2022年 電子情報通信学会 6月 NS 研究会

[招待講演] 情報鮮度 Age of Information の基礎理論と情報通信システムへの応用

井上 文彰

大阪大学大学院 工学研究科
電気電子情報通信工学専攻

リアルタイム情報共有システム

- 従来の通信システムのイメージ: 情報を伝達するための土管

リアルタイム情報共有システム

- 従来の通信システムのイメージ: 情報を伝達するための土管

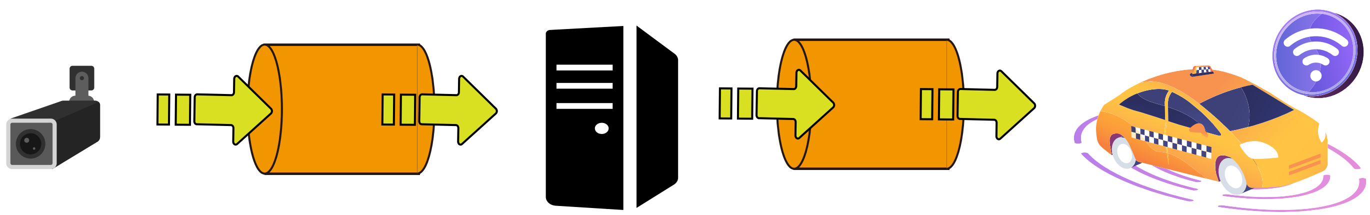
- 近年の通信システムの主要な役割: **リアルタイム情報共有**

◆ 複数の端末間において
最新の情報を共有

◆ 情報のリアルタイム性が重要

モニタリングシステム

- リアルタイム情報共有における片方向に注目



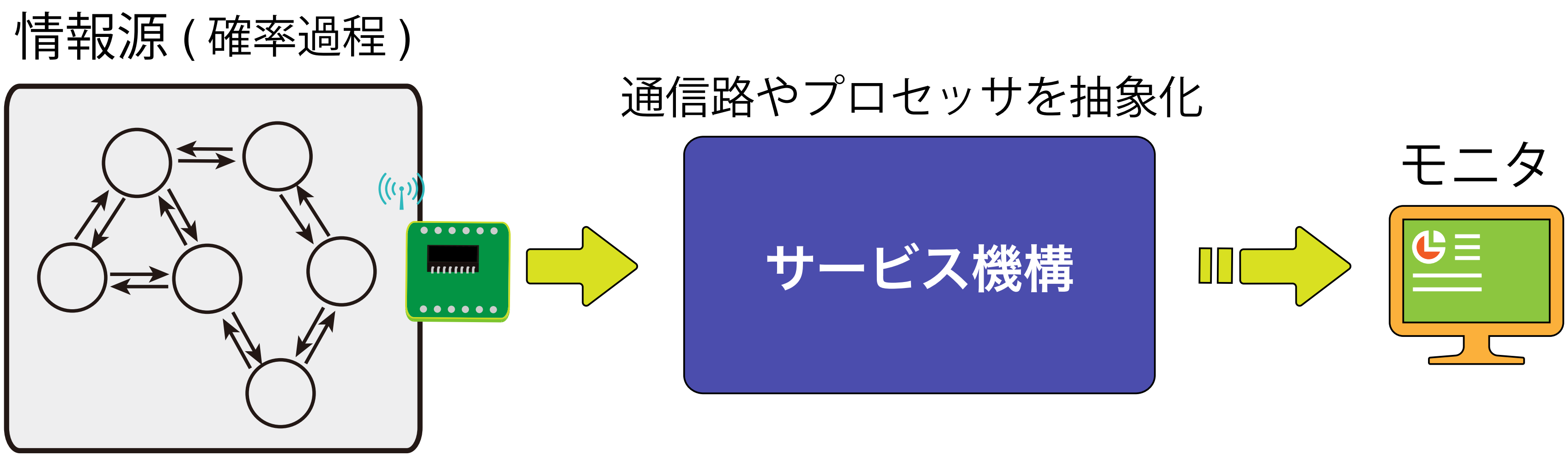
  - 受信側 (モニタ) は送信側の状態情報をリアルタイムに取得
  - リアルタイム性を左右する主要な要素
    - 通信・処理遅延時間, **データ送信頻度**

- システム性能評価において，この枠組みを明示的に取り入れたい

➡ 情報更新システムとしてのモデル化 (次ページ)

情報更新システムモデル

- 時間変化する情報源の状態をリアルタイムに監視



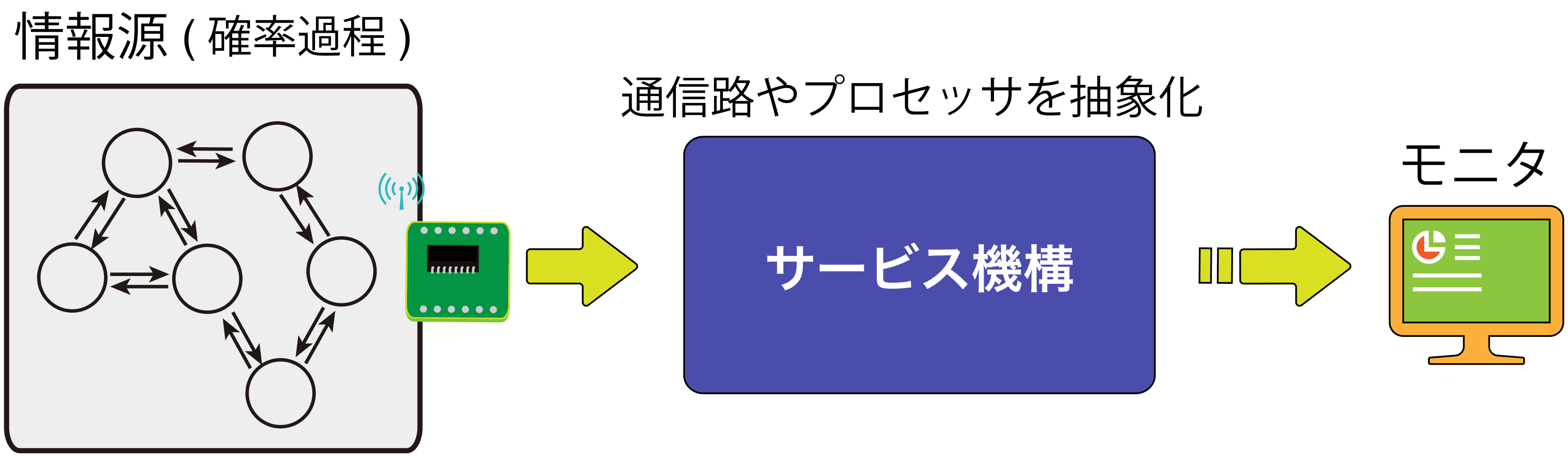
◆ モニタは受信した最新情報を表示

(例) 自動運転車ネットワーク，IoT センサネットワーク，

産業用ロボット，気象レーダシステム，クラウドゲーム など

情報更新システムモデル

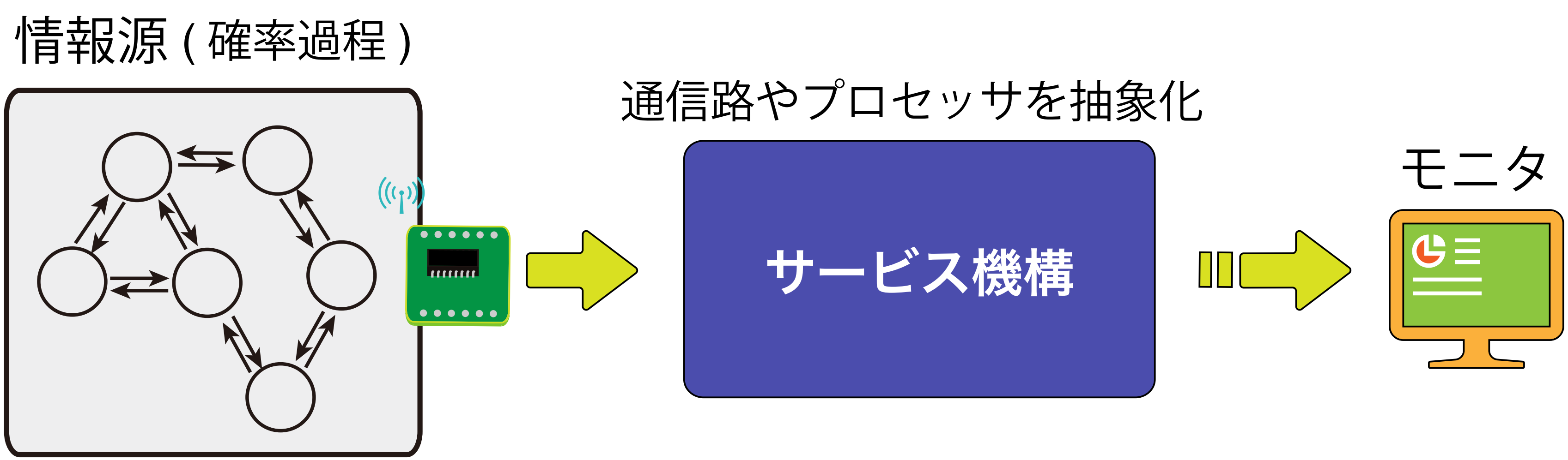
- 時間変化する情報源の状態をリアルタイムに監視



- 表示中の情報は時間経過とともに古くなる
  - 適切な頻度で情報を更新することが不可欠

情報更新システムモデル

- 時間変化する情報源の状態をリアルタイムに監視



- 表示中の情報は時間経過とともに古くなる
  - 適切な頻度で情報を更新することが不可欠

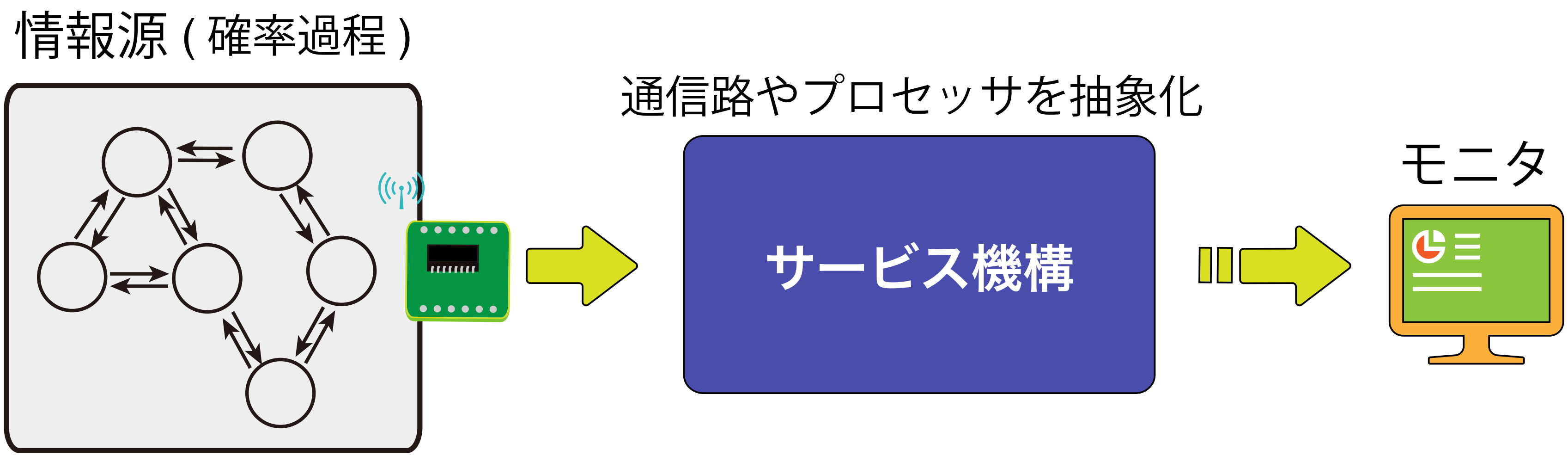
➡ **通常の遅延時間の概念では，この観点をカバーできない**

Age of Information (AoI)

- Age of Information (AoI)[1,2]
  - モニタ表示の情報鮮度を定量化する指標

[1] S. Kaul et al. *Proc. of IEEE SECON 2011*, 2011.

[2] S. Kaul et al. *Proc. of IEEE INFOCOM 2012*, 2012.

