

Bagian III

Artificial Neural Network

Feedforward Neural Network

“If you want to make information stick, it’s best to learn it, go away from it for a while, come back to it later, leave it behind again, and once again return to it - to engage with it deeply across time. Our memories naturally degrade, but each time you return to a memory, you reactivate its neural network and help to lock it in.”

Joshua Foer

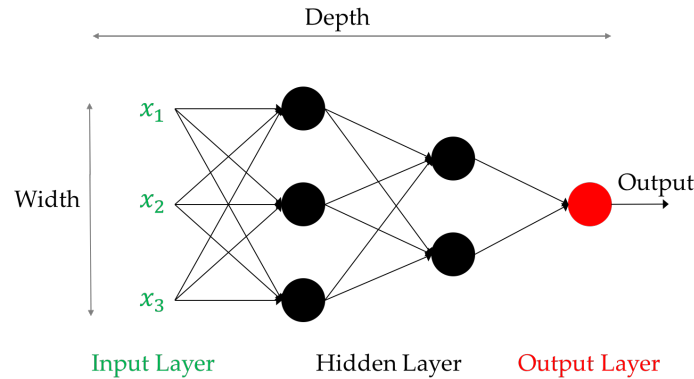
Bagian tiga membahas algoritma *machine learning* yang sedang populer belakangan ini, yaitu *artificial neural network*. Buku ini lebih berfokus pada penggunaan *artificial neural network* untuk *supervised learning*. Pembahasan dimulai dari hal-hal sederhana (*single perceptron*, *multilayer perceptron*) sampai yang lebih kompleks.

11.1 Definisi Artificial Neural Network

Masih ingatkah Anda materi pada bab-bab sebelumnya? *Machine learning* sebenarnya meniru bagaimana proses manusia belajar. Pada bagian ini, peneliti ingin meniru proses belajar tersebut dengan mensimulasikan jaringan saraf biologis (*neural network*) [40, 41, 42, 43]. Kami yakin banyak yang sudah tidak asing dengan istilah ini, berhubung *deep learning* sedang populer dan banyak yang membicarakannya (dan digunakan sebagai trik pemasaran). *Artificial neural network* adalah salah satu algoritma *supervised learning* yang populer dan bisa juga digunakan untuk *semi-supervised* atau *unsupervised learning* [41, 43, 44, 45, 46]. Walaupun tujuan awalnya adalah untuk mensimulasikan jaringan saraf biologis, jaringan tiruan ini sebenarnya simulasi

yang terlalu disederhanakan, artinya simulasi yang dilakukan tidak mampu menggambarkan kompleksitas jaringan biologis manusia¹.

Artificial Neural Network (selanjutnya disingkat ANN), menghasilkan model yang sulit dibaca dan dimengerti oleh manusia karena memiliki banyak layer (kecuali *single perceptron*) dan sifat **non-linear** (merujuk pada fungsi aktivasi). Pada bidang riset ini, ANN disebut agnostik—kita percaya, tetapi sulit membuktikan kenapa konfigurasi parameter yang dihasilkan *training* bisa benar. Konsep matematis ANN itu sendiri cukup *solid*, tetapi *interpretability* model rendah menyebabkan kita tidak dapat menganalisa proses inferensi yang terjadi pada model ANN. Secara matematis, ANN ibarat sebuah graf. ANN memiliki neuron/*node* (*vertex*), dan sinapsis (*edge*). Topologi ANN akan dibahas lebih detil subbab berikutnya. Karena memiliki struktur seperti graf, operasi pada ANN mudah dijelaskan dalam notasi aljabar linear. Sebagai gambaran, ANN berbentuk seperti Gambar 11.1 (*deep neural network*, salah satu varian arsitektur). *Depth* (kedalaman) ANN mengacu pada jumlah *layer*. Sementara *width* (lebar) ANN mengacu pada jumlah unit pada *layer*.



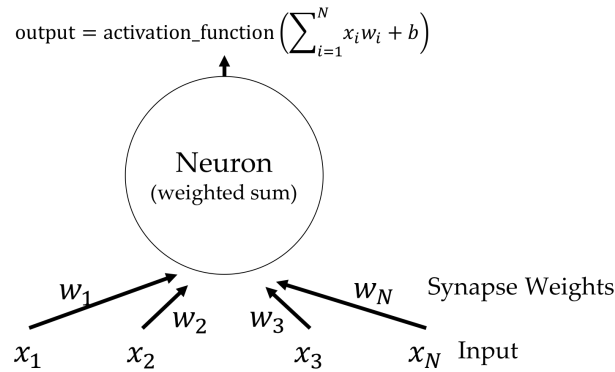
Gambar 11.1. *Deep Neural Network*

11.2 Single Perceptron

Bentuk terkecil (minimal) sebuah ANN adalah *single perceptron* yang hanya terdiri dari sebuah neuron. Sebuah neuron diilustrasikan pada Gambar 11.2. Secara matematis, terdapat *feature vector* \mathbf{x} yang menjadi *input* bagi neuron tersebut. Ingat kembali, *feature vector* merepresentasikan suatu *data point*, *event* atau instans. Neuron akan memproses *input* \mathbf{x} melalui perhitungan

¹ Quora: why is Geoffrey Hinton suspicious of backpropagation and wants AI to start over

jumlah perkalian antara nilai *input* dan ***synapse weight***, yang dilewatkan pada **fungsi non-linear** [47, 48, 4]. Pada *training*, yang dioptimasi adalah nilai *synapse weight* (*learning parameter*). Selain itu, terdapat juga bias b sebagai kontrol tambahan (ingat materi *steepest gradient descent*). *Output* dari neuron adalah hasil fungsi aktivasi dari perhitungan jumlah perkalian antara nilai *input* dan *synapse weight*. Ada beberapa macam fungsi aktivasi, misal ***step function***, ***sign function***, ***rectifier*** dan ***sigmoid function***. Untuk selanjutnya, pada bab ini, fungsi aktivasi yang dimaksud adalah jenis ***sigmoid function***. Silahkan eksplorasi sendiri untuk fungsi aktivasi lainnya. Salah satu bentuk tipe ***sigmoid function*** diberikan pada persamaan 11.1. Bila di-*plot* menjadi grafik, fungsi ini memberikan bentuk seperti huruf S.



Gambar 11.2. Single Perceptron

$$\sigma(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (11.1)$$

Perhatikan kembali, Gambar 11.2 sesungguhnya adalah operasi aljabar linear. Single perceptron dapat dituliskan kembali sebagai 11.2.

$$o = f(\mathbf{x} \cdot \mathbf{w} + b) \quad (11.2)$$

dimana o adalah *output* dan f adalah fungsi **non-linear yang dapat diturunkan secara matematis** (*differentiable non-linear function* – selanjutnya disebut “fungsi non-linear” saja.). Bentuk ini tidak lain dan tidak bukan adalah persamaan model linear yang ditransformasi dengan fungsi non-linear. Secara filosofis, ANN bekerja mirip dengan model linear, yaitu mencari *decision boudary*. Apabila beberapa model non-linear ini digabungkan, maka kemampuannya akan menjadi lebih hebat (subbab berikutnya). Yang menjadikan ANN “spesial” adalah penggunaan fungsi non-linear.

Untuk melakukan pembelajaran *single perceptron*, *training* dilakukan menggunakan ***perceptron training rule***. Prosesnya sebagai berikut [4, 47, 48]:

1. Inisiasi nilai *synapse weights*, bisa *random* ataupun dengan aturan tertentu. Untuk heuristik aturan inisiasi, ada baiknya membaca buku referensi [1, 11].
2. Lewatkan input pada neuron, kemudian kita akan mendapatkan nilai *output*. Kegiatan ini disebut ***feedforward***.
3. Nilai *output* (*actual output*) tersebut dibandingkan dengan *desired output*.
4. Apabila nilai *output* sesuai dengan *desired output*, tidak perlu mengubah apa-apa.
5. Apabila nilai *output* tidak sesuai dengan *desired output*, hitung nilai *error* (*loss*) kemudian lakukan perubahan terhadap *learning parameter* (*synapse weight*).
6. Ulangi langkah-langkah ini sampai tidak ada perubahan nilai *error*, nilai *error* kurang dari sama dengan suatu *threshold* (biasanya mendekati 0), atau sudah mengulangi proses latihan sebanyak T kali (*threshold*).

Error function diberikan pada persamaan 11.3 ² (dapat diganti dengan *absolute value*) dan perubahan *synapse weight* diberikan pada persamaan 11.4, dimana y melambangkan *desired output*³, $o = f(\mathbf{x} \cdot \mathbf{w} + \mathbf{b})$ melambangkan *actual output* untuk \mathbf{x} sebagai input. η disebut sebagai *learning rate*.

$$E(\mathbf{w}) = (y - o)^2 \quad (11.3)$$

$$\Delta w_i = \eta(y - o)x_i \quad (11.4)$$

Hasil akhir pembelajaran adalah konfigurasi *synapse weight*. Saat klasifikasi, kita melewati *input* baru pada jaringan yang telah dibangun, kemudian tinggal mengambil hasilnya. Pada contoh kali ini, seolah-olah *single perceptron* hanya dapat digunakan untuk melakukan *binary classification* (hanya ada dua kelas, nilai 0 dan 1). Untuk *multi-class classification*, kita dapat menerapkan berbagai strategi, misal *thresholding*, i.e., nilai *output* 0–0.2 mengacu pada kelas pertama, 0.2 – 0.4 untuk kelas kedua, dst.

11.3 Permasalahan XOR

Sedikit sejarah, *perceptron* sebenarnya cukup populer sekitar tahun 1950-1960. Entah karena suatu sebab, *perceptron* menjadi tidak populer dan digantikan oleh model linear. Saat itu, belum ada algoritma yang bekerja dengan relatif bagus untuk melatih *perceptron* yang digabungkan (*multilayer perceptron*). Model linear mendapat popularitas hingga kira-kira dapat disebut sekitar

² Pada umumnya, kita tidak menggunakan satu data, tetapi *batch-sized*.

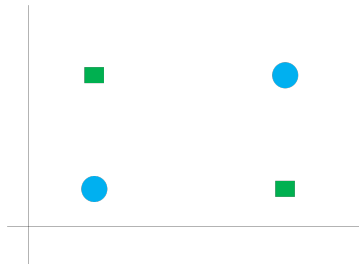
³ Pada contoh ini, kebetulan jumlah *output* neuron hanyalah satu.

tahun 1990'an atau awal 2000'an. Berkat penemuan *backpropagation* sekitar awal 1980⁴, *multilayer perceptron* menjadi semakin populer. Perlu dicatat, komunitas riset bisa jadi seperti cerita ini. Suatu teknik yang baru belum tentu bisa segera diimplementasikan karena beberapa kendala (misal kendala kemampuan komputasi).

Pada bab-bab sebelumnya, kamu telah mempelajari model linear dan model probabilistik. Kita ulangi kembali contoh data yang bersifat *non-linearly separable*, yaitu XOR yang operasinya didefinisikan sebagai:

- $\text{XOR}(0, 0) = 0$
- $\text{XOR}(1, 0) = 1$
- $\text{XOR}(0, 1) = 1$
- $\text{XOR}(1, 1) = 0$

Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 11.3. Jelas sekali, XOR ini adalah fungsi yang tidak dapat diselesaikan secara langsung oleh model linear.



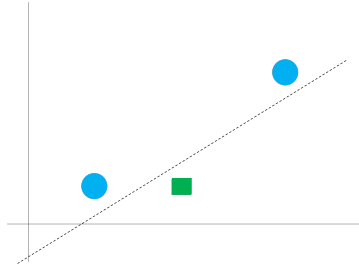
Gambar 11.3. Permasalahan XOR

Seperti yang diceritakan pada bab model linear, solusi permasalahan ini adalah dengan melakukan transformasi data menjadi *linearly-separable*, misalnya menggunakan fungsi non-linear pada persamaan 11.5 dimana (x, y) adalah absis dan ordinat. Hasil transformasi menggunakan fungsi ini dapat dilihat pada Gambar 11.4. Jelas sekali, data menjadi *linearly separable*.

$$\phi(x, y) = (x \times y, x + y) \quad (11.5)$$

Sudah dijelaskan pada bab model linear, permasalahan dunia nyata tidak sederhana ini (kebetulan ditransformasikan menjadi data dengan dimensi yang sama). Pada permasalahan praktis, kita harus mentransformasi data menjadi dimensi lebih tinggi (dari 2D menjadi 3D). Berbeda dengan ide utama linear model/*kernel method* tersebut, **prinsip ANN adalah untuk melewatkan data pada fungsi non-linear** (*non-linearities*). Sekali lagi penulis ingin tekankan, ANN secara filosofis adalah **trainable non-linear mapping functions**. ANN mampu mentransformasi data ke *space*/ruang konsep yang

⁴ <http://people.idsia.ch/~juergen/who-invented-backpropagation.html>



Gambar 11.4. XOR ditransformasi. Segiempat berwarna hijau sebenarnya melambangkan dua instans (yang setelah ditransformasi kebetulan berlokasi pada tempat yang sama)

berbeda (bisa pada dimensi lebih tinggi atau lebih rendah), lalu mencari *non-linear decision boundary* dengan *non-linear functions*. Interaksi antar-fitur juga dapat dimodelkan secara non-linear.

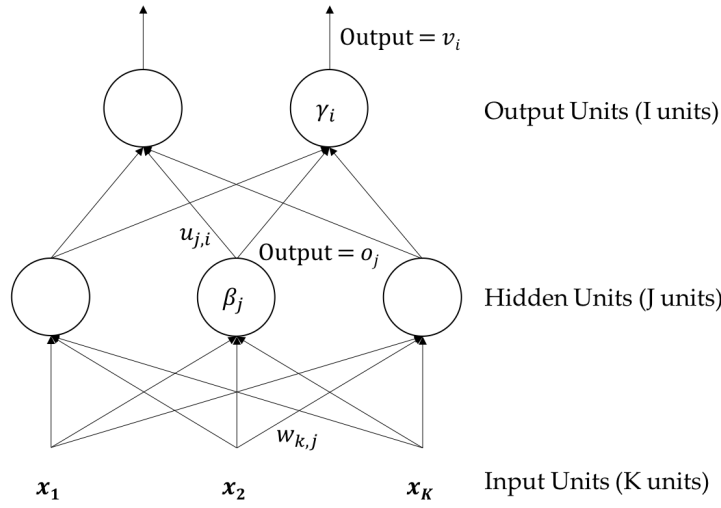
Perlu dicatat, pemodelan non-linear inilah yang membuat ANN menjadi hebat. ANN mungkin secara luas didefinisikan mencakup *single perceptron* tetapi secara praktis, **ANN sebenarnya mengacu pada *multilayer perceptron* dan arsitektur lebih kompleks** (dijelaskan pada subbab berikutnya). Pada masa ini, (hampir) tidak ada lagi yang menggunakan *single perceptron*. Untuk bab-bab kedepan, ketika kami menyebut ANN maka yang diacu adalah *multilayer perceptron* dan arsitektur lebih kompleks (*single perceptron* di-exclude). Hal ini disebabkan oleh *single perceptron* tidak dapat mempelajari XOR *function* secara independen tanpa *feature engineering*, sementara *multilayer perceptron* bisa [49].

11.4 Multilayer Perceptron

Kamu sudah belajar bagaimana proses *training* untuk *single perceptron*. Selanjutnya kita akan mempelajari *multilayer perceptron* (MLP) yang juga dikenal sebagai ***feedforward neural network***. Kami tekankan sekali lagi, **istilah “ANN” selanjutnya mengacu pada MLP dan arsitektur lebih kompleks**.

Perhatikan ilustrasi pada Gambar 11.5, *multilayer perceptron* secara literal memiliki beberapa *layers*. Pada *lecture note* ini, secara umum ada tiga *layers*: *input*, *hidden*, dan *output layer*. *Input layer* menerima *input* (tanpa melakukan operasi apapun), kemudian nilai *input* (tanpa dilewatkan ke fungsi aktivasi) diberikan ke *hidden units* (persamaan 11.6). Pada *hidden units*, *input* diproses dan dilakukan perhitungan hasil fungsi aktivasi untuk tiap-tiap neuron, lalu hasilnya diberikan ke *layer* berikutnya (persamaan 11.7). *Output* dari *input layer* akan diterima sebagai input bagi *hidden layer*. Begitu pula seterusnya *hidden layer* akan mengirimkan hasilnya untuk *output layer*.

Kegiatan ini dinamakan **feed forward** [41, 4]. Hal serupa berlaku untuk *artificial neural network* dengan lebih dari tiga *layers*. Parameter neuron dapat dioptimisasi menggunakan metode *gradient-based optimization* (dibahas pada subbab berikutnya, ingat kembali bab 5). Perlu diperhatikan, MLP adalah gabungan dari banyak fungsi non-linear. Seperti yang disampaikan pada subbab sebelumnya, gabungan banyak fungsi non-linear ini lebih hebat dibanding *single perceptron*. Seperti yang kamu lihat pada Gambar 11.5, masing-masing neuron terkoneksi dengan semua neuron pada *layer* berikutnya. Konfigurasi ini disebut sebagai **fully connected**. MLP pada umumnya menggunakan konfigurasi *fully connected*.



