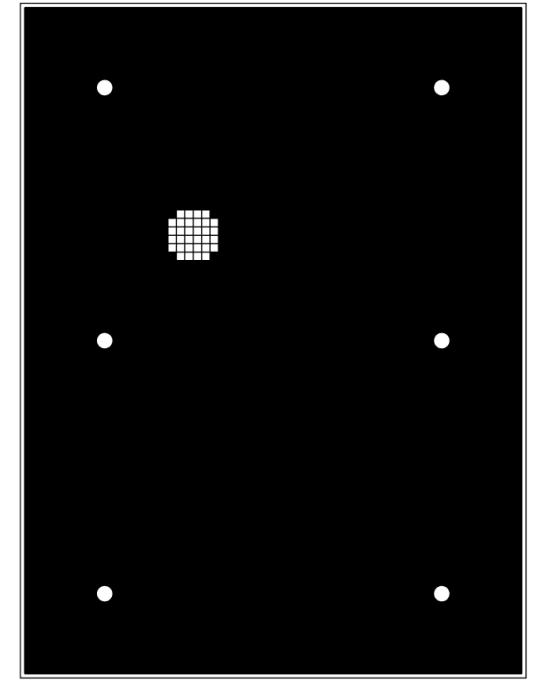
Blocked ray paths



RTI image



Ideal image

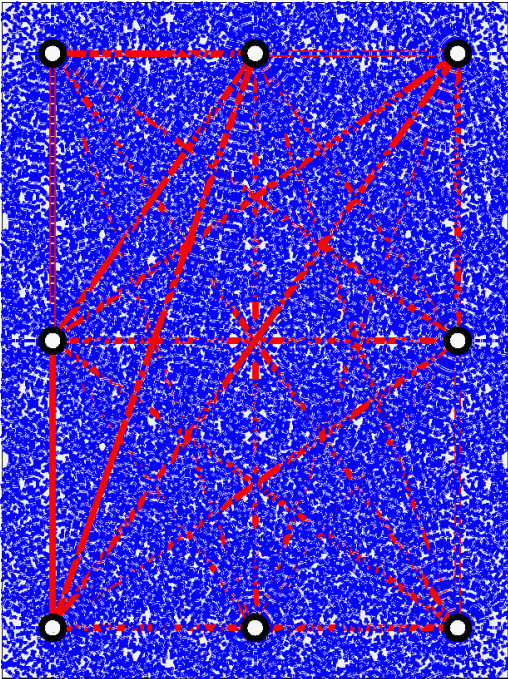


Multipath-RTI : Example (3)

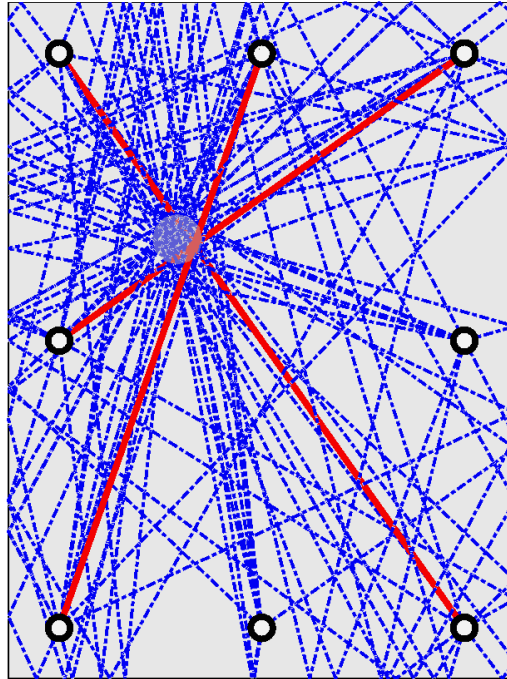
27

- 8 Anchors, 1 Person

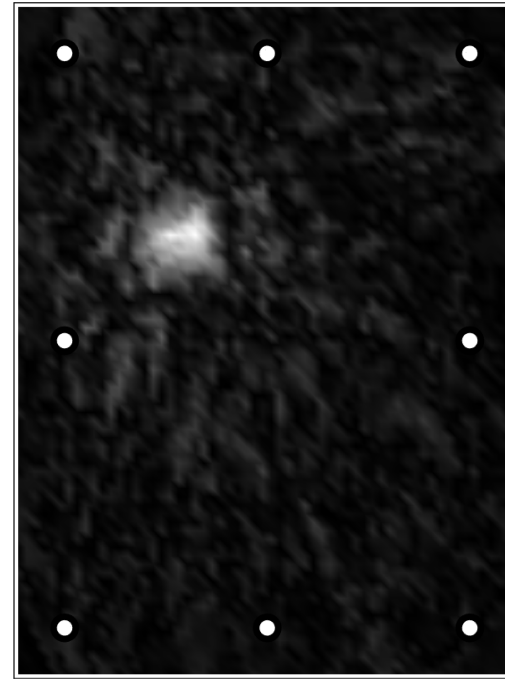
Ray paths



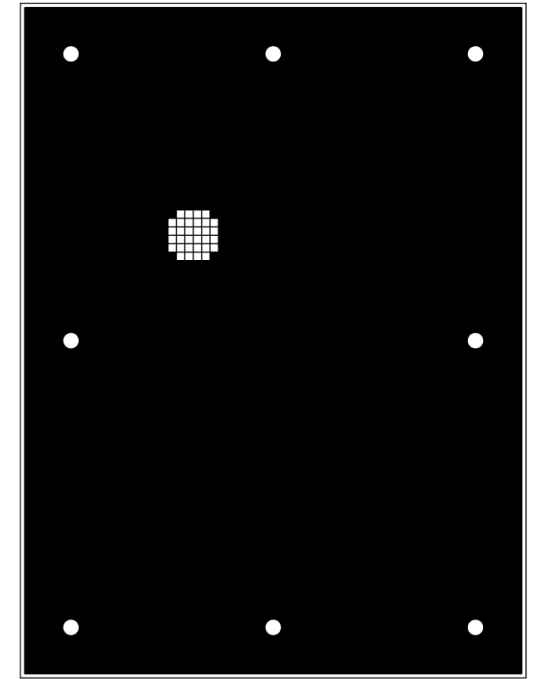
Blocked ray paths



RTI image



Ideal image

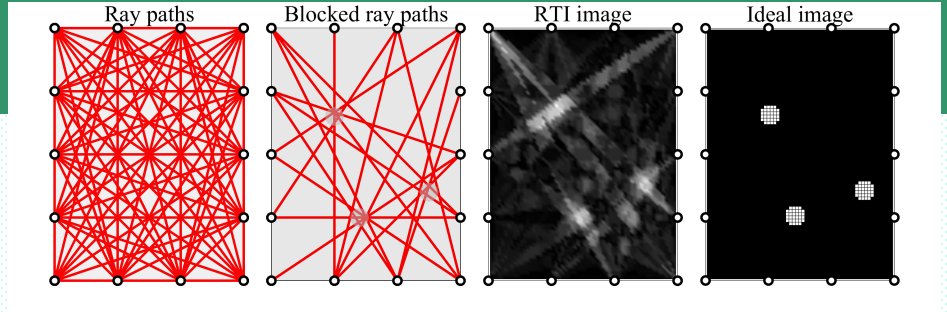


Multipath-RTI : Example (4)

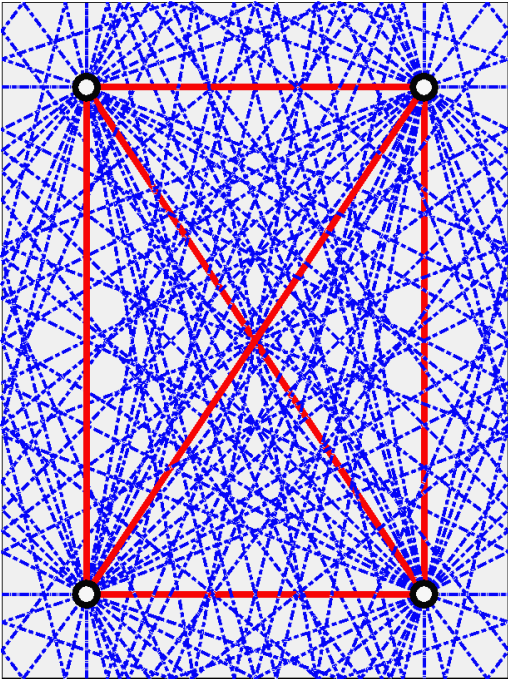
- 4 Anchors, 3 Persons

RSS RTI (14 anchors)

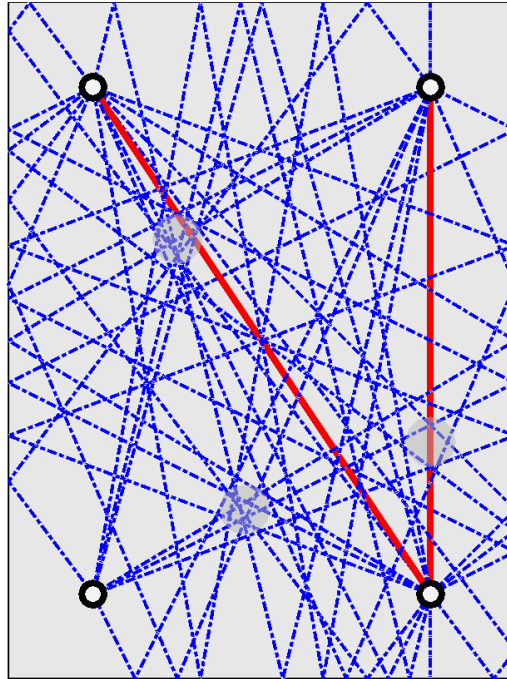
28



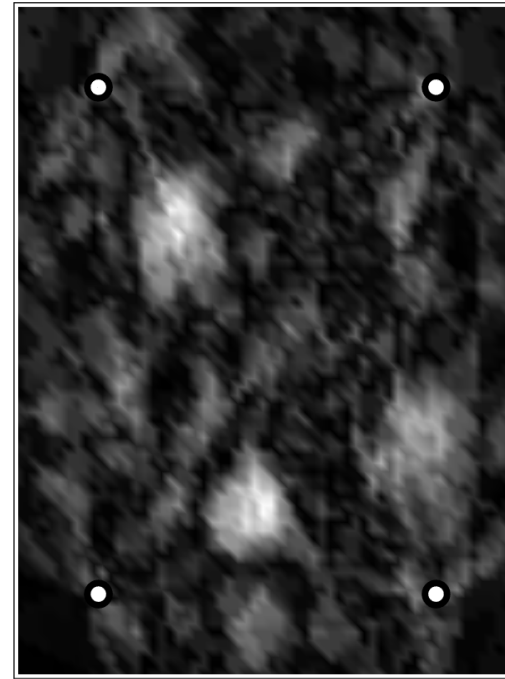
Ray paths



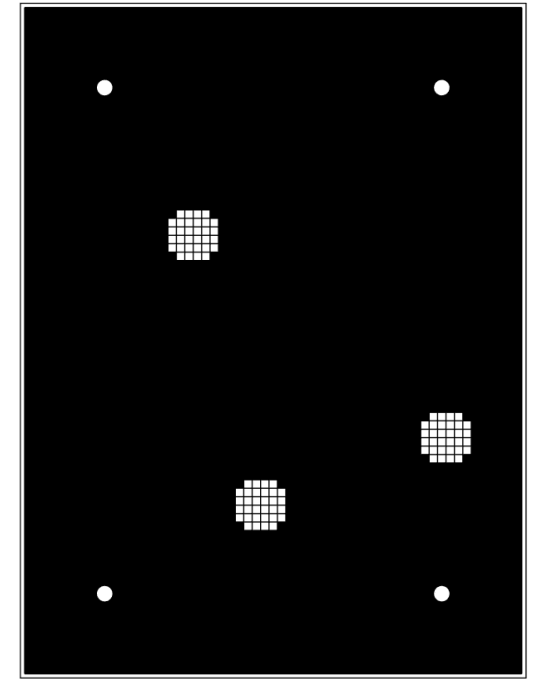
Blocked ray paths



RTI image



Ideal image

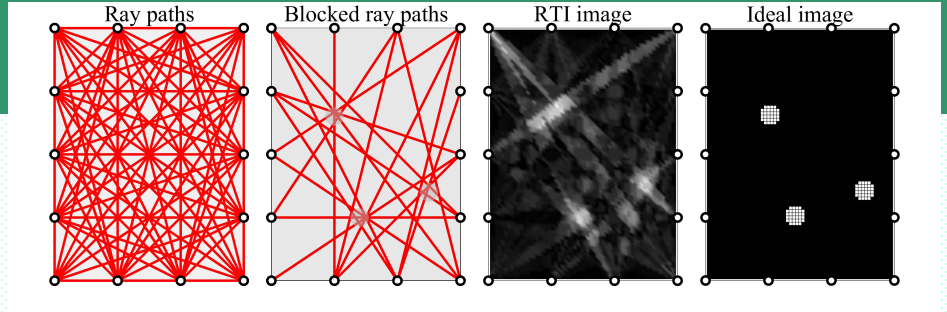


Multipath-RTI : Example (5)