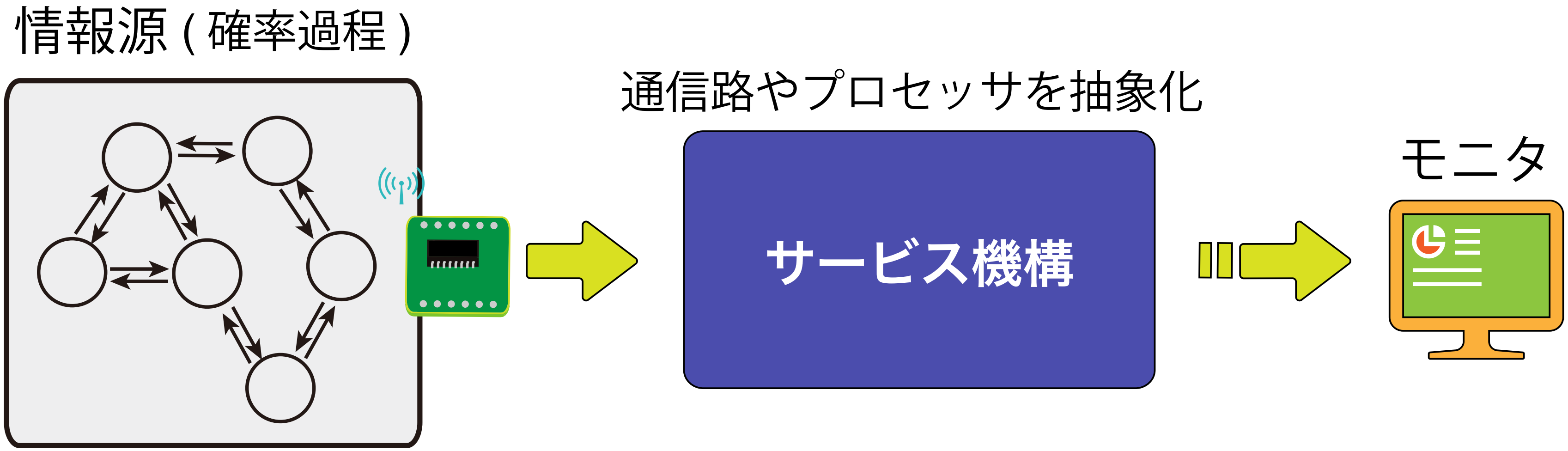


Age of Information (AoI)

- Age of Information (AoI)[1,2]
  - モニタ表示の情報鮮度を定量化する指標
- 時刻 t における AoI A_t は次式で定義される

$$A_t := t - \eta_t, \quad t \in \mathbb{R}$$

η_t: 時刻 t においてモニタに表示中の情報のタイムスタンプ



Age of Information (AoI)

- Age of Information (AoI)[1,2]
  - モニタ表示の情報鮮度を定量化する指標
- 時刻 t における AoI A_t は次式で定義される

$$A_t := t - \eta_t, \quad t \in \mathbb{R}$$

η_t: 時刻 t においてモニタに表示中の情報のタイムスタンプ

言い換えると,

$\eta_t = t - A_t$ ➡ 時刻 t に表示中の情報は時間 A_t だけ古い

Age of Information (AoI)

- Age of Information (AoI)[1,2]
  - モニタ表示の情報鮮度を定量化する指標
- 時刻 t における AoI A_t は次式で定義される

$$A_t := t - \eta_t, \quad t \in \mathbb{R}$$

η_t: 時刻 t においてモニタに表示中の情報のタイムスタンプ

言い換えると,

$\eta_t = t - A_t$ ➡ 時刻 t に表示中の情報は**時間 A_t だけ古い**

- 近年，AoI に関する研究が非常に活発化

参考: Yin Sun, The Ongoing History of the Age of Information
`http://webhome.auburn.edu/~yzs0078/AoI.html`

本講演の概要

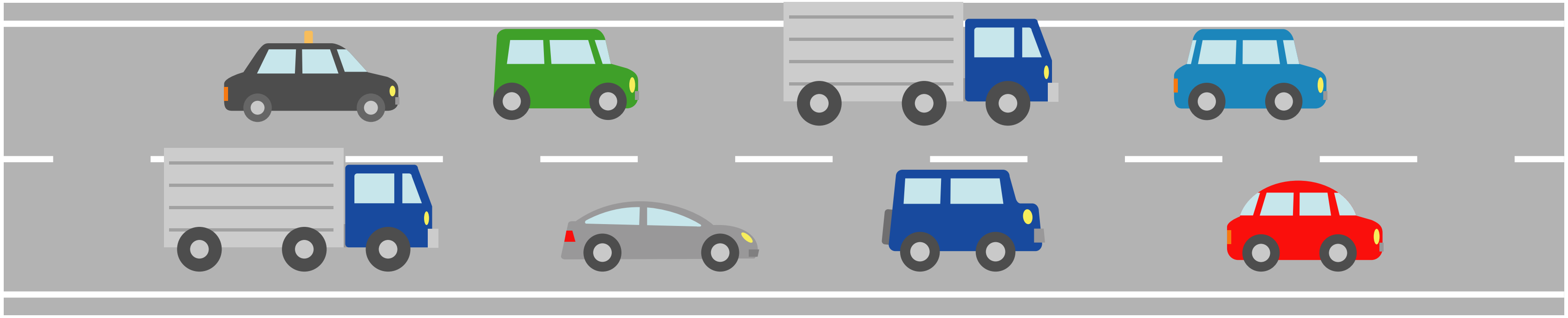
- 初めに，AoI の基本概念について説明
  - 近年の研究の「火付け役」となった研究の動機
  - AoI と従来の遅延時間との決定的な差異
- 次に，AoI の理論解析結果を簡単に紹介
  - 一般的な定式化の枠組み
  - 平均値ならびに確率分布関数の一般公式
  - 単一サーバならびに無限サーバ待ち行列モデルの解析
- 最後に，AoI に基づく情報通信システムの解析を紹介

情報鮮度 AoI の基本概念

車車間アドホックネットワーク (VANET)

近年の AoI 研究ブームの火付け役 [1]

- 走行の安全に関わる情報を車両間で共有 (ブロードキャスト)
  - 自身の位置・走行速度
  - センサやカメラで観測した情報
    - 付近の車両の位置・走行速度
    - 路面の状態



[1] S. Kaul et al., IEEE SECON 2011.

VANET における性能指標

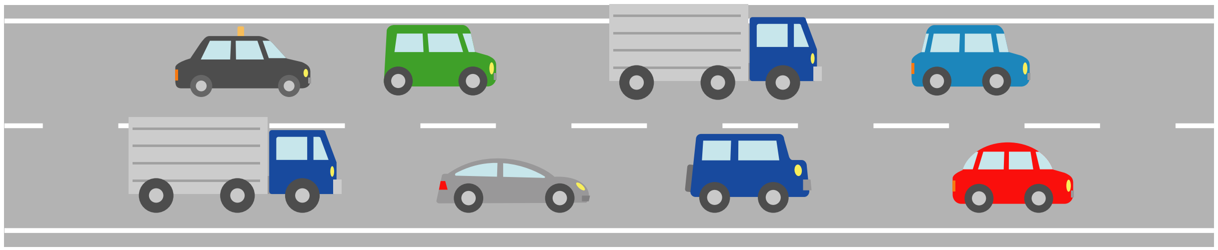
- 車両の周囲の状況は時々刻々と変化
  - 時間が経つと，すぐに情報の価値が無くなる

➡ スループットや遅延時間は適切な性能指標とは言えない

- 情報の鮮度 (AoI) を性能指標として利用 [1]

  車両 i から見た，車両 j の AoI $= t - T_{i,j}$ (t: 現時刻)

  - $T_{i,j}$: i が j から最後に受け取った情報のタイムスタンプ



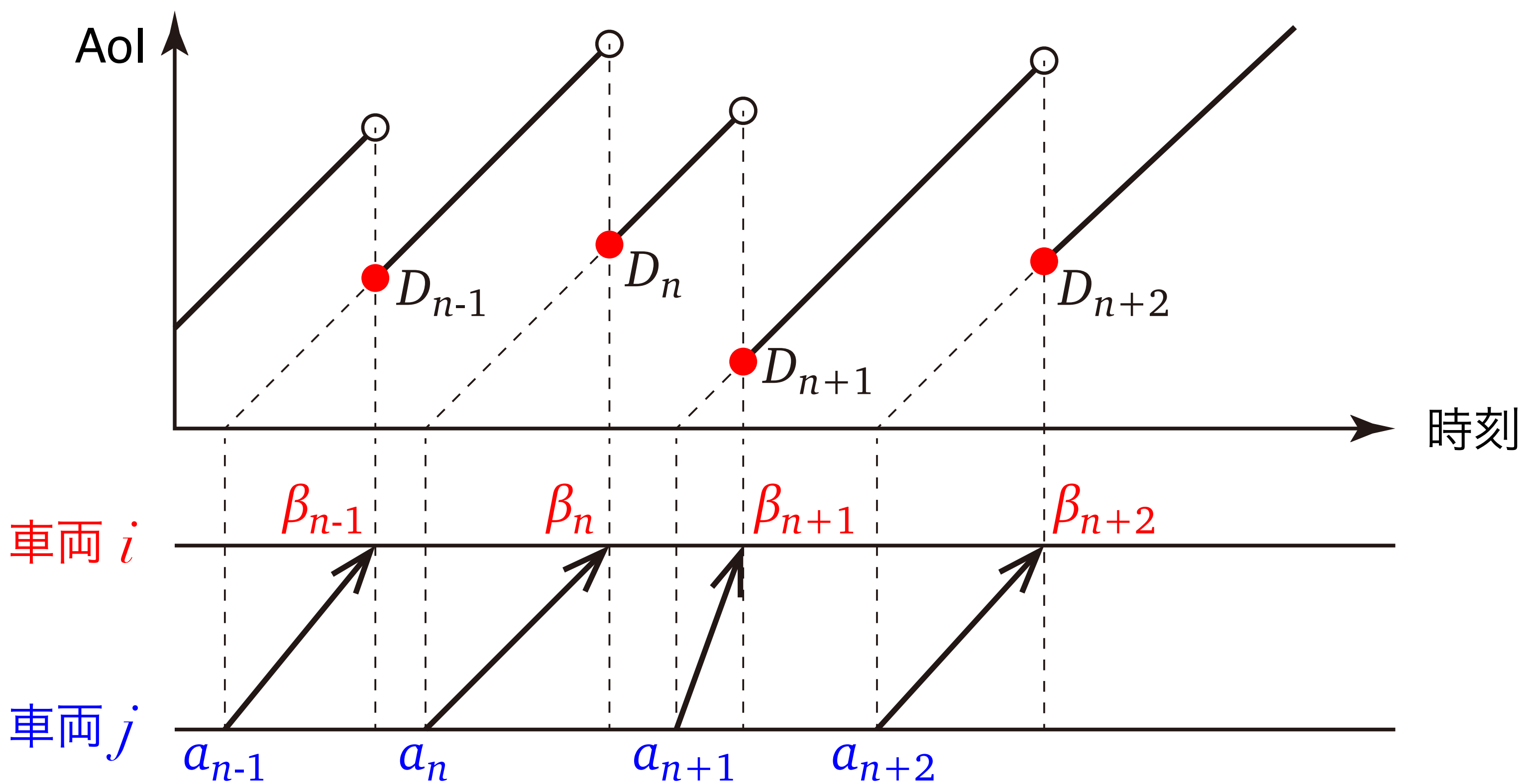
[1] S. Kaul et al., IEEE SECON 2011.

AoI の標本路

特定の車両の組 (i, j) に注目

- α_n: n 番目の更新情報の生成時刻
- β_n: n 番目の更新情報の受信時刻

$D_n := \beta_n - \alpha_n$
n 番目の遅延時間

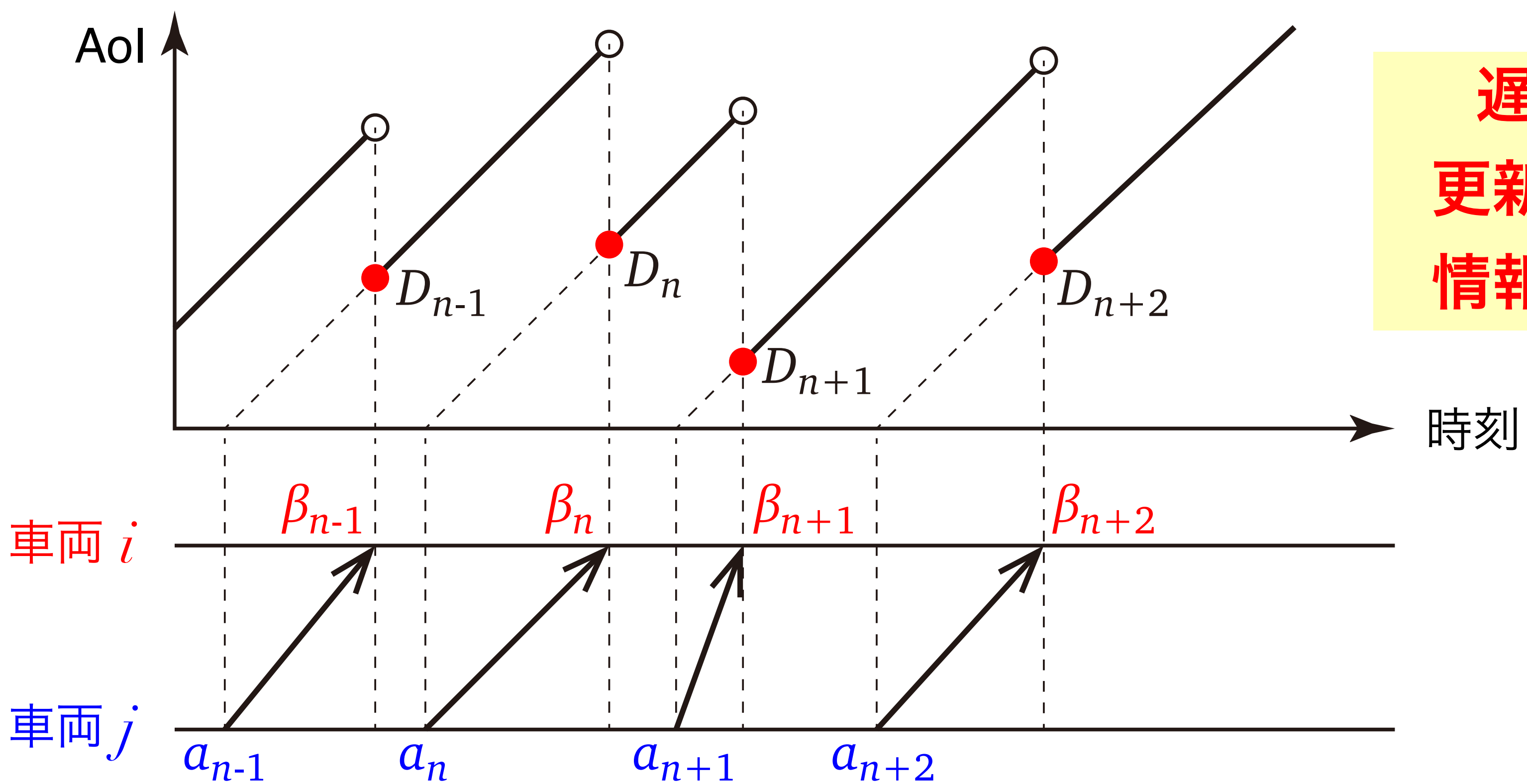


AoI の標本路

特定の車両の組 $(i,\ j)$ に注目

- α_n: n 番目の更新情報の生成時刻
- β_n: n 番目の更新情報の受信時刻

$D_n := \beta_n - \alpha_n$
n 番目の遅延時間



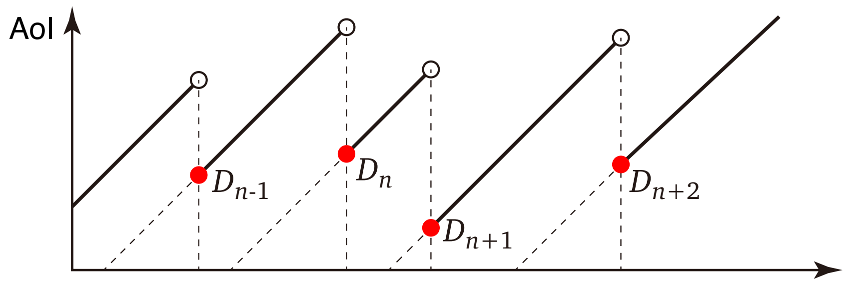
遅延時間 D_n は更新直後における情報鮮度を表す！

性能評価指標

AoI は連続時間過程であるため，性能評価には集約値を用いる

- 平均 AoI $\mathrm{E}[A]$

$$\mathrm{E}[A] = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T A_t \mathrm{d}t$$



