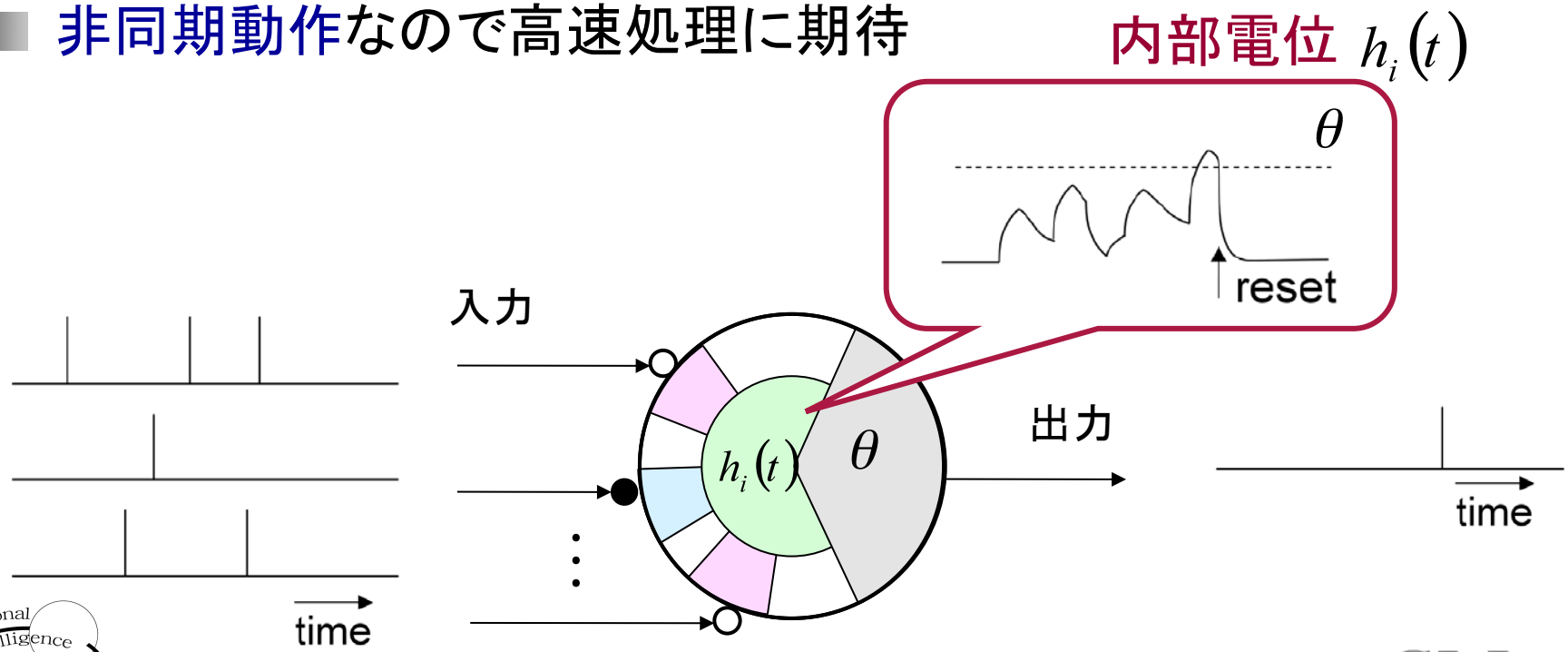
スパイキングニューラルネットワークとは

- 発火頻度ではなくニューロンの内部電位に注目したモデル
- アナログ量をパルスタイミングで表現
- 生体模倣の忠実度が高い
- 非同期動作なので高速処理に期待



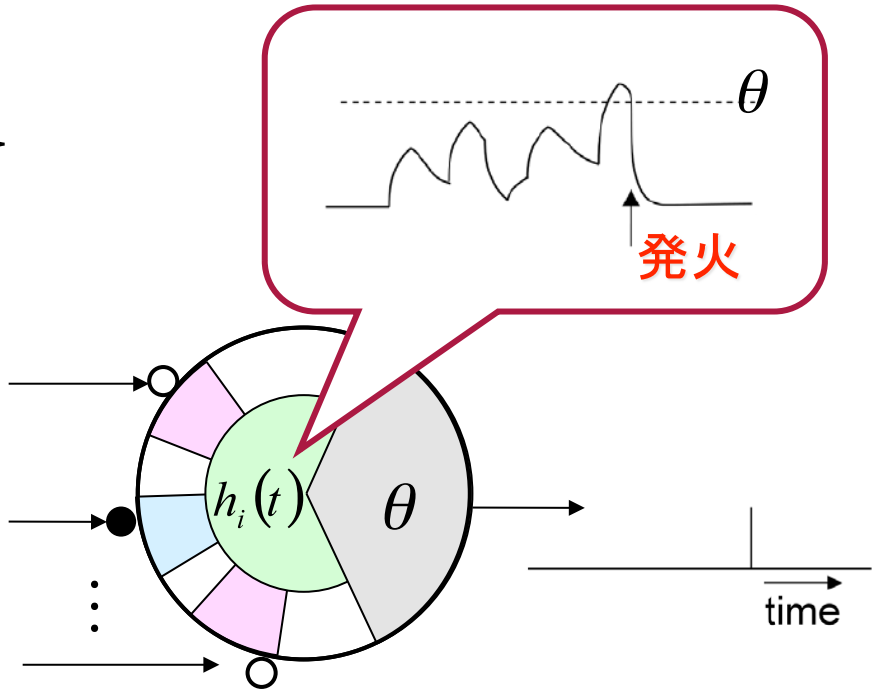
ニューロンの発火

- 内部電位の値 $h_i(t)$ によって、
  ニューロンは確率 P_r に沿って発火し、パルスを発生させる

$$P_r = \frac{1}{1+\exp\{\beta(\theta - h_i(t))\}}$$

β :ニューロンの発火閾値