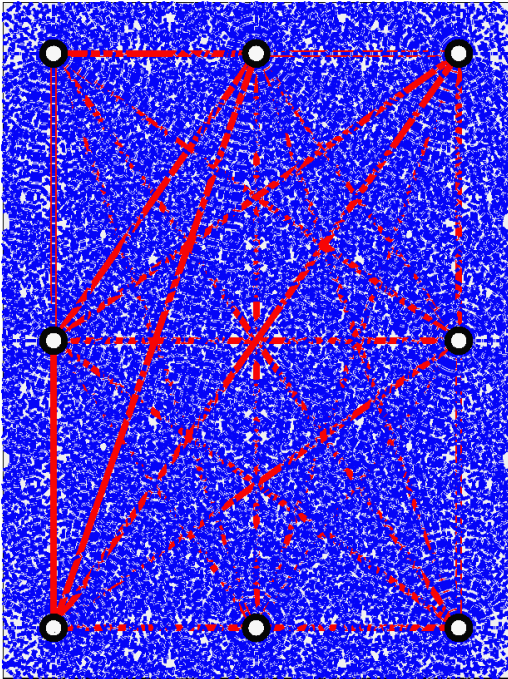
- 8 Anchors, 3 Persons

RSS RTI (14 anchors)

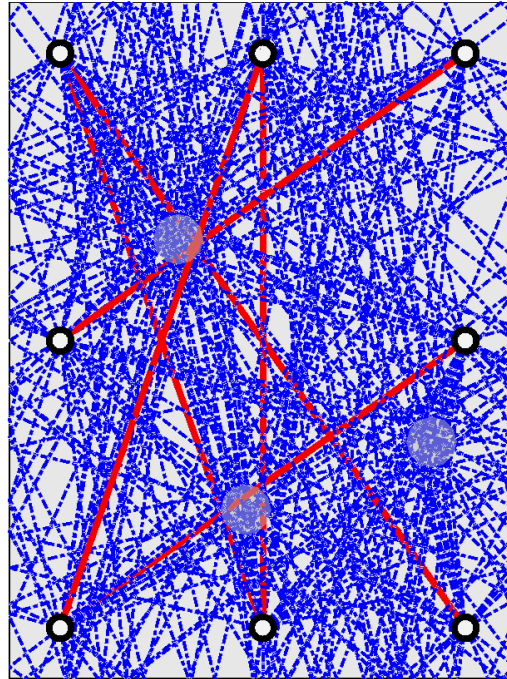
29



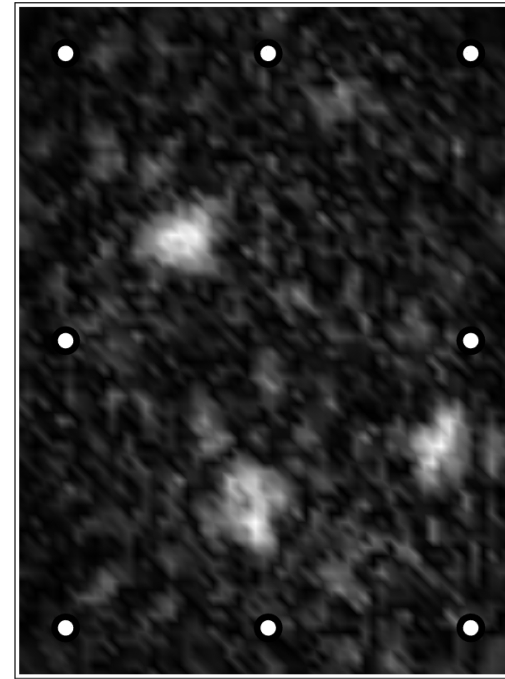
Ray paths



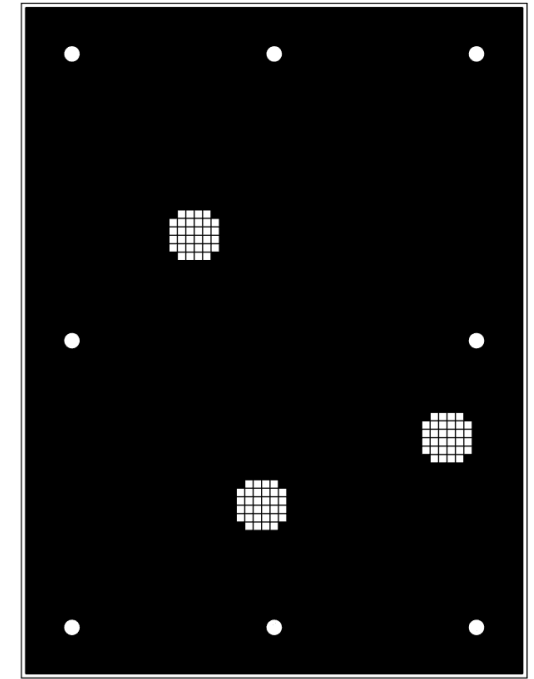
Blocked ray paths



RTI image



Ideal image



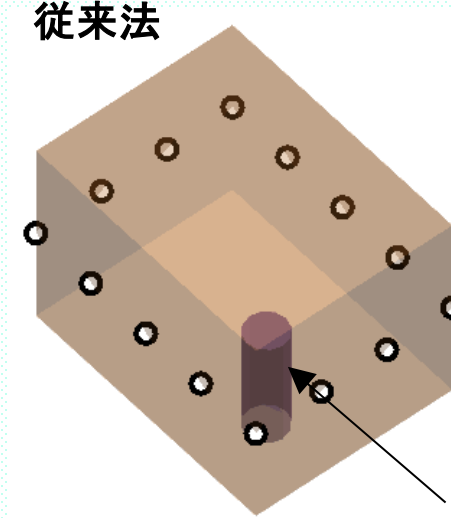
■ レイトレーシングセットアップ

	従来法	提案法
周波数	2.5 GHz	58.5 GHz
ノード数(K)	14	4
環境	3 [m] × 4 [m] × 3 [m] 立方体	
人体モデル	高さ1.7 m, 半径0.3 mの円柱	

■ RTI

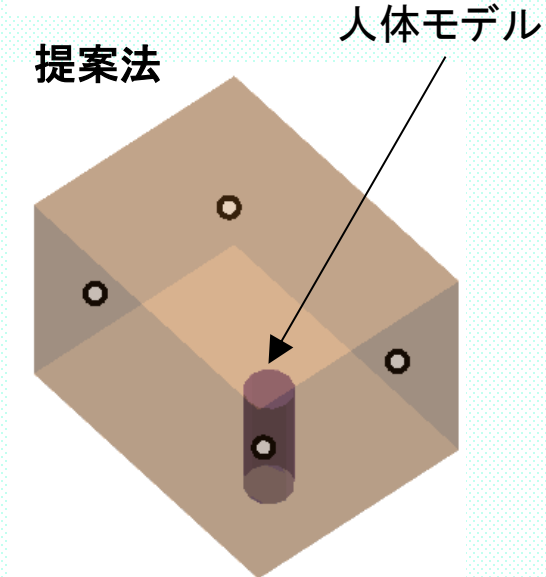
	従来法	提案法
リンク数	91	78(2回反射)
画素サイズ	$\Delta_v = 0.1 [m]$	
画素数	1200 (10 cm間隔 30 × 40)	
マージン	$\gamma = 0.016 [m]$	

従来法



RSS-RTI
with 14 nodes

提案法

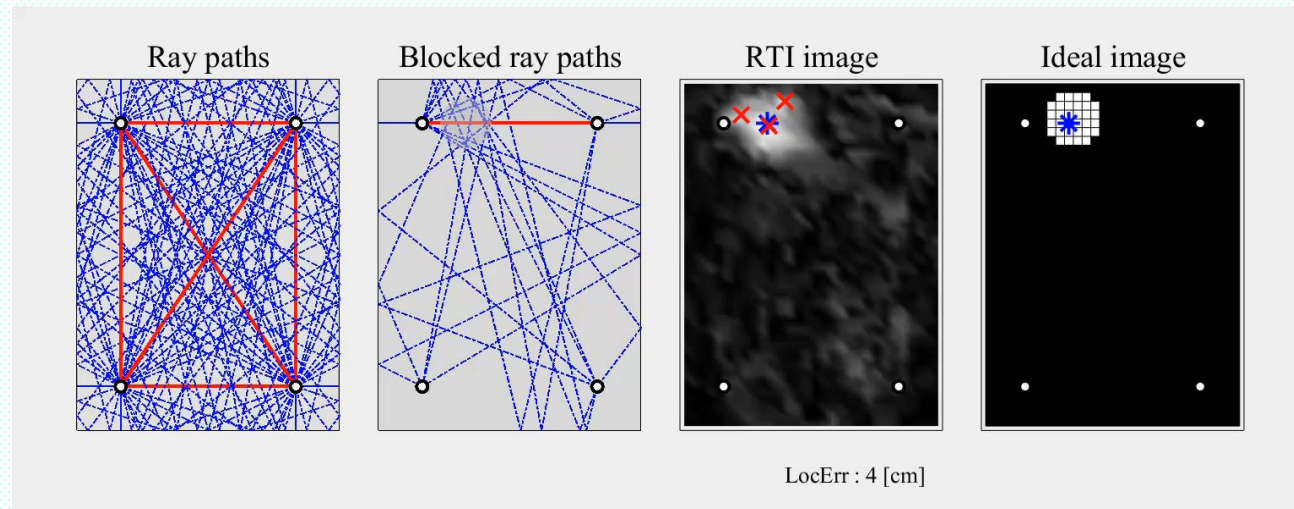
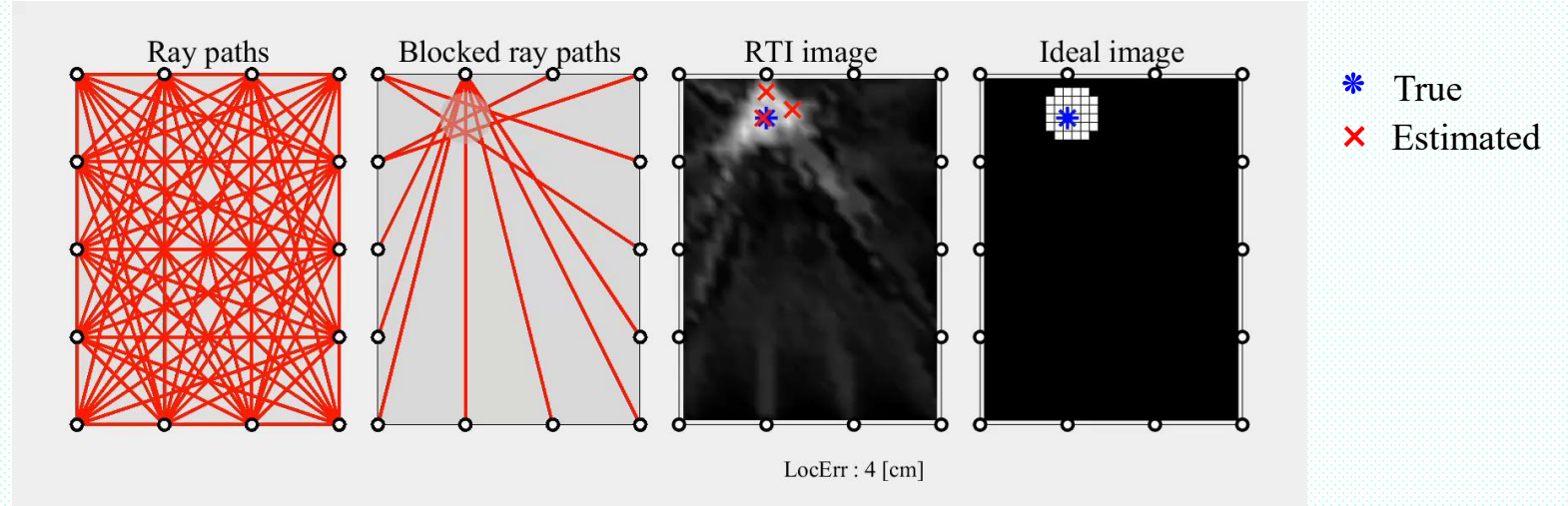


