

Konstruksjon av høydimensjonale nevralt nettverk-potensialer for molekylærdynamikk

John-Anders Stende

Fysisk institutt
Universitetet i Oslo

Masterpresentasjon, 11. oktober 2017

Molekylærdynamikk

Nevrale nettverk

Nevralt nettverk-potensial (NNP)

NNP for Si

Konklusjon og fremtidig arbeid

Table of Contents

Molekylærdynamikk

Nevrale nettverk

Nevralt nettverk-potensial (NNP)

NNP for Si

Konklusjon og fremtidig arbeid

Hva er molekylærdynamikk?

- ▶ Numerisk metode for å simulere atomers og molekylers bevegelser i gasser, væsker og faste stoffer.
- ▶ Kan simulere tusener og millioner av atomer.
- ▶ Virtuelt eksperiment.

Dynamikk

- ▶ Dynamikken styres av partiklenes interaksjoner.
- ▶ Interaksjonene bestemmes av et kraftfelt \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = -\nabla V(\mathbf{r})$$

- ▶ Potensiell energiflate / potensial:

$$V(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N)$$

- ▶ $V(\mathbf{r})$ inneholder fysikken til systemet.

Ab initio molekylærdynamikk

Løse Schrödinger-likningen ved hvert tidssteg.

Klassisk molekylærdynamikk

Bruke en predefinert analytisk funksjon.

Predefinert analytisk potensial

$$V(\mathbf{r}) \approx \sum_i^N V_1(\mathbf{r}_i) + \sum_{i,j}^N V_2(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) + \sum_{i,j,k}^N V_3(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \mathbf{r}_k) + \dots$$

1. Hvor mange ledd bør tas med?
2. Hvordan bør leddene se ut?

Eksperimenter / kvantemekanikk

Empirisk potensial:

1. Starte med en funksjonsform med noen parametre.
2. Bestemme parametre fra eksperimentelle data.

Kvantemekanisk potensial:

1. Produsere et datasett av konfigurasjoner med tilhørende ab initio energier.
2. Tilpasse en generell funksjonsform til datasettet.

Interpolere datasett

- ▶ Spliner
- ▶ Minste kvadraters metode
- ▶ Kunstige nevrale nettverk

Table of Contents

Molekylærdynamikk

Nevrale nettverk

Nevralt nettverk-potensial (NNP)

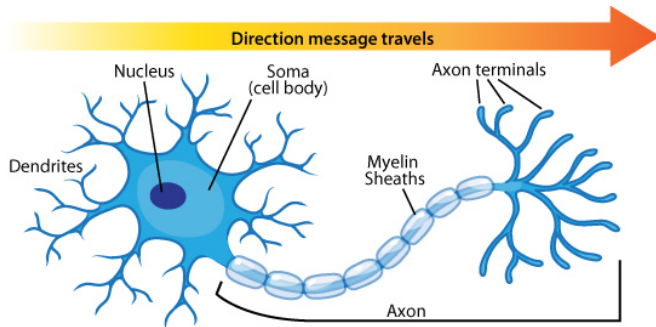
NNP for Si

Konklusjon og fremtidig arbeid

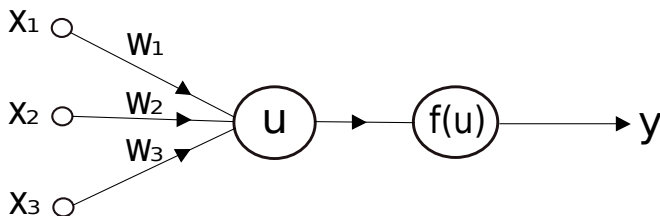
Kunstige nevrale nettverk

- ▶ Maskinlæringsalgoritme.
- ▶ Etterlikner biologiske nevrale nettverk.
- ▶ Kunstige nevroner sender signaler i form av matematiske funksjoner.