Gambar 11.5. *Multilayer Perceptron 2*

$$o_j = \sigma \left(\sum_{k=1}^K x_k w_{k,j} + \beta_j \right) \quad (11.6)$$

$$v_i = \sigma \left(\sum_{j=1}^J o_j u_{j,i} + \gamma_i \right) = \sigma \left(\sum_{j=1}^J \sigma \left(\sum_{k=1}^K x_k w_{k,j} + \beta_j \right) u_{j,i} + \gamma_i \right) \quad (11.7)$$

Perhatikan persamaan 11.6 dan 11.7 untuk menghitung *output* pada *layer* yang berbeda. u, w adalah *learning parameters*. β, γ melambangkan *noise* atau *bias*. K adalah banyaknya *input units* dan J adalah banyaknya *hidden units*.

Persamaan 11.7 dapat disederhanakan penulisannya sebagai persamaan 11.8. Persamaan 11.8 terlihat relatif lebih “elegan”. Seperti yang disebutkan pada subbab sebelumnya, ANN dapat direpresentasikan dengan notasi operasi aljabar.

$$\mathbf{v} = \sigma(\mathbf{oU} + \gamma) = \sigma((\sigma(\mathbf{xW} + \beta))\mathbf{U} + \gamma) \quad (11.8)$$

Untuk melatih MLP, algoritma yang umumnya digunakan adalah **backpropagation** [50]. Arti kata *backpropagation* sulit untuk diterjemahkan ke dalam bahasa Indonesia. Kita memperbaharui parameter (*synapse weights*) secara bertahap (dari *output* ke *input* layer, karena itu disebut *backpropagation*) berdasarkan *error/loss* (*output* dibandingkan dengan *desired output*). Intinya adalah mengkoreksi *synapse weight* dari *output layer* ke *hidden layer*, kemudian *error* tersebut dipropagasi ke layer sebelum-sebelumnya. Artinya, perubahan *synapse weight* pada suatu layer dipengaruhi oleh perubahan *synapse weight* pada layer setelahnya⁵. *Backpropagation* tidak lain dan tidak bukan adalah metode *gradient-based optimization* yang diterapkan pada ANN.

Pertama-tama diberikan pasangan *input* (\mathbf{x}) dan *desired output* (\mathbf{y}) sebagai *training data*. Untuk meminimalkan *loss*, algoritma *backpropagation* menggunakan prinsip *gradient descent* (ingat kembali materi bab model linear). Kamu akan mempelajari bagaimana cara menurunkan *backpropagation* menggunakan teknik *gradient descent*, yaitu menghitung *loss* ANN pada Gambar 11.5 yang menggunakan fungsi aktivasi sigmoid. Untuk fungsi aktivasi lainnya, pembaca dapat mencoba menurunkan persamaan sendiri!

Ingat kembali *chain rule* pada perkuliahan diferensial

$$f(g(x))' = f'(g(x))g'(x). \quad (11.9)$$

Error, untuk MLP diberikan oleh persamaan 11.10 (untuk satu data *point*), dimana I adalah banyaknya *output unit* dan θ adalah kumpulan *weight matrices* (semua parameter pada MLP). Kami ingatkan kembali perhitungan *error* bisa juga menggunakan nilai absolut⁶.

$$E(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I (y_i - v_i)^2 \quad (11.10)$$

Mari kita lakukan proses penurunan untuk melatih MLP. *Error/loss* diturunkan terhadap tiap *learning parameter*.

Diferensial $u_{j,i}$ diberikan oleh turunan *sigmoid function*

$$\begin{aligned} \frac{\delta E(\theta)}{\delta u_{j,i}} &= (y_i - v_i) \frac{\delta v_i}{\delta u_{j,i}} \\ &= (y_i - v_i) v_i (1 - v_i) o_j \end{aligned}$$

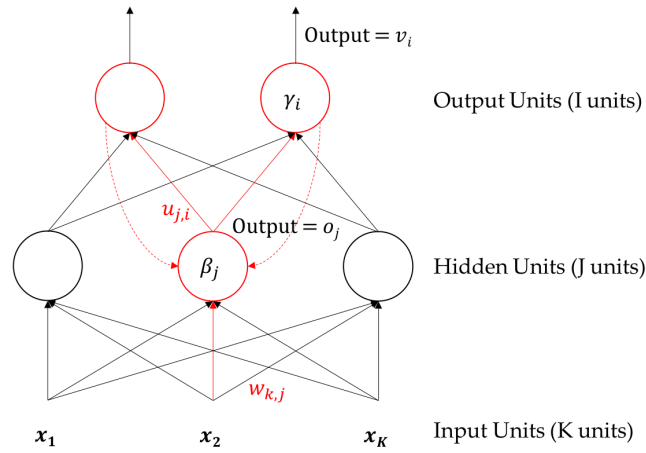
⁵ Kata “setelah” mengacu *layer* yang menuju *output layer*, “sebelum” mengacu *layer* yang lebih dekat dengan *input layer*.

⁶ Kami menggunakan tanda kurung agar lebih mudah dibaca penurunan rumusnya.

Diferensial $w_{k,j}$ diberikan oleh turunan *sigmoid function*

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta E(\theta)}{\delta w_{k,j}} &= \sum_{i=1}^I (y_i - v_i) \frac{\delta v_i}{\delta w_{k,j}} \\
 &= \sum_{i=1}^I (y_i - v_i) \frac{\delta v_i}{\delta o_j} \frac{\delta o_j}{\delta w_{k,j}} \\
 &= \sum_{i=1}^I (y_i - v_i) (v_i(1 - v_i) u_{j,i}) (o_j(1 - o_j) x_k)
 \end{aligned}$$

Perhatikan, diferensial $w_{k,j}$ memiliki \sum sementara $u_{j,i}$ tidak ada. Hal ini disebabkan karena $u_{j,i}$ hanya berkorespondensi dengan satu *output* neuron. Sementara $w_{k,j}$ berkorespondensi dengan banyak *output* neuron. Dengan kata lain, nilai $w_{k,j}$ mempengaruhi hasil operasi yang terjadi pada banyak *output* neuron, sehingga banyak neuron mempropagasi *error* kembali ke $w_{k,j}$. Ilustrasi diberikan pada Gambar 11.6.



Gambar 11.6. Justifikasi penggunaan \sum pada penurunan dari *hidden* ke *input* layer

Metode penurunan serupa dapat juga digunakan untuk menentukan perubahan β dan γ . Jadi proses *backpropagation* untuk kasus Gambar 11.5 dapat diberikan seperti pada Gambar 11.7 dimana η adalah *learning rate*. Untuk *artificial neural network* dengan lebih dari 3 *layers*, kita pun bisa menurunkan

persamaannya. Secara umum, proses melatih ANN (apapun variasi arsitekturnya) mengikuti *framework perceptron training rule* (subbab 11.2).

<p>(2) Hidden to Output</p> $v_i = \sigma \left(\sum_{j=1}^J o_j u_{j,i} + \gamma_i \right)$	<p>(3) Output to Hidden</p> $\begin{aligned} \delta_i &= (y_i - v_i)v_i(1 - v_i) \\ \Delta u_{j,i} &= -\eta(t)\delta_i o_j \\ \Delta \gamma_i &= -\eta(t)\delta_i \end{aligned}$
<p>(1) Input to Hidden Layer</p> $o_j = \sigma \left(\sum_{k=1}^K x_k w_{k,j} + \beta_j \right)$	<p>(4) Hidden to Input</p> $\begin{aligned} \varphi_j &= \sum_{i=1}^I \delta_i u_{j,i} o_j (1 - o_j) \\ \Delta w_{k,j} &= -\eta(t)\varphi_j x_k \\ \Delta \beta_j &= -\eta(t)\varphi_j \end{aligned}$

Gambar 11.7. Proses latihan MLP menggunakan *backpropagation*

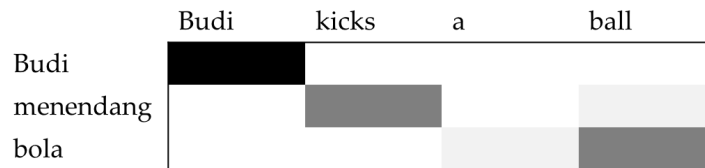
11.5 Interpretability

Interpretability ada dua macam yaitu *model interpretability* (i.e., apakah struktur model pembelajaran mesin dapat dipahami) dan *prediction interpretability* (i.e., bagaimana memahami dan memverifikasi cara *input* dipetakan menjadi *output*) [51]. Contoh teknik pembelajaran mesin yang mudah diinterpretasikan baik secara struktur dan prediksinya adalah *decision tree* (bab 6.2). Struktur *decision tree* berupa pohon keputusan mudah dimengerti oleh manusia dan prediksi (keputusan) dapat dilacak (*trace*). Seperti yang sudah dijelaskan pada bagian pengantar, ANN (MLP) biasanya dianggap sebagai metode *black box* atau susah untuk diinterpretasikan (terutama *model interpretability*-nya). Hal ini disebabkan oleh kedalaman (*depth*) yaitu memiliki beberapa *layer* dan *non-linearities*. Suatu unit pada *output layer* dipengaruhi oleh kombinasi (*arbitrary combination*) banyak parameter pada *layers* sebelumnya yang dilewatkan pada fungsi non-linear. Sulit untuk mengetahui bagaimana pengaruh bobot suatu unit pada suatu *layer* berpengaruh pada *output layer*, beserta bagaimana pengaruh kombinasi bobot. Intinya, fitur dan *output* tidak memiliki korespondensi satu-satu. Berbeda dengan model linear, kita tahu parameter (dan bobotnya) untuk setiap *input*. Salah satu arah riset adalah mencari cara agar keputusan yang dihasilkan oleh ANN dapat dijelaskan [52]⁷, salah satu contoh nyata adalah *attention mechanism* [53, 54]

⁷ Karena struktur lebih susah, setidaknya beranjak dari keputusan terlebih dahulu

(subbab 13.4.4) untuk *prediction interpretability*. Survey tentang *interpretability* dapat dibaca pada *paper* oleh Doshi-Velez dan Kim [55].

Cara paling umum untuk menjelaskan keputusan pada ANN adalah menggunakan *heat map*. Sederhananya, kita lewatkan suatu data \mathbf{x} pada ANN, kemudian kita lakukan *feed-forward* sekali (misal dari *input* ke *hidden layer* dengan parameter \mathbf{W}). Kemudian, kita visualisasikan $\mathbf{x} \cdot \mathbf{W}$ (ilustrasi pada Gambar 11.8). Dengan ini, kita kurang lebih dapat mengetahui bagian *input* mana yang berpengaruh terhadap keputusan di *layer* berikutnya.



Gambar 11.8. Contoh *heat map* (*attention mechanism*) pada mesin translati. Warna lebih gelap menandakan bobot lebih tinggi. Sebagai contoh, kata “menendang” berkorespondensi paling erat dengan kata “kicks”

11.6 Binary Classification

Salah satu strategi untuk *binary classification* adalah dengan menyediakan hanya satu *output unit* di jaringan. Kelas pertama direpresentasikan dengan -1 , kelas kedua direpresentasikan dengan nilai 1 (setelah diaktivasi). Hal ini dapat dicapai dengan fungsi non-linear seperti sign^8 atau \tanh^9 . Apabila kita tertarik dengan probabilitas masuk ke dalam suatu kelas, kita dapat menggunakan fungsi seperti sigmoid^{10} , dimana *output* pada masing-masing neuron berada pada *range* nilai $[0, 1]$.

11.7 Multi-class Classification

Multilayer perceptron dapat memiliki *output unit* berjumlah lebih dari satu. Seumpama kita mempunyai empat kelas, dengan demikian kita dapat merepresentasikan keempat kelas tersebut sebagai empat *output units*. Kelas pertama direpresentasikan dengan unit pertama, kelas kedua dengan unit kedua, dst. Untuk C kelas, kita dapat merepresentasikannya dengan C *output units*. Kita dapat merepresentasikan data harus dimasukkan ke kelas mana

⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Sign_function

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperbolic_function

¹⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Sigmoid_function

menggunakan *sparse vector*, yaitu bernilai 0 atau 1. Elemen ke- i bernilai 1 apabila data masuk ke kelas c_i , sementara nilai elemen lainnya adalah 0 (ilustrasi pada Gambar 11.9). *Output* ANN dilewatkan pada suatu fungsi softmax yang melambungkan probabilitas *class-assignment*; i.e., kita ingin *output* agar semirip mungkin dengan *sparse vector* (*desired output*). Pada kasus ini, *output* ANN adalah sebuah distribusi yang melambungkan *input* di-assign ke kelas tertentu. Ingat kembali materi bab 5, *cross entropy* cocok digunakan sebagai *utility function* ketika *output* berbentuk distribusi.

$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	Kelas pertama
	Kelas kedua
	Kelas ketiga
	Kelas keempat

Gambar 11.9. Ilustrasi representasi *desired output* pada *multi-class classification*

11.8 Multi-label Classification

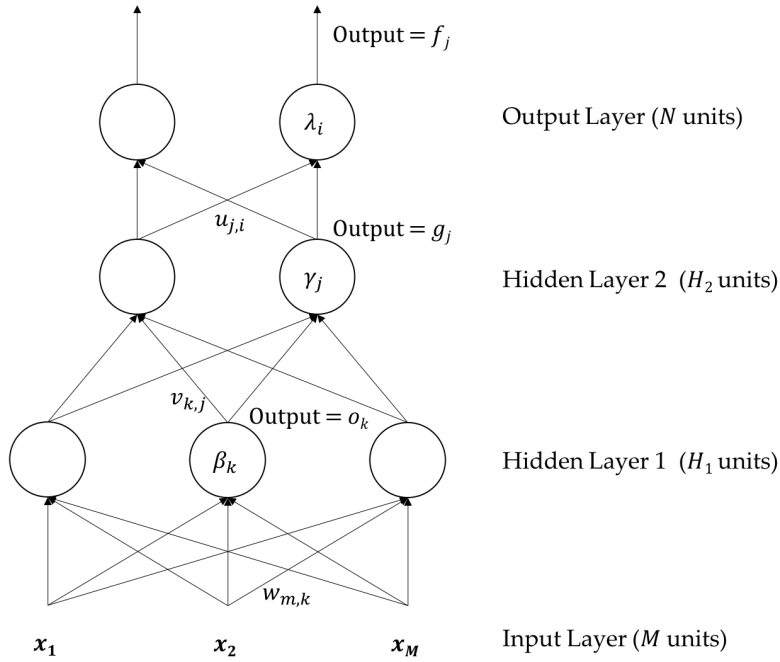
Seperti halnya *multi-class classification*, kita dapat menggunakan sejumlah C neuron untuk merepresentasikan C kelas pada *multi-label classification*. Seperti yang sudah dijelaskan pada bab 5, perbedaan *multi-class* dan *multi-label* terletak pada cara interpretasi *output* dan evaluasi *output*. Pada umumnya, *layer* terakhir diaktivasi dengan fungsi sigmoid, dimana tiap neuron n_i merepresentasikan probabilitas suatu dapat diklasifikasikan sebagai kelas c_i atau tidak (Gambar 11.10). *Cross entropy* juga cocok untuk mengevaluasi (dan melatih) *multi-label classification*.

c_1	c_2	c_3	c_4	
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$				Label = c_1, c_3
				Label = c_2
				Label = c_1, c_4
				Label = c_2, c_3, c_4

Gambar 11.10. Ilustrasi representasi *desired output* pada *multi-label classification*

11.9 Deep Neural Network

Deep Neural Network (DNN) adalah *artificial neural network* yang memiliki banyak *layer*. Pada umumnya, *deep neural network* memiliki lebih dari 3 *layers*



Gambar 11.11. Deep Neural Network

(input layer, N hidden layers, output layer), dengan kata lain adalah MLP dengan lebih banyak layer. Karena ada relatif banyak layer, disebutlah *deep*. Proses pembelajaran pada DNN disebut sebagai *deep learning*¹¹ [9]. Jaringan neural network pada DNN disebut *deep neural network*¹².

Perhatikan Gambar 11.11 yang memiliki 4 layers. Cara menghitung *final output* sama seperti MLP, diberikan pada persamaan 11.11 dimana β, γ, λ adalah *noise* atau *bias*.

$$f_i = \sigma \left(\sum_{j=1}^{H_2} u_{j,i} \sigma \left(\sum_{k=1}^{H_1} v_{k,j} \sigma \left(\sum_{m=1}^M x_m w_{m,k} + \beta_k \right) + \gamma_j \right) + \lambda_i \right) \quad (11.11)$$

Cara melatih *deep neural network*, salah satunya dapat menggunakan *back-propagation*. Seperti pada bagian sebelumnya, kita hanya perlu menurunkan rumusnya saja. **Penurunan diserahkan pada pembaca sebagai latihan.** Hasil proses penurunan dapat dilihat pada Gambar 11.12.

¹¹ Hanya istilah keren saja, tak ada arti spesial!

¹² Terkadang disingkat menjadi *deep network* saja.