Multipath- RTI
with 4 nodes

Multipath-RTI vs. RSS-RTI

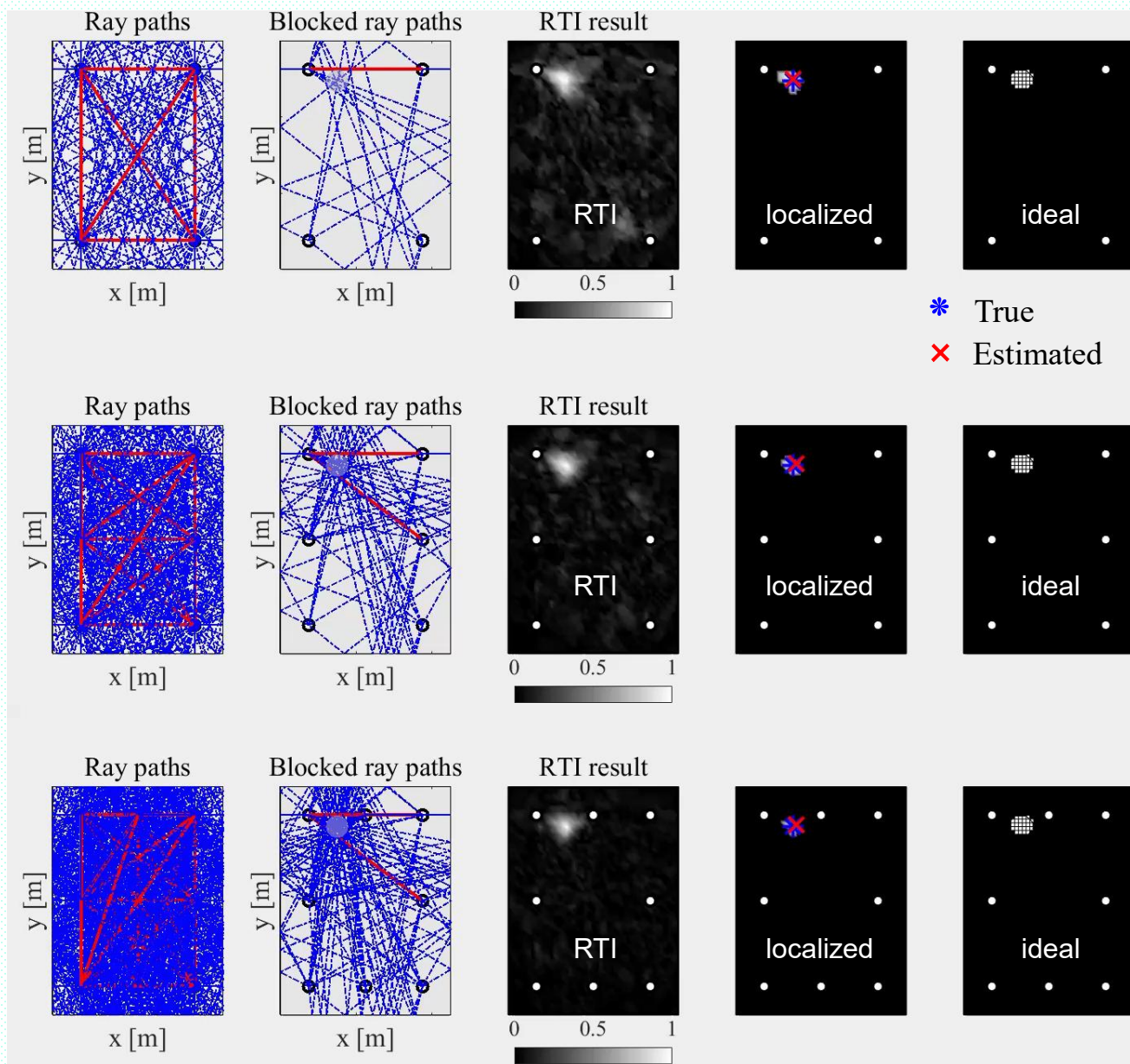
31

- RSS-RTI
(14 anchors)
- Multipath-RTI
(4 anchors, up to double-bounce reflection)



Multipath-RTI: ノード数

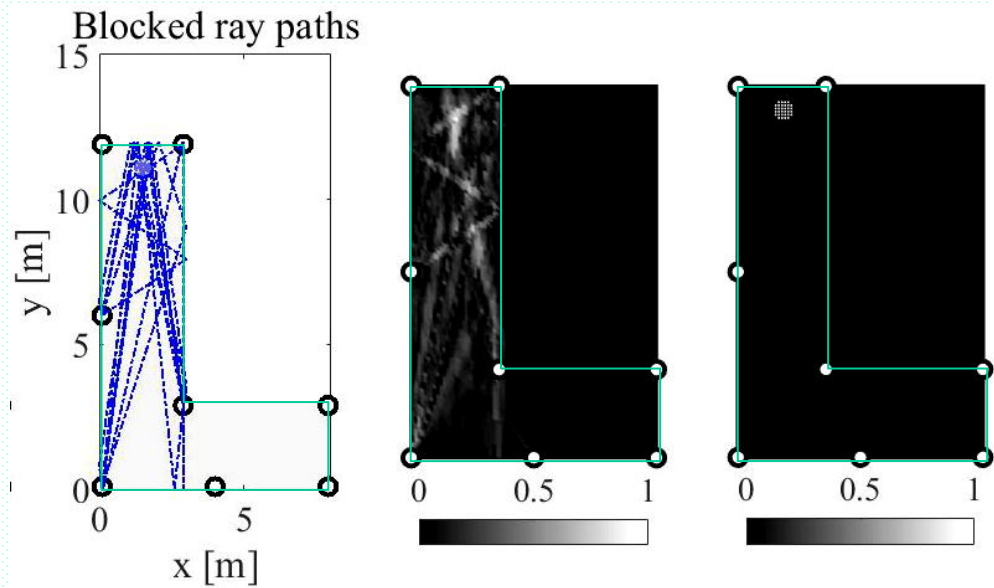
32

Room size: 4.5×6 [m]

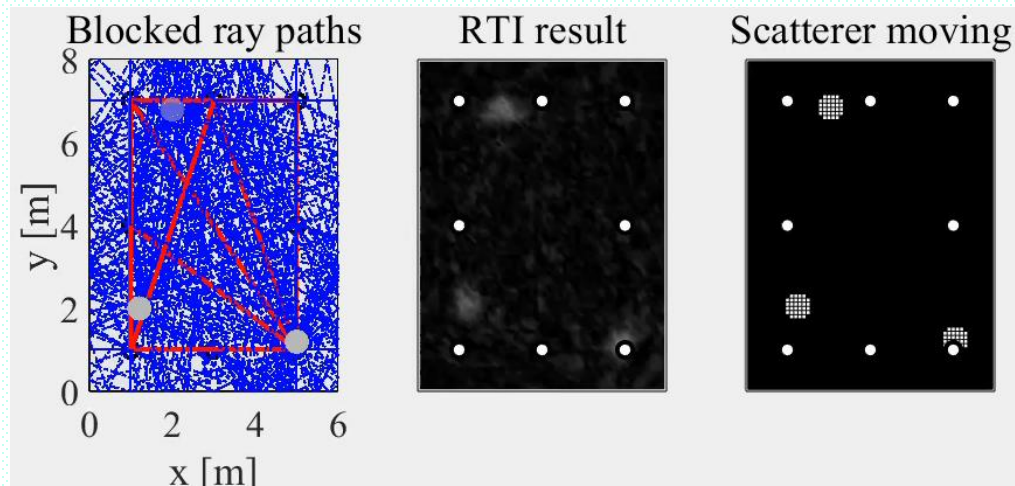
4 Anchors
MSE: 12.87 [cm]

6 Anchors
MSE: 12.52 [cm]

8 Anchors
MSE: 11.99 [cm]

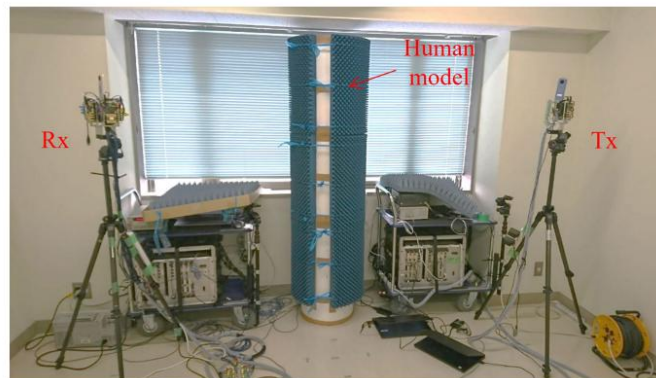


L-shaped
corridor

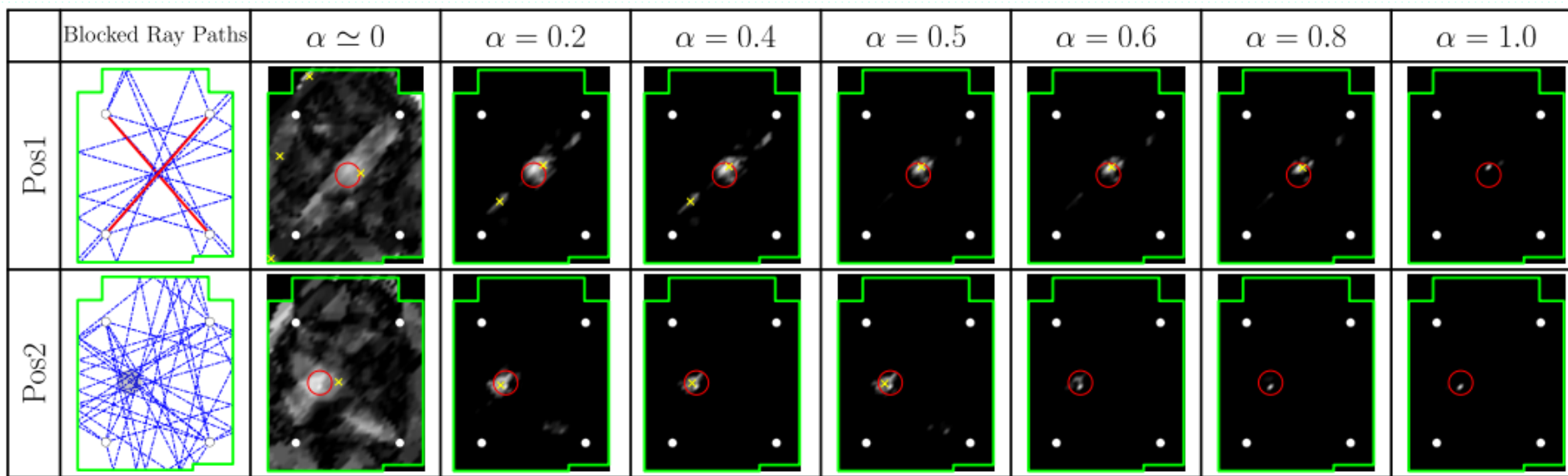


3 targets

- ミリ波チャネルサウンダを用いたP2P測定



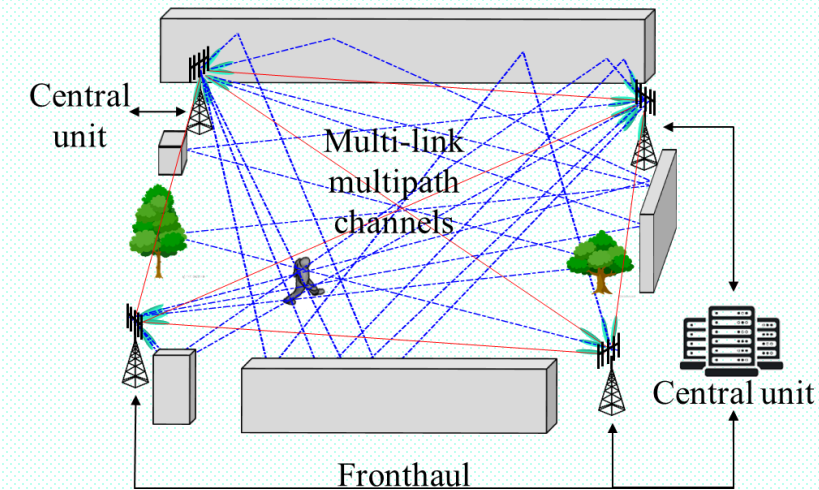
- 良好な測位結果



- 多重波成分をどう分離するか
 - 複雑な超高分解能信号処理による多重波成分(MPC)の抽出
 - 抽出したMPCに基づくクラスタリング
- 多重波経路をどう求めるか
 - 測定で得られたクラスタ情報を利用して経路推定
 - 時間変化に伴う多重波経路の追跡・紐づけ
- どう実現できるのか
 - アレーアンテナ搭載が必要
 - ノード間同期など...