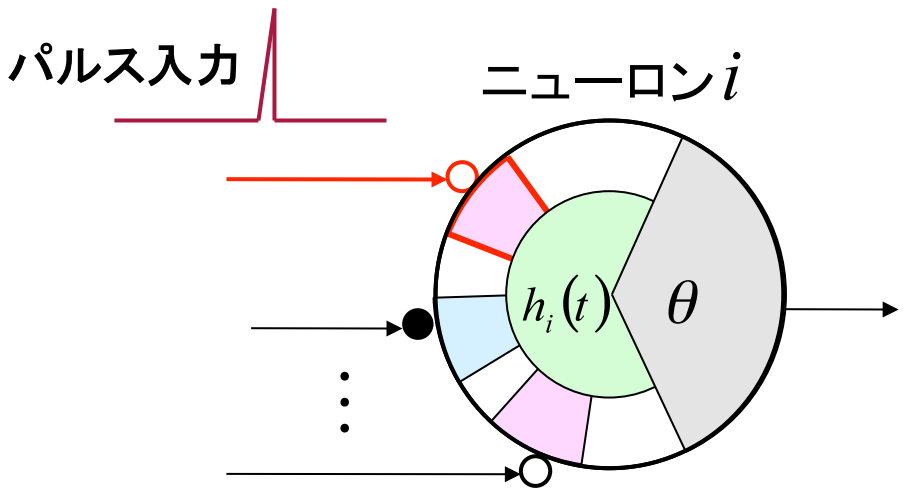
θ :ニューロン内部ノイズ



Computational Intelligence
CI Lab.
Kobe Univ.

入力パルスによる影響

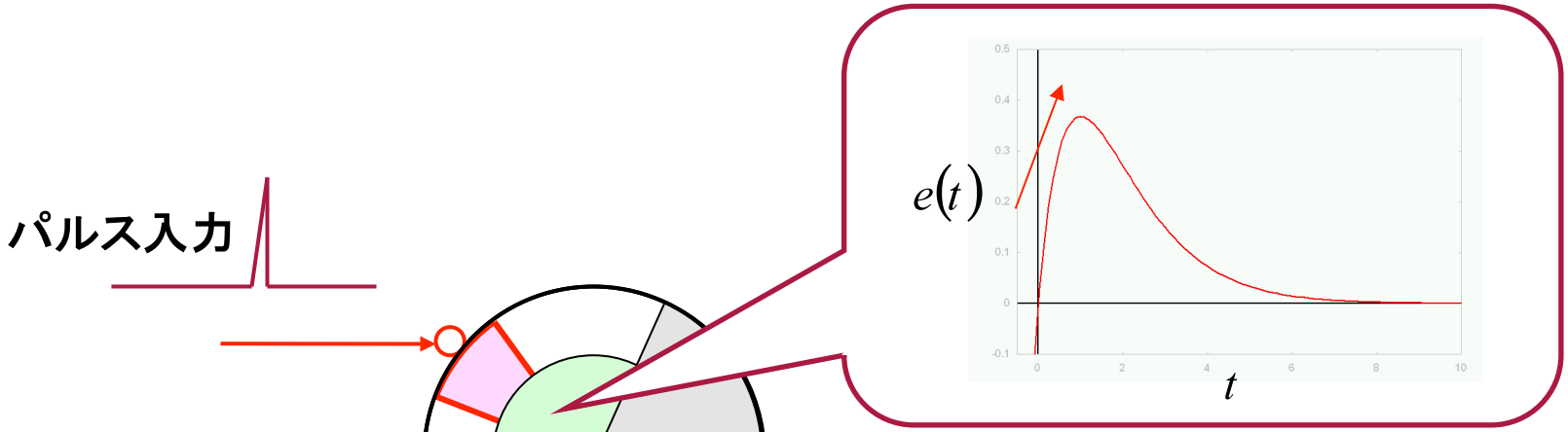
- ニューロンi がパルスを受け取る



入力パルスによる影響

- ニューロンi がパルスを受け取る

→ 内部電位が上昇



$$e(t) = \frac{t}{\tau_e^{\,2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right)$$