(3) Hidden 2 to Output

$$f_i = \sigma \left(\sum_{j=1}^{H_2} g_j u_{j,i} + \lambda_i \right)$$

(4) Output to Hidden 2

$$\begin{aligned} \delta_i &= (y_i - f_i) f_i (1 - f_i) \\ \Delta u_{j,i} &= -\eta(t) \delta_i g_j \\ \Delta \lambda_i &= -\eta(t) \delta_i \end{aligned}$$

(2) Hidden 1 to Hidden 2

$$g_j = \sigma \left(\sum_{k=1}^{H_1} o_k v_{k,j} + \gamma_j \right)$$

(5) Hidden 2 to Hidden 1

$$\begin{aligned} \varphi_j &= \sum_{i=1}^N \delta_i u_{j,i} g_j (1 - g_j) \\ \Delta v_{k,j} &= -\eta(t) \varphi_j o_k \\ \Delta \gamma_j &= -\eta(t) \varphi_j \end{aligned}$$

(1) Input to Hidden Layer

$$o_k = \sigma \left(\sum_{m=1}^M x_m w_{m,k} + \beta_k \right)$$

(6) Hidden 1 to Input

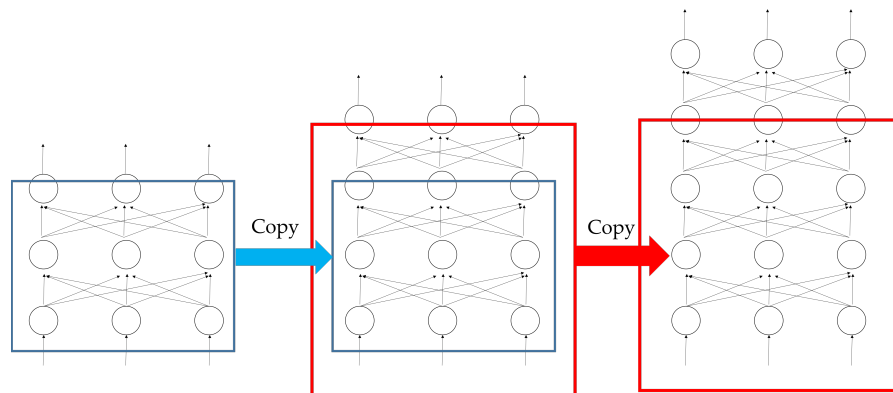
$$\begin{aligned} \mu_k &= \sum_{j=1}^{H_2} \varphi_j v_{k,j} o_k (1 - o_k) \\ \Delta w_{m,k} &= -\eta(t) \mu_k x_m \\ \Delta \beta_k &= -\eta(t) \mu_k \end{aligned}$$

Gambar 11.12. Proses latihan DNN menggunakan *backpropagation*

Deep network terdiri dari banyak *layer* dan *synapse weight*, karenanya estimasi parameter susah dilakukan. Arti filosofisnya adalah susah/lama untuk menentukan relasi antara *input* dan *output*. Walaupun *deep learning* sepertinya kompleks, tetapi entah kenapa dapat bekerja dengan baik untuk permasalahan praktis [9]. *Deep learning* dapat menemukan relasi “tersembunyi” antara *input* dan *output*, yang tidak dapat diselesaikan menggunakan *multi-layer perceptron* (3 layers). Perhatikan, kamu harus ingat bahwa satu langkah *feedforward* memiliki analogi dengan transformasi. Jadi, *input* ditransformasikan secara non-linear sampai akhirnya pada *output*, berbentuk distribusi *class-assignment*.

Banyak orang percaya *deep neural network* lebih baik dibanding *neural network* yang lebar tapi sedikit *layer*, karena terjadi lebih banyak transformasi. Maksud lebih banyak transformasi adalah kemampuan untuk merubah *input* menjadi suatu representasi (tiap *hidden layer* dapat dianggap sebagai salah satu bentuk representasi *input*) dengan langkah *hierarchial*. Seperti contoh permasalahan XOR, permasalahan *non-linearly separable* pun dapat diselesaikan apabila kita dapat mentransformasi data (representasi data) ke dalam bentuk *linearly separable* pada ruang yang berbeda. Keuntungan utama *deep learning* adalah mampu merubah data dari *non-linearly separable* menjadi *linearly separable* melalui serangkaian transformasi (*hidden layers*). Selain itu, *deep learning* juga mampu mencari *decision boundary* yang berbentuk non-linear, serta mensimulasikan interaksi non-linear antar fitur.

Karena memiliki banyak parameter, proses latihan ANN pada umumnya lambat. Ada beberapa strategi untuk mempercepat pembelajaran menggunakan deep learning, misalnya: regularisasi, *successive learning*, dan penggunaan *autoencoder* [9]. Sebagai contoh, arti *successive learning* adalah jaringan yang dibangun secara bertahap. Misal kita latih ANN dengan 3 *layers*, kemudian kita lanjutkan 3 *layers* tersebut menjadi 4 *layers*, lalu kita latih lagi menjadi 5 *layers*, dst. Hal ini sesuai dengan [56], yaitu mulai dari hal kecil. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 11.13. Menggunakan *deep learning* harus hati-hati karena pembelajaran cenderung *divergen* (artinya, *minimum squared error* belum tentu semakin rendah seiring berjalannya waktu – *swing* relatif sering).



Gambar 11.13. Contoh *successive learning*

11.10 Tips

Pada contoh yang diberikan, *error* atau *loss* dihitung per tiap data point. Artinya begitu ada melewati suatu *input*, parameter langsung dioptimisasi sesuai dengan *loss*. Pada umumnya, hal ini tidak baik untuk dilakukan karena ANN menjadi tidak stabil. Metode yang lebih baik digunakan adalah teknik *minibatches*. Yaitu mengoptimisasi parameter untuk beberapa buah *inputs*. Jadi, update parameter dilakukan per *batch*. Perhitungan *error* juga berubah, diberikan pada persamaan 11.12 dimana B melambangkan *batch size* (jumlah instans per *batch*), \mathbf{y} adalah *desired output* dan \mathbf{o} adalah *actual output*. Perhitungan *error* saat menggunakan *minibatches* secara sederhana adalah rata-rata (bisa diganti dengan jumlah saja) individual *error* untuk semua instans yang ada pada *batch* bersangkutan. Setelah menghitung *error* per *batch*, barulah *backpropagation* dilakukan.

$$E(\text{minibatch}) = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \|\mathbf{y} - \mathbf{o}\|^2 \quad (11.12)$$

Data mana saja yang dimasukkan ke suatu *batch* dalam dipilih secara acak. Seperti yang mungkin kamu sadari secara intuitif, urutan data yang disajikan saat *training* mempengaruhi kinerja ANN. Pengacakan ini menjadi penting agar ANN mampu menggeneralisasi dengan baik. Kita dapat mengatur laju pembelajaran dengan menggunakan *learning rate*. Selain menggunakan *learning rate*, kita juga dapat menggunakan *momentum* (subbab 5.6).

Pada library/API *deep learning*, *learning rate* pada umumnya berubah-ubah sesuai dengan waktu. Selain itu, tidak ada nilai khusus (*rule-of-thumb*) untuk *learning rate* terbaik. Pada umumnya, kita inisiasi *learning rate* dengan nilai $\{0.001, 0.01, 0.1, 1\}$ [1]. Biasanya, kita menginisiasi proses latihan dengan nilai *learning rate* cukup besar, kemudian mengecil seiring berjalannya waktu¹³. Kemudian, kita mencari konfigurasi parameter terbaik dengan metode **grid-search**¹⁴, yaitu dengan mencoba-coba parameter secara *exhaustive* (*brute-force*) kemudian memilih parameter yang memberikan kinerja terbaik.

ANN sensitif terhadap inisialisasi parameter, dengan demikian banyak metode inisialisasi parameter misalkan, nilai *synapse weights* diambil dari distribusi binomial (silahkan eksplorasi lebih lanjut). Dengan hal ini, kinerja ANN dengan arsitektur yang sama dapat berbeda ketika dilatih ulang dari awal. Untuk menghindari *bias* inisialisasi parameter, biasanya ANN dilatih beberapa kali (umumnya 5, 10, atau 15 kali). Kinerja ANN yang dilaporkan adalah nilai kinerja rata-rata dan varians (*variance*). Kamu mungkin sudah menyadari bahwa melatih ANN harus telaten, terutama dibanding model linear. Untuk model linear, ia akan memberikan konfigurasi parameter yang sama untuk *training data* yang sama (kinerja pun sama). Tetapi, ANN dapat konfigurasi parameter yang berbeda untuk *training data* yang sama (kinerja pun berbeda). Pada model linear, kemungkinan besar variasi terjadi saat mengganti data. Pada ANN, variasi kinerja ada pada seluruh proses! Untuk membandingkan dua arsitektur ANN pada suatu dataset, kita dapat menggunakan *significance testing* (arsitektur *X* lebih baik dari arsitektur *Y* secara signifikan dengan nilai $p < \text{threshold}$). Penulis merekomendasikan untuk membaca [57] perihal *significance testing*.

Apabila kamu pikir dengan seksama, ANN sebenarnya melakukan transformasi non-linear terhadap *input* hingga menjadi *output*. Parameter diperbarui agar transformasi non-linear *input* bisa menjadi semirip mungkin dengan *output* yang diharapkan. Dengan hal ini, istilah “ANN” memiliki asosiasi yang dekat dengan “transformasi non-linear”. Kami ingin kamu mengingat, ANN (apapun variasi arsitekturnya) adalah **gabungan fungsi non-**

¹³ Analogi: ngebut saat baru berangkat, kemudian memelan saat sudah dekat dengan tujuan agar tidak kelewat

¹⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperparameter_optimization

linear, dengan demikian ia mampu mengaproksimasi fungsi non-linear (*decision boundary* dapat berupa fungsi non-linear).

Deep learning menjadi penting karena banyaknya transformasi (banyaknya *hidden layers*) lebih penting dibanding lebar jaringan. Seringkali (pada permasalahan praktis), kita membutuhkan banyak transformasi agar *input* bisa menjadi *output*. Setiap transformasi (*hidden layer*) merepresentasikan *input* menjadi suatu representasi. Dengan kata lain, *hidden layer* satu dan *hidden layer* lainnya mempelajari bentuk representasi atau karakteristik *input* yang berbeda.

Curriculum learning juga adalah tips yang layak disebutkan (*mention*) [58]. Penulis tidak mengerti detilnya, sehingga pembaca diharapkan membaca sendiri. Intinya adalah memutuskan apa yang harus ANN pelajari terlebih dahulu (mulai dari mempelajari hal mudah sebelum mempelajari hal yang susah).

11.11 Regularization and Dropout

Seperti yang sudah dijelaskan pada model linear. Kita ingin model mengeneralisasi dengan baik (kinerja baik pada *training data* dan *unseen examples*). Kita dapat menambahkan fungsi regularisasi untuk mengontrol kompleksitas ANN. Regularisasi pada ANN cukup *straightforward* seperti regularisasi pada model linear (subbab 5.9). Kami yakin pembaca bisa mengeksplorasi sendiri.

Selain itu, agar ANN tidak “bergantung” pada satu atau beberapa *synapse weights* saja, kita dapat menggunakan *dropout*. *Dropout* berarti me-*nol*-kan nilai *synapse weights* dengan nilai *rate* tertentu. Misalkan kita *nol*-kan nilai 30% *synapse weights* (*dropout rate* = 0.3) secara random. Hal ini dapat dicapai dengan teknik *masking*, yaitu mengalikan *synapse weights* dengan suatu *mask*.

Ingat kembali ANN secara umum, persamaan 11.13 dimana \mathbf{W} adalah *synapse weights*, \mathbf{x} adalah *input* (dalam pembahasan saat ini, dapat merepresentasikan *hidden state* pada suatu layer), b adalah *bias* dan f adalah fungsi aktivasi (non-linear). Kita buat suatu *mask* untuk *synapse weights* seperti pada persamaan 11.14, dimana \mathbf{p} adalah vektor dan $p_i = [0, 1]$ merepresentasikan *synapse weight* diikutsertakan atau tidak. $r\%$ (*dropout rate*) elemen vektor \mathbf{p} bernilai 0. Biasanya \mathbf{p} diambil dari *bernoulli distribution* [1]. Kemudian, saat *feed forward*, kita ganti *synapse weights* menggunakan *mask* seperti pada persamaan 11.15. Saat menghitung *backpropagation*, turunan fungsi juga mengikutsertakan *mask* (gradient di-*mask*). Kami sarankan untuk membaca *paper* oleh Srivastava et al. [59] tentang *dropout* pada ANN. Contoh implementasi *dropout* dapat dilihat pada pranala berikut¹⁵. Teknik *regularization* dan *dropout* sudah menjadi metode yang cukup “standar” dan diaplikasikan pada berbagai macam arsitektur.

¹⁵ <https://gist.github.com/yusugomori/cf7bce19b8e16d57488a>

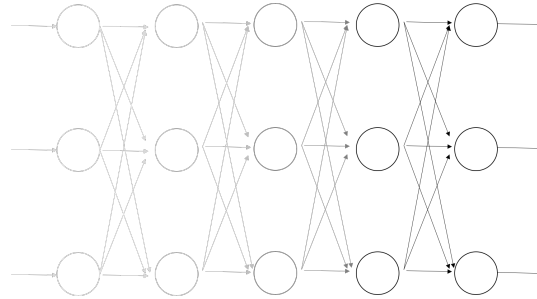
$$o = f(\mathbf{x} \cdot \mathbf{W} + b) \quad (11.13)$$

$$\mathbf{W}' = \mathbf{p} \cdot \mathbf{W} \quad (11.14)$$

$$o = f(\mathbf{x} \cdot \mathbf{W}' + b) \quad (11.15)$$

11.12 Vanishing and Exploding Gradients

Pada beberapa kasus, nilai gradien ($\Delta \mathbf{W}$ - perubahan parameter) sangat kecil (mendekati nol - *vanishing*) atau sangat besar (*explode*). *Vanishing gradient problem* umum terjadi untuk ANN yang sangat dalam (*deep*), yaitu memiliki banyak *layer*. Hal ini juga terjadi pada arsitektur khusus, seperti *recurrent neural network* saat diberikan input yang panjang [60]. Turunan suatu fungsi bernilai lebih kecil dari fungsi tersebut. Artinya nilai gradien pada *input layer* bernilai lebih kecil dari *output layer*. Apabila kita memiliki banyak *layer*, nilai gradien saat *backpropagation* mendekati nol ketika diturunkan kembali dalam banyak proses. Ilustrasi *vanishing gradient* diberikan pada Gambar 11.14 (analogikan dengan *heat map*). Saat melakukan *backpropagation*, nilai gradien menjadi mendekati nol (warna semakin putih, delta nilai semakin menghilang). Penanganan permasalahan ini masih merupakan topik riset tersendiri. Sebagai contoh, pada arsitektur *recurrent neural network*, biasanya digunakan fungsi aktivasi *long short term memory* (LSTM) atau *gated recurrent unit* (GRU) untuk menangani *vanishing gradient problem*. Selain nilai gradien, nilai *synapse weights* juga bisa sangat kecil atau sangat besar. Hal ini juga tidak baik!



Gambar 11.14. Ilustrasi *vanishing gradient problem*

11.13 Rangkuman

Ada beberapa hal yang perlu kamu ingat, pertama-tama jaringan *neural network* terdiri atas:

1. *Input layer*
2. *Hidden layer(s)*
3. *Output layer*

Setiap *edge* yang menghubungkan suatu *node* dengan *node* lainnya disebut *synapse weight*. Pada saat melatih *neural network* kita mengestimasi nilai yang “bagus” untuk *synapse weights*.

Kedua, hal tersulit saat menggunakan *neural network* adalah menentukan topologi. Kamu bisa menggunakan berbagai macam variasi topologi *neural network* serta cara melatih untuk masing-masing topologi. Tetapi, suatu topologi tertentu lebih tepat untuk merepresentasikan permasalahan dibanding topologi lainnya. Menentukan tipe topologi yang tepat membutuhkan pengalaman.

Ketiga, proses *training* untuk *neural network* berlangsung lama. Secara umum, perubahan nilai *synapse weights* mengikuti tahapan (*stage*) berikut [9]:

1. *Earlier state*. Pada tahap ini, struktur global (kasar) diestimasi.
2. *Medium state*. Pada tahap ini, *learning* berubah dari tahapan global menjadi lokal (ingat *steepest gradient descent*).
3. *Last state*. Pada tahap ini, struktur detail sudah selesai diestimasi. Harapannya, model menjadi konvergen.

Neural network adalah salah satu *learning machine* yang dapat menemukan *hidden structure* atau pola data “implisit”. Secara umum, *learning machine* tipe ini sering menjadi *overfitting/overtraining*, yaitu model memiliki kinerja sangat baik pada *training data*, tapi buruk pada *testing data/unseen example*. Oleh sebab itu, menggunakan *neural network* harus hati-hati.

Keempat, *neural network* dapat digunakan untuk *supervised*, *semi-supervised*, maupun *unsupervised learning*. Hal ini membuat *neural network* cukup populer belakangan ini karena fleksibilitas ini. Contoh penggunaan *neural network* untuk *unsupervised learning* akan dibahas pada bab 12. Semakin canggih komputer, maka semakin cepat melakukan perhitungan, dan semakin cepat melatih *neural network*. Hal ini adalah kemewahan yang tidak bisa dirasakan 20-30 tahun lalu.

Soal Latihan

11.1. Turunan

- (a) Turunkanlah perubahan *noise/bias* untuk *training* pada MLP.
- (b) Turunkanlah proses *training deep neural network* pada Gambar 11.12 termasuk perubahan *noise/bias*.