Distributed Antenna Network
ISAC仕組みが活用できる[*]

Ray Tracingを活用
(6GにおいてRTの高度化に期待)



Sub-6 GHzを用いたハードウェア実装へ挑戦

[*] Minseok Kim, Gesi Teng, Nishi Keita, Togo Ikegami, Masamune Sato, "Device-Free Localization Using Multi-Link MIMO Channels in Distributed Antenna Networks," *IEEE J. Sel. Top. Electromagn. Antennas Propag. (JSTEAP)* (early access)

■ 各伝搬経路のRSS変化の測定

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(t_0) = \mathbf{W} \Delta \mathbf{x}$$

Baseline measurement

- $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{N \times M}$ has no inverse matrix, so $\Delta \mathbf{x}$ is not uniquely determined
- Derivation of the estimated solution $\Delta \hat{\mathbf{x}} \rightarrow$ regularization

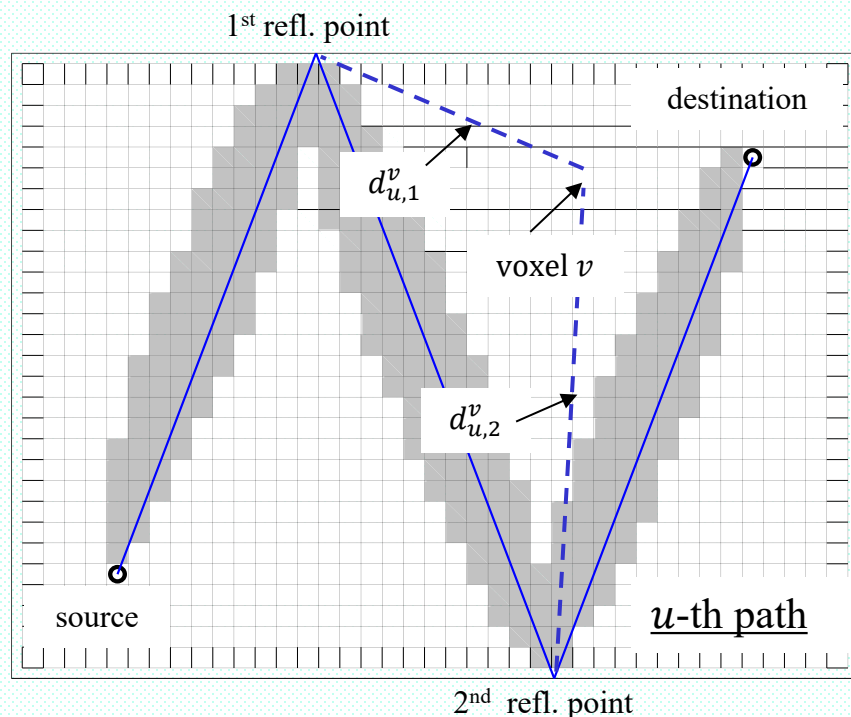
■ Elastic Netによるイメージ再構成

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\Delta \mathbf{x}} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{y}_\Delta - \mathbf{W} \Delta \mathbf{x}\|_2^2 + \lambda P_\alpha(\Delta \mathbf{x}) \right\}$$

$$P_\alpha(\Delta \mathbf{x}) = \frac{1 - \alpha}{2} \|\Delta \mathbf{x}\|_2^2 + \alpha \|\Delta \mathbf{x}\|_1$$

- λ : regularization parameter $\rightarrow$ Control the intensity of regularization
- α : relative contribution of L_2 regularization and L_1 regularization
 - Specified in the range of 0 to 1
 - The closer to 1, the sparser the vector

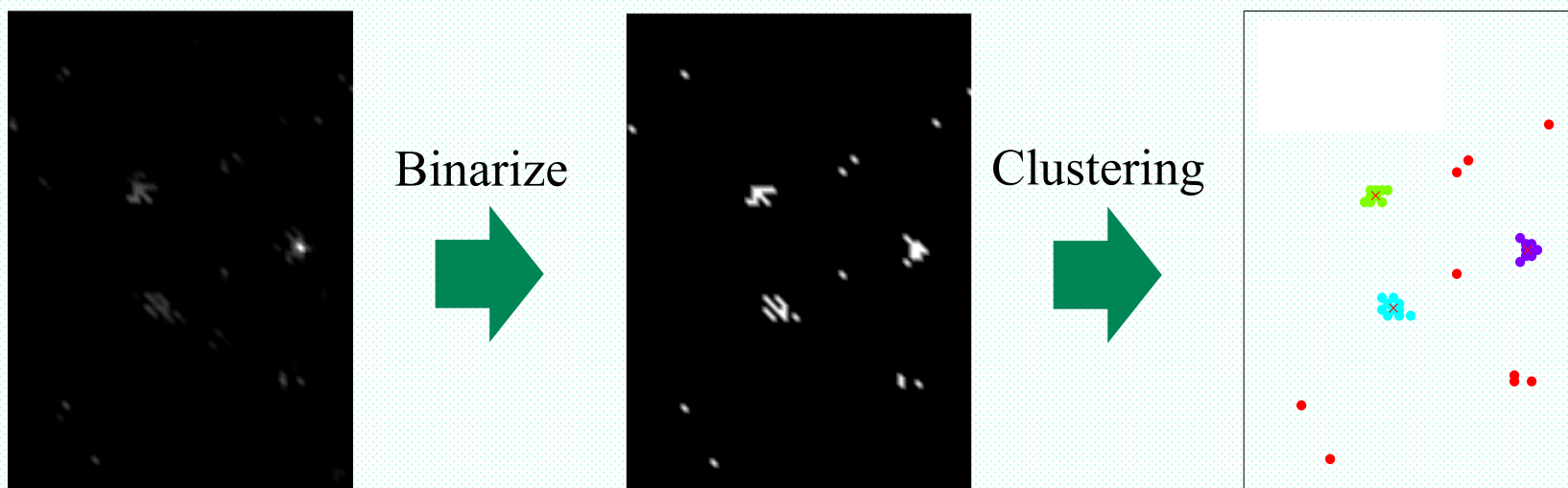
■ 重み行列の決定



$$[W]_{u,v} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_u}, & d_{u,\text{src}}^v + d_{u,1}^v < d_{u,1} + \gamma \\ 1/\sqrt{d_u}, & d_{u,1}^v + d_{u,2}^v < d_{u,2} + \gamma \\ \vdots & \\ 1/\sqrt{d_u}, & d_{u,K_u}^v + d_{u,\text{des}}^v < d_{u,K_u+1} + \gamma \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

- 反射次数が増加するにつれて、経路は実際のターゲット位置との相関が低下し、アーチファクトが生じる可能性が高くなる
- 最大2次反射までを利用するのが妥当な選択である

- Step 1: Sparse voxel estimation via Elastic Net
- Step 2: Otsu's binarization to detect active voxels
- Step 3: DBSCAN clustering to identify target regions
 - $\varepsilon = 0.5$, minPts = 3 (typical values)
- Step 4: Centroid of cluster gives final target estimate
 - Parameter tuning via Bayesian Optimization for α and γ



- MIMO impulse response model (l -th link)

$$\mathbf{h}_l = \mathbf{A}(\boldsymbol{\Omega}_l) \boldsymbol{\Gamma}_l \in \mathbb{C}^{M_{T,l} M_{R,l} D \times 1}$$

N_l : Number of propagation paths
 $M_{T,l}, M_{R,l}$: Number of MIMO antennas
 D : Number of delay time bins

- Response matrix

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\Omega}_l) = [\mathbf{a}(\boldsymbol{\Omega}_{l,1}), \dots, \mathbf{a}(\boldsymbol{\Omega}_{l,N_l})] \in \mathbb{C}^{M_{T,l} M_{R,l} D \times N_l}$$

$$\mathbf{a}(\boldsymbol{\Omega}_{l,n_l}) = \mathbf{a}_T(\phi_{T,l,n_l}) \otimes \mathbf{a}_R(\phi_{R,l,n_l}) \otimes \mathbf{a}_\tau(\tau_{l,n_l}) \in \mathbb{C}^{M_{T,l} M_{R,l} D \times 1}$$

- Response vectors

$$\mathbf{a}_\tau(\tau) = [a_\tau(\check{\tau}_0 - \tau), \dots, a_\tau(\check{\tau}_{D-1} - \tau)]^T$$

$$\mathbf{a}_T(\phi_T) = [1, e^{-j\pi \sin \phi_T} \dots, e^{-j\pi(M_{T,l}-1) \sin \phi_T}]^T$$

$$\mathbf{a}_R(\phi_R) = [1, e^{-j\pi \sin \phi_R} \dots, e^{-j\pi(M_{R,l}-1) \sin \phi_R}]^T$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_l = [\gamma_{l,1}, \dots, \gamma_{l,N_l}] \in \mathbb{C}^{N_l \times 1}$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{l,n_l} = [\tau_{l,n_l}, \phi_{T,l,n_l}, \phi_{R,l,n_l}]$$

$$a_\tau(\tau) = \frac{1}{D} e^{-j\pi \Delta_f \tau} \cdot \frac{\sin(\pi D \Delta_f \tau)}{\sin(\pi \Delta_f \tau)}$$

- 双角度時空間ビームフォーミング (double-directional spatiotemporal beamforming)
- 各伝搬経路のRSS 変化:

$$[\Delta \mathbf{y}_l]_{n_l} = 10 \log_{10} \left(\frac{\mathbb{E} \left[|\mathbf{a}^H(\boldsymbol{\Omega}_{l,n_l}) \mathbf{h}_l(t)|^2 \right]}{\mathbb{E} \left[|\mathbf{a}^H(\boldsymbol{\Omega}_{l,n_l}) \mathbf{h}_{\text{base},l}(t)|^2 \right]} \right)$$