- 非線形 AoI コスト $\mathrm{E}[C(A)]$

$$\mathrm{E}[C(A)] = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T C(A_t)\mathrm{d}t$$

- AoI の確率分布 $F_A(\cdot)$　　**上記の指標を包含**

$$F_A(x) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T \mathbb{1}\{A_t \le x\}\,\mathrm{d}t, \quad x \ge 0$$

AoI の定式化と理論的解析

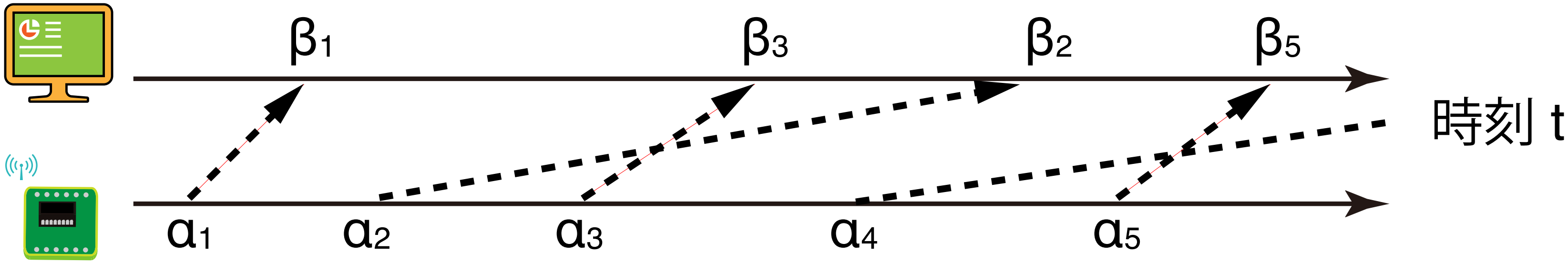
AoI に対する一般的な定式化 (1)

G_n: センサにおける $n-1$ 番目と n 番目の更新情報の生成間隔

D_n: n 番目の更新情報のシステム遅延

- n 番目の更新情報は時刻 $t = \alpha_n$ に生成され，$t = \beta_n$ に受信される

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + G_n, \qquad \beta_n = \alpha_n + D_n$$



AoI に対する一般的な定式化 (1)

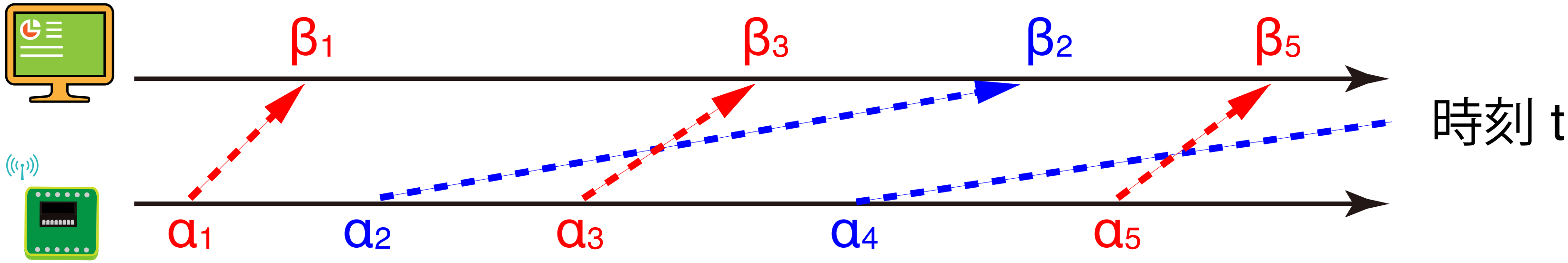
G_n: センサにおける $n-1$ 番目と n 番目の更新情報の生成間隔

D_n: n 番目の更新情報のシステム遅延

- n 番目の更新情報は時刻 $t = \alpha_n$ に生成され，$t = \beta_n$ に受信される

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + G_n, \qquad \beta_n = \alpha_n + D_n$$

- 追い抜かれた更新情報は受信時に破棄
  - 追い抜かれなかった更新情報は有効であると言う



AoI に対する一般的な定式化 (1)

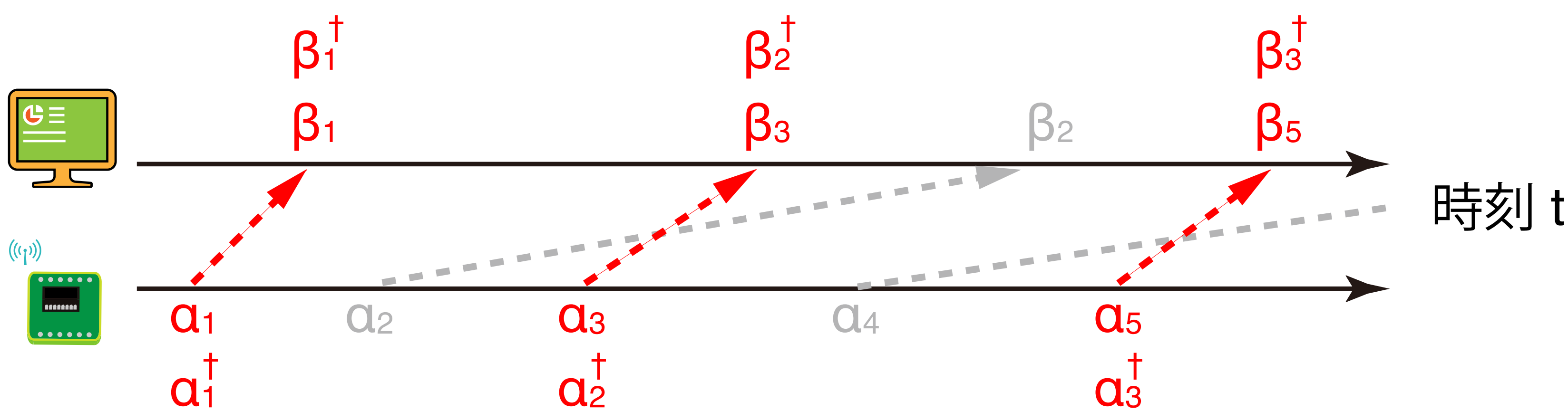
G_n: センサにおける $n-1$ 番目と n 番目の更新情報の生成間隔

D_n: n 番目の更新情報のシステム遅延

- n 番目の更新情報は時刻 $t = \alpha_n$ に生成され，$t = \beta_n$ に受信される

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + G_n, \qquad \beta_n = \alpha_n + D_n$$

- 追い抜かれた更新情報は受信時に破棄
  - 追い抜かれなかった更新情報は有効であると言う



AoI に対する一般的な定式化 (1)

G_n: センサにおける $n-1$ 番目と n 番目の更新情報の生成間隔

D_n: n 番目の更新情報のシステム遅延

- n 番目の更新情報は時刻 $t=\alpha_n$ に生成され，$t=\beta_n$ に受信される

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + G_n, \qquad \beta_n = \alpha_n + D_n$$

- 追い抜かれた更新情報は受信時に破棄
  - 追い抜かれなかった更新情報は有効であると言う

- AoI 過程は有効な更新情報に関する系列で完全に特徴づけられる

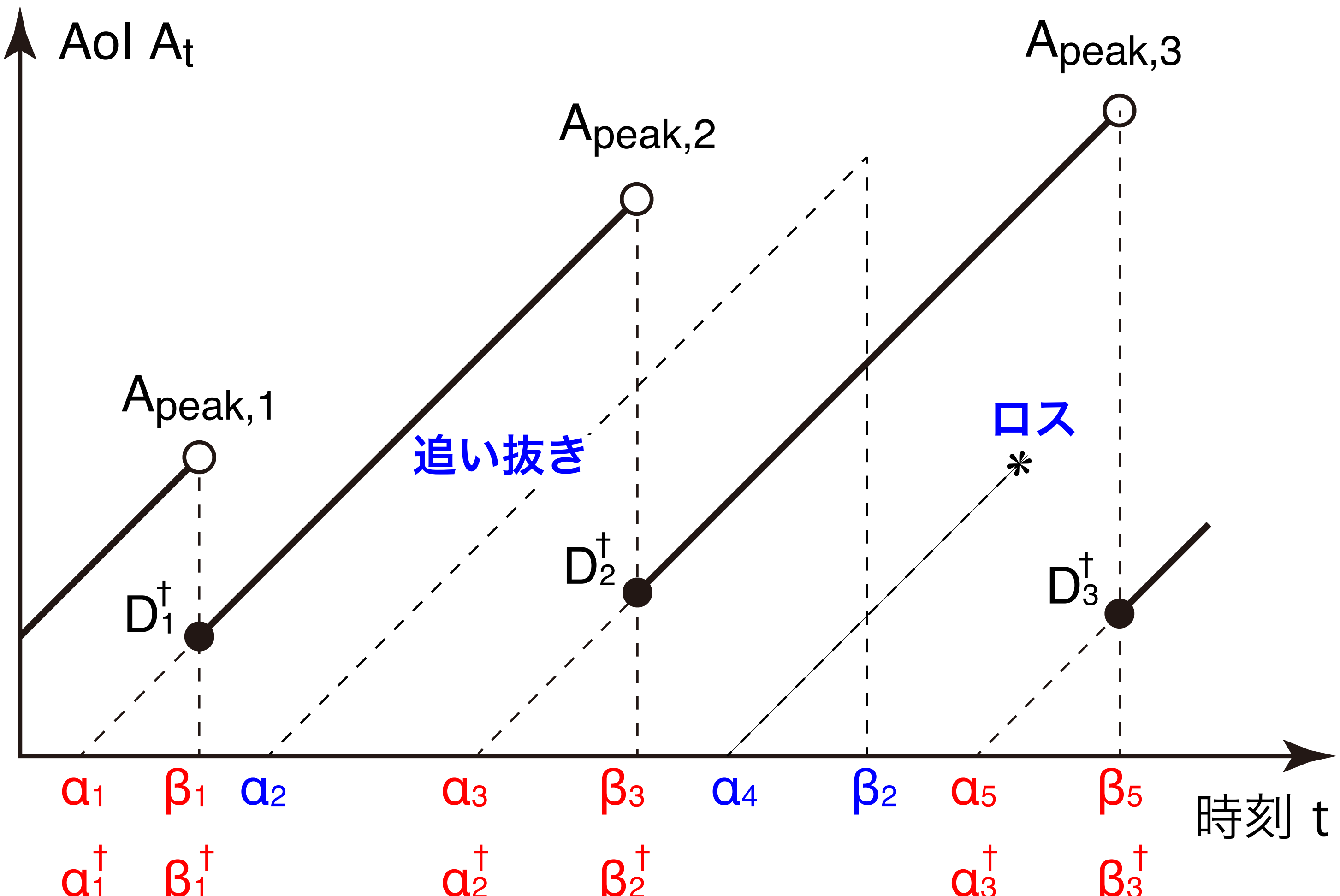
生成時刻: $(\alpha_\ell^\dagger)_{\ell\in\mathbb{Z}} := (\alpha_n)_{n\in I}$ 　受信時刻: $(\beta_\ell^\dagger)_{\ell\in\mathbb{Z}} := (\beta_n)_{n\in I}$

  - 有効な更新情報の集合 $I := \{n;\, \beta_n < \min\{\beta_{n+1}, \beta_{n+2}, \ldots\}\}$

AoI に対する一般的な定式化 (2)