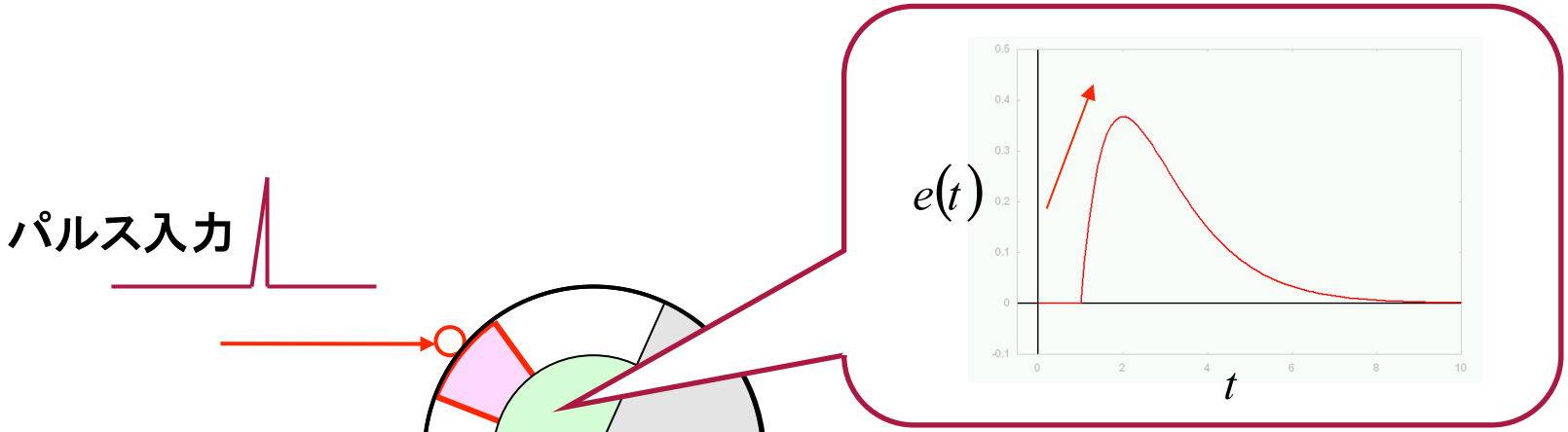
τ_e:内部電位の変化を決定する時定数

Computational Intelligence
CI Lab. Kobe Univ.

入力パルスによる影響

- ニューロンi がパルスを受け取る

→ Δ_i^{ax}だけ遅れて、内部電位が上昇



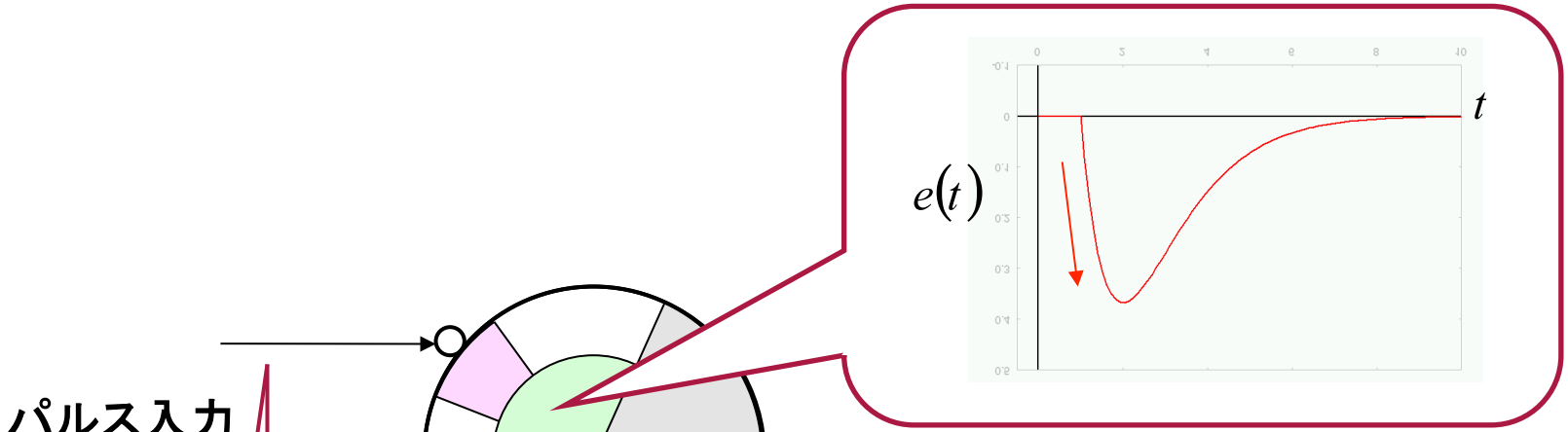
$$e(t) = \frac{t}{\tau_e^{\,2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right)$$

τ_e:内部電位の変化を決定する時定数

Computational Intelligence
CI Lab.
Kobe Univ.