11.2. Neural Network Training

- (a) Sebutkan dan jelaskan cara lain untuk melatih *artificial neural network* (selain *backpropagation*) (bila ada)!

- (b) Apa kelebihan dan kekurangan *backpropagation*?
- (c) Tuliskan persamaan MLP dengan menggunakan momentum! (kemudian berikan juga *backpropagation*-nya)

11.3. Regularization Technique

- (a) Sebutkan dan jelaskan teknik *regularization* untuk *neural network*! (dalam bentuk formula)
- (b) Mengapa kita perlu menggunakan teknik tersebut?

11.4. Softmax Function

- (a) Apa itu *softmax function*?
- (b) Bagaimana cara menggunakan *softmax function* pada *neural network*?
- (c) Pada saat kapan kita menggunakan fungsi tersebut?
- (d) Apa kelebihan fungsi tersebut dibanding fungsi lainnya?

11.5. Transformasi atribut

Secara alamiah *neural network* membutuhkan data dengan atribut numerik untuk klasifikasi. Jelaskan konversi/strategi penanganan atribut nominal pada *neural network*!

Autoencoder

“The goal is to turn data into information, and information into insight.”

Carly Fiorina

Bab ini memuat materi yang relatif sulit (karena agak *high level*). Bab ini memuat materi *autoencoder* serta penerapannya pada pemrosesan bahasa alami (*natural language processing* - NLP). Berhubung aplikasi yang diceritakan adalah aplikasi pada NLP, kami akan memberi sedikit materi (*background knowledge*) agar bisa mendapat gambaran tentang persoalan pada domain tersebut. Bagi yang tertarik belajar NLP, kami sarankan untuk membaca buku [61]. Teknik yang dibahas pada bab ini adalah ***representation learning*** untuk melakukan pengurangan dimensi pada *feature vector* (*dimensionality reduction*), teknik ini biasanya digolongkan sebagai *unsupervised learning*. Artinya, *representation learning* adalah mengubah suatu representasi menjadi bentuk representasi lain yang ekuivalen, tetapi berdimensi lebih rendah; sedemikian sehingga informasi yang terdapat pada representasi asli tidak hilang/terjaga. Ide dasar teknik ini bermula dari aljabar linear, yaitu dekomposisi matriks.

12.1 Representation Learning

Pada bab model linear, kamu telah mempelajari ide untuk mentransformasi data menjadi dimensi lebih tinggi agar data tersebut menjadi *linearly separable*. Pada bab ini, kamu mempelajari hal sebaliknya, yaitu mengurangi dimensi. *Curse of dimensionality* dapat dipahami secara mendalam apabila kamu membaca buku [62]. Untuk melakukan klasifikasi maupun *clustering*, kita membutuhkan fitur. Fitur tersebut haruslah dapat membedakan satu *instance* dan *instance* lainnya. Seringkali, untuk membedakan *instance* satu dan

instance lainnya, kita membutuhkan *feature vector* yang berdimensi relatif “besar”. Karena dimensi *feature vector* besar, kita butuh sumber daya komputasi yang besar juga (bab 9). Untuk itu, terdapat metode-metode **feature selection**¹ untuk memilih fitur-fitur yang dianggap “representatif” dibanding fitur lainnya. Sayangnya, bila kita menggunakan metode-metode *feature selection* ini, tidak jarang kita kehilangan informasi yang memuat karakteristik data. Dengan kata lain, ada karakteristik yang hilang saat menggunakan *feature selection*.

Pertanyaan yang kita ingin jawab adalah apakah ada cara untuk merepresentasikan data ke dalam bentuk yang membutuhkan memori lebih sedikit tanpa adanya kehilangan informasi? Kita dapat memanfaatkan prinsip *principal component analysis* yang sudah kamu pelajari pada bab 9 untuk mereduksi dimensi data (mengurangi dimensi *input*), pada saat yang bersamaan, menjaga karakteristik data. **Representation learning** adalah metode untuk melakukan **kompresi** *feature vector* menggunakan *neural network*². Proses melakukan kompresi disebut **encoding**, hasil *feature vector* dalam bentuk terkompresi disebut **coding**, proses mengembalikan hasil kompresi ke bentuk awal disebut **decoding**³. *Neural network* yang mampu melakukan proses *encoding* disebut **encoder**, sedangkan **decoder** untuk proses *decoding* [63, 64, 65, 66, 67].

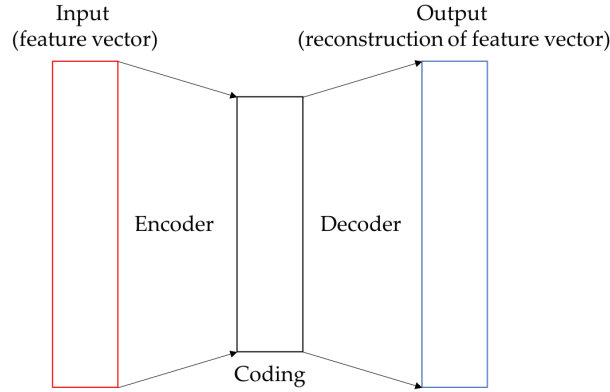
Contoh *representation learning* paling sederhana kemungkinan besar adalah **autoencoder** yaitu *neural network* yang dapat merepresentasikan data kemudian merekonstruksinya kembali. Ilustrasi *autoencoder* dapat dilihat pada Gambar 12.1. Karena tujuan *encoder* untuk kompresi, bentuk terkompresi haruslah memiliki dimensi lebih kecil dari dimensi *input*. *Neural network* mampu melakukan “kompresi” dengan baik karena ia mampu menemukan *hidden structure* dari data. Ukuran *utility function* atau *performance measure* untuk *autoencoder* adalah mengukur *loss*. Kamu mungkin berpikir bahwa idealnya, *output* harus sama dengan *input*, yaitu *autoencoder* dengan tingkat *loss* 0%. Akan tetapi, kita sebenarnya tidak ingin *autoencoder* memiliki performa 100% (subbab 12.4).

Contoh klasik lainnya adalah ***N*-gram language modelling**, yaitu memprediksi kata y_t diberikan suatu konteks (*surrounding words*) misal kata sebelumnya y_{t-1} (bigram). Apabila kita mempunyai *vocabulary* sebesar 40,000 berarti suatu bigram model membutuhkan *memory* sebesar $40,000^2$ (kombinatorial). Apabila kita ingin memprediksi kata diberikan *history* yang lebih panjang (misal dua kata sebelumnya - trigram) maka kita membutuhkan *memory* sebesar $40,000^3$. Artinya, *memory* yang dibutuhkan berlipat secara eksponensial. Tetapi, terdapat strategi menggunakan *neural network* dimana

¹ http://scikit-learn.org/stable/modules/feature_selection.html

² Istilah *representation learning* pada umumnya mengacu dengan teknik menggunakan *neural network*.

³ Bisa dianggap sebagai proses menginterpretasikan *coding*.



Gambar 12.1. Contoh autoencoder sederhana

parameter yang dibutuhkan tidak berlipat secara eksponensial walau kita ingin memodelkan konteks yang lebih besar [68].

12.2 Singular Value Decomposition

Sebelum masuk ke *autoencoder* secara matematis, penulis akan memberikan sedikit *overview* tentang dekomposisi matriks. Seperti yang sudah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya, dataset dimana setiap instans direpresentasikan oleh *feature vector* dapat disusun menjadi matriks \mathbf{X} berukuran $N \times F$, dimana N adalah banyaknya instans⁴ dan F adalah dimensi fitur. Pada *machine learning*, dekomposisi atau reduksi dimensi sangat penting dilakukan terutama ketika dataset berupa *sparse matrix*. Dekomposisi berkaitan erat dengan *principal component analysis* (PCA) yang sudah kamu pelajari. Teknik PCA (melalui *eigendecomposition*) mendekomposisi sebuah matriks \mathbf{X} menjadi tiga buah matriks, seperti diilustrasikan pada persamaan 12.1. Matriks \mathbf{A} adalah kumpulan eigenvector dan λ adalah sebuah diagonal matriks yang berisi nilai eigenvalue.

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \lambda \mathbf{A}^{-1} \quad (12.1)$$

PCA membutuhkan matriks yang kamu ingin dekomposisi berbentuk simetris. Sedangkan, teknik *singular value decomposition* (SVD) tidak. Dengan konsep yang mirip dengan PCA, matriks \mathbf{X} dapat difaktorisasi menjadi tiga buah matriks menggunakan teknik SVD, dimana operasi ini berkaitan dengan mencari eigenvectors, diilustrasikan pada persamaan 12.2.

$$\mathbf{X} = \mathbf{U} \mathbf{V} \mathbf{W}^T \quad (12.2)$$

⁴ Banyaknya training data.

dimana \mathbf{U} berukuran $N \times N$, \mathbf{V} berukuran $N \times F$, dan \mathbf{W} berukuran $F \times F$. Perlu diperhatikan, matriks \mathbf{V} adalah sebuah diagonal matriks (elemennya adalah nilai *singular value* dari \mathbf{X}). \mathbf{U} disebut *left-singular vectors* yang tersusun atas eigenvector dari $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$. Sementara, \mathbf{W} disebut *right-singular vectors* yang tersusun atas eigenvector dari $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$.

Misalkan kita mempunyai sebuah matriks lain $\hat{\mathbf{V}}$ berukuran $K \times K$, yaitu modifikasi matriks \mathbf{V} dengan mengganti sejumlah elemen diagonalnya menjadi 0 (analogi seperti menghapus beberapa baris dan kolom yang dianggap kurang penting). Sebagai contoh, perhatikan ilustrasi berikut!

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{bmatrix}$$

Kita juga dapat me-nol-kan sejumlah baris dan kolom pada matriks \mathbf{U} dan \mathbf{W} menjadi $\hat{\mathbf{U}}$ ($N \times K$) dan $\hat{\mathbf{W}}$ ($K \times F$). Apabila kita mengalikan semuanya, kita akan mendapat matriks $\hat{\mathbf{X}}$ yang disebut *low rank approximation* dari matriks asli \mathbf{X} , seperti diilustrasikan pada persamaan 12.3.

$$\hat{\mathbf{X}} = \hat{\mathbf{U}} \hat{\mathbf{V}} \hat{\mathbf{W}} \quad (12.3)$$

Suatu baris dari matriks $\mathbf{E} = \hat{\mathbf{U}} \hat{\mathbf{V}}$ dianggap sebagai aproksimasi baris matriks \mathbf{X} berdimensi tinggi [1]. Artinya, menghitung *dot-product* $\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_j = \hat{\mathbf{X}}_i \cdot \hat{\mathbf{X}}_j$. Artinya, operasi pada matriks aproksimasi (walaupun berdimensi lebih rendah), kurang lebih melambangkan operasi pada matriks asli. Konsep ini menjadi fundamental *autoencoder* yang akan dibahas pada subbab berikutnya. Operasi data pada level *coding* dianggap merepresentasikan operasi pada bentuk aslinya. Matriks aproksimasi ini memanfaatkan sejumlah K arah paling berpengaruh pada data. Dengan analogi tersebut, sama seperti mentransformasi data ke bentuk lain dimana data hasil transformasi memiliki varians yang tinggi.

12.3 Ide Dasar Autoencoder

Seperti yang sudah dijelaskan *autoencoder* adalah *neural network* yang mampu merekonstruksi *input*. Ide dasar *autoencoder* tidak jauh dari konsep dekomposisi/*dimentionality reduction* menggunakan *singular value decomposition*. Diberikan dataset \mathbf{X} , kita ingin mensimulasikan pencarian matriks $\hat{\mathbf{X}}$ yang merupakan sebuah *low rank approximation* dari matriks asli. Arsitektur dasar *autoencoder* diberikan pada Gambar 12.1. Kita memberi input matriks \mathbf{X} pada *autoencoder*, kemudian ingin *autoencoder* tersebut menghasilkan matriks yang sama. Dengan kata lain, *desired output* sama dengan *input*. Apabila dihubungkan dengan pembahasan ANN pada bab sebelumnya, *error function* untuk melatih *autoencoder* diberikan pada persamaan 12.4, dimana \mathbf{y} adalah

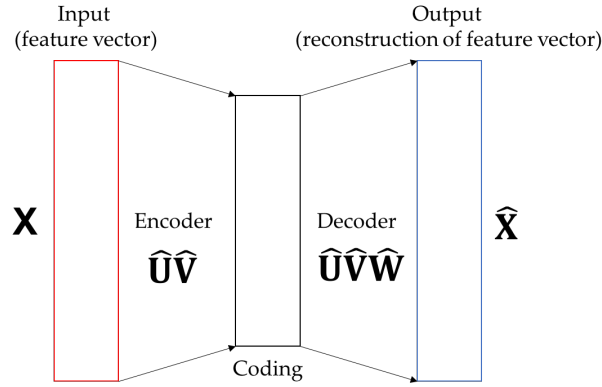
output dari jaringan dan Z adalah dimensi *output*, N adalah banyaknya instans dan \mathbf{x}_i adalah data ke- i (*feature vector* ke- i).

$$E(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^Z (\mathbf{x}_{i[j]} - \mathbf{y}_{i[j]})^2 \quad (12.4)$$

Persamaan 12.4 dapat kita tulis kembali sebagai persamaan 12.5, dimana f melambangkan fungsi aktivasi dan θ adalah ANN (kumpulan *weight matrices*)⁵.

$$E(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^Z (\mathbf{x}_{i[j]} - f(\mathbf{x}_i, \theta)_{[j]})^2 \quad (12.5)$$

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, *desired output* sama dengan *input*. Tetapi seperti yang kamu ketahui, mencapai *loss* sebesar 0% adalah hal yang susah. Dengan demikian, kamu dapat memahami secara intuitif bahwa *autoencoder* melakukan aproksimasi terhadap data asli. Gambar 12.2 mengilustrasikan hubungan antara *autoencoder* dan *singular value decomposition*⁶. Perhatikan, *hidden layer/coding* adalah $\mathbf{E} = \hat{\mathbf{U}} \hat{\mathbf{V}}$. Dengan kata lain, kita



Gambar 12.2. Hubungan autoencoder dan *singular value decomposition* (analogi)

dapat melakukan operasi *dot-product* pada *coding* untuk merepresentasikan *dot-product* pada data asli \mathbf{X} . Ini adalah ide utama *autoencoder*, yaitu mengaproksimasi/mengompresi data asli menjadi bentuk lebih kecil *coding*. Kemudian, operasi pada bentuk *coding* merepresentasikan operasi pada data sebenarnya.

⁵ Pada banyak literatur, kumpulan *weight matrices* ANN sering dilambangkan dengan θ

⁶ Hanya sebuah analogi.

Autoencoder terdiri dari *encoder* (sebuah *neural network*) dan *decoder* (sebuah *neural network*). *Encoder* merubah *input* ke dalam bentuk dimensi lebih kecil (dapat dianggap sebagai kompresi). *Decoder* berusaha merekonstruksi *coding* menjadi bentuk aslinya. Secara matematis, kita dapat menulis *autoencoder* sebagai persamaan 12.6, dimana dec melambangkan *decoder*, enc melambangkan *encoder* dan \mathbf{x} adalah *input*. *Encoder* diberikan pada persamaan 12.7 yang berarti melewati *input* pada suatu *layer* di *neural network* untuk menghasilkan representasi \mathbf{x} berdimensi rendah, disebut *coding* \mathbf{c} . \mathbf{U} dan α melambangkan *weight matrix* dan *bias*.

$$f(\mathbf{d}, \theta) = \text{dec}(\text{enc}(\mathbf{x})) \quad (12.6)$$

$$\mathbf{c} = \text{enc}(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}, \mathbf{U}, \alpha) = \sigma(\mathbf{x} \cdot \mathbf{U} + \alpha) \quad (12.7)$$

Representasi \mathbf{c} ini kemudian dilewatkan lagi pada suatu *layer* untuk merekonstruksi kembali *input*, kita sebut sebagai *decoder*. *Decoder* diberikan pada persamaan 12.8 dimana \mathbf{W} dan β melambangkan *weight matrix* dan *bias*. Baik pada fungsi *encoder* dan *decoder*, σ melambangkan fungsi aktivasi.

$$f(\mathbf{d}, \theta) = \text{dec}(\mathbf{c}) = h(\mathbf{c}, \mathbf{W}, \beta) = \sigma(\mathbf{c} \cdot \mathbf{W} + \beta) \quad (12.8)$$

Pada contoh sederhana ini, *encoder* dan *decoder* diilustrasikan sebagai sebuah *layer*. Kenyataannya, *encoder* dan *decoder* dapat diganti menggunakan sebuah *neural network* dengan arsitektur kompleks.