- 時刻 $t \in \mathbb{R}$ における AoI A_t は次式で与えられる

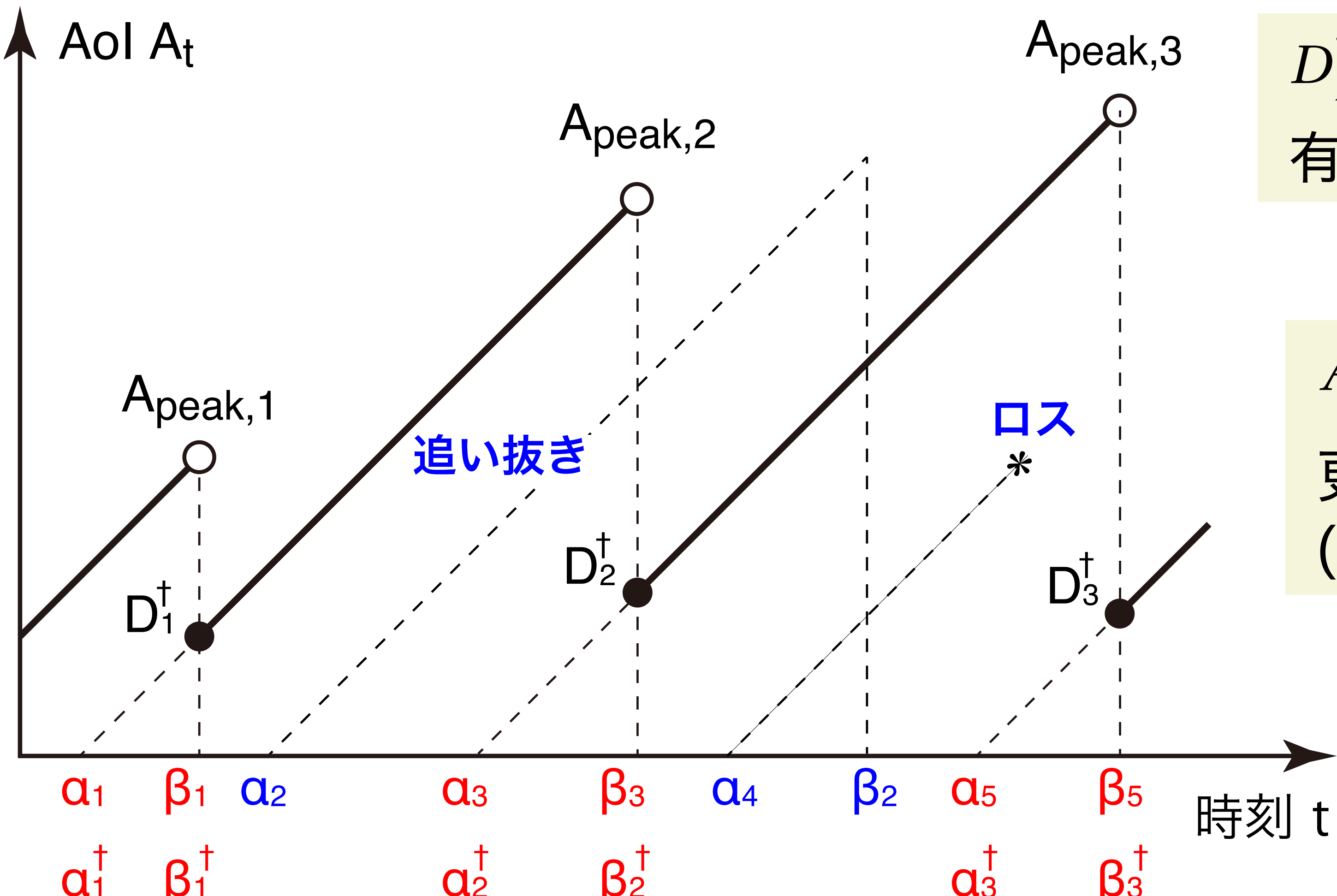
$$A_t = t - \alpha^\dagger_\ell, \quad \text{for } t \in [\beta^\dagger_\ell, \beta^\dagger_{\ell+1}), \quad \ell \in \mathbb{Z}$$



AoI に対する一般的な定式化 (2)

- 時刻 $t \in \mathbb{R}$ における AoI A_t は次式で与えられる

$$A_t = t - \alpha^\dagger_\ell, \quad \text{for } t \in [\beta^\dagger_\ell, \beta^\dagger_{\ell+1}), \quad \ell \in \mathbb{Z}$$



$D^\dagger_\ell := \beta^\dagger_\ell - \alpha^\dagger_\ell$

有効な更新の遅延時間

$A^\dagger_{\text{peak},\ell} := \beta^\dagger_{\ell+1} - \alpha^\dagger_\ell$

更新直前の AoI
(ピーク AoI)

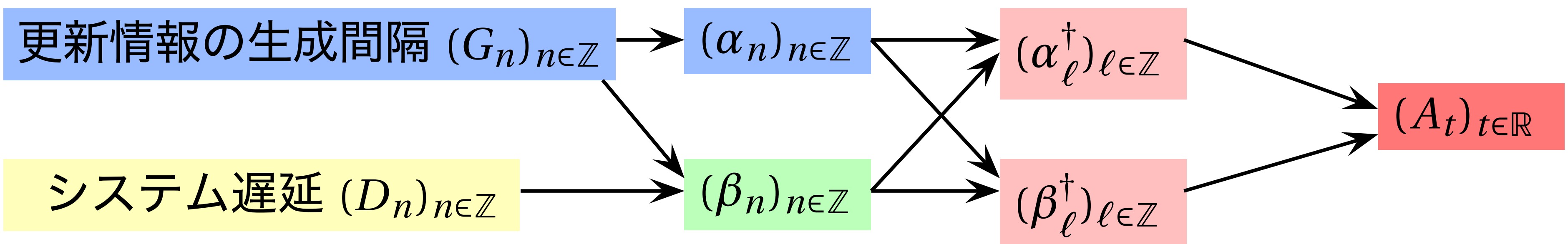
AoI に対する一般的な定式化 (3)

$\alpha^\dagger_\ell$: ℓ 番目の有効な更新情報の生成時刻

$\beta^\dagger_\ell$: ℓ 番目の有効な更新情報の受信時刻

- 時刻 $t \in \mathbb{R}$ における AoI A_t は次式で与えられる

$$A_t = t - \alpha^\dagger_\ell, \quad \text{for } t \in [\beta^\dagger_\ell, \beta^\dagger_{\ell+1}), \quad \ell \in \mathbb{Z}$$



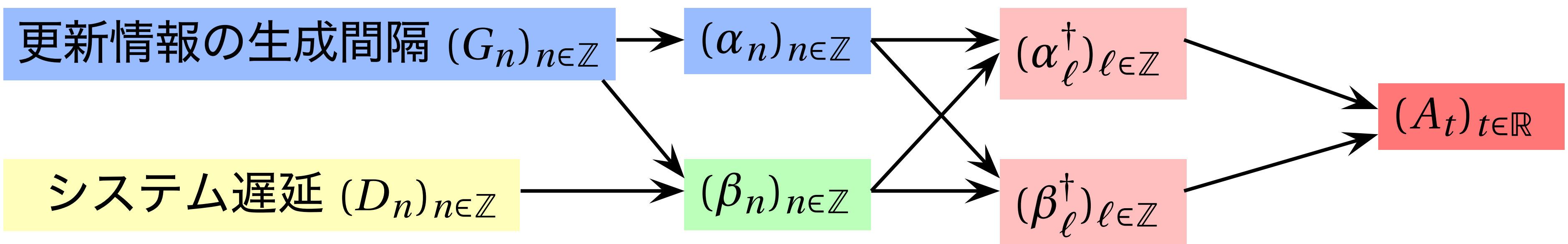
AoI に対する一般的な定式化 (3)

$\alpha_\ell^\dagger$: ℓ 番目の有効な更新情報の生成時刻

$\beta_\ell^\dagger$: ℓ 番目の有効な更新情報の受信時刻

- 時刻 $t \in \mathbb{R}$ における AoI A_t は次式で与えられる

$$A_t = t - \alpha_\ell^\dagger, \quad \text{for } t \in [\beta_\ell^\dagger, \beta_{\ell+1}^\dagger), \quad \ell \in \mathbb{Z}$$



AoI 研究における主要な問題設定 (のひとつ)

$(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ と $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ の従う確率法則が与えられた下で,
AoI 過程の時間平均値や確率分布を特徴づける

AoI の一般公式

有効な更新情報の生成間隔と遅延時間

$$G_\ell^\dagger := \alpha_\ell^\dagger - \alpha_{\ell-1}^\dagger, \qquad D_\ell^\dagger := \beta_\ell^\dagger - \alpha_\ell^\dagger$$

- 平均 AoI [2]

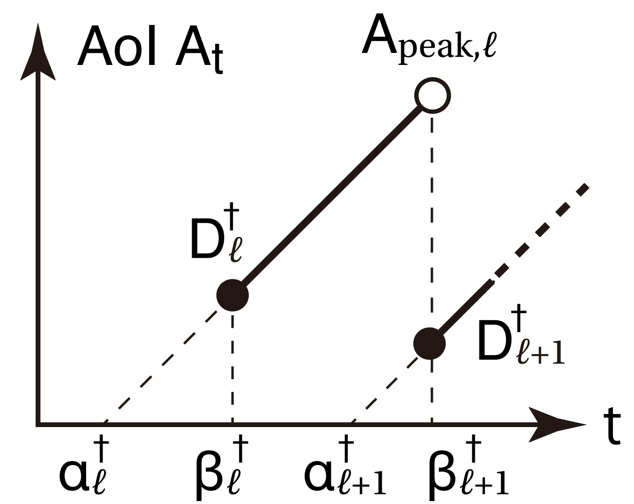
$$\mathrm{E}[A] = \frac{\mathrm{E}[G_n^\dagger D_n^\dagger] + \mathrm{E}[(G^\dagger)^2]/2}{\mathrm{E}[G^\dagger]}$$

[2] S. Kaul et al., IEEE INFOCOM 2012.

AoI の一般公式

有効な更新情報の生成間隔と遅延時間

$G_\ell^\dagger := \alpha_\ell^\dagger - \alpha_{\ell-1}^\dagger, \quad D_\ell^\dagger := \beta_\ell^\dagger - \alpha_\ell^\dagger$



- 平均 AoI [2]

$$\mathrm{E}[A] = \frac{\mathrm{E}[G_n^\dagger D_n^\dagger] + \mathrm{E}[(G^\dagger)^2]/2}{\mathrm{E}[G^\dagger]}$$

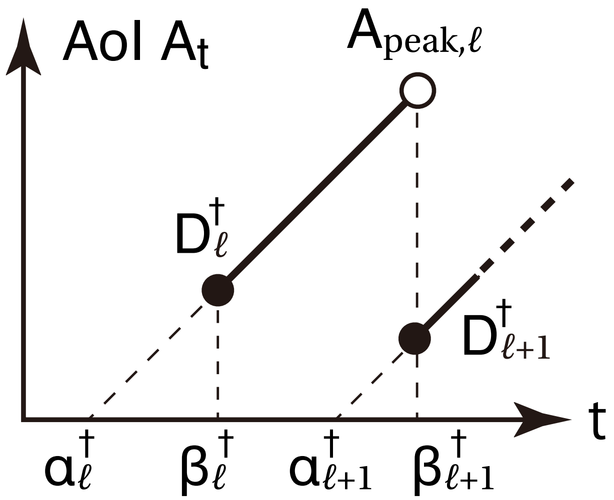
※ 上式は次と等価: $$\mathrm{E}[A] = \frac{\mathrm{E}\left[A_{\mathrm{peak}}^2\right] - \mathrm{E}[(D^\dagger)^2]}{2\mathrm{E}[G^\dagger]}$$

[2] S. Kaul et al., IEEE INFOCOM 2012.

AoI の一般公式

有効な更新情報の生成間隔と遅延時間

$G_\ell^\dagger := \alpha_\ell^\dagger - \alpha_{\ell-1}^\dagger, \quad D_\ell^\dagger := \beta_\ell^\dagger - \alpha_\ell^\dagger$



- 平均 AoI [2]

$$\mathrm{E}[A] = \frac{\mathrm{E}[G_n^\dagger D_n^\dagger] + \mathrm{E}[(G^\dagger)^2]/2}{\mathrm{E}[G^\dagger]}$$

※ 上式は次と等価: $\mathrm{E}[A] = \dfrac{\mathrm{E}\left[A_{\mathrm{peak}}^2\right] - \mathrm{E}[(D^\dagger)^2]}{2\mathrm{E}[G^\dagger]}$

- AoI の確率分布 [3]

$$F_A(x) = \frac{1}{\mathrm{E}[G^\dagger]} \int_0^x \{F_{D^\dagger}(y) - F_{A_{\mathrm{peak}}}(y)\} \mathrm{d}y, \qquad x \geq 0$$

[2] S. Kaul et al., IEEE INFOCOM 2012.

[3] Y. Inoue et al., IEEE Trans. Inf. Theory 2019.