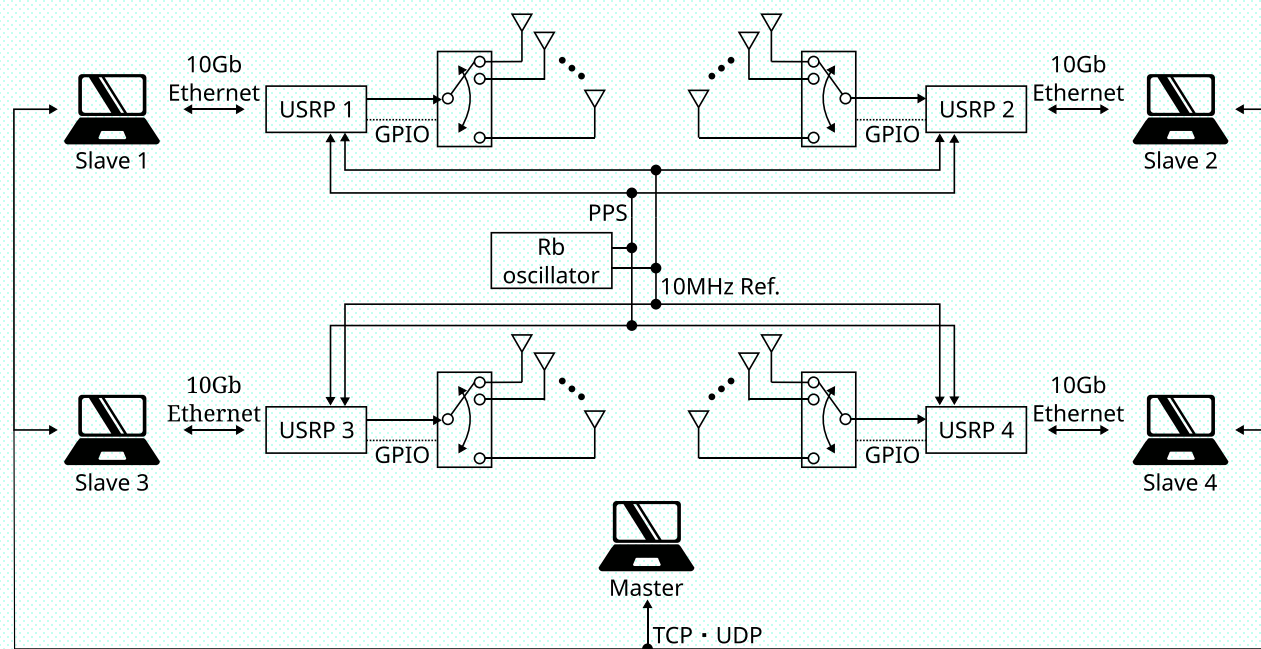
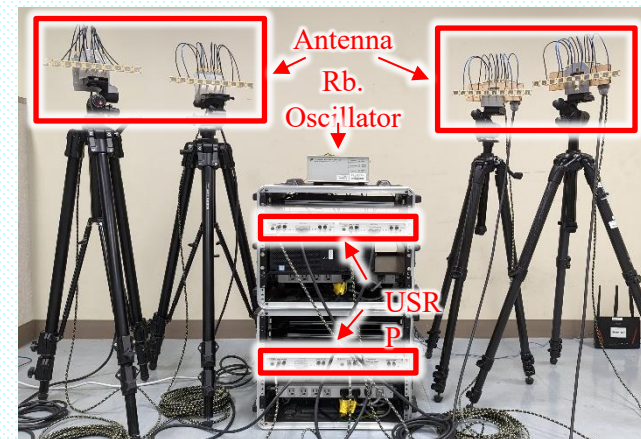
$$\Delta \mathbf{y}_l = \mathbf{y}_l(t) - \mathbf{y}_{\text{base},l}(t) \text{ [dB]}$$

$$\Delta \mathbf{y} = [\Delta \mathbf{y}_1^T, \dots, \Delta \mathbf{y}_L^T]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

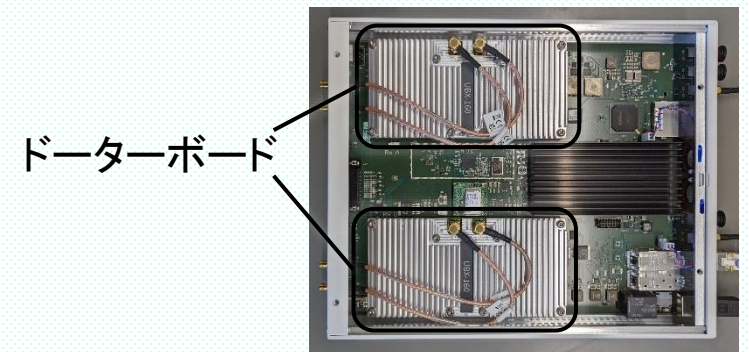
- $\mathbf{a}(\boldsymbol{\Omega})$: Combined response vector from antenna and signal model
 - $\boldsymbol{\Omega} = [\text{AoA } (\phi_{\text{Rx}}), \text{AoD } (\phi_{\text{Tx}}), \text{delay time } (\tau)]$ extracted via **Ray tracing**
 $\boldsymbol{\Omega}_{l,n_l} = [\tau_{l,n_l}, \phi_{\text{T},l,n_l}, \phi_{\text{R},l,n_l}]$
- これにより, 多重波成分を分離し, 高精度な位置推定を実現可能

■ マルチリンクMIMOチャネル測定系

- 4ノード6リンク
- Master PC 1台とSlave PC 4台を使用
- Master PCからSlave PCへ送受信開始命令を順に送信
- 各Slave PCはUSRPを制御
- ルビジウム発振器を用いて全USRPを同期



- USRP (Universal Software Radio Peripheral)
 - Ettus Research社製ソフトウェア無線機
 - 回路図・FPGAプログラムが公開されたオープンソースのソフトウェアプラットフォーム
 - ドーターボードの差し替えで様々な周波数帯に対応
 - USRP X310
 - 2 チャンネル(それぞれTx/RxとRx)
 - ホストとの接続インターフェース:
USB・PCIe・1G/10G bit Ethernet(最大200 MSps / channel)
 - ドーターボード:UBX-160
 - 10 MHz~6 GHz, 160 MHz BW
 - 最大送信電力:約 20 dBm
 - 開発環境:UHD C++ API (v4.4.0)



USRP内部

■ アンテナスイッチング方式

- 複数の送受信アンテナ(SP8T)をスイッチにより切り替えて使用
- RFスイッチ: SR-J030-8S (Universal Microwave Components Corp.)
- X310の15ピン汎用IO(GPIO)を使用
 - UHD APIでは制御用関数が提供

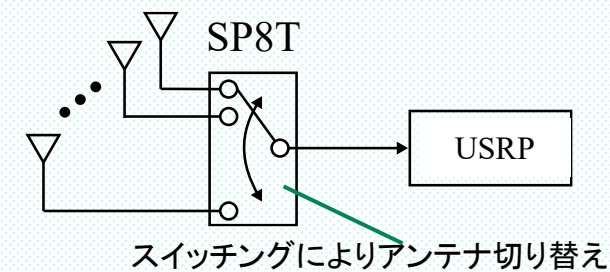


Table 1 Specifications of the RF switch.

Item	Specification
Frequency range	0.5–12.4 GHz
Insertion loss	3.0 dB Max
Isolation	0.5–6 GHz: 60 dB Min 6–12.4 GHz: 50 dB Min
VSWR (on state)	1.8:1 Max
Rise/Fall time ^{*a}	40 ns Max
On/Off time ^{*b}	90 ns Max

^{*a} 10–90%RF, 90–10%RF

^{*b} 50%TTL–90%RF, 50%TTL–10%RF



GPIOポート



スイッチ外観

■ 各種パラメータ

項目	仕様
搬送波周波数	4.85001 GHz
サンプリング周波数	200 MHz
信号帯域幅	100 MHz
送信信号	ニューマン位相 マルチトーン信号
副搬送波数	128

項目	仕様
副搬送波間隔	781.25 kHz
シンボル長	1.28 μ s
遅延時間分解能	10 ns
FFT点数	256
送信電力	15 dBm (typ.)
測定時間	164 μ s (8 $\times$ 8MIMO)

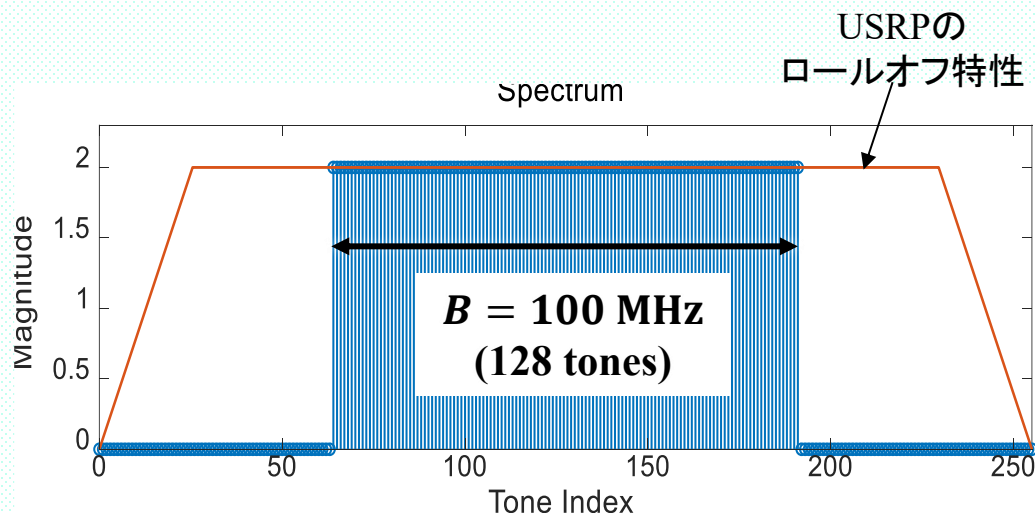
■ マルチトーン信号 (Newman位相付加)

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \exp(j2\pi\Delta_f t + j\phi_k)$$

N : No. tones.