Sekarang kamu mungkin bertanya-tanya, bila *autoencoder* melakukan hal serupa seperti *singular value decomposition*, untuk apa kita menggunakan *autoencoder*? (mengapa tidak menggunakan aljabar saja?) Berbeda dengan teknik SVD, teknik *autoencoder* dapat juga mempelajari fitur non-linear⁷. Pada penggunaan praktis, *autoencoder* adalah *neural network* yang cukup kompleks (memiliki banyak *hidden layer*). Dengan demikian, kita dapat "mengetahui" **berbagai macam representasi** atau transformasi data. *Framework autoencoder* yang disampaikan sebelumnya adalah *framework* dasar. Pada kenyataannya, masih banyak ide lainnya yang bekerja dengan prinsip yang sama untuk mencari *coding* pada permasalahan khusus. *Output* dari *neural network* juga bisa tidak sama *input*-nya, tetapi tergantung permasalahan (kami akan memberikan contoh persoalan *word embedding*). Selain itu, *autoencoder* juga relatif fleksibel; dalam artian saat menambahkan data baru, kita hanya perlu memperbaharui parameter *autoencoder* saja. Kami sarankan untuk membaca *paper* [69, 70] perihal penjelasan lebih lengkap tentang perbedaan dan persamaan SVD dan *autoencoder* secara lebih matematis.

Secara sederhana, *representation learning* adalah teknik untuk mengkompresi *input* ke dalam dimensi lebih rendah tanpa (diharapkan) ada kehilangan informasi. Operasi vektor (dan lainnya) pada level *coding* merepresentasikan operasi pada bentuk aslinya. Untuk pembahasan *autoencoder* secara lebih

⁷ Hal ini abstrak untuk dijelaskan karena membutuhkan pengalaman.

matematis, kamu dapat membaca pranala ini⁸. Setelah *autoencoder* dilatih, pada umumnya *encoder* dapat digunakan untuk hal lainnya juga, e.g., klasifikasi kelas gambar.

12.4 Resisting Perturbation

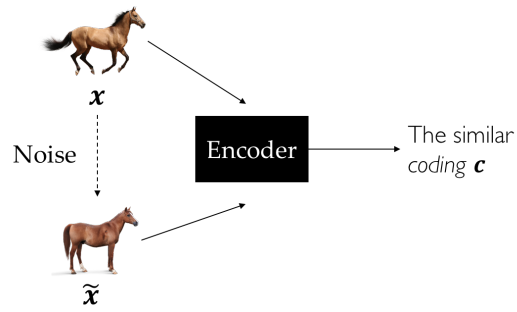
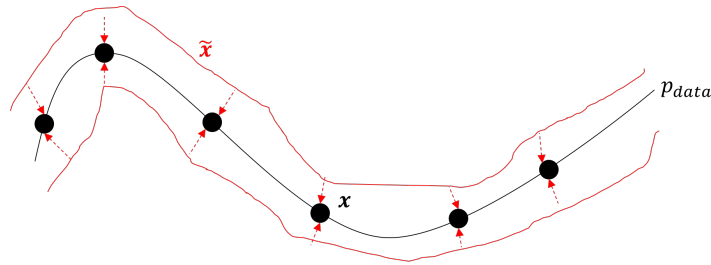
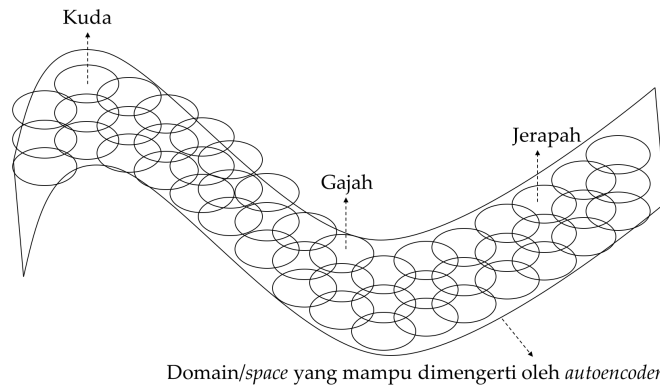
Pada subbab sebelumnya, telah dijelaskan bahwa mencapai performa 100% (100% rekonstruksi) pada *autoencoder* adalah hal yang tidak diinginkan. Hal ini disebabkan karena kita ingin menghindari *autoencoder* semata-mata hanya mempelajari *trivial identity function* [11], memiliki analogi dengan *one-to-one mapping*. Misalnya, suatu gambar kuda dipetakan ke *coding* \mathbf{c} , kemudian gambar kuda lainnya dipetakan ke *coding* $\hat{\mathbf{c}}$, dan $\hat{\mathbf{c}}$ tidak mirip dengan \mathbf{c} , i.e., *cosine similarity*-nya jauh. Artinya kita ingin *autoencoder* merepresentasikan dua hal yang mirip ke dalam bentuk representasi *coding* yang mirip juga! Walaupun kita ingin performa *autoencoder* tidak mencapai 100%, tapi kita masih ingin performanya dekat dengan 100%.

Tujuan utama *autoencoder* adalah mengekstraksi informasi penting tentang data yang ada (*principal components*), bukan replikasi semata. Dengan alasan ini, *coding* pada umumnya memiliki dimensi lebih rendah dibanding *input*. Kita sebut arsitektur ini sebagai ***undercomplete autoencoder***. Apabila *coding* memiliki dimensi lebih besar dari *input*, disebut sebagai ***overcomplete autoencoder***, kemungkinan besar hanya mempelajari *trivial identity function* [11]. Kita dapat menggunakan teknik regularisasi pada *autoencoder* untuk memastikan tujuan kita tercapai, misal *sparse autoencoder*, *denoising autoencoder* dan *penalizing derivatives* [11]. Untuk mengilustrasikan permasalahan, buku ini membahas ***denoising autoencoder*** (silahkan baca buku [11] untuk teknik regularisasi lainnya).

Diberikan suatu *input* \mathbf{x} , kemudian kita lakukan *noise-injection* terhadap *input* tersebut, menghasilkan $\tilde{\mathbf{x}}$. Perhatikan Gambar 12.3, kita ingin *encoder* memberikan bentuk *coding* yang mirip bagi \mathbf{x} dan $\tilde{\mathbf{x}}$. Kita ingin memaksa *autoencoder* untuk mempelajari sebuah fungsi yang tidak berubah terlalu jauh ketika *input* sedikit diubah. Hal ini disebut sebagai sifat ***resistance to perturbation***. Performa *autoencoder* yang bernilai 100% berbahaya karena *autoencoder* tersebut belum tentu mampu mempelajari sifat data, melainkan mampu “mengingat” *training data* saja (*mapping table*). Objektif *denoising autoencoder* diberikan pada persamaan 12.9, yaitu kemampuan merekonstruksi kembali data tanpa *noise*.

$$E(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^Z (\mathbf{x}_{i[j]} - f(\tilde{\mathbf{x}}_i, \theta)_{[j]})^2 \quad (12.9)$$

⁸ <https://jaan.io/what-is-variational-autoencoder-vae-tutorial/>

Gambar 12.3. *Resisting Perturbation*Gambar 12.4. Autoencoder yang memiliki sifat *resistance to perturbation*, yaitu invarian terhadap sedikit perubahan.

Domain/space yang mampu dimengerti oleh autoencoder

Gambar 12.5. *Manifolds*

Implikasi atau tujuan dari persamaan 12.9 diberikan pada Gambar 12.4 yang mengilustrasikan *invariant to slight changes*. Diberikan data dengan distribusi asli p_{data} , dan data yang sudah terkena *noise* \tilde{x} , *autoencoder* mampu mengembalikan \tilde{x} ke bentuk asli x . Sebagai ilustrasi yang lebih “global”, perhatikan Gambar 12.5 dimana suatu elips melambangkan *manifolds*. Kamu

dapat memahami *resistance to perturbation* membuat *autoencoder* membentuk semacam “ruang lokal” yang merepresentasikan suatu data dan variannya.

12.5 Representing Context: Word Embedding

Subbab ini menceritakan salah satu aplikasi *autoencoder*. Pada domain NLP, kita ingin komputer mampu mengerti bahasa selayaknya manusia mengerti bahasa. Misalkan komputer mampu mengetahui bahwa “meja” dan “kursi” memiliki hubungan yang erat. Hubungan seperti ini tidak dapat terlihat berdasarkan teks tertulis, tetapi kita dapat menyusun kamus hubungan kata seperti WordNet⁹. WordNet memuat ontologi kata seperti hipernim, antonim, sinonim. Akan tetapi, hal seperti ini tentu sangat melelahkan, seumpama ada kata baru, kita harus memikirkan bagaimana hubungan kata tersebut terhadap seluruh kamus yang sudah dibuat. Pembuatan kamus ini memerlukan kemampuan para ahli linguistik.

Oleh sebab itu, kita harus mencari cara lain untuk menemukan hubungan kata ini. Ide utama untuk menemukan hubungan antarkata adalah ***statistical semantics hypothesis*** yang menyebutkan pola penggunaan kata dapat digunakan untuk menemukan arti kata [71]. Contoh sederhana, kata yang muncul pada “**konteks**” yang sama cenderung memiliki makna yang sama. Perhatikan “konteks” dalam artian NLP adalah kata-kata sekitar (*surrounding words*)¹⁰; contohnya kalimat “budi menendang bola”, “konteks” dari “bola” adalah “budi menendang”. Kata “cabai” dan “permen” pada kedua kalimat “budi suka cabai” dan “budi suka permen” memiliki kaitan makna, dalam artian keduanya muncul pada konteks yang sama. Sebagai manusia, kita tahu ada keterkaitan antara “cabai” dan “permen” karena keduanya bisa dimakan.

Berdasarkan hipotesis tersebut, kita dapat mentransformasi kata menjadi sebuah bentuk matematis dimana kata direpresentasikan oleh pola penggunaannya [61]. Arti kata ***embedding*** adalah transformasi kata (beserta konteksnya) menjadi bentuk matematis (vektor), i.e., mirip/sama dengan *coding*. “Kedekatan hubungan makna” (***semantic relationship***) antarkata kita harapkan dapat tercermin pada operasi vektor. Salah satu metode sederhana untuk merepresentasikan kata sebagai vektor adalah ***Vector Space Model***. Konsep *embedding* dan *autoencoder* sangatlah dekat, tapi kami ingin menekankan bahwa *embedding* adalah bentuk representasi konteks.

Semantic relationship dapat diartikan sebagai ***attributional*** atau ***relational similarity***. *Attributional similarity* berarti dua kata memiliki atribut/sifat yang sama, misalnya anjing dan serigala sama-sama berkaki empat, menggonggong, serta mirip secara fisiologis. *Relational similarity* berarti derajat korespondensi, misalnya *anjing : menggonggong* memiliki hubungan yang erat dengan *kucing : mengeong*.

⁹ <https://wordnet.princeton.edu/>

¹⁰ Selain *surrounding words*, konteks dalam artian NLP dapat juga berupa kalimat, paragraph, atau dokumen.

	Dokumen 1	Dokumen 2	Dokumen 3	Dokumen 4	...
King	1	0	0	0	...
Queen	0	1	0	1	...
Prince	1	0	1	0	...
Princess	0	1	0	1	...
...					

Tabel 12.1. Contoh 1-of-V encoding

12.5.1 Vector Space Model

Vector space model (VSM)¹¹ adalah bentuk *embedding* yang relatif sudah cukup lama tapi masih digunakan sampai saat ini. Pada pemodelan ini, kita membuat sebuah matriks dimana baris melambangkan kata, kolom melambangkan dokumen. Metode VSM ini selain mampu menangkap hubungan antarkata juga mampu menangkap hubungan antardokumen (*to some degree*). Asal muasalnya adalah *statistical semantics hypothesis*. Tiap sel pada matriks berisi nilai 1 atau 0. 1 apabila $kata_i$ muncul di $dokumen_i$ dan 0 apabila tidak. Model ini disebut **1-of-V/1-hot encoding** dimana V adalah ukuran kosa kata. Ilustrasi dapat dilihat pada Tabel 12.1.

Akan tetapi, *1-of-V encoding* tidak menyediakan banyak informasi untuk kita. Dibanding sangat ekstrim saat mengisi sel dengan nilai 1 atau 0 saja, kita dapat mengisi sel dengan frekuensi kemunculan kata pada dokumen, disebut **term frequency** (TF). Apabila suatu kata muncul pada banyak dokumen, kata tersebut relatif tidak terlalu "penting" karena muncul dalam berbagai konteks dan tidak mampu membedakan hubungan dokumen satu dan dokumen lainnya (**inverse document frequency**/IDF). Formula IDF diberikan pada persamaan 12.10. Tingkat kepentingan kata berbanding terbalik dengan jumlah dokumen dimana kata tersebut dimuat. N adalah banyaknya dokumen, $|d \in D; t \in d|$ adalah banyaknya dokumen dimana kata t muncul.

$$IDF(t, D) = \log \left(\frac{N}{|d \in D; t \in d|} \right) \quad (12.10)$$

Dengan menggunakan perhitungan TF-IDF yaitu $TF \times IDF$ untuk mengisi sel pada matriks Tabel 12.1, kita memiliki lebih banyak informasi. TF-IDF sampai sekarang menjadi *baseline* pada **information retrieval**. Misalkan kita ingin menghitung kedekatan hubungan antar dua dokumen, kita hitung **cosine distance** antara kedua dokumen tersebut (vektor suatu dokumen disusun oleh kolom pada matriks). Apabila kita ingin menghitung kedekatan hubungan antar dua kata, kita hitung **cosine distance** antara kedua kata tersebut dimana vektor suatu kata merupakan baris pada matriks. Tetapi seperti intuisi yang mungkin kamu miliki, mengisi *entry* dengan nilai TF-IDF pun

¹¹ Mohon bedakan dengan VSM (*vector space model*) dan SVM (*support vector machine*)

akan menghasilkan *sparse matrix*.

Statistical semantics hypothesis diturunkan lagi menjadi empat macam hipotesis [71]:

1. *Bag of words*
2. *Distributional hypothesis*
3. *Extended distributional hypothesis*
4. *Latent relation hypothesis*

Silakan pembaca mencari sumber tersendiri untuk mengerti keempat hipotesis tersebut atau membaca *paper* Turney dan Pantel [71].

12.5.2 Sequential, Time Series dan Compositionality

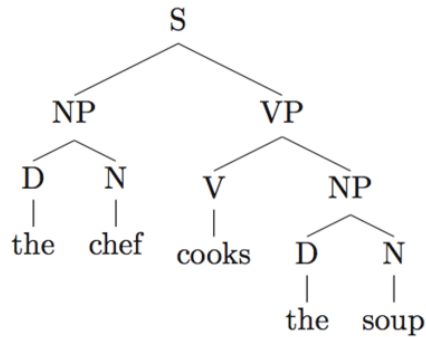
Bahasa manusia memiliki dua macam karakteristik yaitu adalah data berbentuk ***sequential data*** dan memenuhi sifat ***compositionality***. *Sequential data* adalah sifat data dimana suatu kemunculan $data_i$ dipengaruhi oleh data sebelumnya ($data_{i-1}, data_{i-2}, \dots$). Perhatikan kedua kalimat berikut:

1. Budi melempar bola.
2. Budi melempar gedung bertingkat.

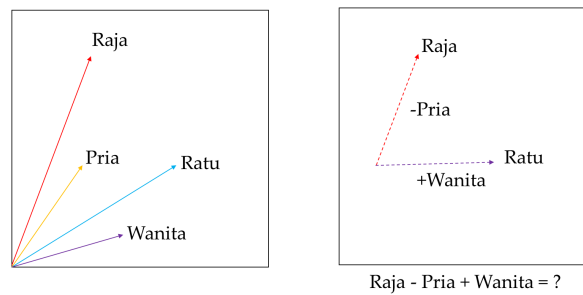
Pada kedua kalimat tersebut, kalimat pertama lebih masuk akal karena bagaimana mungkin seseorang bisa melempar “gedung bertingkat”. Keputusan kita dalam memilih kata berikutnya dipengaruhi oleh kata-kata sebelumnya, dalam hal ini “Budi melempar” setelah itu yang lebih masuk akal adalah “bola”. Contoh lain adalah data yang memiliki sifat ***time series*** yaitu gelombang laut, angin, dan cuaca. Kita ingin memprediksi data dengan rekaman masa lalu, tapi kita tidak mengetahui masa depan. Kita mampu memprediksi cuaca berdasarkan rekaman parameter cuaca pada hari-hari sebelumnya. Ada yang berpendapat beda *time series* dan *sequential* (sekuensial) adalah diketahuinya sekuens kedepan secara penuh atau tidak. Penulis tidak dapat menyebutkan *time series* dan sekuensial sama atau beda, silahkan pembaca menginterpretasikan secara bijaksana.

Data yang memenuhi sifat ***compositionality*** berarti memiliki struktur hirarkis. Struktur hirarkis ini menggambarkan bagaimana unit-unit lebih kecil berinteraksi sebagai satu kesatuan. Artinya, interpretasi/pemaknaan unit yang lebih besar dipengaruhi oleh interpretasi/pemaknaan unit lebih kecil (subunit). Sebagai contoh, kalimat “saya tidak suka makan cabai hijau”. Unit “cabai” dan “hijau” membentuk suatu frasa “cabai hijau”. Mereka tidak bisa dihilangkan sebagai satu kesatuan makna. Kemudian interaksi ini naik lagi menjadi kegiatan “makan cabai hijau” dengan keterangan “tidak suka”, bahwa ada seseorang yang “tidak suka makan cabai hijau” yaitu “saya”. Pemecahan kalimat menjadi struktur hirarkis berdasarkan *syntactical role* disebut ***constituent parsing***, contoh lebih jelas pada Gambar 12.6. *N* adalah *noun*, *D*

adalah *determiner*, *NP* adalah *noun phrase*, *VP* adalah *verb phrase*, dan *S* adalah *sentence*. Selain bahasa manusia, gambar juga memiliki struktur hirarkis. Sebagai contoh, gambar rumah tersusun atas tembok, atap, jendela, dan pintu. Tembok, pintu, dan jendela membentuk bagian bawah rumah; lalu digabung dengan atap sehingga membentuk satu kesatuan rumah.