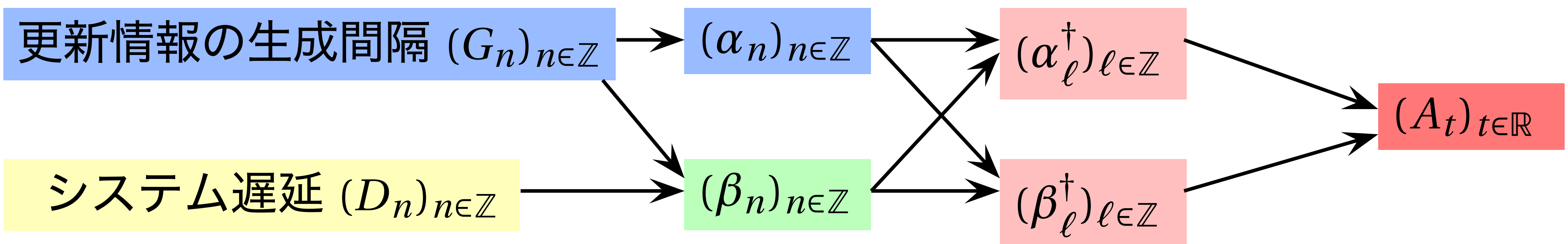
(再掲) AoI に対する一般的な定式化

$\alpha_\ell^\dagger$: ℓ 番目の有効な更新情報の生成時刻

$\beta_\ell^\dagger$: ℓ 番目の有効な更新情報の受信時刻

- 時刻 $t \in \mathbb{R}$ における AoI A_t は次式で与えられる

$$A_t = t - \alpha_\ell^\dagger, \quad \text{for } t \in [\beta_\ell^\dagger, \beta_{\ell+1}^\dagger), \quad \ell \in \mathbb{Z}$$



AoI 研究における主要な問題設定 (のひとつ)

$(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ と $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ の従う確率法則が与えられた下で, AoI 過程の時間平均値や確率分布を特徴づける

AoI 解析と待ち行列モデル

- $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は通常，i.i.d. 確率変数列をなすと仮定される

  例 1) $G_n = \text{const.}$　　等間隔サンプリング

  例 2) $G_n \sim \mathrm{EXP}(\lambda)$　　ポワソンランダムサンプリング

AoI 解析と待ち行列モデル

- $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は通常，i.i.d. 確率変数列をなすと仮定される
- システム遅延 $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ に対するモデル化の枠組み
  - 単一サーバ待ち行列モデル
    - 資源競合を定式化
    - D_n = [サービス時間 H_n] + [待ち行列遅延 W_n]
    - $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ を小さくすると $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ が大きくなる

AoI 解析と待ち行列モデル

- $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は通常，i.i.d. 確率変数列をなすと仮定される
- システム遅延 $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ に対するモデル化の枠組み
  - 単一サーバ待ち行列モデル
    - 資源競合を定式化
    - D_n = [サービス時間 H_n] + [待ち行列遅延 W_n]
    - $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ を小さくすると $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ が大きくなる
  - $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ とは独立に i.i.d.
    - 複数経路のあるネットワークやサーバクラスタのモデル
    - 無限サーバ待ち行列と等価

      D_n = [サービス時間 H_n]

AoI 解析と待ち行列モデル

- $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は通常，i.i.d. 確率変数列をなすと仮定される
- システム遅延 $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ に対するモデル化の枠組み
  - 単一サーバ待ち行列モデル
    - 資源競合を定式化
    - D_n = [サービス時間 H_n] + [待ち行列遅延 W_n]
    - $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ を小さくすると $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ が大きくなる
  - $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ とは独立に i.i.d.
    - 複数経路のあるネットワークやサーバクラスタのモデル
    - 無限サーバ待ち行列と等価

      D_n = [サービス時間 H_n]

単一サーバ待ち行列における AoI (1)

基本的な 3 種類のモデルにおける平均 AoI $\mathrm{E}[A]$[2]

(M/M/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 指数分布

(M/D/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 一定時間

(D/M/1) サンプリング間隔: 一定間隔,　サービス時間: 指数分布

[2] S. Kaul et al., IEEE INFOCOM 2012.

単一サーバ待ち行列における AoI (1)

基本的な 3 種類のモデルにおける平均 AoI $\mathrm{E}[A]$[2]

(M/M/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 指数分布

$$\mathrm{E}[A] = \left(1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1-\rho}\right)\mathrm{E}[H]$$

$\mathrm{E}[H]$: 平均サービス時間,　ρ: トラヒック強度 ($= \mathrm{E}[H]/\mathrm{E}[G]$)

(M/D/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 一定時間

(D/M/1) サンプリング間隔: 一定間隔,　サービス時間: 指数分布

[2] S. Kaul et al., IEEE INFOCOM 2012.

単一サーバ待ち行列における AoI (1)

基本的な 3 種類のモデルにおける平均 AoI $\mathrm{E}[A]$[2]

(M/M/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 指数分布

(M/D/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 一定時間

$$\mathrm{E}[A] = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2(1-\rho)} + \frac{1-\rho}{\rho e^{-\rho}}\right)\mathrm{E}[H]$$

$\mathrm{E}[H]$: 平均サービス時間,　ρ: トラヒック強度 ($= \mathrm{E}[H]/\mathrm{E}[G]$)

※ 上記の陽形式解は [Y. Inoue et al., IEEE ISIT 2017] による

(D/M/1) サンプリング間隔: 一定間隔,　サービス時間: 指数分布

[2] S. Kaul et al., IEEE INFOCOM 2012.

単一サーバ待ち行列における AoI (1)

基本的な 3 種類のモデルにおける平均 AoI $\mathrm{E}[A]$[2]

(M/M/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 指数分布

(M/D/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 一定時間

(D/M/1) サンプリング間隔: 一定間隔,　サービス時間: 指数分布

$$\mathrm{E}[A] = \left(\frac{1}{2\rho} + \frac{1}{1-\gamma}\right)\mathrm{E}[H]$$

$\mathrm{E}[H]$: 平均サービス時間,　ρ: トラヒック強度 ($= \mathrm{E}[H]/\mathrm{E}[G]$)

γ は，方程式 $x = e^{-(1-x)/\rho}$ の $0 < x < 1$ における一意解

[2] S. Kaul et al., IEEE INFOCOM 2012.

単一サーバ待ち行列における AoI (1)

基本的な 3 種類のモデルにおける平均 AoI $\mathrm{E}[A]$[2]

(M/M/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 指数分布

$$\mathrm{E}[A] = \left(1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1-\rho}\right)\mathrm{E}[H]$$

(M/D/1) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 一定時間

$$\mathrm{E}[A] = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2(1-\rho)} + \frac{1-\rho}{\rho e^{-\rho}}\right)\mathrm{E}[H]$$

(D/M/1) サンプリング間隔: 一定間隔,　サービス時間: 指数分布

$$\mathrm{E}[A] = \left(\frac{1}{2\rho} + \frac{1}{1-\gamma}\right)\mathrm{E}[H]$$

単一サーバ待ち行列における AoI (2)

基本的な 2 種類のモデルにおける AoI 分布 $F_A(x)$ ($\mu := 1/\mathrm{E}[H]$)

(M/M/1) サンプリング間隔: 指数分布, サービス時間: 指数分布

$$F_A(x) = 1 - e^{-(1-\rho)\mu x} + \left(\frac{1}{1-\rho} + \rho\mu x\right) e^{-\mu x} - \frac{1}{1-\rho} \cdot e^{-\lambda x}$$

λ: サンプリング頻度, ρ: トラヒック強度 ($= \lambda/\mu$)

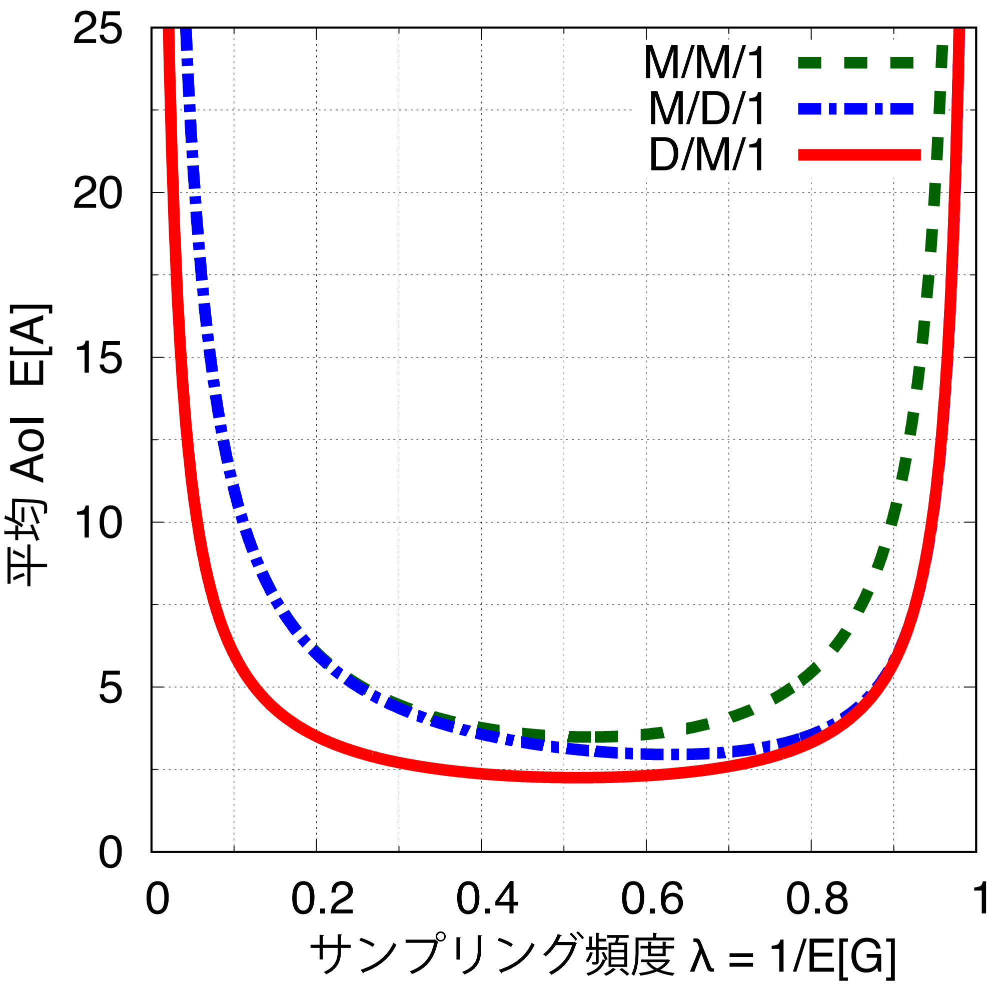
(D/M/1) サンプリング間隔: 一定間隔 τ, サービス時間: 指数分布

$$F_A(x) = \mathbb{1}\{x \le \tau\} \left\{ \frac{x}{\tau} - \frac{1 - e^{-\mu(1-\gamma)x}}{\tau\mu(1-\gamma)} \right\} + \mathbb{1}\{x > \tau\} \left\{ 1 - \frac{e^{-\mu(1-\gamma)x}}{\tau\mu\gamma} \right\}$$

γ は, 方程式 $x = e^{-\mu(1-x)\tau}$ の $0 < x < 1$ における一意解

単一サーバ待ち行列における AoI (3)

- 平均サービス時間 $\mathrm{E}[H] = 1$ とおく

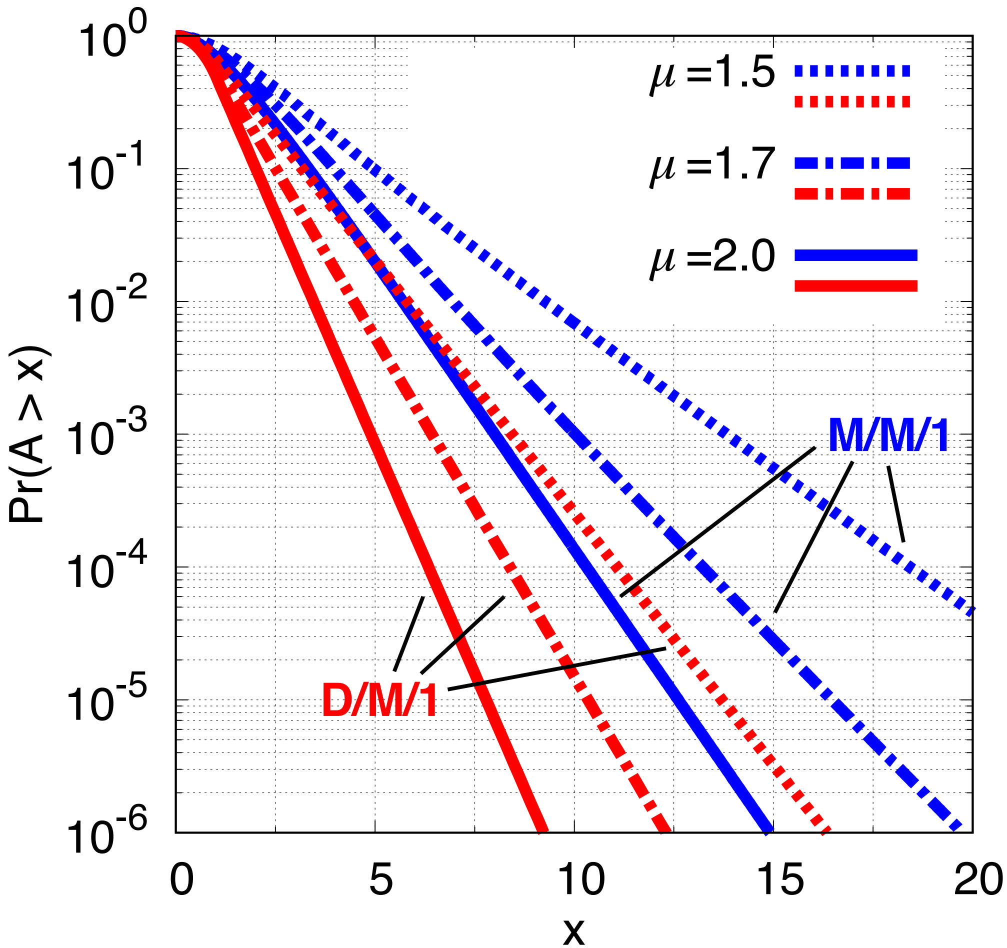


- サンプリング頻度に関して平均 AoI は U 字型の関数
  - サンプリング頻度と遅延時間のトレードオフ

また，平均 AoI の観点では
一定間隔のサンプリングが効果的

単一サーバ待ち行列における AoI (4)

- サンプリング頻度 $\lambda = 1$ とおく



AoI の 補分布関数 をプロット

確率分布の意味でも
一定間隔のサンプリングは効果的

- 輻輳を緩和する効果
- 更新間隔のばらつきを小さくする効果

(再掲) AoI 解析と待ち行列モデル

- $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は通常，i.i.d. 確率変数列をなすと仮定される
- システム遅延 $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ に対するモデル化の枠組み
  - 単一サーバ待ち行列モデル
    - 資源競合を定式化
    - D_n = [サービス時間 H_n] + [待ち行列遅延 W_n]
    - $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ を小さくすると $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ が大きくなる
  - $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ とは独立に i.i.d.
    - 複数経路のあるネットワークやサーバクラスタのモデル
    - 無限サーバ待ち行列と等価