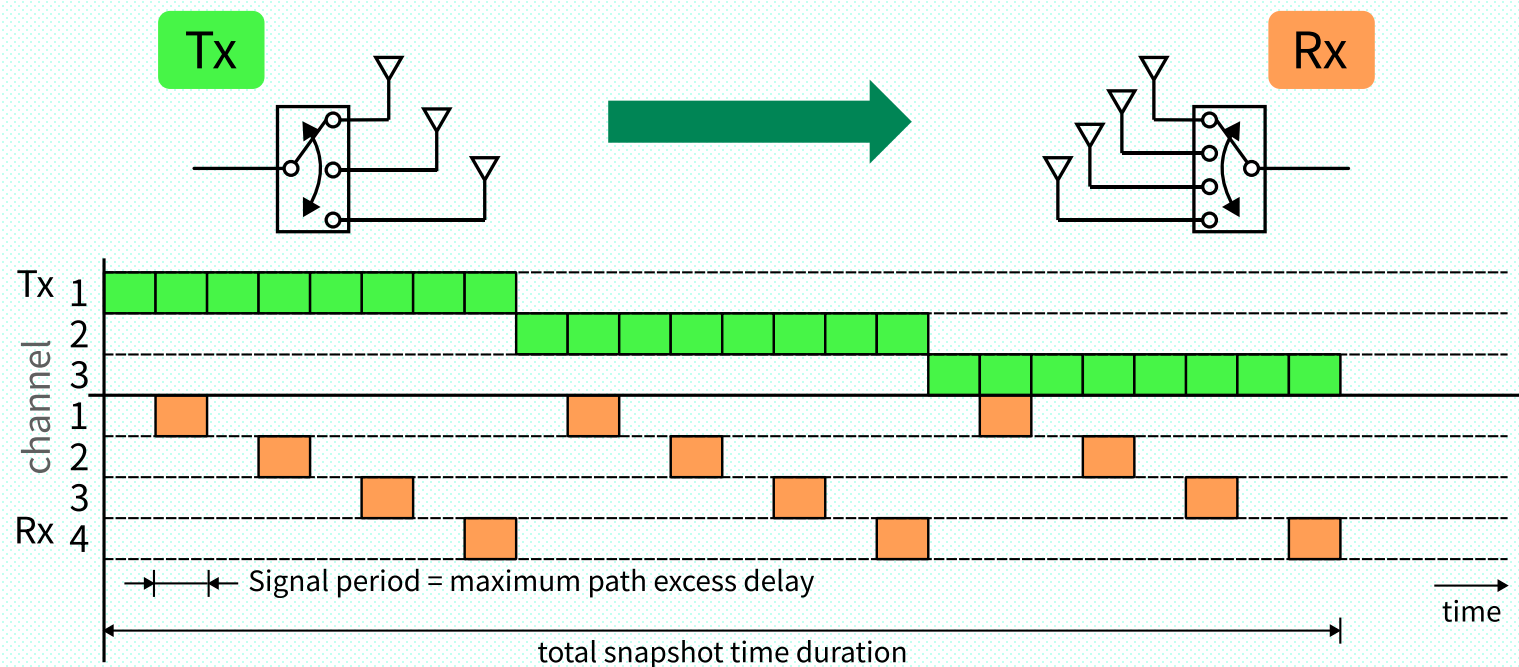
$\Delta_F = B/N$: Tone spacing

$\phi_k = \frac{k^2\pi}{N}$: Newman phase



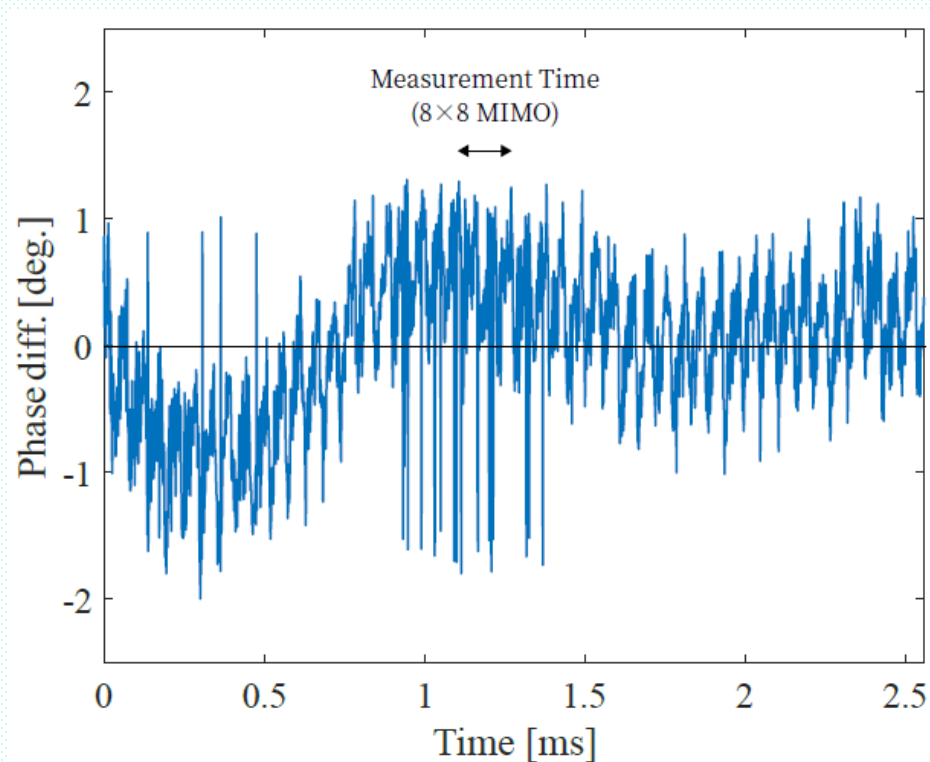
■ アンテナスイッチング

- 信号を2回送信→後半1信号を受信

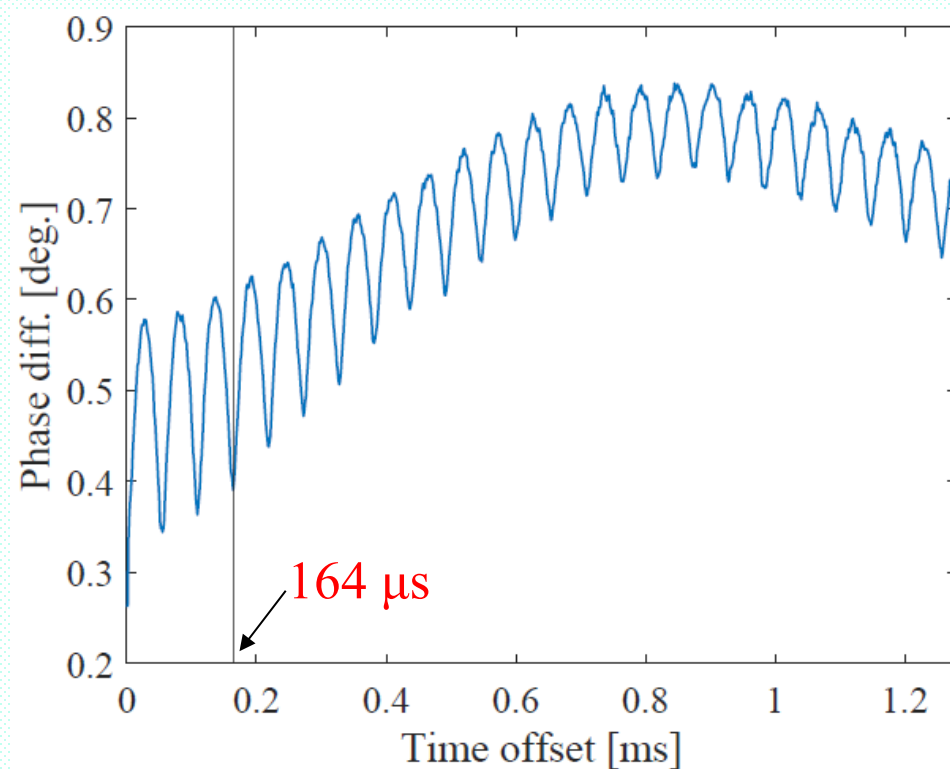


- シンボル長: $1.28 \mu\text{s}$ (256 samples / 200Msps)
- 8×8 MIMOチャネル測定にかかる時間(MIMOスナップショット): $164 \mu\text{s}$ ($= 1.28 \mu\text{s} \times 2 \times 8 \times 8$)

- 基準信号と1PPSは, 共通のRbから送・受のUSRPへ供給
- 約3度位の変動幅⇒MIMOチャネル測定への影響は無視できる



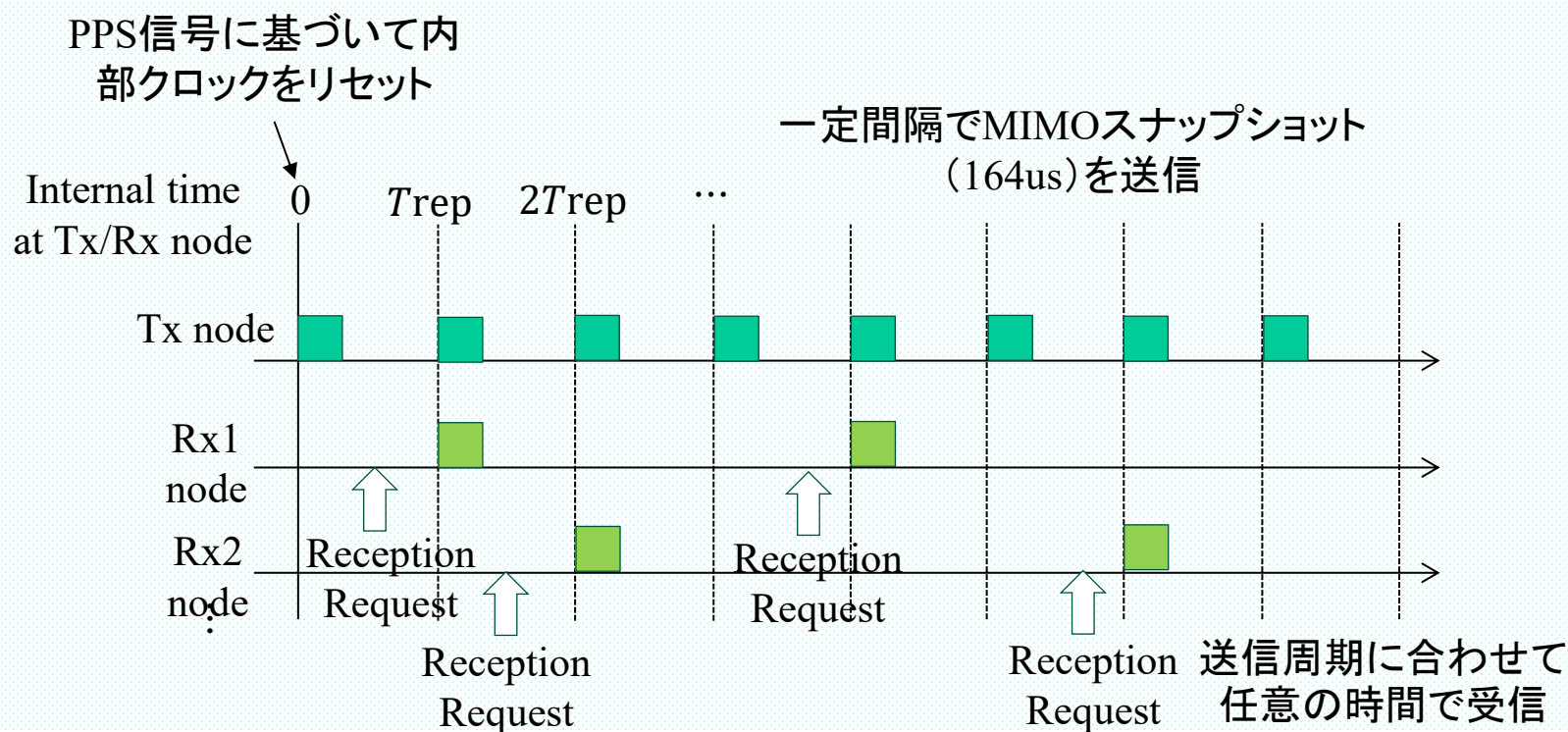
(a) Phase stability of the local oscillator.



(b) Average absolute phase difference at each time offset.

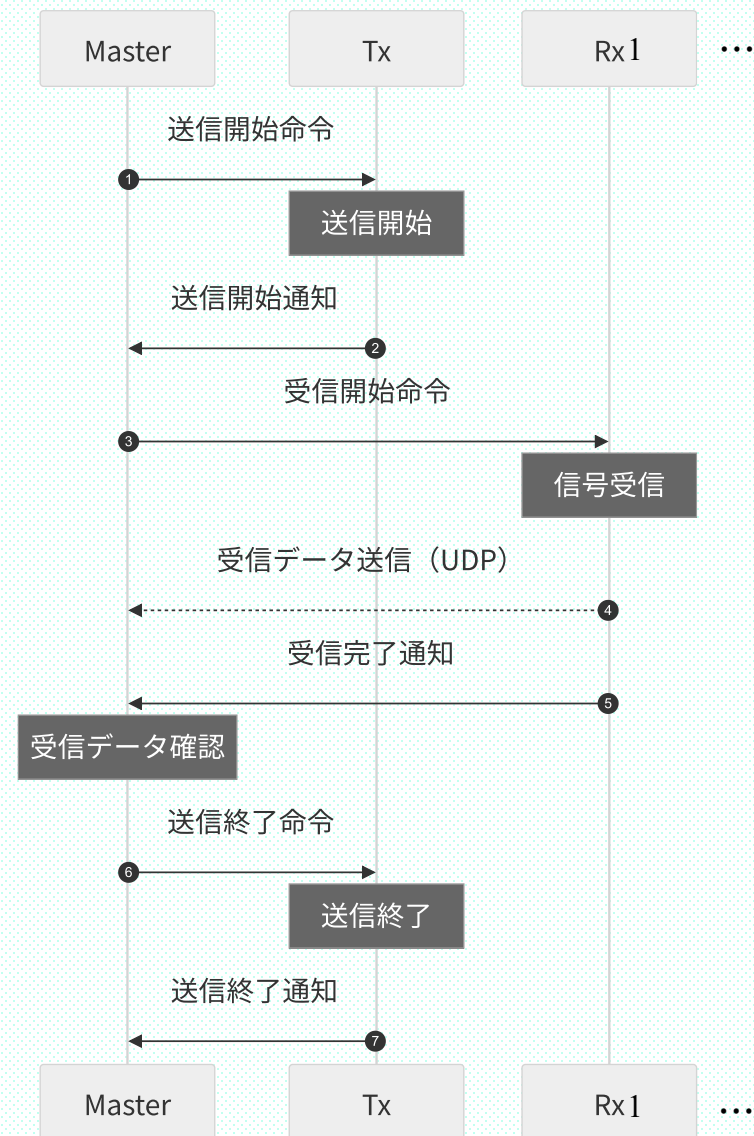
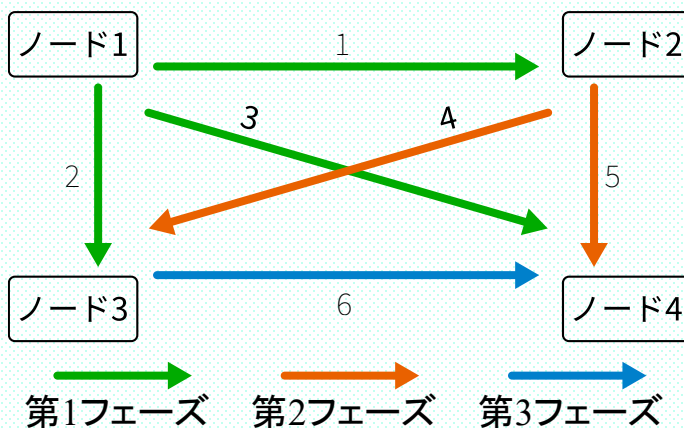
■ ルビジウム発振器から同期信号共有