Gambar 12.6. Contoh constituent tree¹²



Gambar 12.7. Contoh operasi vektor kata

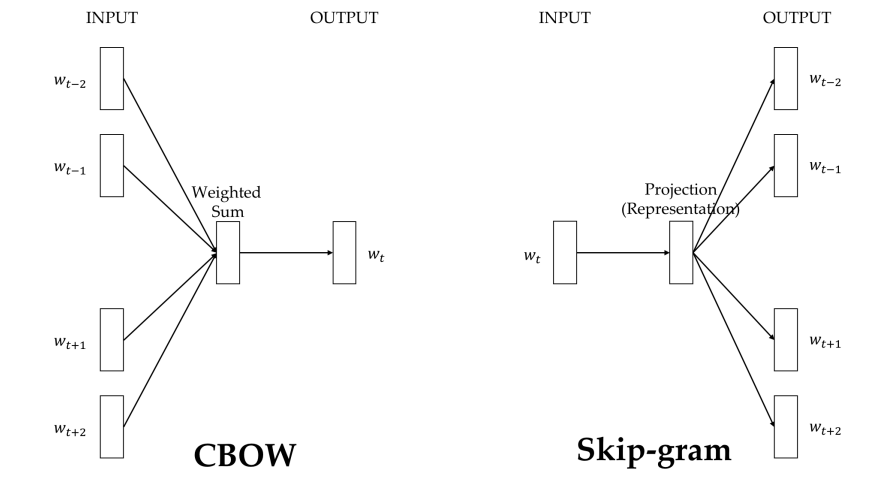
12.5.3 Distributed Word Representation

Seperti yang disebutkan pada bagian sebelumnya, kita ingin hubungan kata (yang diinferensi dari konteksnya) dapat direpresentasikan sebagai operasi vektor seperti pada ilustrasi Gambar 12.7. Kata “raja” memiliki sifat-sifat yang dilambangkan oleh suatu vektor (misal 90% aspek loyalitas, 80% kebijaksanaan, 90% aspek kebangsaan, dst), begitu pula dengan kata “pria”,

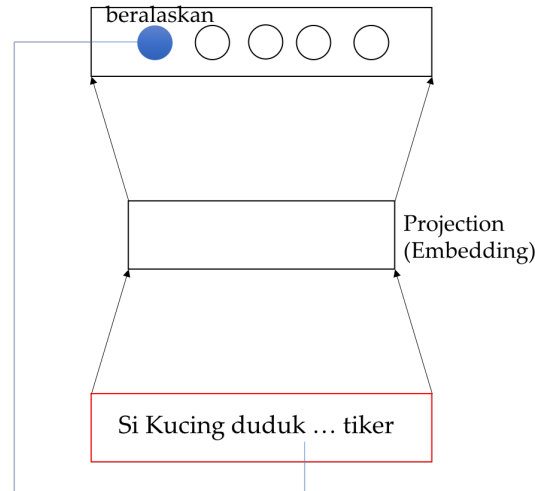
¹² source: Pinterest

“wanita”, dan “ratu”. Jika sifat-sifat yang dimiliki “raja” dihilangkan bagian sifat-sifat “pria”-nya, kemudian ditambahkan sifat-sifat “wanita” maka idealnya operasi ini menghasilkan vektor yang dekat kaitannya dengan “ratu”. Dengan kata lain, raja yang tidak maskulin tetapi fenimin disebut ratu. Seperti yang disebutkan sebelumnya, ini adalah tujuan utama *embedding* yaitu merepresentasikan “makna” kata sebagai vektor sehingga kita dapat memanipulasi banyak hal berdasarkan operasi vektor. Hal ini mirip (tetapi tidak sama) dengan prinsip *singular value decomposition* dan *autoencoder* yang telah dijelaskan sebelumnya.

Selain *vector space model*, apakah ada cara lain yang mampu merepresentasikan kata dengan lebih baik? Salah satu kekurangan VSM adalah tidak memadukan sifat sekuensial pada konstruksi vektornya. Cara lebih baik ditemukan oleh [44, 45] dengan ekstensi pada [67]. Idenya adalah menggunakan teknik *representation learning* dan prinsip *statistical semantics hypothesis*. Metode ini lebih dikenal dengan sebutan *word2vec*. Tujuan *word2vec* masih sama, yaitu merepresentasikan kata sebagai vektor, sehingga kita dapat melakukan operasi matematis terhadap kata. *Encoder*-nya berbentuk **Continuous bag of words (CBOW)** atau **Skip-gram**. Pada CBOW, kita memprediksi kata diberikan suatu “konteks”. Pada arsitektur “Skip-gram” kita memprediksi konteks, diberikan suatu kata. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 12.8. Bagian *projection layer* pada Gambar 12.8 adalah *coding layer*. Kami akan memberikan contoh CBOW secara lebih detil. Kedua arsitektur ini dapat dilatih menggunakan *one-hot encoding*, i.e., w_i merepresentasikan *one-hot encoding* untuk kata ke- i .



Gambar 12.8. CBOW vs Skip-gram, rekonstruksi [45]



Gambar 12.9. CBOW

Perhatikan Gambar 12.9. Diberikan sebuah konteks “si kucing duduk ... tiker”. Kita harus menebak apa kata pada “...” tersebut. Dengan menggunakan teknik *autoencoder*, *output layer* adalah distribusi probabilitas $kata_i$ pada konteks tersebut. Kata yang menjadi jawaban adalah kata dengan probabilitas terbesar, misalkan pada kasus ini adalah “beralaskan”. Dengan arsitektur ini, prinsip sekuensial atau *time series* dan *statistical semantics hypothesis* terpenuhi (*to a certain extent*). Teknik ini adalah salah satu contoh penggunaan *neural network* untuk *unsupervised learning*. Kita tidak perlu mengkorespondensikan kata dan *output* yang sesuai karena *input vektor* didapat dari statistik penggunaan kata. Agar lebih tahu kegunaan vektor kata, kamu dapat mencoba kode dengan bahasa pemrograman Python 2.7 yang disediakan penulis¹³. Buku ini telah menjelaskan ide konseptual *word embedding* pada level abstrak, yaitu merepresentasikan kata dan konteksnya menjadi bentuk vektor. Apabila kamu tertarik untuk memahami detilnya secara matematis, kamu dapat membaca berbagai penelitian terkait¹⁴. Silahkan baca *paper* oleh Mikolov [44, 45] untuk detil implementasi *word embedding*.

12.5.4 Distributed Sentence Representation

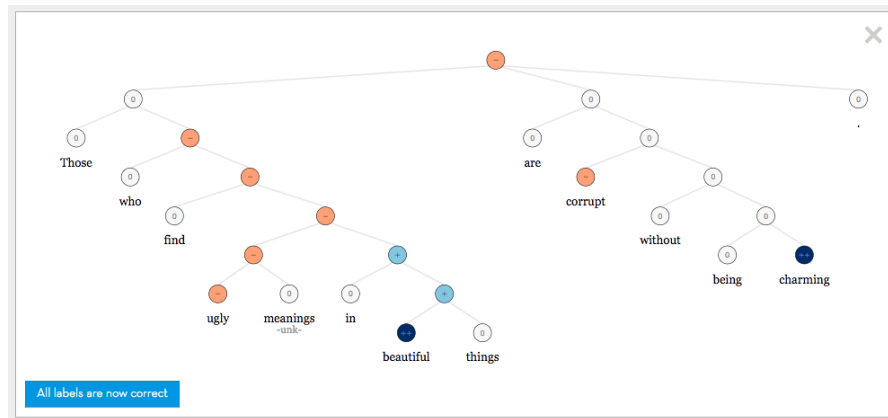
Kita sudah dapat merepresentasikan kata menjadi vektor, selanjutnya kita ingin mengonversi unit lebih besar (kalimat) menjadi vektor. Salah satu cara paling mudah adalah menggunakan nilai rata-rata representasi *word embedding* untuk semua kata yang ada pada kalimat tersebut (*average of its individual word embeddings*). Cara ini sering digunakan pada bidang NLP dan cukup

¹³ https://github.com/wiragotama/GloVe_Playground

¹⁴ Beberapa orang berpendapat bahwa *evil is in the detail*.

powerful, sebagai contoh pada *paper* oleh Putra dan Tokunaga [72]. Pada NLP, sering kali kalimat diubah terlebih dahulu menjadi vektor sebelum dilewatkan pada algoritma *machine learning*, misalnya untuk analisis sentimen (kalimat bersentimen positif atau negatif). Vektor ini yang nantinya menjadi *feature vector* bagi algoritma *machine learning*.

Kamu sudah tahu bagaimana cara mengonversi kata menjadi vektor, untuk mengonversi kalimat menjadi vektor cara sederhananya adalah merata-ratakan nilai vektor kata-kata pada kalimat tersebut. Tetapi dengan cara sederhana ini, sifat sekuensial dan *compositional* pada kalimat tidak terpenuhi. Sebagai contoh, kalimat “anjing menggigit Budi” dan “Budi menggigit anjing” akan direpresentasikan sebagai vektor yang sama karena terdiri dari kata-kata yang sama. Dengan demikian, representasi kalimat sederhana dengan merata-ratakan vektor kata-katanya juga tidaklah sensitif terhadap urutan¹⁵. Selain itu, rata-rata tidak sensitif terhadap *compositionality*. Misal frase “bukan sebuah pengalaman baik” tersusun atas frase “bukan” yang diikuti oleh “sebuah pengalaman baik”. Rata-rata tidak mengetahui bahwa “bukan” adalah sebuah *modifier* untuk sebuah frase dibelakangnya. Sentimen dapat berubah bergantung pada komposisi kata-katanya (contoh pada Gambar 12.10).

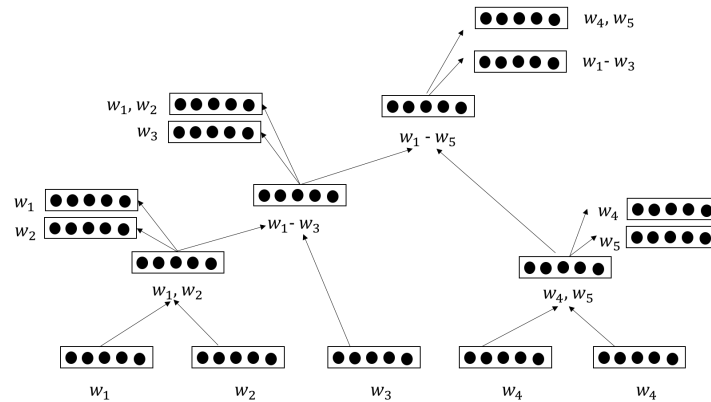


Gambar 12.10. Contoh analisis sentimen (Stanford)¹⁶

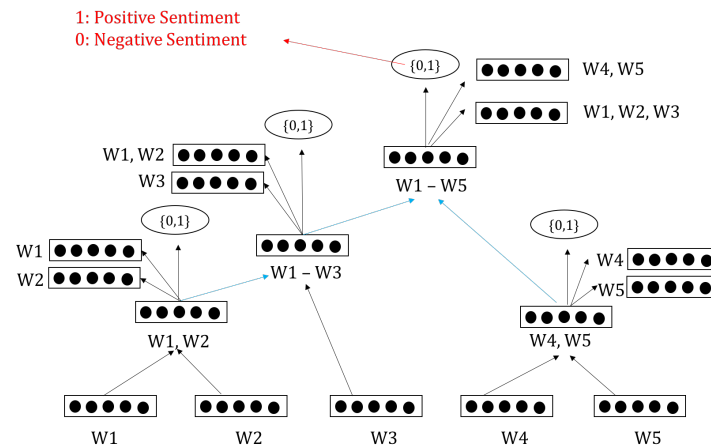
Cara lainnya adalah meng-*encode* kalimat sebagai *vektor* menggunakan *recursive autoencoder*. *Recursive* berarti suatu bagian adalah komposisi dari bagian lainnya. Penggunaan *recursive autoencoder* sangat rasional berhubung data memenuhi sifat *compositionality* yang direpresentasikan dengan baik oleh topologi *recursive neural network*. Selain itu, urutan susunan kata-kata juga tidak hilang. Untuk melatih *recursive autoencoder*, *output* dari suatu layer

¹⁵ Karena ini *recurrent neural network* bagus untuk *language modelling*.

¹⁶ <http://nlp.stanford.edu:8080/sentiment/rntnDemo.html>



Gambar 12.11. Contoh recursive autoencoder



Gambar 12.12. Contoh recursive autoencoder dengan sentiment[64]

adalah rekonstruksi *input*, ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 12.11. Pada setiap langkah *recursive*, *hidden layer/coding layer* berusaha men-*decode* atau merekonstruksi kembali vektor *input*.

Lebih jauh, untuk sentimen analisis pada kata, kita dapat menambahkan output pada setiap *hidden layer*, yaitu sentimen unit gabungan, seperti pada Gambar 12.12. Selain menggunakan *recursive autoencoder*, kamu juga dapat menggunakan *recurrent autoencoder*. Kami silahkan pada pembaca untuk memahami *recurrent autoencoder*. Prinsipnya mirip dengan *recursive autoencoder*.

Teknik yang disampaikan mampu mengonversi kalimat menjadi vektor, lalu bagaimana dengan paragraf, satu dokumen, atau satu frasa saja? Teknik

umum untuk mengonversi teks menjadi vektor dapat dibaca pada [66] yang lebih dikenal dengan nama *paragraph vector* atau *doc2vec*.

12.6 Tips

Bab ini menyampaikan penggunaan *neural network* untuk melakukan *kompresi data (representation learning)* dengan teknik *unsupervised learning*. Hal yang lebih penting untuk dipahami bahwa ilmu *machine learning* tidak berdiri sendiri. Walaupun kamu menguasai teknik *machine learning* tetapi tidak mengerti domain dimana teknik tersebut diaplikasikan, kamu tidak akan bisa membuat *learning machine* yang memuaskan. Contohnya, pemilihan fitur *machine learning* pada teks (NLP) berbeda dengan gambar (*visual processing*). Mengerti *machine learning* tidak semata-mata membuat kita bisa menyelesaikan semua macam permasalahan. Tanpa pengetahuan tentang domain aplikasi, kita bagaikan orang buta yang ingin menyetir sendiri!

Soal Latihan

12.1. Penggunaan Autoencoder untuk Arsitektur Kompleks

- (a) Pada bab 11, telah dijelaskan bahwa kita dapat menginisialisasi arsitektur *neural network* yang kompleks menggunakan *autoencoder*. Jelaskan pada kasus apa kita dapat melakukan hal tersebut!
- (b) Jelaskan mengapa menginisiasi (sebagian) arsitektur kompleks menggunakan *autoencoder* adalah sesuatu yang masuk akal!

12.2. LSI dan LDA

- (a) Jelaskanlah Latent Semantic Indexing (LSI) dan Latent Dirichlet Allocation (LDA)!
- (b) Apa persamaan dan perbedaan antara LSI, LDA, dan *autoencoder*?

12.3. Variational Autoencoder

Jelaskan apa itu *variational autoencoder*! Deskripsikan perbedaannya dengan *autoencoder* yang sudah dijelaskan pada bab ini?

Arsitektur Neural Network

“As students cross the threshold from outside to insider, they also cross the threshold from superficial learning motivated by grades to deep learning motivated by engagement with questions. Their transformation entails an awakening—even, perhaps, a falling in love.”

John C. Bean

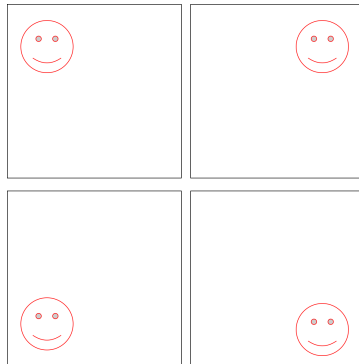
Seperti yang sudah dijelaskan pada bab 12, data memiliki karakteristik (dari segi *behaviour*) misal *sequential data*, *compositional data*, dsb. Terdapat arsitektur khusus *artificial neural network* (ANN) untuk menyelesaikan persoalan pada tipe data tertentu. Pada bab ini, kami akan memberikan beberapa contoh variasi arsitektur ANN yang cocok untuk tipe data tertentu. Penulis akan berusaha menjelaskan semaksimal mungkin ide-ide penting pada masing-masing arsitektur. Tujuan bab ini adalah memberikan pengetahuan konseptual (intuisi). Pembaca harus mengeksplorasi tutorial pemrograman untuk mampu mengimplementasikan arsitektur-arsitektur ini. Penjelasan pada bab ini bersifat abstrak dan kamu harus mengerti penjelasan bab-bab sebelumnya untuk mengerti konsep pada bab ini.

13.1 Convolutional Neural Network

Subbab ini akan memaparkan **ide utama** dari *convolutional neural network* (CNN) berdasarkan *paper* asli dari LeCun dan Bengio [73] (saat buku ini ditulis sudah ada banyak variasi). CNN memiliki banyak istilah dari bidang pemrosesan gambar (karena dicetuskan dari bidang tersebut), tetapi demi

mempermudah pemahaman intuisi CNN, diktat ini akan menggunakan istilah yang lebih umum juga.