Biologisk neuron

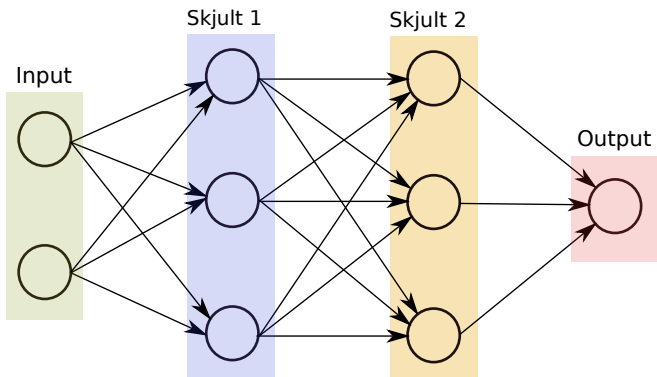


Kunstig neuron



$$y = f \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b_i \right) = f(u)$$

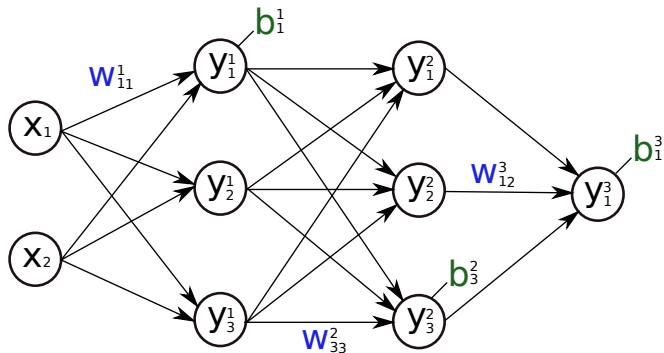
- ▶ x_i : Inputsignaler.
- ▶ w_i : Vekter - forsterkning/forminksning.
- ▶ u : Sum - signalmiksing i soma.
- ▶ $f(u)$: Akteriveringsfunksjon - aksjonspotensial.



Fully-connected feed-forward nettverk.

- ▶ Hvert nevron i et lag er koblet til alle nevroner i neste lag.
- ▶ Informasjon propageres kun fremover fra input til output.

Detaljert beskrivelse

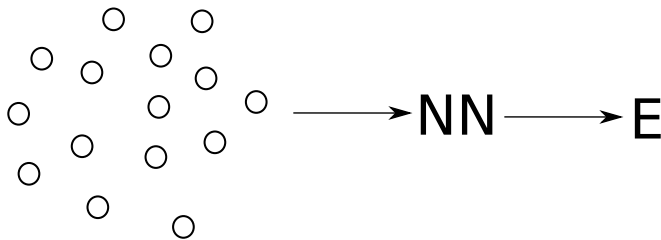


- ▶ Hver forbindelse/pil har en vekt w .
- ▶ Hver node har en bias b .
- ▶ Vektene og biasene $\{w, b\}$ er nettverkets parametre (25 stk).

Analytisk uttrykk

$$\begin{aligned} y_1^3 &= f_3 \left[\sum_{j=1}^3 w_{1j}^3 f_2 \left(\sum_{k=1}^3 w_{jk}^2 f_1 \left(\sum_{m=1}^2 w_{km}^1 x_m + b_k^1 \right) + b_j^2 \right) + b_1^3 \right] \\ &= f_3(x_1, x_2) \end{aligned}$$

- ▶ Mapping: $(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 \rightarrow y_1^3 \in \mathbb{R}$.
- ▶ Kan approksimere en rekke funksjoner ved å justere parameterne.
- ▶ Dimensjonene til nettet (inputs og outputs) må stemme overens med funksjonen som skal tilpasses.
- ▶ Et nettverk med ett skjult lag kan approksimere enhver kontinuerlig funksjon.



Regresjon med nevralt nettverk

- ▶ Mål: Interpolere datasett av konfigurasjoner X og energier Y slik at $NN : X \in \mathbb{R}^n \rightarrow Y \in \mathbb{R}$.
- ▶ Referansenergiene Y regnes ut kvantemekanisk.
- ▶ Iterativt justere parameterne slik at nettets output matcher referanseenergiene - *trening*.
- ▶ Én enkelt konfigurasjon kalles et *treningseksempel*, og datasettet (X, Y) kalles et *treningssett*.