EPSP と IPSP

- EPSP：興奮性結合
- IPSP：抑制性結合

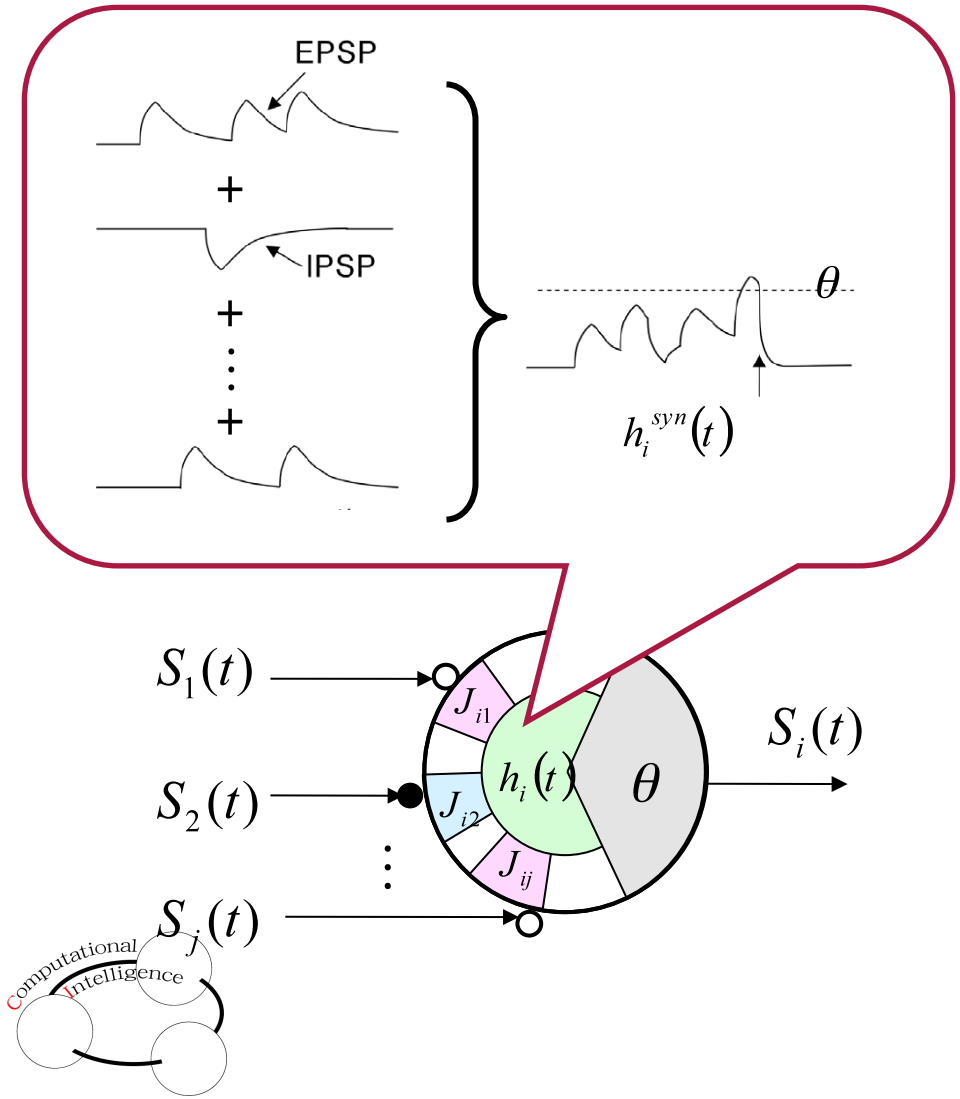


$$e(t) = -\frac{t}{\tau_e^{\,2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right)$$

τ_e：内部電位の変化を決定する時定数

Computational Intelligence
CI Lab.
Kobe Univ.

入力パルスによる影響



時間 t において、ニューロンが発火 $S_i(t)=1$

発火しない $S_i(t)=0$

$$h_i^{syn}(t)=\sum_{j=1}^{N} J_{ij} \sum_{\tau=0}^{t} e(\tau) S_j(t-\tau-\Delta_i^{ax})$$

J_{ij} :ニューロンとの結合の強さを表す係数

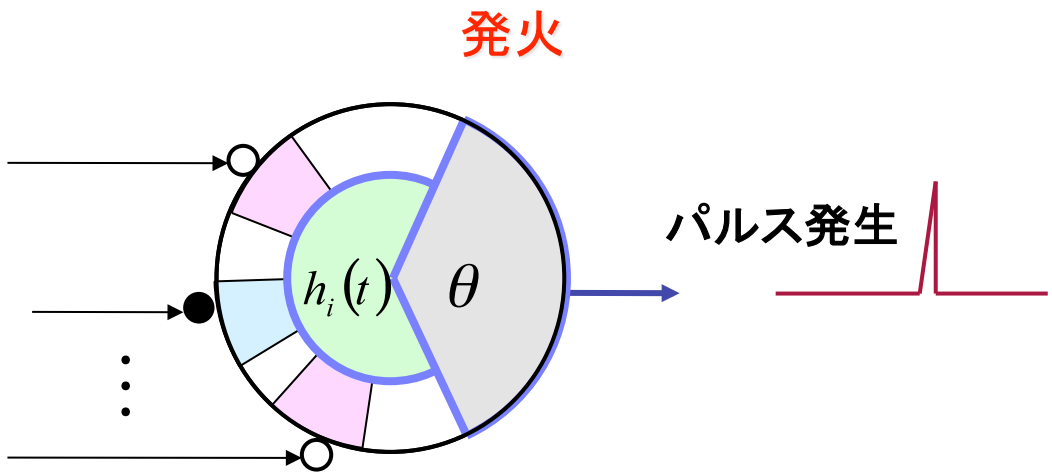
$J_{ij} > 0$ でEPSP（興奮性結合）

$J_{ij} < 0$ でIPSP（抑制性結合）

Computational Intelligence
CI Lab. Kobe Univ.