Sekarang, mari kita memasuki cerita CNN dari segi pemrosesan gambar. Objek bisa saja terlatak pada berbagai macam posisi seperti diilustrasikan oleh Gambar. 13.1. Selain tantangan variasi posisi objek, masih ada juga tantangan lain seperti rotasi objek dan perbedaan ukuran objek (*scaling*). Kita ingin mengenali (memproses) objek pada gambar pada berbagai macam posisi yang mungkin (*translation invariance*). Salah satu cara yang mungkin adalah dengan membuat suatu mesin pembelajaran (ANN) untuk regional tertentu seperti pada Gambar. 13.2 (warna biru) kemudian meng-*copy* mesin pembelajaran untuk mampu mengenali objek pada regional-regional lainnya. Akan tetapi, kemungkinan besar ANN *copy* memiliki konfigurasi parameter yang sama dengan ANN awal. Hal tersebut disebabkan objek memiliki informasi prediktif (*predictive information – feature vector*) yang sama yang berguna untuk menganalisisnya. Dengan kata lain, objek yang sama (*smiley*) memiliki bentuk *feature vector* yang mirip walaupun posisinya digeser-geser. ANN (MLP) bisa juga mempelajari prinsip *translation invariance*, tetapi memerlukan jauh lebih banyak parameter dibanding CNN (subbab berikutnya secara lebih matematis) yang memang dibuat dengan prinsip *translation invariance (built-in)*.

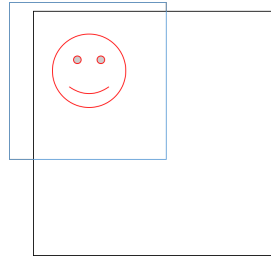


Gambar 13.1. Motivasi *convolutional neural network*

13.1.1 Convolution

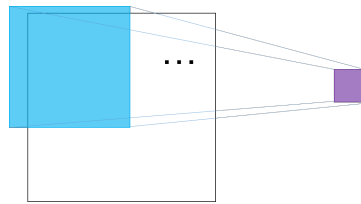
Seperti yang sudah dijelaskan, motivasi CNN adalah untuk mampu mengenali aspek yang informatif pada regional tertentu (lokal). Dibanding meng-*copy* mesin pembelajaran beberapa kali untuk mengenali objek pada banyak regional, ide lebih baik adalah untuk menggunakan *sliding window*. Setiap operasi pada *window*¹ bertujuan untuk mencari aspek lokal yang paling infor-

¹ Dikenal juga sebagai *receptive field*.



Gambar 13.2. Motivasi *convolutional neural network*, solusi regional

matif. Ilustrasi diberikan oleh Gambar. 13.3. Warna biru merepresentasikan satu *window*, kemudian kotak ungu merepresentasikan aspek lokal paling informatif (disebut ***filter***) yang dikenali oleh *window*. Dengan kata lain, kita mentransformasi suatu *window* menjadi suatu nilai numerik (*filter*). Kita juga dapat mentransformasi suatu *window* (regional) menjadi d nilai numerik (d -*channels*, setiap elemen berkorespondensi pada suatu *filter*). *Window* ini kemudian digeser-geser sebanyak T kali, sehingga akhirnya kita mendapatkan vektor dengan panjang $d \times T$. Keseluruhan operasi ini disebut sebagai ***convolution***².

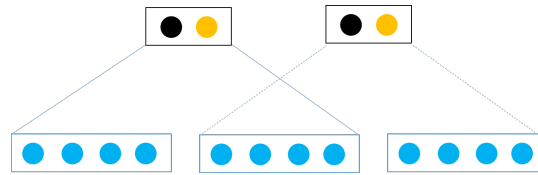


Gambar 13.3. *Sliding window*

Agar kamu lebih mudah memahami prinsip ini, kami berikan contoh dalam bentuk 1-D pada Gambar. 13.4. Warna biru merepresentasikan *feature vector* (regional) untuk suatu *input* (e.g., regional pada suatu gambar, kata pada kalimat, dsb). Pada contoh ini, setiap 2 *input* ditransformasi menjadi vektor berdimensi 2 (2-*channels*); menghasilkan vektor berdimensi 4 (2 *window* \times 2).

Pada contoh sebelumnya, kita menggunakan *window* selebar 2, satu *window* mencakup 2 data; i.e., $window_1 = (x_1, x_2)$, $window_2 = (x_2, x_3)$, \dots . Untuk suatu *input* \mathbf{x} . Kita juga dapat mempergunakan ***stride*** sebesar s , yaitu seberapa banyak data yang digeser untuk *window* baru. Contoh yang diberikan memiliki *stride* sebesar satu. Apabila kita memiliki *stride*= 2, maka

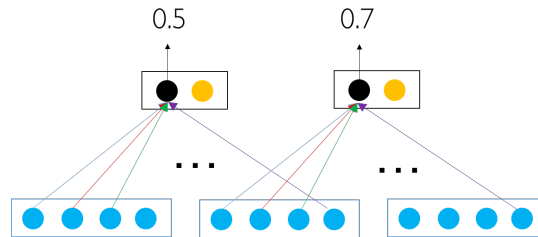
² Istilah *convolution* yang diterangkan pada konteks *machine learning* memiliki arti yang berbeda pada bidang *signal processing*.



Gambar 13.4. 1D Convolution

kita menggeser sebanyak 2 data setiap langkah; i.e., $window_1 = (x_1, x_2)$, $window_2 = (x_3, x_4), \dots$.

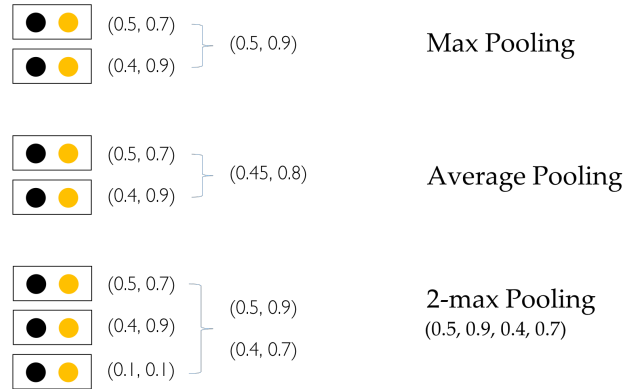
Selain *sliding window* dan *filter*, *convolutional layer* juga mengadopsi prinsip *weight sharing*. Artinya, *synapse weights* untuk suatu filter adalah sama walau *filter* tersebut dipergunakan untuk berbagai *window*. Sebagai ilustrasi, perhatikan Gambar. 13.5, warna yang sama pada *synapse weights* menunjukkan *synapse weights* bersangkutan memiliki nilai (*weight*) yang sama. Tidak hanya pada *filter* hitam, hal serupa juga terjadi pada *filter* berwarna oranye (i.e., *filter* berwarna oranye juga memenuhi prinsip *weight sharing*). Walaupun memiliki konfigurasi bobot *synapse weights* yang sama, unit dapat menghasilkan *output* yang berbeda untuk *input* yang berbeda. Konsep *weight sharing* ini sesuai dengan cerita sebelumnya bahwa konfigurasi parameter untuk mengenali karakteristik informatif untuk satu objek bernilai sama walau pada lokasi yang berbeda. Dengan *weight sharing*, parameter *neural network* juga menjadi lebih sedikit dibanding menggunakan *multilayer perceptron* (*feed-forward neural network*).

Gambar 13.5. Konsep *weight sharing*

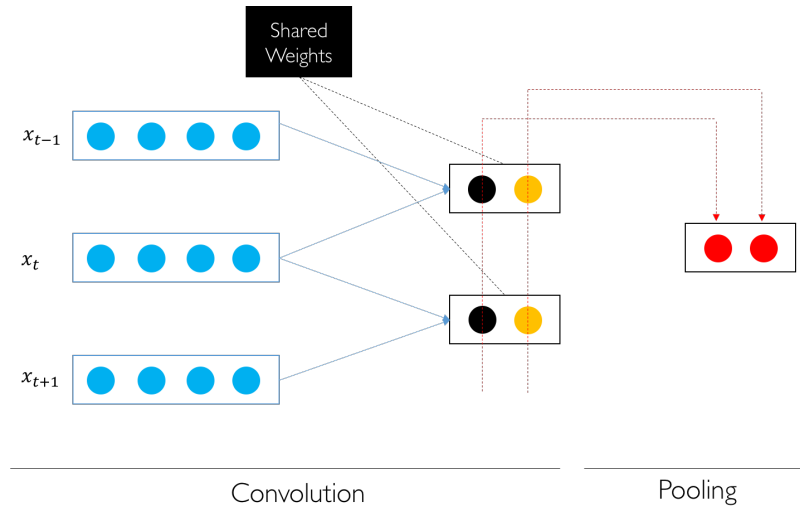
13.1.2 Pooling

Pada tahap *convolution*, kita merubah setiap *k-sized window* menjadi satu vektor berdimensi *d* (yang dapat disusun menjadi matriks **D**). Semua vektor yang dihasilkan pada tahap sebelumnya dikombinasikan (*pooled*) menjadi satu vektor **c**. Ide utamanya adalah mengekstrak informasi paling informatif (semacam meringkas). Ada beberapa teknik *pooling*, diantaranya: *max pooling*,

average pooling, dan *K-max pooling*³; diilustrasikan pada Gambar. 13.6. *Max pooling* mencari nilai maksimum untuk setiap dimensi vektor. *Average pooling* mencari nilai rata-rata tiap dimensi. *K-max pooling* mencari K nilai terbesar untuk setiap dimensinya (kemudian hasilnya digabungkan). Gabungan operasi *convolution* dan *pooling* secara konseptual diilustrasikan pada Gambar. 13.7.



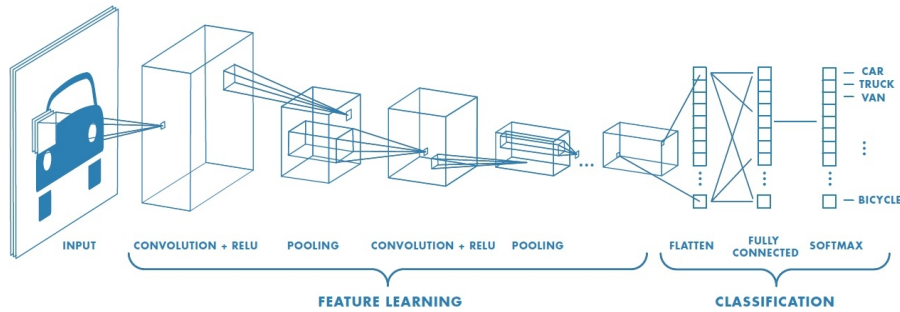
Gambar 13.6. Contoh *pooling*



Gambar 13.7. *Convolution* dan *pooling*

³ Kami ingin pembaca mengeksplorasi sendiri *dynamic pooling*.

Setelah melewati berbagai operasi *convolution* dan *pooling*, kita akan memiliki satu vektor yang kemudian dilewatkan pada *multilayer perceptron* (*fully connected*) untuk melakukan sesuatu (tergantung permasalahan), misal klasifikasi gambar, klasifikasi sentimen, dsb (Ilustrasi pada Gambar. 13.8).



Gambar 13.8. *Convolutional Neural Network*⁴

13.1.3 Rangkuman

Kemampuan utama *convolutional neural network* (CNN) adalah arsitektur yang mampu mengenali informasi prediktif suatu objek (gambar, teks, potongan suara, dsb) walaupun objek tersebut dapat diposisikan dimana saja pada *input*. Kontribusi CNN adalah pada *convolution* dan *pooling* layer. *Convolution* bekerja dengan prinsip *sliding window* dan *weight sharing* (mengurangi kompleksitas perhitungan). *Pooling layer* berguna untuk merangkum informasi informatif yang dihasilkan oleh suatu *convolution* (mengurangi dimensi). Pada ujung akhir CNN, kita lewatkan satu vektor hasil beberapa operasi *convolution* dan *pooling* pada *multilayer perceptron* (*feed-forward neural network*), dikenal juga sebagai ***fully connected layer***, untuk melakukan suatu pekerjaan, e.g., klasifikasi. Perhatikan, pada umumnya CNN tidak berdiri sendiri, dalam artian CNN biasanya digunakan (dikombinasikan) pada arsitektur yang lebih besar.

13.2 Recurrent Neural Network

Ide dasar *recurrent neural network* (RNN) adalah membuat topologi jaringan yang mampu merepresentasikan data *sequential* (sekuensial) atau *time series* [74], misalkan data ramalan cuaca. Cuaca hari ini bergantung kurang lebih pada cuaca hari sebelumnya. Sebagai contoh apabila hari sebelumnya

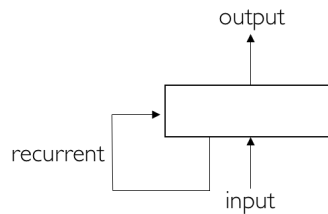
⁴ mathworks.com

mendung, ada kemungkinan hari ini hujan⁵. Walau ada yang menganggap sifat data sekuensial dan *time series* berbeda, RNN berfokus sifat data dimana instans waktu sebelumnya ($t - 1$) mempengaruhi instans pada waktu berikutnya (t). Intinya, mampu mengingat *history*.

Secara lebih umum, diberikan sebuah sekuens *input* $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_T)$. Data x_t (i.e., vektor, gambar, teks, suara) dipengaruhi oleh data sebelumnya (*history*), ditulis sebagai $P(x_t \mid \{x_1, \dots, x_{t-1}\})$. Kami harap kamu ingat kembali materi *markov assumption* yang diberikan pada bab 8. Pada *markov assumption*, diasumsikan bahwa data x_t (data point) hanya dipengaruhi oleh **beberapa data sebelumnya saja** (analogi: *windowing*). Setidaknya, asumsi ini memiliki dua masalah:

1. Menentukan *window* terbaik. Bagaimana cara menentukan banyaknya data sebelumnya (secara optimal) yang mempengaruhi data sekarang.
2. Apabila kita menggunakan *markov assumption*, artinya kita menganggap informasi yang dimuat oleh data lama dapat direpresentasikan oleh data lebih baru (x_t juga memuat informasi x_{t-J}, \dots, x_{t-1} ; J adalah ukuran *window*). Penyederhanaan ini tidak jarang mengakibatkan informasi yang hilang.

RNN adalah salah satu bentuk arsitektur ANN untuk mengatasi masalah yang ada pada *markov assumption*. Ide utamanya adalah memorisasi⁶, kita ingin mengingat **keseluruhan** sekuens (dibanding *markov assumption* yang mengingat sekuens secara terbatas), implikasinya adalah RNN yang mampu mengenali dependensi yang panjang (misal x_t ternyata dependen terhadap x_1). RNN paling sederhana diilustrasikan pada Gambar. 13.9. Ide utamanya adalah terdapat *pointer* ke dirinya sendiri.

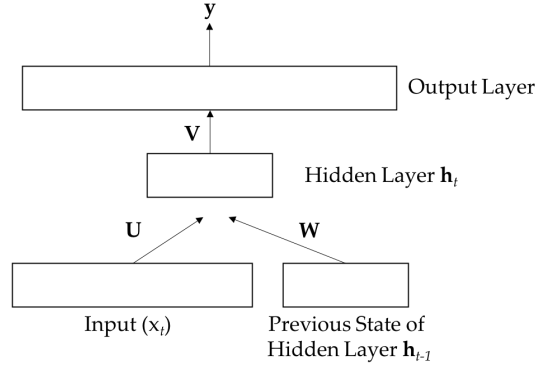


Gambar 13.9. Bentuk konseptual paling sederhana recurrent NN

Ilustrasi Gambar. 13.9 mungkin sedikit susah dipahami karena berbentuk sangat konseptual. Bentuk lebih matematis diilustrasikan pada Gambar. 13.10 [74]. Perhitungan *hidden state* pada waktu ke- t bergantung pada *input* pada waktu ke- t (x_t) dan *hidden state* pada waktu sebelumnya (h_{t-1}).

⁵ Mohon bertanya pada ahli meteorologi untuk kebenaran contoh ini. Contoh ini semata-mata pengalaman pribadi penulis.

⁶ Tidak merujuk hal yang sama dengan *dynamic programming*.



Gambar 13.10. Konsep Recurrent Neural Network

Konsep ini sesuai dengan prinsip *recurrent* yaitu **mengingat** (memorisasi) kejadian sebelumnya. Kita dapat tulis kembali RNN sebagai persamaan 13.1.

$$\mathbf{h}_t = f(x_t, \mathbf{h}_{t-1}, b) \quad (13.1)$$

dimana f adalah fungsi aktivasi (non-linear, dapat diturunkan). Demi menyederhanakan penjelasan, penulis tidak mengikutsertakan *bias* (b) pada fungsi-fungsi berikutnya. Kami berharap pembaca selalu mengingat bahwa *bias* adalah parameter yang diikutsertakan pada fungsi *artificial neural network*. Fungsi f dapat diganti dengan variasi *neural network*⁷, misal menggunakan *long short-term memory network* (LSTM) [75]. Buku ini hanya akan menjelaskan konsep paling penting, silahkan eksplorasi sendiri variasi RNN.