- 10 MHz ref ⇒ 各USRPの内部クロックの同期
- 1PPS ⇒ 送受信タイミングの同期



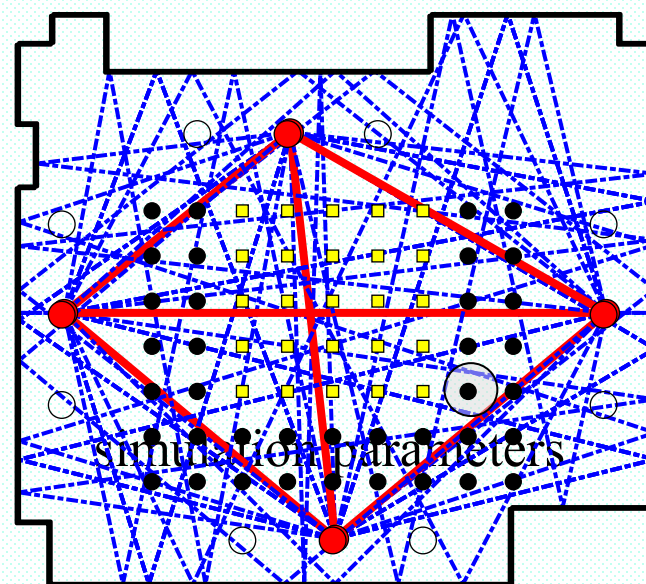
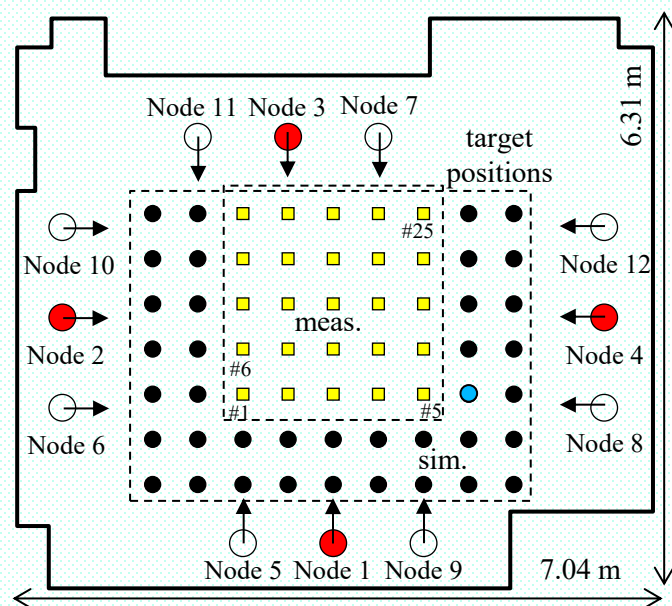
■ 測定シーケンス

- 3段階に分けて6リンク測定
- Masterは各送受信命令発行後正常にプロセスが開始されたことを確認するまで待機
- 受信信号の保存方法は2通り
 - UDPでMasterに集約
 - 各Slave PCに保存
- 全リンク測定時間は 4 秒程度



■ ノードおよびターゲット配置・シミュレーションパラメータ

- アンカーノード: リニアアレーアンテナ
- ターゲット: 半径0.3 mの電波吸収体

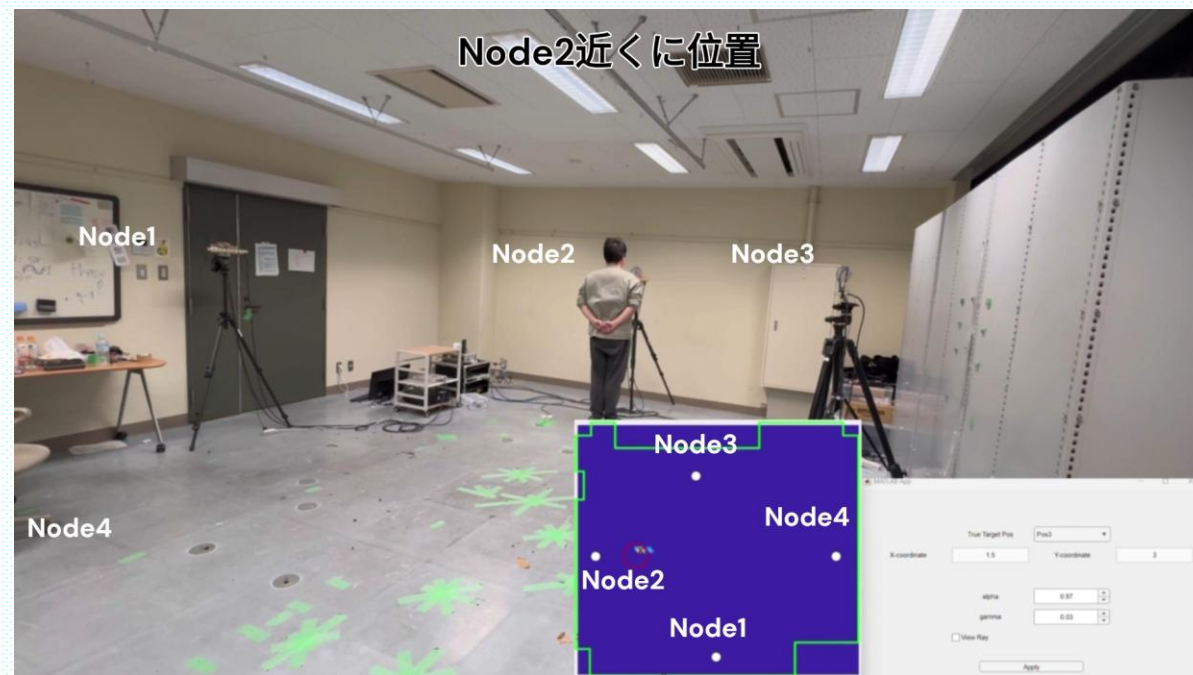
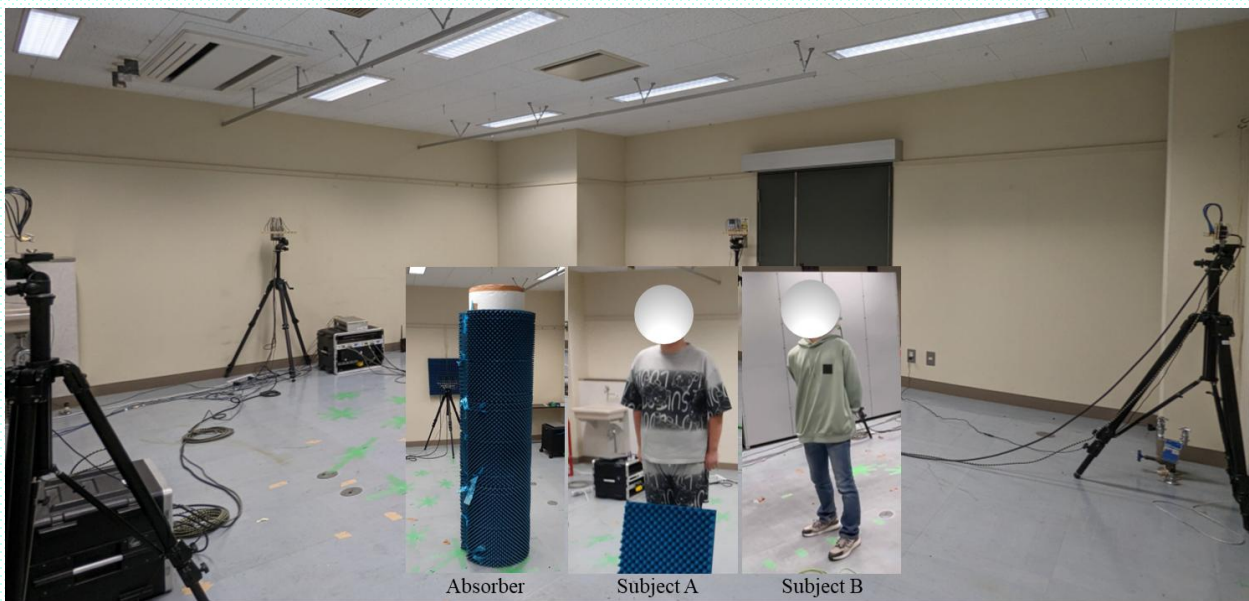


Number of antenna elements K	8
Antenna elements spacing d	half-wavelength
RTI voxel size	0.1 m
Signal Bandwidth	100 MHz
Number of delay time beam N	128
RTI oval parameter γ	0.05 m
Regularization parameter λ	Determined by 5-division cross-validation
Regularization parameter α	0.75
DBSCAN ϵ	0.3 m
DBSCAN minPts	3

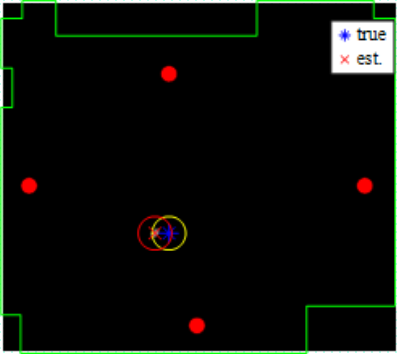
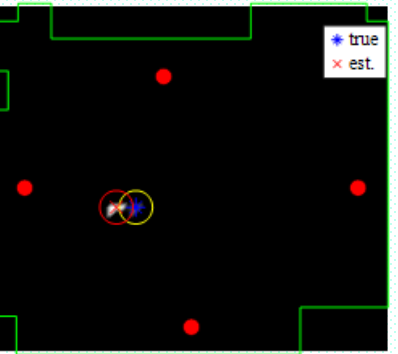
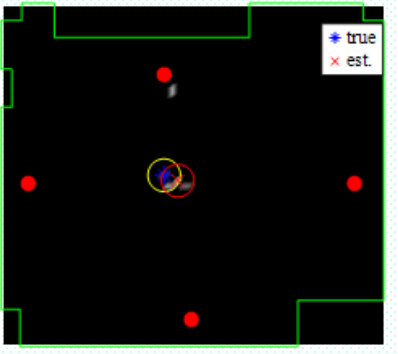
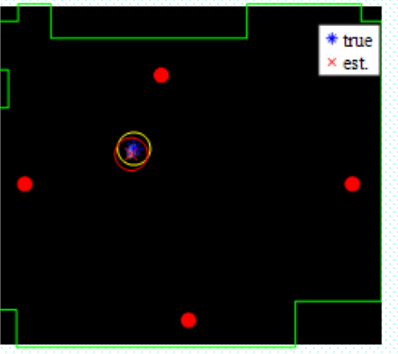
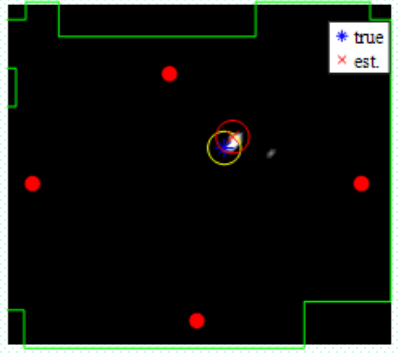
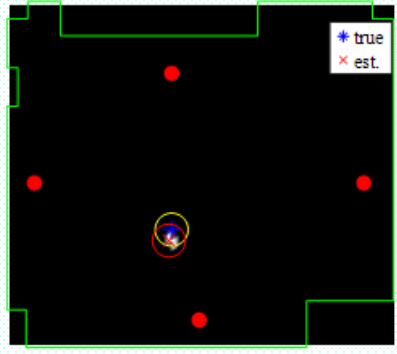
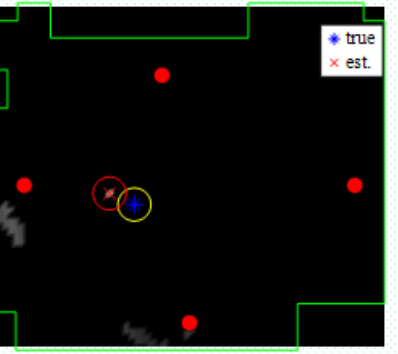
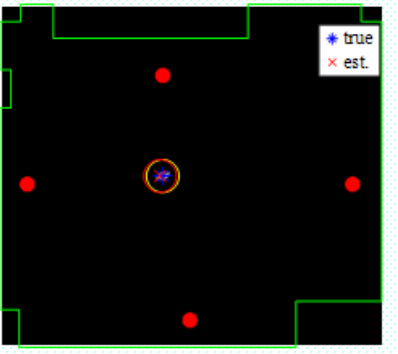
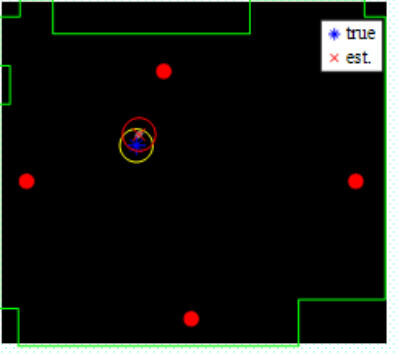
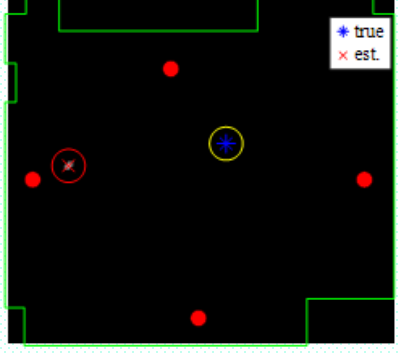
測定のセットアップ