抑制信号による影響

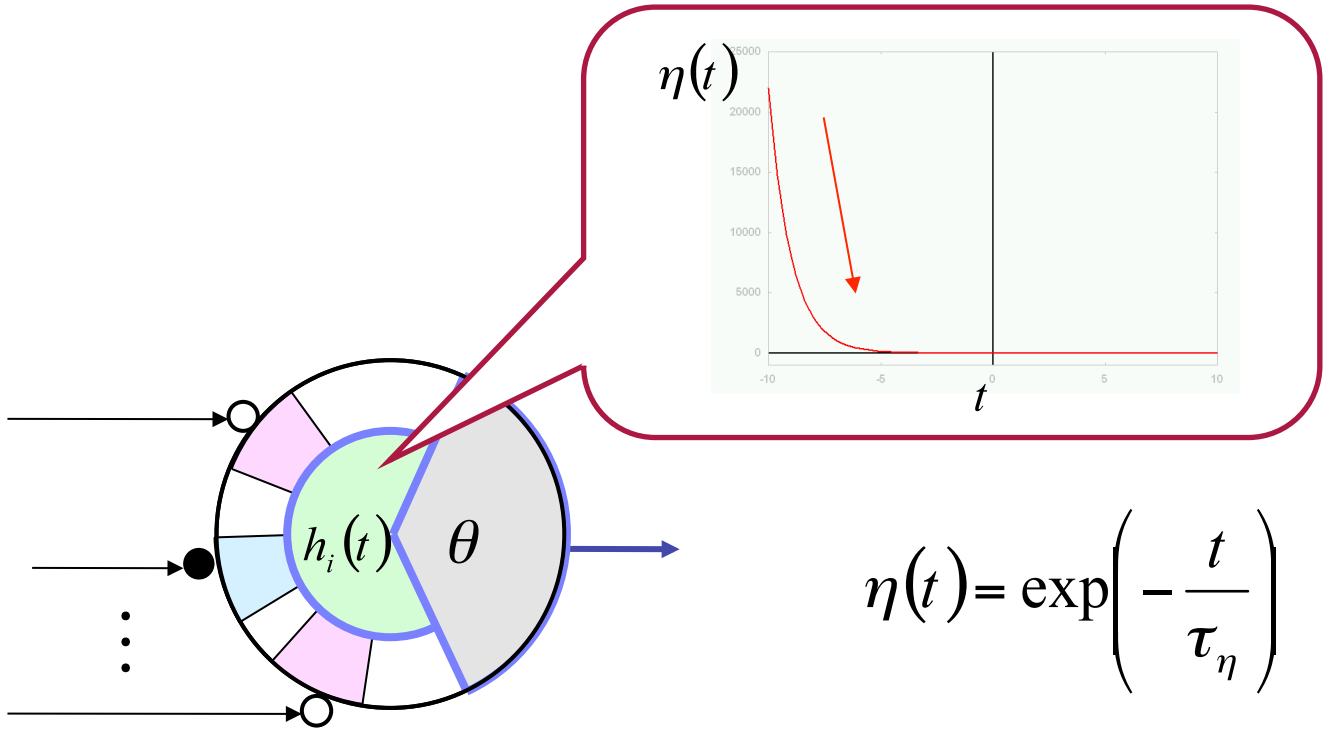
- ニューロンi が発火してパルスを発生



抑制信号による影響

- ニューロンi が発火してパルスを発生

→ Δ_i^{inh} だけ遅れて、内部電位が大きく下がる



$$\eta(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_\eta}\right)$$

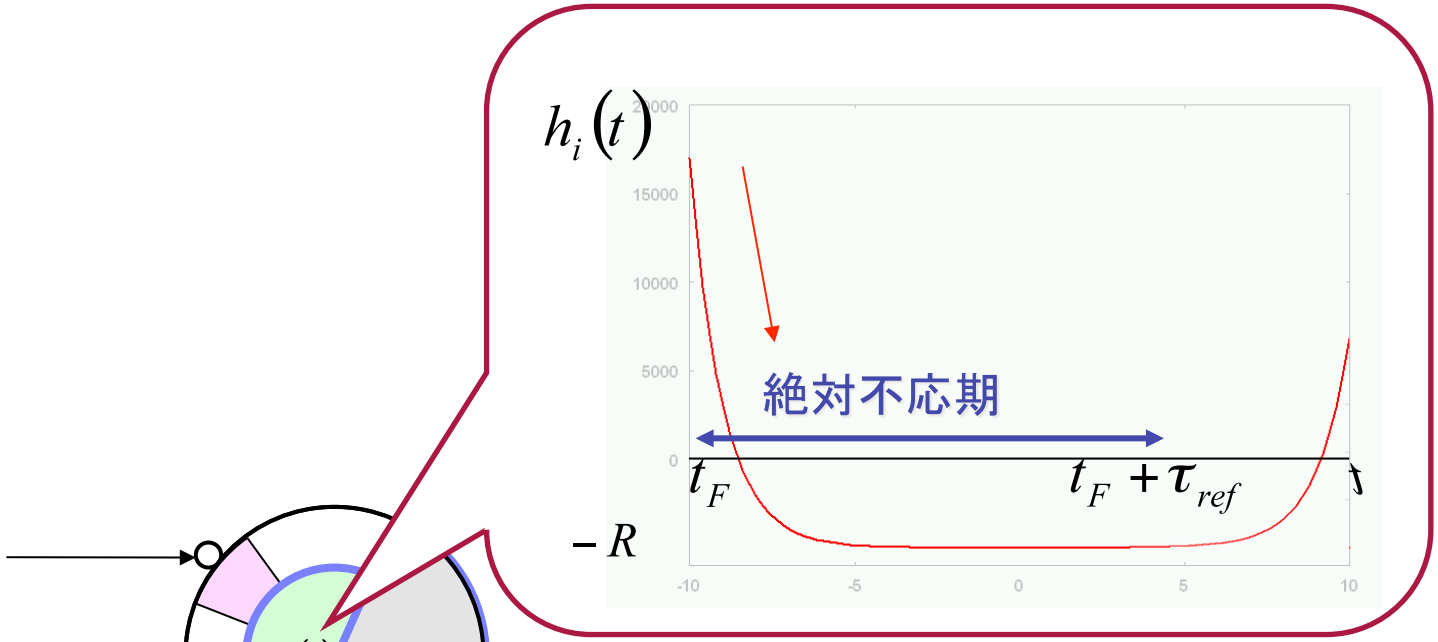
τ_η 内部膜電位の変化を決定する時定数

Computational Intelligence
CI Lab.
Kobe Univ.

抑制信号による影響

■ 不応期の電圧降下

$t = t_F$ で発火したものとする



$$h_i^{ref}(t) = \begin{cases} -R & t_F \le t \le t_F + \tau_{ref} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

Computational Intelligence
CI Lab.
Kobe Univ.

抑制信号による影響

- 抑制信号による内部電位の降下

$$h_i^{inh}(t) = -\sum_{\tau=0}^{t} J^{inh}\eta(\tau)S_i\left(t-\tau-\Delta_i^{inh}\right)$$

