Übungen zur Vorlesung

Mathematische Aspekte der Neuronenmodellierung und Simulation

http://conan.iwr.uni-heidelberg.de/teaching/numsimneuro_ss2012

Dr. S. Lang, D. Popović

Abgabe: 30. Mai 2012 in der Übung

Übung 8 Integrate-and-Fire Neuron mit Exponential Adaption (10 Punkte)

In dieser Übung wird das Adaptive Exponential Leaky Integrate-and-Fire-Modell (*IFAdEx*) untersucht. Das Modell basiert auf dem Leaky Integrate-and-Fire-Modell (LIF, siehe auch Blatt 1), es gibt nun zusätzlich einen Adaptions-Term w (den wir bei gleichem Einfluß auf das Modell, aber in anderer Notation in Übung 7 kennengelernt haben, und der einen hemmenden Strom beschreibt), sowie einen nicht-linearen exponentiellen Term. Dieser Term realisiert einen Spike-erzeugenden Mechanismus. Das bedeutet, daß das Neuron, ähnlich wie beim Izhikevich-Modell, selber in der Lage ist, einen Spike zu erzeugen. Dieser muss nicht mehr von Hand wie bei LIF „eingezeichnet" werden. *IFAdEx* steht für „Integrate-and-Fire mit exponentieller Adaption". Das Modell wird ausführlich untersucht in Brette, R. and Gerstner, W.: *Adaptive Exponential Integrate-and-Fire Model as an Effective Description of Neuronal Activity*, Journal of Neurophysiology 94, pp. 3637–3642, 2005 und Naud et al.: *Firing patterns in the adaptive exponential integrate-and-fire model*, Biol. Cybern (2008), 99:pp. 335–347. Aus dem zweiten Paper sind die in dieser Übung verwendeten Parameter.

In physikalischer Schreibweise lautet *IFAdEx*:

$$\begin{aligned} C_m \partial_t v(t) &= -g_L(v - E_L) + g_L \cdot \triangle_T \cdot \exp\{(v - v_T)/\triangle_T\} - w + I, \\ \tau_w \partial_t w(t) &= a \cdot (v - E_L) - w, \\ v(0) &= v_0, \quad w(0) = w_0. \end{aligned}$$

$$\text{falls } v > 0\,mV, \text{ dann} \begin{cases} v \to v_{reset}, \\ w \to w + b. \end{cases}$$

Hierbei ist I (in pA) der (absolute) Eingangstrom, C_m die Gesamt-Kapazität der Membran (in pF), g_L die Gesamt-Leitfähigkeit der Membran (in nS), $\triangle_T$ ein *threshold slope factor* (in mV), v_T der Potential-Threshold (in mV), w eine Adaptions-Variable (in pA), τ_w die Zeitkonstante der Adaption (in ms) und a der Kopplungsfaktor der Adaption (in nS). Wenn das Potential den Schwellwert $v = 0$ übersteigt, werden Potential v und Adaptions-Variable a. zurückgesetzt, wobei b der Offset (in pA) der Adaptions-Variable ist. Das Potential v hat die Einheit mV und der Adaptionsstrom w die Einheit pA. Falls v den Wert v_T übersteigt, lässt die Exponential-Funktion das Potential schnell anwachsen. Der Parameter $\triangle_T$ steuert dabei, wie scharf das Modell auf das Überschreiten des Werts reagiert. Das Modell wird vom angelegten Strom und neun anderen Parametern eingestellt, von denen fünf reine Skalierungsparameter sind (C_m, g_L, E_L, $\triangle_T$, und v_T), und vier sogenannte Bifurkationsparameter (bis auf eventuelle Reskalierung dieser Parameter sind dies a, τ_w, b, v_{reset}), die das Spiking-Verhalten des Systems beeinflussen können. Die fünf Skalierungsparameter können aus dem Modell elimiert werden, relevant sind Bifurkationsparameter, siehe dazu auch die oben genannten Referenzen.

C	g_L	E_L	v_T	$\triangle_T$	a	τ_w	b	v_{reset}	I
200	10	-70	-50	2	2	30	0	-58	0.5
200	12	-70	-50	2	2	300	60	-58	0.5
130	18	-58	-50	2	4	150	120	-58	0.4
200	10	-58	-50	2	2	120	100	-46	0.21
200	12	-70	-50	2	-10	300	0	-58	0.3
200	12	-70	-50	2	-6	300	0	-58	0.11
100	10	-65	-50	2	-10	90	30	-47	0.35
100	12	-60	-50	2	-11	130	30	-47	0.16

Tabelle 0.2: Parameter für das Integrate-and-Fire mit Exponential Adaptation-Modell.

Laut den Autoren der zweiten Studie hat das Modell folgende Charakteristika:

- Es ist realistischer als LIF,
- Es reproduziert in guter Genauigkeit die Spike-Times von pyramidalen Zellen mit noisy input,
- Das Modell kann unterschiedlichste Arten von Neuronen und Feuermustern reproduzieren,
- Es umgeht unrealistische Verzögerungen im Spike-firing, wie sie beim Modell von Izhikevich auftreten.

Wir wollen in dieser Übung das Modell mit Octave testen und versuchen, Abbildung 4 aus dem zweiten Paper (s.o.) zu reproduzieren, sowie die Aussagen der Autoren überprüfen.

1. Führen Sie für die beiden Modell-Gleichungen eine Einheiten-Analyse für alle Terme durch. Verwenden Sie dabei die üblichen Skalen, Zeit t in ms und Potential v in mV sowie die oben angegebenen Einheiten. Welches ist die Einheit der einzelnen Terme in der ersten bzw. zweiten Gleichung? Passen die einzelnen Terme von den Einheiten her zueinander?

2. Lösen Sie das Modell numerisch mit Hilfe von Octave und dem Forward Euler-Verfahren. Testen Sie das Modell dann mit den acht Parameter-Setups aus Tabelle 0.2 und exportieren Sie Plots des Potentials. Der applizierte Strom soll eine Strom-Schnelle sein, die Dauer können Sie beliebig wählen. Setzen Sie ausserdem $v_0 = E_L$ und $w_0 = 0.0$.

3. Die in der Tabelle angegebenen Parameter sind die Parameter aus dem zweiten Paper und korrespondieren zur dortigen Abbildung 4, rechte Spalte. Diskutieren sie kurz für welche Parameter Ihre Plots gut mit jenen aus dem Paper übereinstimmen, und für welche nicht.

4. Betrachten Sie Abbildung 8a-8c im genannten Paper. Dort ist der Vergleich zwischen Experiment und Modell zu sehen. Kommentieren Sie kurz, ob das Modell Ihrer Meinung nach die experimentellen Werte gut trifft. Überlegen Sie sich dazu, welche Skalen die Achsen der Abbildung haben, und lesen Sie auch Abschnitt 7 – Discussion, S.46 erster Abschnitt.

5. Freiwillige Zusatzaufgabe: Implementieren Sie ein implizites Verfahren (BE, CN) für das nichtlineare Modell. Beachten Sie, dass Sie dazu in jedem Schritt ein nicht-lineares Gleichungssystem lösen müssen. Dazu können Sie zum Beispiel ein Newton-Verfahren verwenden.