50

- 4 nodes; 6 links

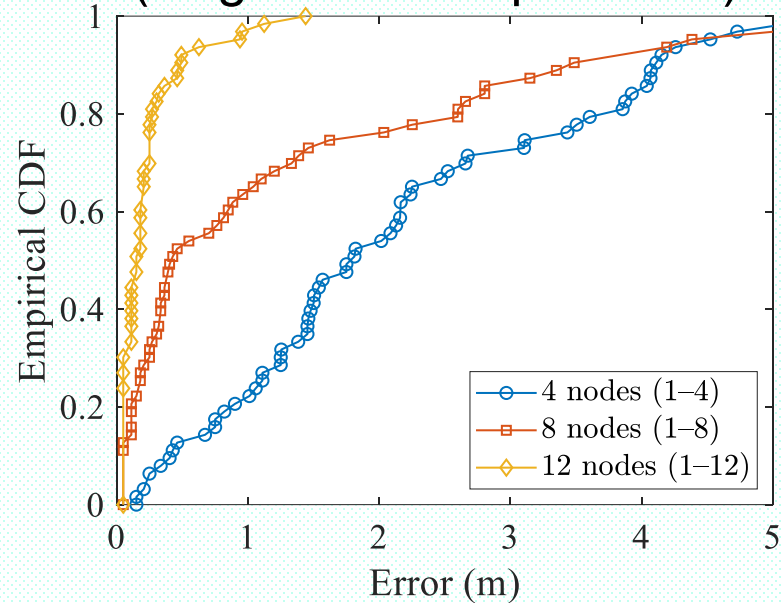


✱ true
✕ est.

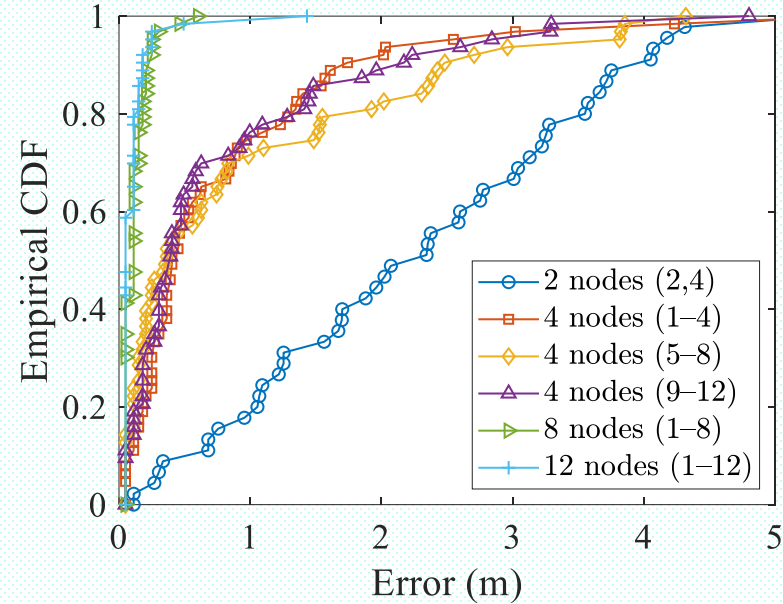
	Pos. #2	Pos. #6	Pos. #12	Pos. #16	Pos. #19
Simulation					
Measurement					

■ シミュレーション結果

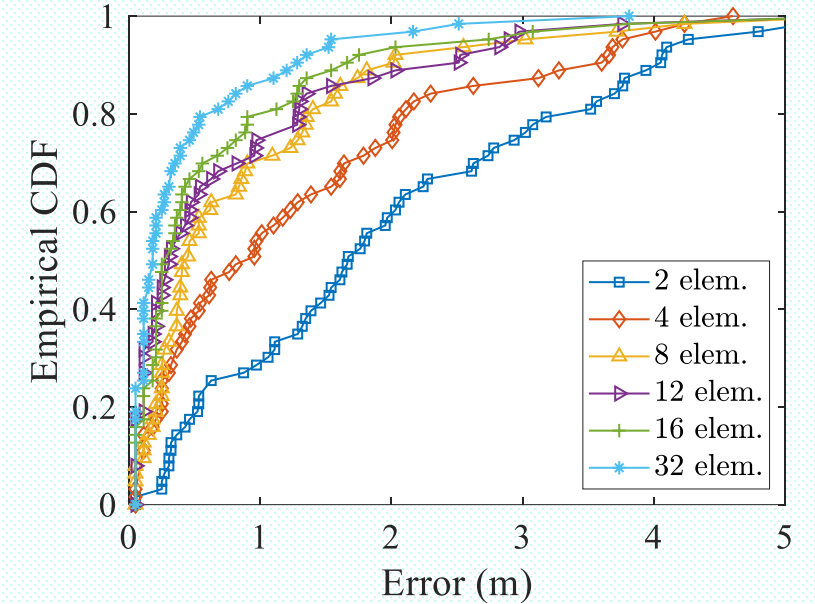
(a) Number of nodes
(single antenna per node)



(b) Number of nodes
(eight elements per node)

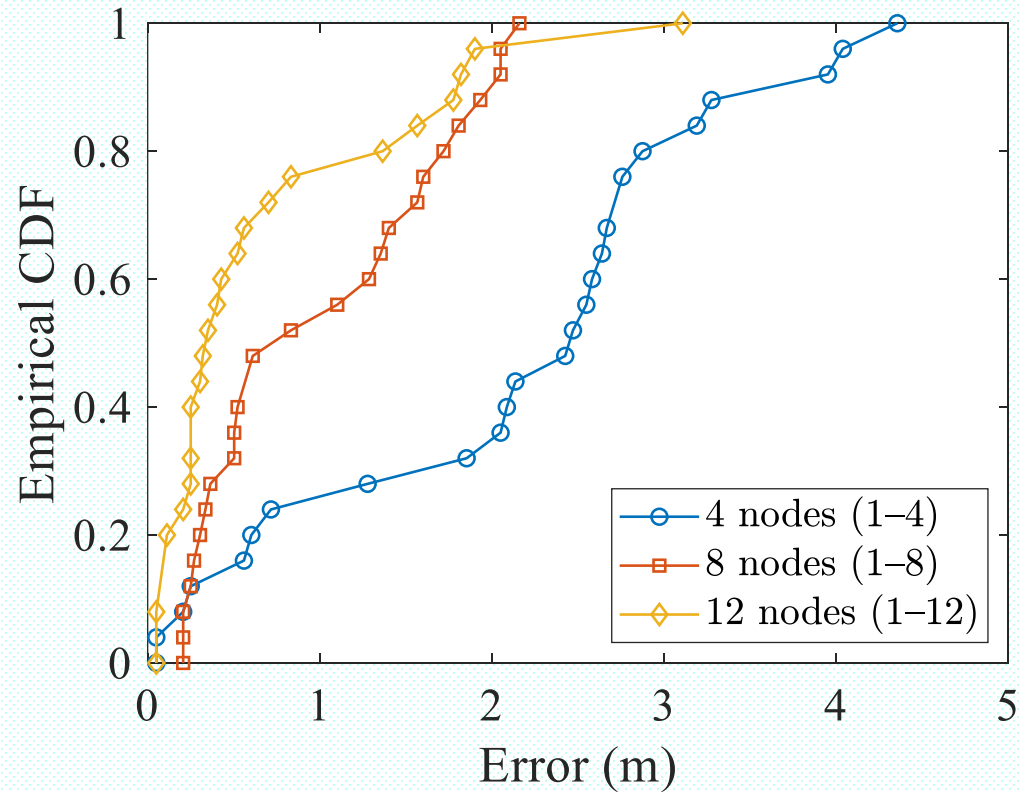


(c) Size of antenna array
(four nodes)

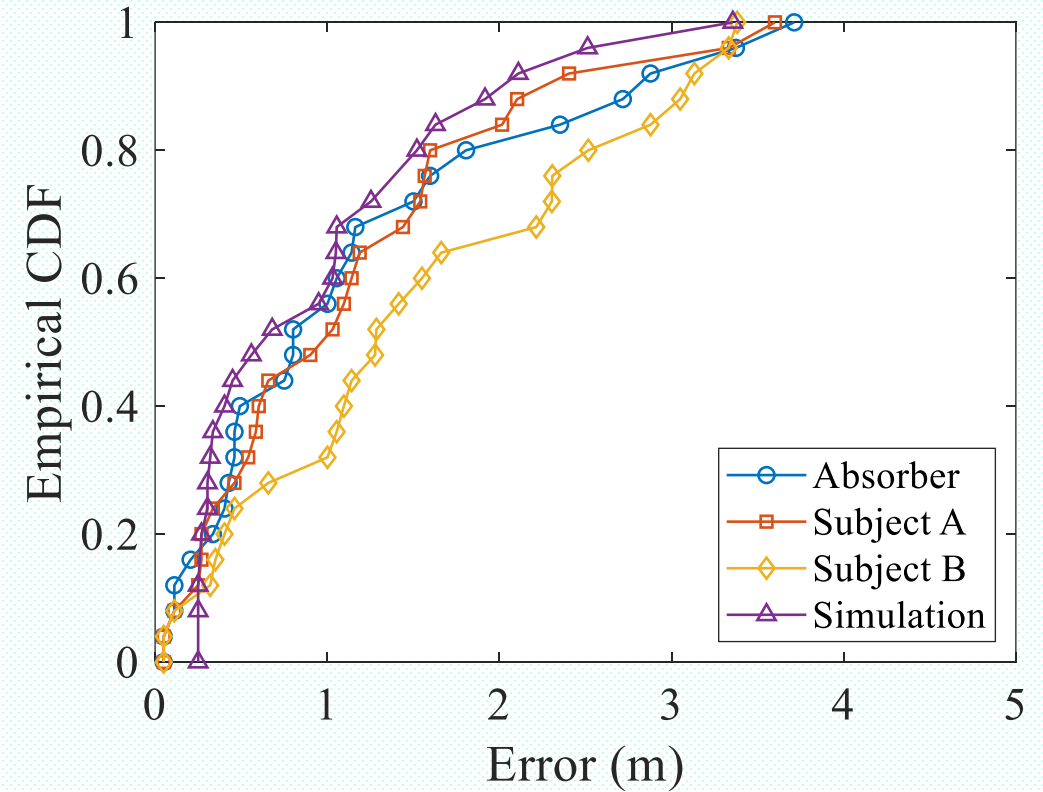


■ 測定結果

(a) Number of nodes (single antenna per node); the subject is absorber.



(b) Different targets (four nodes with eight antennas per node).



- 提案手法: multipath-RTI法によるDFL
 - Sub-6 GHz帯のSDRプラットフォーム上で実装
 - アンテナ切り替えMIMOチャネルサウンディング系により検証
- 評価結果
 - サブメートル級の測位精度を達成
 - ノード数／MPC数の増加により性能が向上
 - 人体依存のシャドウイングが結果に影響
- 今後の展望
 - 高精度な同期および伝搬経路情報が必要
 - 6GネイティブなDAN／セルフフリーISACシステムとの親和性