J^{inh} : 抑制信号の振幅

- 不応期の電圧降下

$$h_i^{ref}(t) = \begin{cases} -R & t_F \le t \le t_F + \tau_{ref} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

内部電位の値

■ 内部電位の値は

・入力パルスの影響

$$h_i^{syn}(t) = \sum_{j=1}^{N} J_{ij} \sum_{\tau=0}^{t} e(\tau) S_j(t - \tau - \Delta_i^{ax})$$

・抑制信号

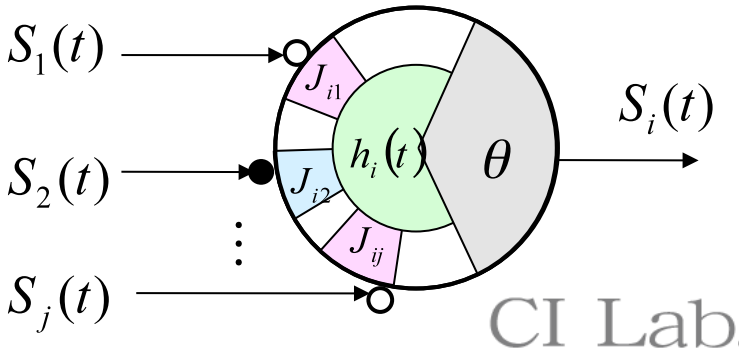
$$h_i^{inh}(t) = -\sum_{\tau=0}^{t} J^{inh} \eta(\tau) S_i(t - \tau - \Delta_i^{inh})$$

・不応期の電圧降下

$$h_i^{ref}(t) = \begin{cases} -R & t_F \le t \le t_F + \tau_{ref} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

の線形結合で表される

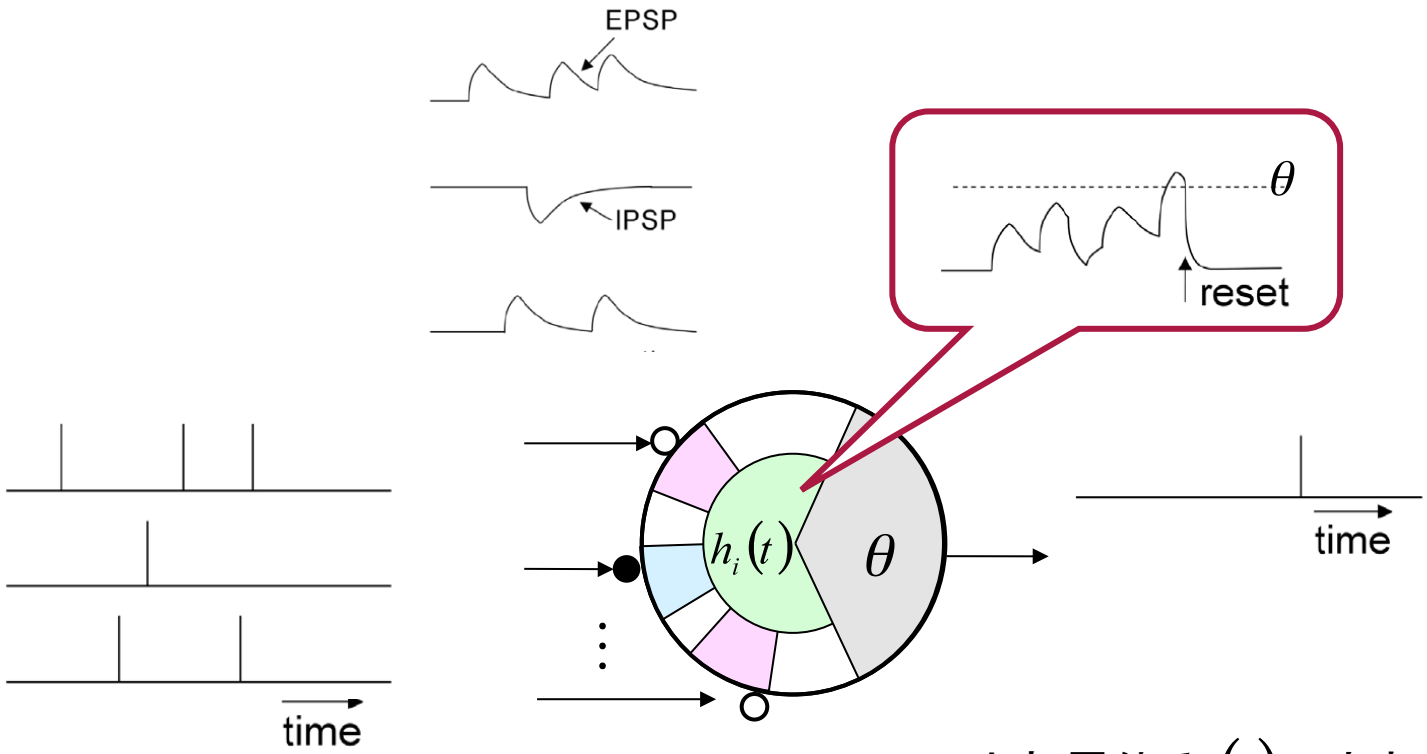
$$h_i(t) = h_i^{syn}(t) + h_i^{inh}(t) + h_i^{ref}(t)$$