      D_n = [サービス時間 H_n]

(再掲) AoI 解析と待ち行列モデル

- $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は通常，i.i.d. 確率変数列をなすと仮定される
- システム遅延 $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ に対するモデル化の枠組み
  - 単一サーバ待ち行列モデル
    - 資源競合を定式化
    - D_n = [サービス時間 H_n] + [待ち行列遅延 W_n]
    - $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ を小さくすると $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ が大きくなる
  - $(D_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ は $(G_n)_{n\in\mathbb{Z}}$ とは独立に i.i.d.
    - 複数経路のあるネットワークやサーバクラスタのモデル
    - 無限サーバ待ち行列と等価

$$D_n = [\text{サービス時間 } H_n]$$

無限サーバ待ち行列における AoI (1)

サービス時間は分布関数 $F_H(x)$ に従うとする

(M/GI/∞) サンプリング間隔: 指数分布,　サービス時間: 一般分布

$$F_A(x) = 1 - \exp\left(-\lambda \int_0^x F_H(y)\,\mathrm{d}y\right), \quad x \geq 0.$$

(D/GI/1) サンプリング間隔: 一定間隔 τ,　サービス時間: 一般分布

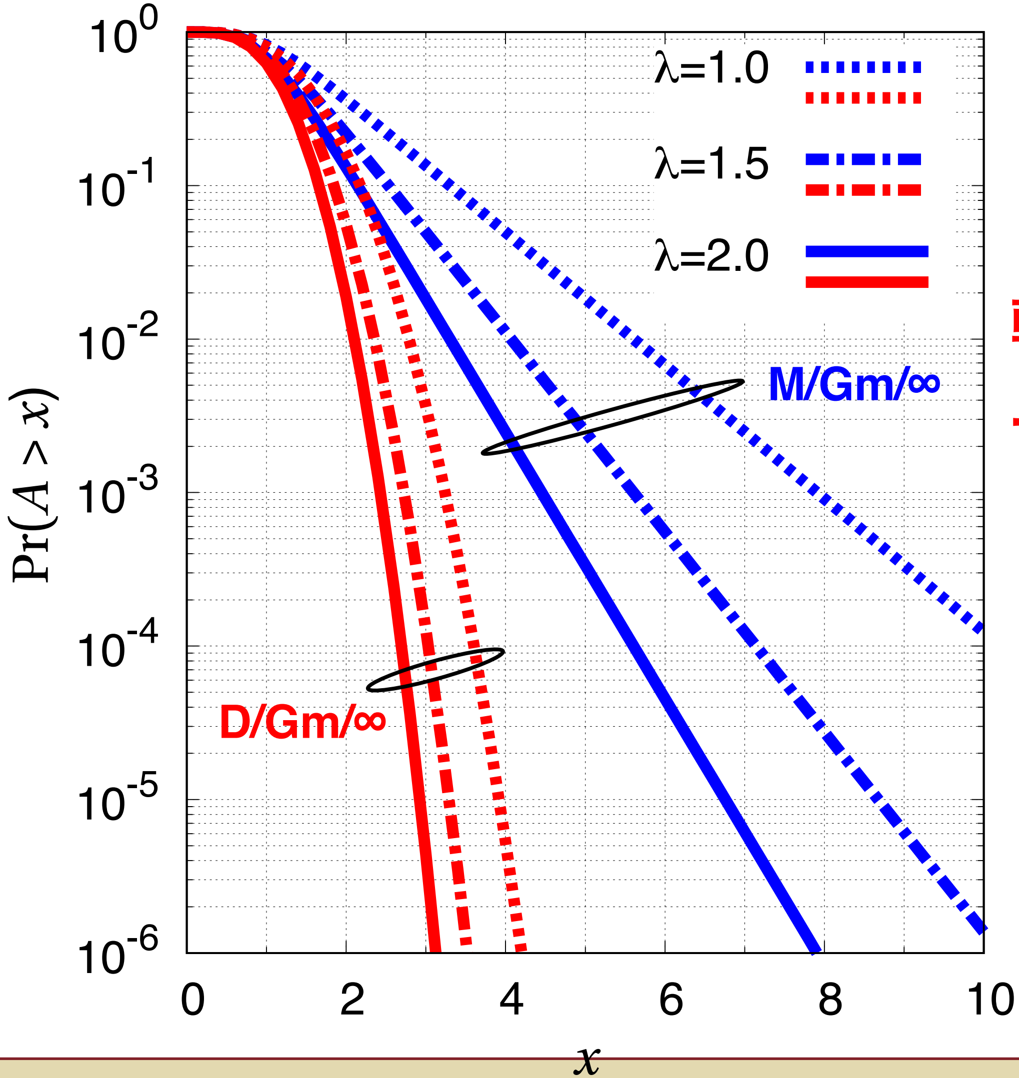
$$F_A(x) = 1 - \frac{1}{\tau}\int_{x-K\tau}^{\tau}\left(\prod_{n=0}^{K-1}\overline{F}_H(n\tau+u)\right)\mathrm{d}u - \frac{1}{\tau}\int_0^{x-K\tau}\left(\prod_{n=0}^{K}\overline{F}_H(n\tau+u)\right)\mathrm{d}u,$$

$$x \in [K\tau, (K+1)\tau),\ K = 0, 1, \ldots.$$

$$\overline{F}_H(x) := 1 - F_H(x)$$

無限サーバ待ち行列における AoI (2)

- サービス時間: 平均 1，標準偏差 0.5 のガンマ分布



AoI の補分布関数をプロット

輻輳が発生しない状況においても，
一定間隔のサンプリングは効果的

- 更新間隔のばらつきを小さくする効果
- 理論的に強力な結果を証明可能 (次ページ)

無限サーバ待ち行列における AoI (3)

以下の理論的関係を証明することができる[4]

定理.

情報生成頻度 λ ならびにサービス時間分布 $F_H(\cdot)$ が同一である D/GI/∞ および M/GI/∞ 待ち行列において次式が成り立つ.

$$E\left[\phi(A^{\mathrm{D/GI/\infty}})\right] \leq \mathrm{E}\left[\phi(A^{\mathrm{M/GI/\infty}})\right]$$

ただし, $\phi(\cdot)$ は任意の単調増加関数を表す.

$A^{\mathrm{D/GI/\infty}}$: D/GI/∞ 待ち行列の定常 AoI

$A^{\mathrm{M/GI/\infty}}$: M/GI/∞ 待ち行列の定常 AoI

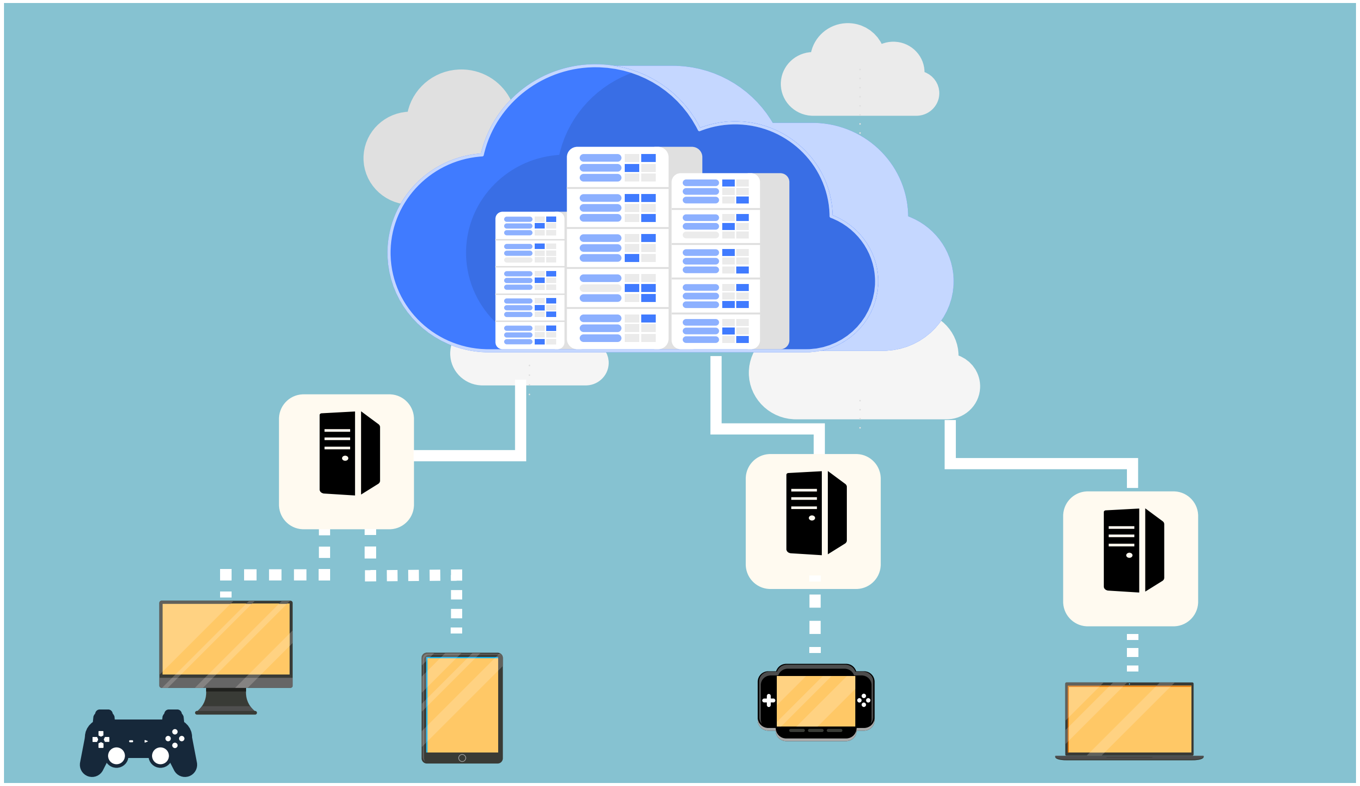
[4] Y. Inoue and T. Kimura, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 39, 2021.

情報通信システムへの応用 (1)
クラウドゲーミング

※山田耀平 (大阪大学)，滝根哲哉 (大阪大学) との共同研究に基づく

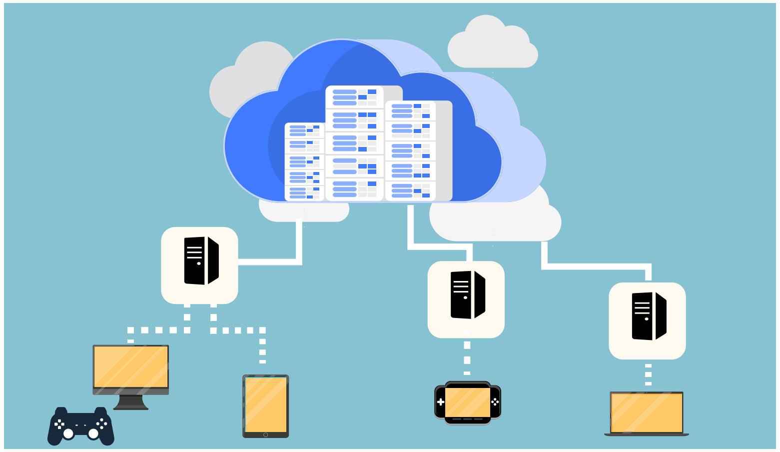
クラウドゲーミング

- 遠隔サーバ上にゲームエンジンとフレームレンダラを配置
  - クラウドサーバ: ゲーム状態の管理や演算を行う
  - エッジサーバ: 映像フレームの生成 (レンダリング) を行う



クラウドゲーミング

- 遠隔サーバ上に ゲームエンジン と フレームレンダラ を配置
  - クラウドサーバ: ゲーム状態の管理や演算を行う
  - エッジサーバ: 映像フレームの生成 (レンダリング) を行う



- 端末はユーザ入力の送信と，映像フレームの再生のみを担う
  - 非力な携帯端末で高品質なゲームをプレイ可能
  - 海賊版の発生を抑止可能

クラウドゲーミングと AoI

- サーバは所与のフレームレートで映像フレームを生成
  - 端末表示は離散的な時刻に更新される
- ゲーム演算とレンダリングを遠隔サーバで実行
  - 演算完了から端末表示への反映までに遅延が発生

➡ 結果として，最新のゲーム状態と端末表示にずれが生じる

- AoI を用いることで，端末表示のリアルタイム性を評価可能[5]
  - AoI は Quality of Experience (QoE) の主要な決定要素[6]

[5] R. Yates, et al., *Proc. of IEEE INFOCOM 2017*, 2017.
[6] S. Lindström et al., *Proc. of IEEE/ACM UCC 2020*, 2020.

クラウドゲーミングにおける AoI (1)

サーバから端末への下り通信のみに着目

- クラウドサーバ:
  時刻 $(k\tau)_{k\in\mathbb{Z}}$ に更新情報を生成　　フレームレート $1/\tau$
- エッジサーバ (レンダラ):
  - クラウドサーバから更新情報を受信　　通信遅延 H_k^{c0}
  - 受信情報をもとに映像フレームを生成　　処理遅延 H_k^{p}
  - ユーザ端末へ映像フレームを送信　　通信遅延 H_k^{c1}
- ユーザ端末:
  - 時刻 $(k\tau+\phi)_{k\in\mathbb{Z}}$ に画面を更新　　ϕ: 同期オフセット

モデル化のアプローチ

- 3 種類の遅延時間が存在
  - クラウドサーバ・レンダラ間の通信遅延 H_k^{c0}
  - レンダラの処理遅延 H_k^{p}
  - レンダラ・端末間の通信遅延 H_k^{c1}
- 先行研究[5] のモデル (無限サーバ待ち行列)
  - $H_k^{\mathrm{c0}} + H_k^{\mathrm{p}} + H_k^{\mathrm{c1}}$ が独立かつ同一に分布すると仮定
- 本研究では，レンダラの処理がボトルネックになる状況を表現
  - H_k^{c0} と H_k^{c1} は無視できるほど小さいと仮定

➡ 単一サーバ待ち行列モデル　(待ち行列遅延を考慮)

[5] R. Yates, et al., *Proc. of IEEE INFOCOM 2017*, 2017.