Feilen til nettet defineres ved en cost-funksjon:

Gjennomsnittlig kvadratisk feil:

$$\Gamma = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (Y_i - y_i)^2$$

Cost-funksjonen minimeres med gradient descent:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \gamma \nabla_{\theta_k} \Gamma(\theta)$$

- ▶ θ_k : Vektor av parametre ved iterasjon k .
- ▶ γ : Steglengde/læringsrate.

Hvordan finne gradienten av et nevralt nettverk?

$$y_1^3 = f_3 \left[\sum_{j=1}^3 w_{1j}^3 f_2 \left(\sum_{k=1}^3 w_{jk}^2 f_1 \left(\sum_{m=1}^2 w_{km}^1 x_m + b_k^1 \right) + b_j^2 \right) + b_1^3 \right]$$

Backpropagation

- ▶ Verdien av cost-funksjonen (feilen) propageres *bakover* fra output til input.
- ▶ Alle deriverte innhentes ved å propagere feilen én gang.
- ▶ En anvendelse av kjerneregelen.

Table of Contents

Molekylærdynamikk

Nevrale nettverk

Nevralt nettverk-potensial (NNP)

NNP for Si

Konklusjon og fremtidig arbeid

Hvor mange nettverk?

- ▶ Ett nettverk: Uhåndterlig størrelse.
- ▶ Atomære nettverk,

$$E = \sum_{i=1}^N E_i$$

- ▶ Behler-Parrinello: Hver atomenergi E_i avhenger kun av naboatomer innenfor en cutoff-radius r_c .

Høydimensjonalt potensial - utfordringer

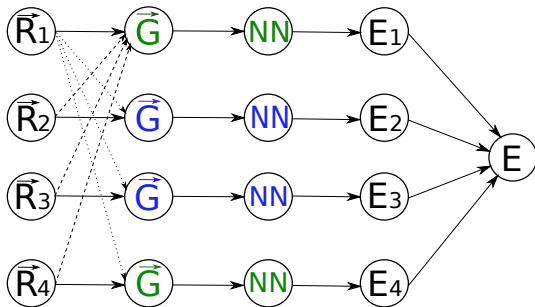
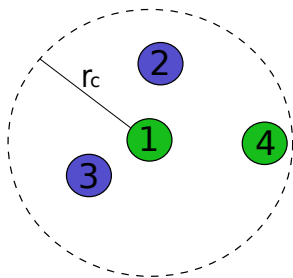
1. Varierende antall naboer.
2. Translasjonell og rotasjonell invarians.
3. Rekkefølgen på naboer.

Behler-Parrinello-metoden: Symmetrifunksjoner

1. Et sett av såkalte symmetrifunksjoner transformerer de kartesiske koordinatene til alle naboer til en vektor av symmetriverdier.
2. Symmetrifunksjonene er atomsentrerte.
3. Symmetrifunksjonene er definert som summer over naboer.

Behler-Parrinello

- ▶ Symmetrifunksjone beskriver hvert atoms kjemiske omgivelser.
- ▶ Hvert atom har både et eget nettverk og et eget sett av symmetrifunksjoner.
- ▶ Alle atomer av samme kjemiske element har identiske nettverk og symmetrifunksjonssett.

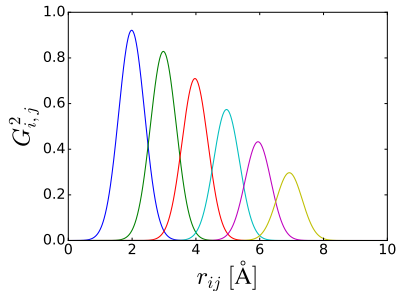
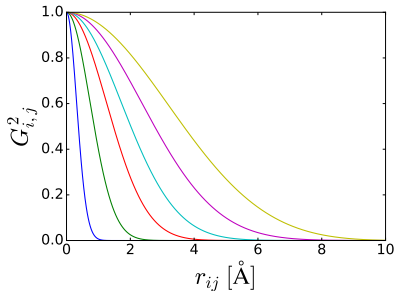


Symmetrifunksjoner

To typer: Radielle og angulære symmetrifunksjoner.
Funksjoner av alle naboatomer.

$$G_i^2 = \sum_j G_{ij}^2(r_{ij}; \{p_i\})$$

Trenger et sett av slike funksjoner med forskjellige parametre:



Angulære symmetrifunksjoner

$$G_i^5 = \sum_{j \neq i} \sum_{k > j} G_{ijk}^5(r_{ij}, r_{ik}, \theta_{jik}; \{p_i\})$$

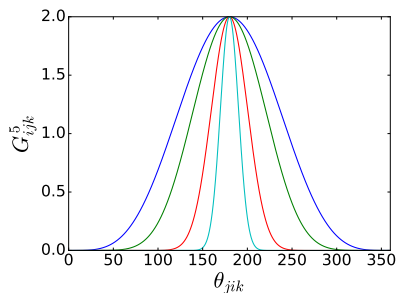
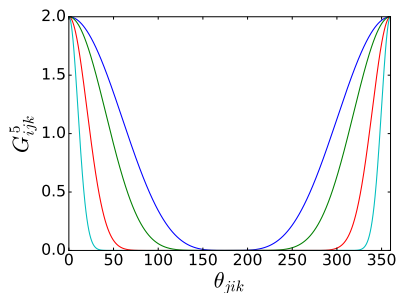
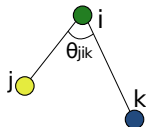


Table of Contents

Molekylærdynamikk

Nevrale nettverk

Nevralt nettverk-potensial (NNP)

NNP for Si

Konklusjon og fremtidig arbeid

Simuleringspakker

LAMMPS

- ▶ Pakke for klassisk molekylærdynamikk utviklet ved Sandia National Laboratories.
- ▶ Kjøres ved inputscripts med egen syntaks.
- ▶ Vi har utvidet med samplingsalgoritme og nevral nettverk-potensial.

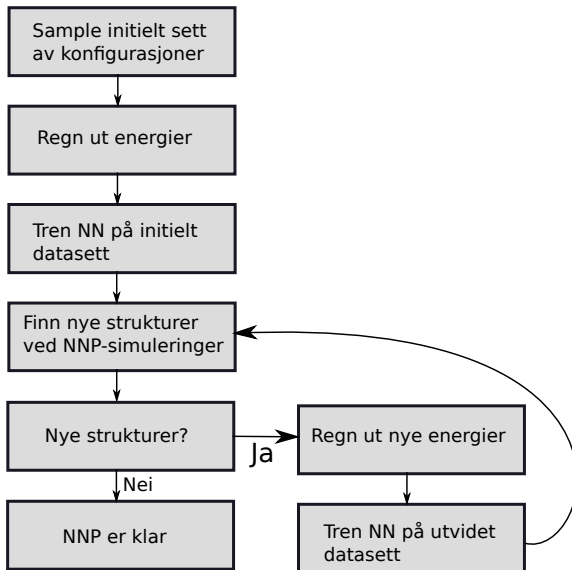
TensorFlow

- ▶ Maskinlæringspakke utviklet av Google.
- ▶ Vi har brukt TensorFlow Python API til å utvikle en modell for regresjon med nevrale nettverk.

Konstruksjon av et nevralt nettverk-potensial (NNP)

1. Generere treningsdata som er relevant for anvendelsen av potensialet, dvs. identifisere konfigurasjonsrommet.
2. Trene et nevralt nettverk for å tilpasse en funksjon til dataene.
3. Bruke det trente nettverket som et analytisk potensial i molekylærdynamikksimuleringer for å validere.

Sample konfigurasjonsrommet vha. MD-simuleringer



Konstruere et potensial for Si

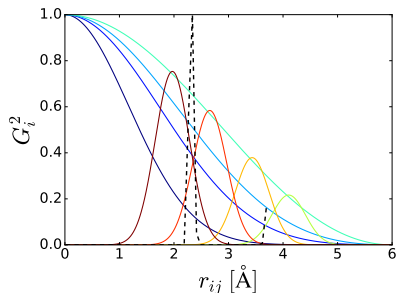
1. Initiell sampling

- ▶ Stillinger-Weber brukes til å regne ut referanseenergier.
- ▶ $T \in [0, 500]$ K.
- ▶ Konfigurasjoner og energies samples med vår samplingsalgoritme.