Computational Intelligence
CI Lab.
Kobe Univ.

Integrate-and-fire Model

積分発火モデル



内部電位 $h_i(t)$の大きさによって

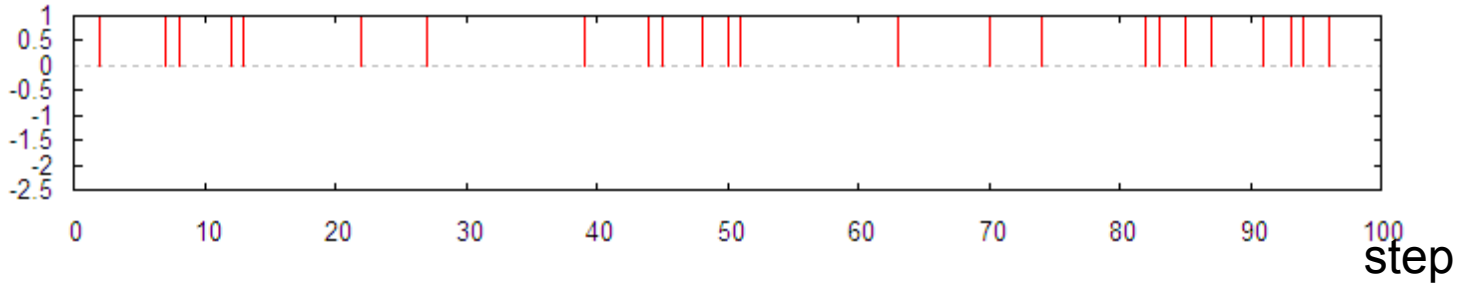
ニューロンは確率P_r で発火し、パルスを発生させる

$$P_r = \frac{1}{1+\exp\{\beta(\theta - h_i(t))\}}$$

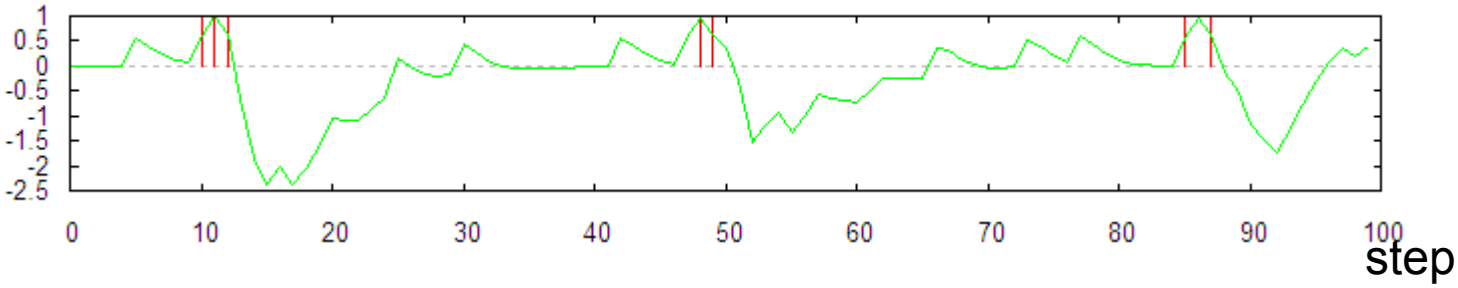
Computational Intelligence
CI Lab.
Kobe Univ.