解析結果

A: AoI の時間平均分布 $F_A(x)$ に従う確率変数

- A は三つの独立な確率変数の和に分解される

$$A =_{\mathrm{st}} L(\phi)\tau + \phi + U[0,\tau)$$

$1/\tau$: フレームレート, ϕ: タイミングオフセット,

$L(\phi)$: 時刻 $k\tau + \phi$ $(k \in \mathbb{Z})$ におけるレンダラ内パケット数

$U[0,\tau)$: $[0,\tau)$ 上の一様確率変数

解析結果

A: AoI の時間平均分布 $F_A(x)$ に従う確率変数

- A は三つの独立な確率変数の和に分解される

$$A =_{\mathrm{st}} L(\phi)\tau + \phi + U[0,\tau)$$

$1/\tau$: フレームレート, ϕ: タイミングオフセット,

$L(\phi)$: 時刻 $k\tau + \phi$ $(k \in \mathbb{Z})$ におけるレンダラ内パケット数

$U[0,\tau)$: $[0,\tau)$ 上の一様確率変数

- 特に，サービス時間がパラメタ μ の指数分布に従うとき,

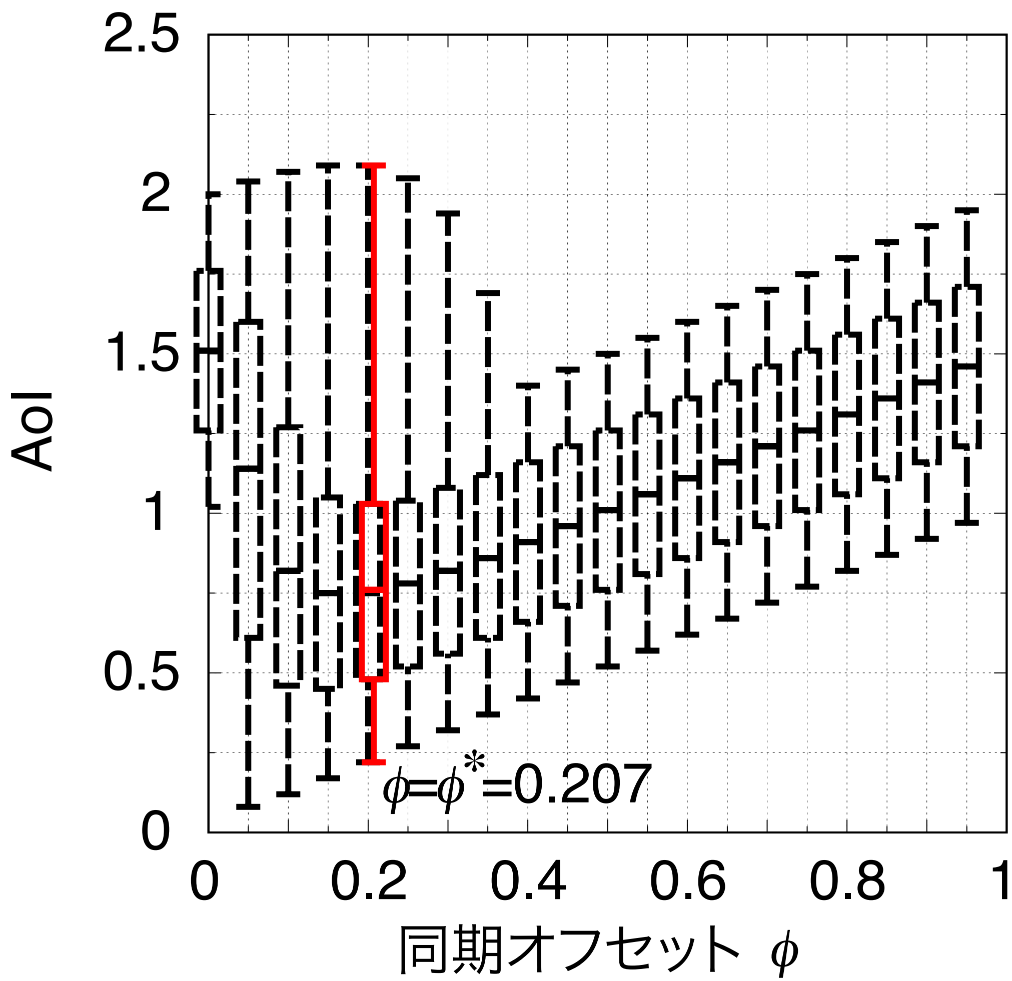
$(k \in \mathbb{Z}, k \geq 1)$

$$F_A(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \phi \\ (1 - e^{-(1-\gamma)\mu\phi})\dfrac{x-\phi}{\tau}, & \phi \leq x \leq \tau + \phi \\ 1 - \gamma^{k-1} e^{-(1-\gamma)\mu\phi}\left\{1 - (1-\gamma)\dfrac{x - k\tau - \phi}{\tau}\right\}, & x \in [k\tau + \phi, (k+1)\tau + \phi) \end{cases}$$

タイミングオフセットの最適化

フレームレート $(1/\tau)$ を 1 に固定

レンダラの処理時間: 率 $\mu = 12$ の指数分布



AoI の 箱ひげ図 をプロット

- 同期オフセット ϕ
  - サーバの情報送信と端末の画面更新とのタイミング差
- 平均 AoI は $\phi = \phi^*$ で最小
  - 分布の意味で適切な ϕ の値とは異なる

※先行研究は平均 AoI のみを考察

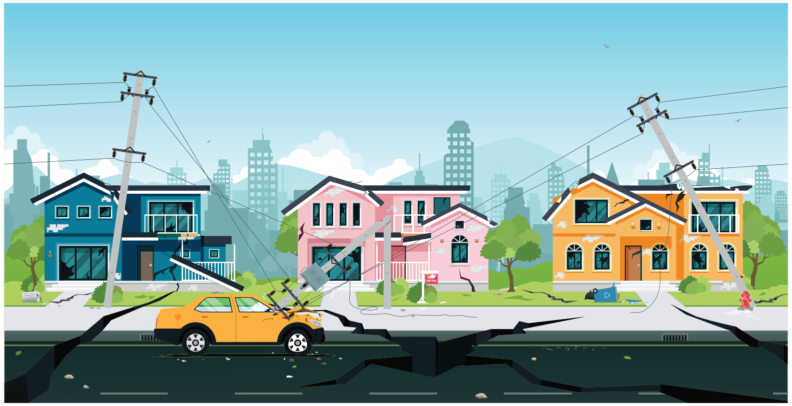
情報通信システムへの応用 (2)
疎密度モバイルアドホック網

※木村共孝 (同志社大学) との共同研究に基づく

Y. Inoue and T. Kimura,
"Age-Effective Information Updating over Intermittently Connected MANETs,"
IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 39, no. 5, pp. 1293–1308, 2021.

疎密度モバイルアドホック網

- 自然災害の発生時に危惧される通信インフラの機能不全
  - 基地局の損傷による通信障害
  - 発電所・送電網への影響による大規模停電



疎密度モバイルアドホック網

- 自然災害の発生時に危惧される通信インフラの機能不全
  - 基地局の損傷による通信障害
  - 発電所・送電網への影響による大規模停電

携帯端末同士の通信のみで実現する通信網

➡ **Delay/Disruption Tolerant Networking (DTN) 技術**

- 各移動端末が，他端末間の通信のリレー端末として振る舞う
  - バケツリレー方式で，離れた端末間のメッセージ配送を実現
- 従来の DTN 研究における主要な性能指標
  - 不達確率，配送遅延，リレーによる電力消費

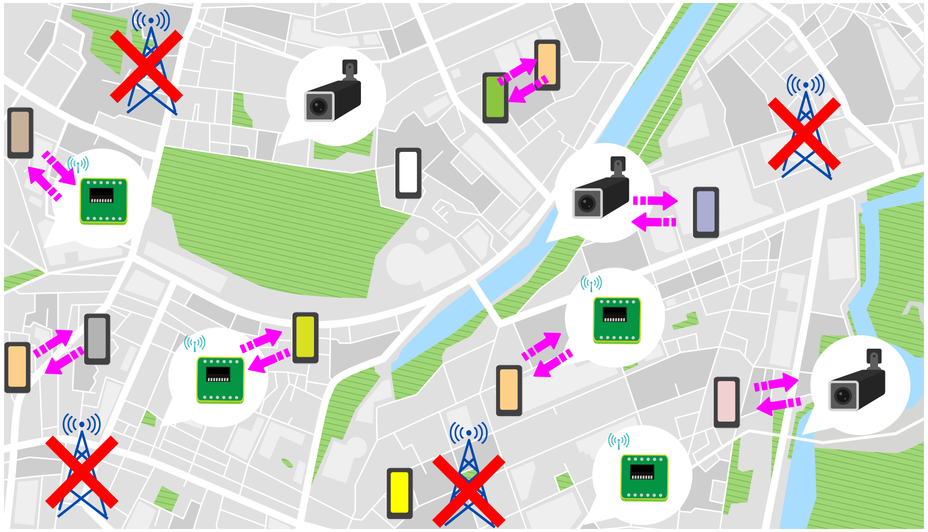
DTN に基づくモニタリングシステム (1)

- スマートシティでは，平常時からセンサ群を活用
  - 人流モニタリング，運転支援，インフラ点検
- 災害発生時には，遠隔地との通信機能が一時的に喪失
  - せっかく収集可能な情報が活かされない事態

DTN に基づくモニタリングシステム (1)

- スマートシティでは，平常時からセンサ群を活用
  - 人流モニタリング，運転支援，インフラ点検
- 災害発生時には，遠隔地との通信機能が一時的に喪失
  - せっかく収集可能な情報が活かされない事態

➡ **DTN 技術の活用により情報の可用性を継続**



DTN に基づくモニタリングシステム (1)

- スマートシティでは，平常時からセンサ群を活用
  - 人流モニタリング，運転支援，インフラ点検
- 災害発生時には，遠隔地との通信機能が一時的に喪失
  - せっかく収集可能な情報が活かされない事態

➡ **DTN 技術の活用により情報の可用性を継続**

- 災害発生時においては電力資源は非常に貴重
  - 各センサは効果的なタイミングでの情報生成が必要
  - リレー端末は無駄なメッセージ拡散の抑制が必要

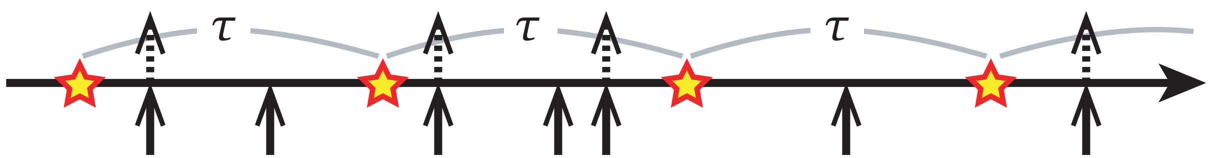
情報鮮度 AoI を用いることで，これらの観点を考慮可能

DTN に基づくモニタリングシステム (2)

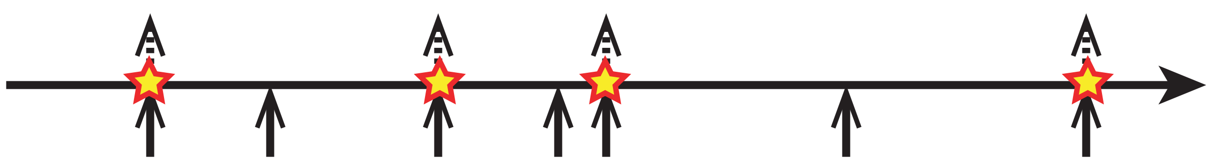
基本的な 2 種類の情報生成 (サンプリング) 方式

サンプリング	データ送信	他ノードとの遭遇

- **定間隔サンプリング**: 一定時間 τ ごとにサンプリング



- **遭遇時サンプリング**: 他端末と遭遇時にサンプリング



モデル化と解析

- センサ端末 N_{s} 台，移動端末 N_{mb} 台
  - $\mathcal{N}_{\mathrm{mb}} := \{1, 2, \ldots, N_{\mathrm{mb}}\}$　移動端末の集合
  - $\mathcal{N}_{\mathrm{dst},i} \subseteq \mathcal{N}_{\mathrm{mb}}$: i 番目のセンサの宛先端末集合
- 異なる 2 端末は率 μ のポワソン過程に従って遭遇
  ※ただし，センサ端末同士は遭遇しないものとする
- メッセージ拡散には (p, q)-epidemic routing[7] を使用
  - センサ端末は確率 q でメッセージを複製して送信
  - 移動端末は確率 p でメッセージを複製して送信

[7] T. Matsuda and T. Takine, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, 2008.