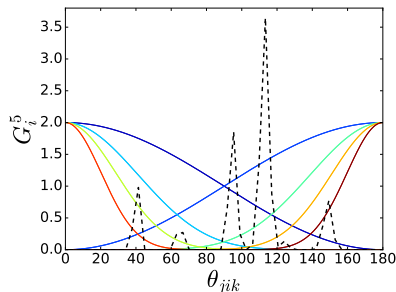
2. Foreløpig potensial

Initielt symmetrifunksjonssett

Radielle



Angulære



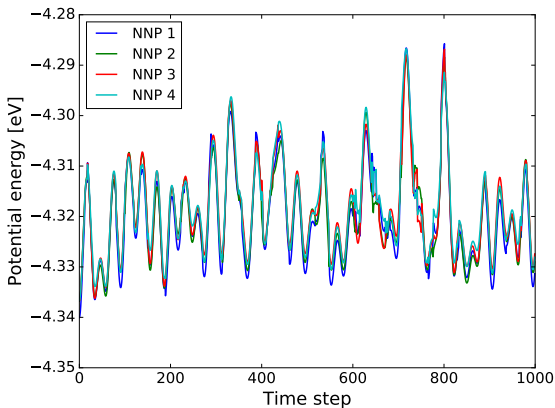
- ▶ Bør dekke konfigurasjonsrommet på en noenlunde uniform måte.
- ▶ Unngå symmetrifunksjoner som er null for alle konfigurasjoner.

Trener et nevralt nettverk for å konstruere et foreløpig potensial.

3. Iterativ sampling

Finne nye relevante konfigurasjoner

1. Trene fire forskjellige nett på samme treningssett.
2. Sammenlikne energier for de samme konfigurasjonene.

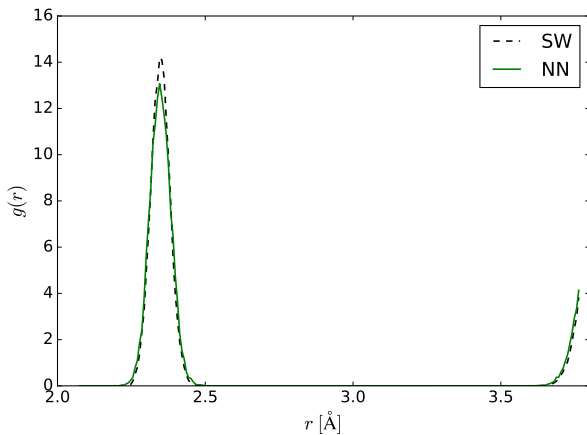


4. Tilpasse endelig treningssett

- ▶ RMSE energi per atom: 0.864 meV
- ▶ RMSE krefter per atom: 41.2 meV

5. Anvende potensialet

Sammenlikner tidsmidlet radiell distribusjonsfunksjon $g(r)$ for SW og NNP.



Mekaniske egenskaper

	NNP	Analytic SW	Relative error
Bulk modulus	103.0	101.4	1.58 %
Shear modulus	53.6	56.4	5.22 %
Poisson ratio	0.348	0.335	3.88 %

Table of Contents

Molekylærdynamikk

Nevrale nettverk

Nevralt nettverk-potensial (NNP)

NNP for Si

Konklusjon og fremtidig arbeid

Ab initio NNP med Behler-Parrinello-metoden

Fordeler

- ▶ Multiskalafysikk: Ab initio nøyaktighet, men flere størrelsesordener raskere enn kvantemekaniske metoder.
- ▶ Metoden er anvendbar på alle typer systemer (i teorien).
- ▶ Høydimensjonalt.
- ▶ Deler av konstruksjonen er automatisert.
- ▶ Analytisk derivert tilgjengelig.

Ab initio NNP med Behler-Parrinello-metoden

Ulemper

- ▶ Konstruksjonen kan ta lang tid dersom konfigurasjonsrommet er stort.
- ▶ Behler-Parrinello tungvint for system med mange atomtyper.
- ▶ Tregere enn empiriske potensialer som Stillinger-Weber.
- ▶ Dårlige ekstrapoleringsegenskaper.

Fremtidig arbeid

- ▶ *Ab initio* data.
- ▶ Mer nøyaktige krefter.
- ▶ Andre systemer.
- ▶ Optimering.