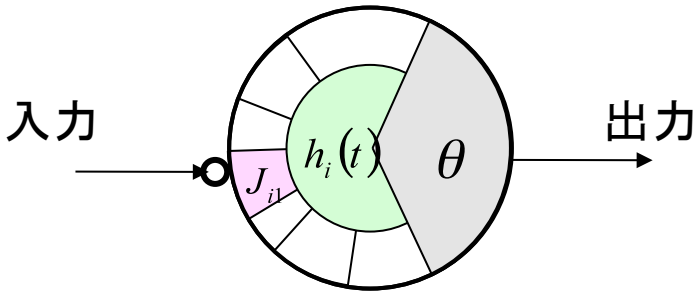
入力数1のシミュレーション

- 入力　（パルス発生率 10%）



- 出力





$\theta = 0.6$　　$J^{inh} = 1.0$

$\beta = 10.0$　　$J_{i1} = 1.5$

$\Delta_i^{ax} = 2$　　$\tau_e = 1$

$\Delta_i^{inh} = 3$　　$\tau_\eta = 5$

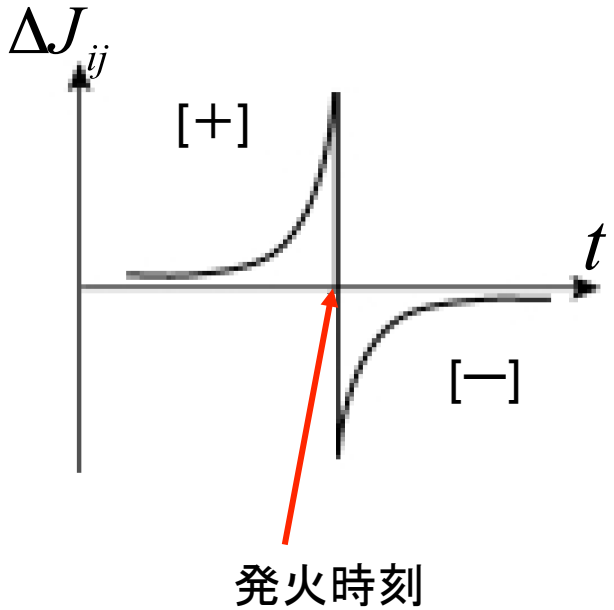
Computational Intelligence

CI Lab. Kobe Univ.

結合の強さ J_{ij} の更新規則

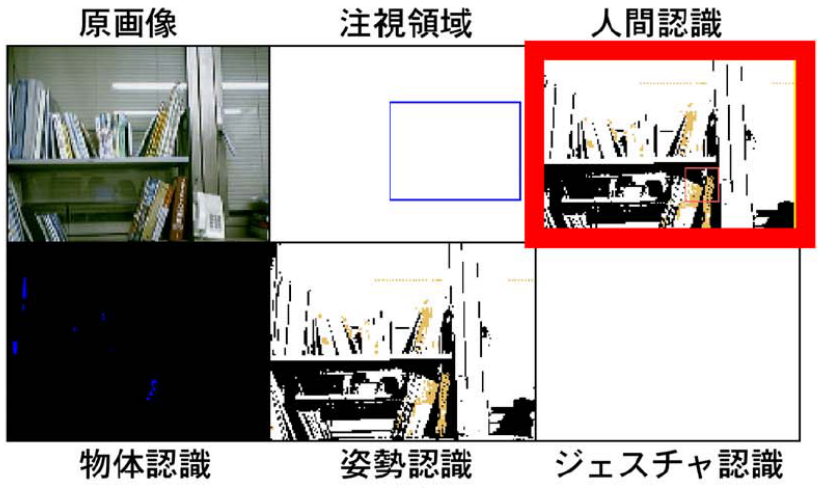
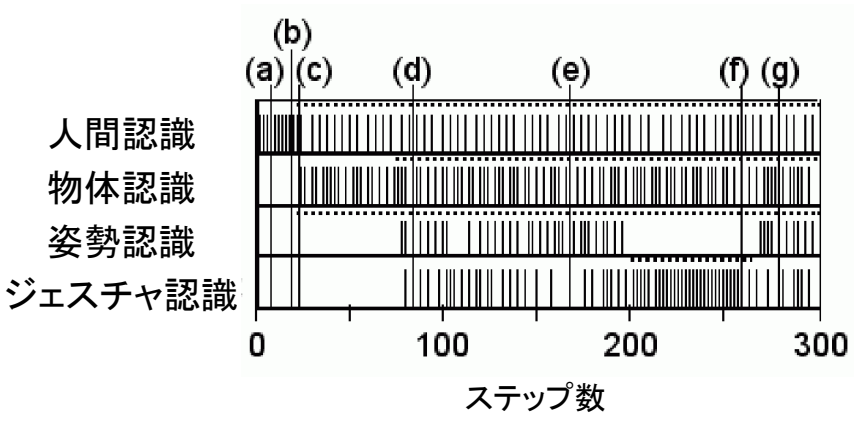
- 発火に関与した結合を強め、関与しない結合を弱める

$$\Delta J_{ij} = \begin{cases} Ae^{\frac{\Delta t}{\tau}} & if\ (\Delta t < 0) \\ -Ae^{-\frac{\Delta t}{\tau}} & if\ (\Delta t \geq 0) \end{cases}$$



Δt ＝ 発火した時刻 － 信号入力時刻

A, τ ：定数

応用例

画像処理知覚モジュールの選択