AoI の近似解析

- このモデルにおける AoI の厳密解析は煩雑
  - 複雑な依存関係の下でメッセージの追い抜きが発生

AoI の近似解析

- このモデルにおける AoI の厳密解析は煩雑
  - 複雑な依存関係の下でメッセージの追い抜きが発生

➡ **無限サーバ待ち行列として近似**

定間隔サンプリング: D/GI/∞ 待ち行列

$$F_A(x) = 1 - \frac{1}{\tau}\int_{x-K\tau}^{\tau}\left(\prod_{n=0}^{K-1}\overline{F}_H(n\tau+u)\right)\mathrm{d}u - \frac{1}{\tau}\int_0^{x-K\tau}\left(\prod_{n=0}^{K}\overline{F}_H(n\tau+u)\right)\mathrm{d}u$$

遭遇時サンプリング: M/GI/∞ 待ち行列

$$F_A(x) = 1 - \exp\left(-\lambda\int_0^x F_H(y)\mathrm{d}y\right)$$

AoI の近似解析

- このモデルにおける AoI の厳密解析は煩雑
  - 複雑な依存関係の下でメッセージの追い抜きが発生

➡ **無限サーバ待ち行列として近似**

定間隔サンプリング: D/GI/∞ 待ち行列

$$F_A(x) = 1 - \frac{1}{\tau}\int_{x-K\tau}^{\tau}\left(\prod_{n=0}^{K-1}\overline{F}_H(n\tau+u)\right)\mathrm{d}u - \frac{1}{\tau}\int_{0}^{x-K\tau}\left(\prod_{n=0}^{K}\overline{F}_H(n\tau+u)\right)\mathrm{d}u$$

遭遇時サンプリング: M/GI/∞ 待ち行列

$$F_A(x) = 1 - \exp\left(-\lambda\int_0^x F_H(y)\mathrm{d}y\right)$$

遅延時間分布 $F_H(x)$ は
マルコフ解析により導出可能

パラメータ設定

- センサ 1 台，リレー端末 95 台，宛先端末 5 台
- 端末の遭遇率 $\mu = 0.01$
  - 単位時間当たりに平均 1 台の端末と遭遇
- パケットの TTL (time-to-live): 平均遅延時間の 2 倍
- センサのサンプリング頻度 λ
  - 遭遇時サンプリング: センサの拡散確率 q を用いて

$$\lambda = q\mu N_{\mathrm{re}} + \mu N_{\mathrm{dst}}$$

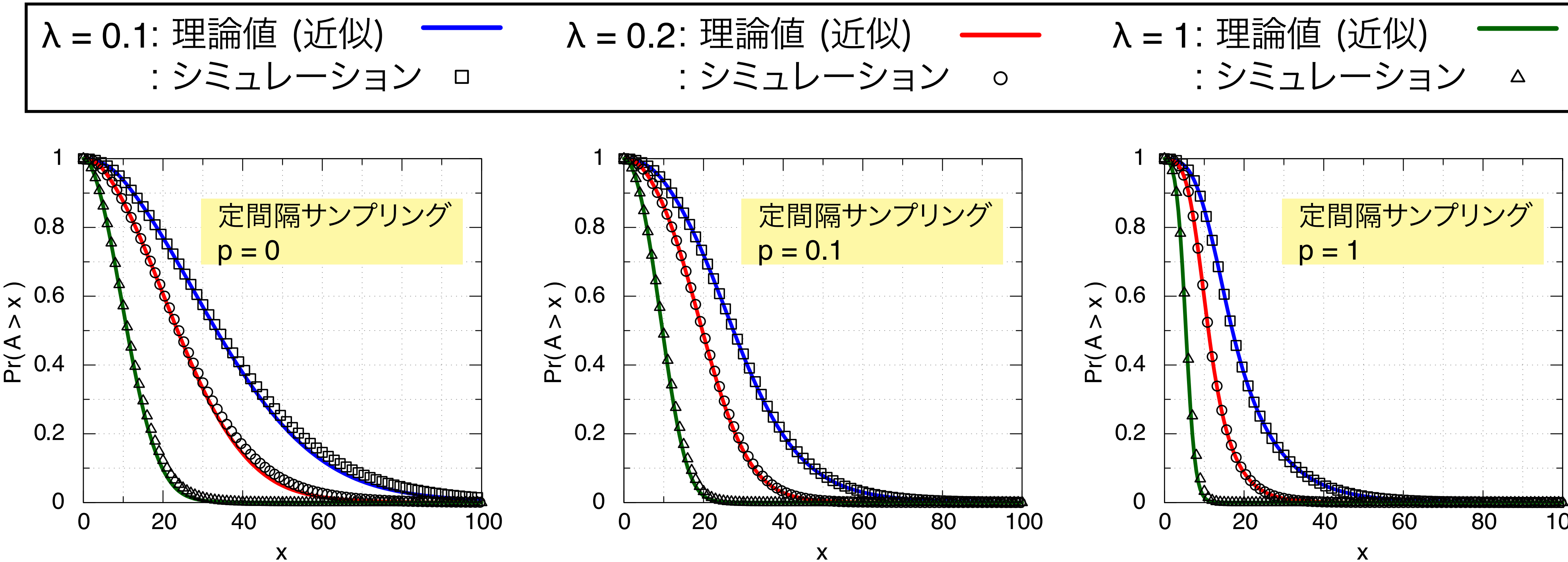
  - 定間隔サンプリング: λ は q とは独立に決定

    遭遇時サンプリングと比較する際は q を固定

近似精度

λ: センサのサンプリング頻度

p: リレー端末の拡散確率 (p が大きいほど積極的に拡散)

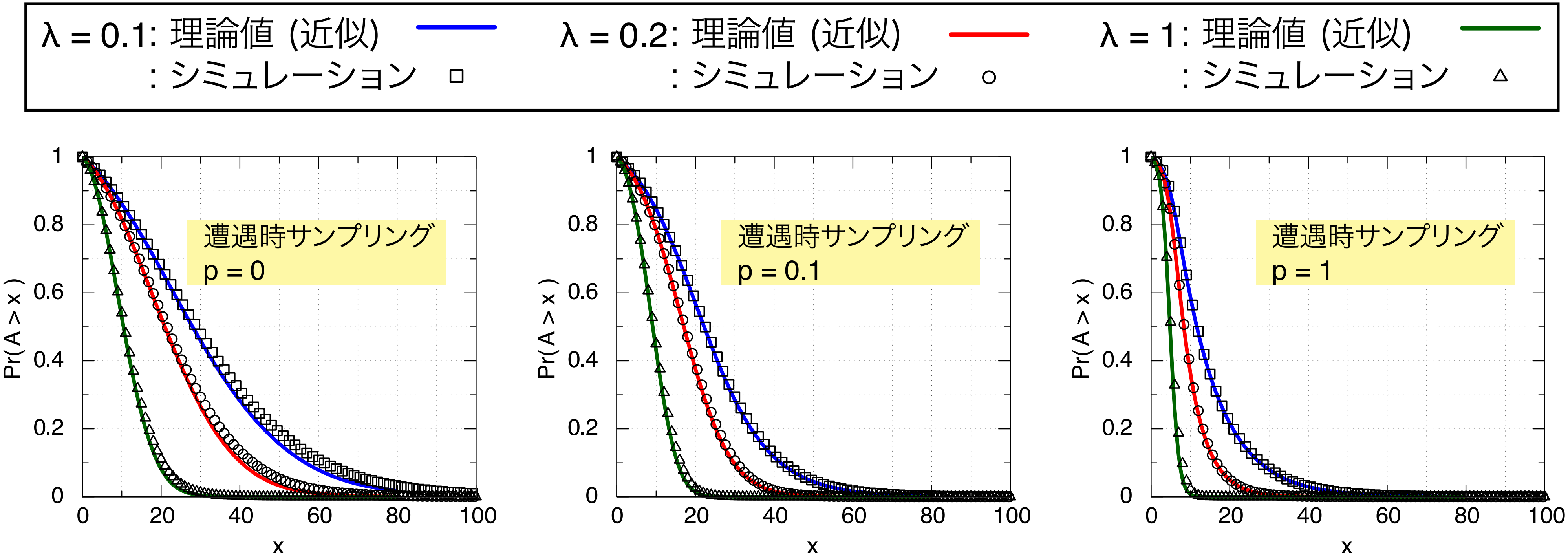


- **無限サーバ待ち行列による近似は精度良好**

近似精度

λ: センサのサンプリング頻度

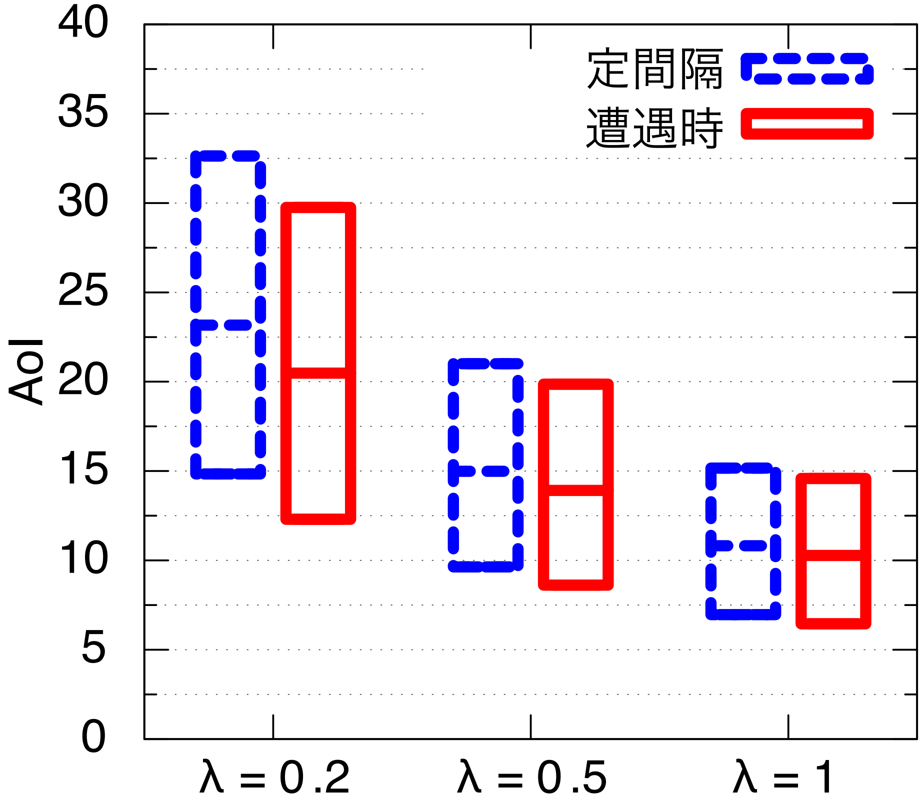
p: リレー端末の拡散確率 (p が大きいほど積極的に拡散)

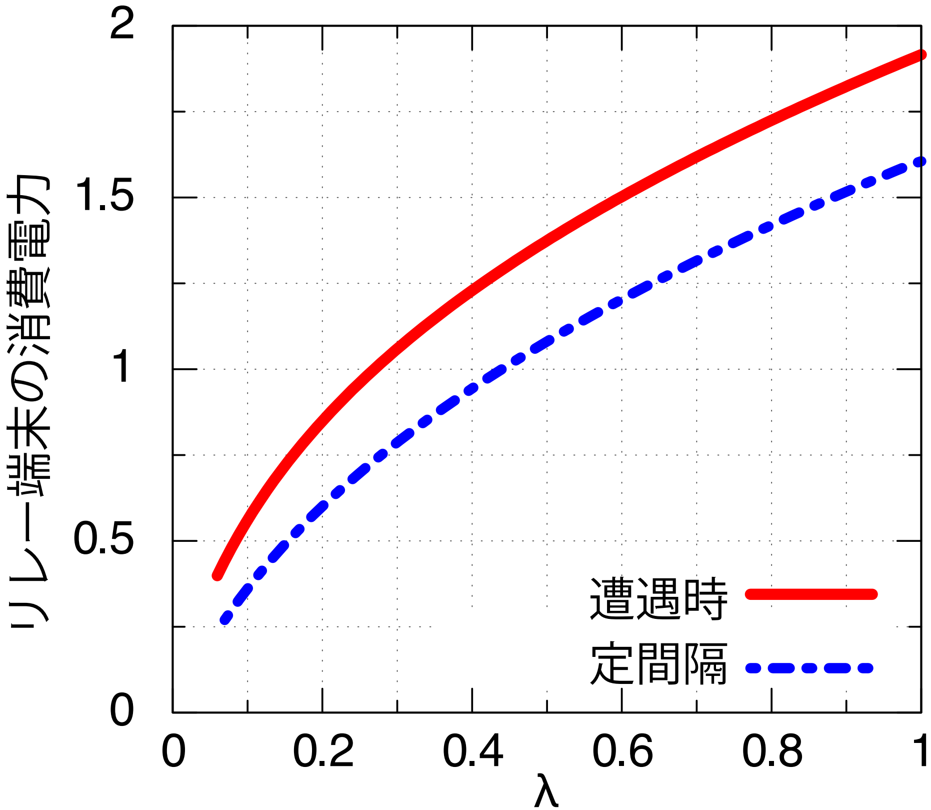


- **無限サーバ待ち行列による近似は精度良好**

サンプリング方式の比較

定間隔サンプリングと遭遇時サンプリングの比較
※ 消費電力: 単位時間当たりのメッセージ転送回数





- 遭遇時サンプリングは低い AoI を達成
- 一方，定間隔サンプリングのほうが電力効率が良い

まとめ

- 情報鮮度 Age of Information (AoI)
  - リアルタイム情報共有における主要な性能指標
  - 通常の遅延時間と異なり，情報生成からの時間経過を考慮
- AoI 解析の基本的な枠組みを紹介
  - AoI が満たす一般公式，基本的な待ち行列モデルの結果
- 情報通信システムへの応用について紹介
  - クラウドゲーミング，DTN に基づくモニタリング
  - 今回紹介しきれなかった話題 (現在進行中):

    エッジ AI 推論，水中音響画像伝送，水中音波・光融合通信
    映像ストリーミング，動的基地局ネットワーク，など