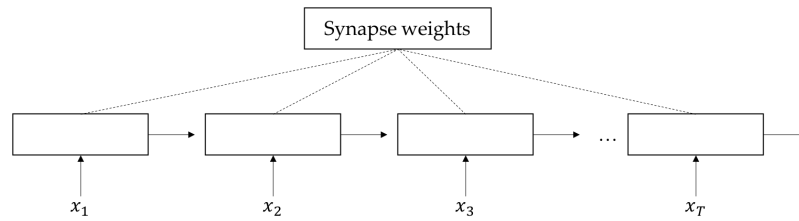
Secara konseptual, persamaan 13.1 memiliki analogi dengan *full markov chain*. Artinya, *hidden state* pada saat ke- t bergantung pada semua *hidden state* dan *input* sebelumnya.

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_t &= f(x_t, \mathbf{h}_{t-1}) \\ &= f(x_t, f(x_{t-1}, \mathbf{h}_{t-2})) \\ &= f(x_t, f(x_{t-1}, f(x_{t-2}, \dots, x_1, \dots, \mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_{t-3})))) \end{aligned} \quad (13.2)$$

Training pada *recurrent neural network* dapat menggunakan metode *back-propagation*. Akan tetapi, metode tersebut kurang intuitif karena tidak mampu mengakomodasi *training* yang bersifat sekuensial *time series*. Untuk itu, terdapat metode lain bernama *backpropagation through time* [76].

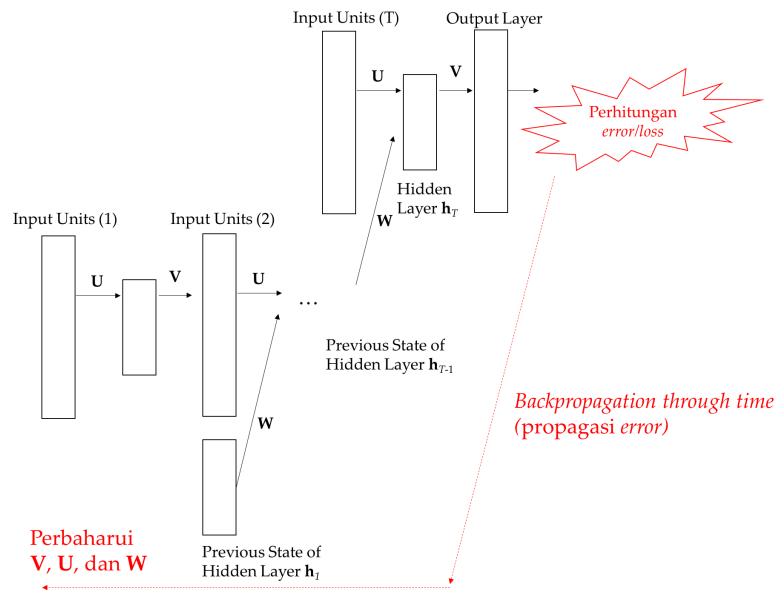
Sebagai contoh kita diberikan sebuah sekuens \mathbf{x} dengan panjang T sebagai input, dimana x_t melambangkan input ke- i (**data point** dapat berupa e.g., vektor, gambar, teks, atau apapun). Kita melakukan *feed forward* data tersebut ke RNN, diilustrasikan pada Gambar. 13.11. Perlu diingat, RNN

⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Recurrent_neural_network



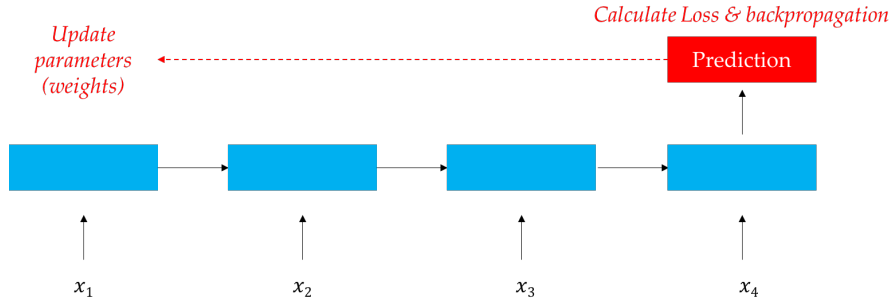
Gambar 13.11. Konsep *feed forward* pada RNN

mengadopsi prinsip *parameter sharing* (serupa dengan *weight sharing* pada CNN) dimana neuron yang sama diulang-ulang saat proses *feed forward*. Setelah selesai proses *feed forward*, kita memperbaharui parameter (*synapse weights*) berdasarkan propagasi *error* (*backpropagation*). Pada *backpropagation* biasa, kita perbaharui parameter sambil mempropagasi *error* dari *hidden state* ke *hidden state* sebelumnya. Teknik melatih RNN adalah ***backpropagation through time*** yang melakukan *unfolding* pada *neural network*. Kita mengupdate parameter saat kita sudah mencapai *hidden state* paling awal. Hal ini diilustrasikan pada Gambar. 13.12⁸. Gambar. 13.12 dapat disederhanakan menjadi bentuk lebih abstrak (konseptual) pada Gambar. 13.13.



Gambar 13.12. Konsep *backpropagation through time* [43]

⁸ Prinsip ini mirip dengan *weight sharing*.



Gambar 13.13. Konsep *backpropagation through time* [1]. Persegi berwarna merah umumnya melambangkan *multi-layer perceptron*

Kita mempropagasi *error* dengan adanya efek dari *next states of hidden layer*. *Synapse weights* diperbaharui secara *large update*. *Synapse weight* tidak diperbaharui per *layer*. Hal ini untuk merepresentasikan *neural network* yang mampu mengingat beberapa kejadian masa lampau dan keputusan saat ini dipengaruhi oleh keputusan pada masa lampau juga (ingatan). Untuk mengerti proses ini secara praktikal (dapat menuliskannya sebagai program), penulis sarankan pembaca untuk melihat materi tentang **computation graph**⁹ dan disertasi PhD oleh Mikolov [43].

Walaupun secara konseptual RNN dapat mengingat seluruh kejadian sebelumnya, hal tersebut sulit untuk dilakukan secara praktikal untuk sekuens yang panjang. Hal ini lebih dikenal dengan *vanishing* atau *exploding gradient problem* [60, 77, 78]. Seperti yang sudah dijelaskan, ANN dan variasi arsitekturnya dilatih menggunakan teknik *stochastic gradient descent* (*gradient-based optimization*). Artinya, kita mengandalkan propagasi *error* berdasarkan turunan. Untuk sekuens *input* yang panjang, tidak jarang nilai *gradient* menjadi sangat kecil dekat dengan 0 (*vanishing*) atau sangat besar (*exploding*). Ketika pada satu *hidden state* tertentu, *gradient* pada saat itu mendekati 0, maka nilai yang sama akan dipropagasikan pada langkah berikutnya (menjadi lebih kecil lagi). Hal serupa terjadi untuk nilai *gradient* yang besar.

Berdasarkan pemaparan ini, RNN adalah teknik untuk merubah suatu sekuens *input*, dimana x_t merepresentasikan data ke- t (e.g., vektor, gambar, teks) menjadi sebuah *output* vektor \mathbf{y} . Vektor \mathbf{y} dapat digunakan untuk permasalahan lebih lanjut (buku ini memberikan contoh *sequence to sequence* pada subbab 13.4). Bentuk konseptual ini dapat dituangkan pada persamaan 13.3. Biasanya, nilai \mathbf{y} dilewatkan kembali ke sebuah *multi-layer perceptron* (MLP) dan fungsi softmax untuk melakukan klasifikasi akhir (*final output*) dalam bentuk probabilitas, seperti pada persamaan 13.4.

$$\mathbf{y} = \text{RNN}(x_1, \dots, x_N) \quad (13.3)$$

⁹ <https://www.coursera.org/learn/neural-networks-deep-learning/lecture/4Wd0Y/computation-graph>

$$\text{final output} = \text{softmax}(\text{MLP}(\mathbf{y})) \quad (13.4)$$

Perhatikan, arsitektur yang penulis deskripsikan pada subbab ini adalah arsitektur paling dasar. Untuk arsitektur *state-of-the-art*, kamu dapat membaca *paper* yang berkaitan.

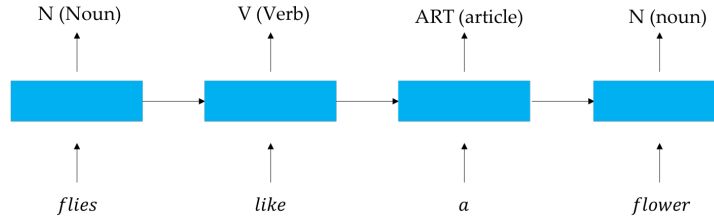
13.3 Part-of-speech Tagging Revisited

Pada bab sebelumnya, kamu telah mempelajari konsep dasar *recurrent neural network*. Selain digunakan untuk klasifikasi (i.e., *hidden state* terakhir digunakan sebagai *input* klasifikasi), RNN juga dapat digunakan untuk memprediksi sekuens seperti persoalan *part-of-speech tagging* (POS *tagging*) [79, 80, 81]. Kami harap kamu masih ingat materi bab 8 yang membahas apa itu persoalan POS *tagging*.

Diberikan sebuah sekuens kata $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_T\}$, kita ingin mencari sekuens *output* $\mathbf{y} = \{y_1, \dots, y_T\}$ (*sequence prediction*); dimana y_i adalah kelas kata untuk x_i . Perhatikan, panjang *input* dan *output* adalah sama. Ingat kembali bahwa pada persoalan POS *tagging*, kita ingin memprediksi suatu kelas kata yang cocok y_i dari kumpulan kemungkinan kelas kata C ketika diberikan sebuah *history* seperti diilustrasikan oleh persamaan 13.5, dimana t_i melambangkan kandidat POS *tag* ke- i . Pada kasus ini, biasanya yang dicari tahu setiap langkah (*unfolding*) adalah probabilitas untuk memilih suatu kelas kata $t \in C$ sebagai kelas kata yang cocok untuk di-*assign* sebagai y_i .

Ilustrasi diberikan oleh Gambar. 13.14.

$$y_1, \dots, y_T = \arg \max_{t_1, \dots, t_T; t_i \in C} P(t_1, \dots, t_T \mid x_1, \dots, x_T) \quad (13.5)$$



Gambar 13.14. POS *tagging* menggunakan RNN

Apabila kita melihat secara sederhana (*markov assumption*), hal ini tidak lain dan tidak bukan adalah melakukan klasifikasi untuk setiap *instance* pada sekuens *input* (persamaan 13.6). Pada setiap *time step*, kita ingin menghasilkan *output* yang bersesuaian.

$$y_i = \arg \max_{t_i \in C} P(t_i | x_i) \quad (13.6)$$

Akan tetapi, seperti yang sudah dibahas sebelum sebelumnya, *markov assumption* memiliki kelemahan. Kelemahan utama adalah tidak menggunakan keseluruhan *history*. Persoalan ini cocok untuk diselesaikan oleh RNN karena kemampuannya untuk mengingat seluruh sekuens (berbeda dengan *hidden markov model* (HMM) yang menggunakan *markov assumption*). Secara teoritis (dan juga praktis¹⁰), RNN lebih hebat dibanding HMM. Dengan ini, persoalan POS *tagging* (*full history*) diilustrasikan oleh persamaan 13.7.

$$y_i = \arg \max_{t_i \in C} P(t_i | x_1, \dots, x_T) \quad (13.7)$$

Pada bab sebelumnya, kamu diberikan contoh persoalan RNN untuk satu *output*; i.e., diberikan sekuens *input*, *output*-nya hanyalah satu kelas yang mengkategorikan seluruh sekuens *input*. Untuk persoalan POS *tagging*, kita harus sedikit memodifikasi RNN untuk menghasilkan *output* bagi setiap elemen sekuens *input*. Hal ini dilakukan dengan cara melewati setiap *hidden layer* pada RNN pada suatu jaringan (anggap sebuah MLP + softmax). Kita lakukan prediksi kelas kata untuk setiap elemen sekuens *input*, kemudian menghitung *loss* untuk masing-masing elemen. Seluruh *loss* dijumlahkan untuk menghitung *backpropagation* pada RNN. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar. 13.15. Tidak hanya untuk persoalan POS *tagging*, arsitektur ini dapat juga digunakan pada persoalan *sequence prediction* lainnya seperti *named entity recognition*¹¹. Gambar. 13.15 mungkin agak sulit untuk dilihat, kami beri bentuk lebih sederhananya (konseptual) pada Gambar. 13.16. Pada setiap langkah, kita menentukan POS *tag* yang sesuai dan menghitung *loss* yang kemudian digabungkan. *Backpropagation* dilakukan dengan mempertimbangkan keseluruhan (jumlah) *loss* masing-masing prediksi.

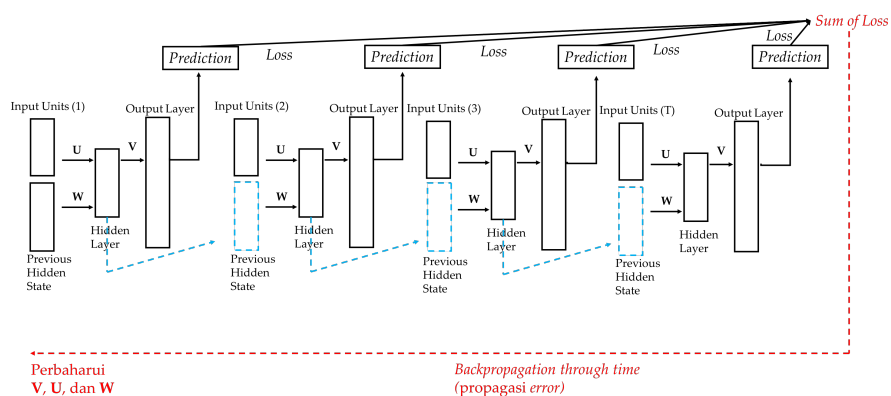
Berdasarkan arsitektur yang sudah dijelaskan sebelumnya, prediksi POS *tag* ke-*i* bersifat independen dari POS *tag* lainnya. Padahal, POS *tag* lainnya memiliki pengaruh saat memutuskan POS *tag* ke-*i* (ingat kembali materi bab 8); sebagai persamaan 13.8.

$$y_i = \arg \max_{t_i \in C} P(t_i | y_1, \dots, y_{i-1}, x_1, \dots, x_i) \quad (13.8)$$

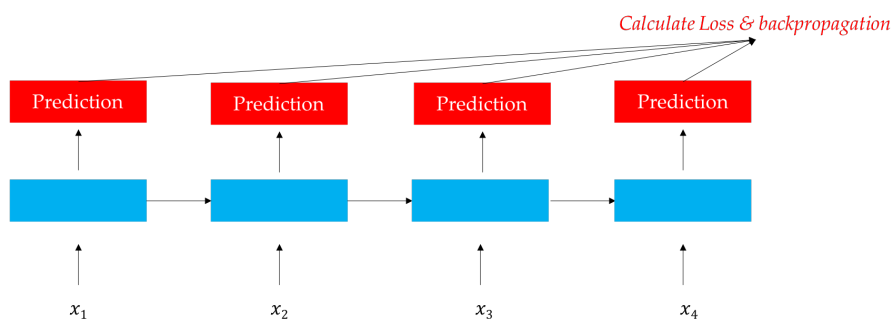
Salah satu strategi untuk menangani hal tersebut adalah dengan melewati POS *tag* pada sebuah RNN juga, seperti pada persamaan 13.9 [1] (ilustrasi pada Gambar. 13.17). Untuk mencari keseluruhan sekuens terbaik, kita dapat menggunakan teknik *beam search* (detil penggunaan dijelaskan pada subbab berikutnya). RNN^x pada persamaan 13.9 juga lebih intuitif apabila diganti menggunakan *bidirectional RNN* (dijelaskan pada subbab berikutnya).

¹⁰ Sejauh yang penulis ketahui. Tetapi hal ini bergantung juga pada variasi arsitektur.

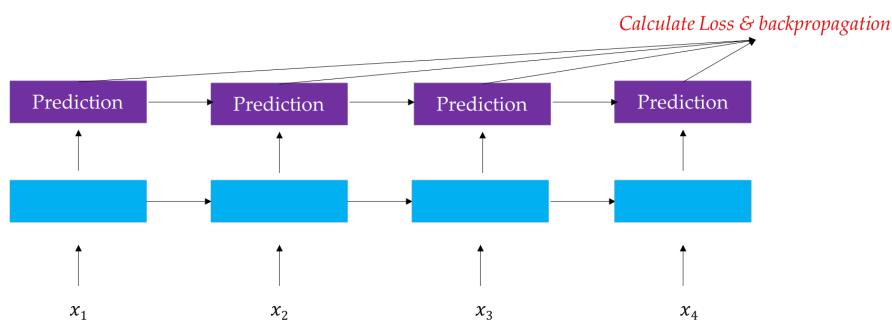
¹¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Named-entity_recognition



Gambar 13.15. *Sequence prediction menggunakan RNN*



Gambar 13.16. *Sequence prediction menggunakan RNN (disederhakan) [1]. Persegi berwarna merah umumnya melambangkan *multi-layer perceptron**



Gambar 13.17. *Sequence prediction menggunakan RNN (disederhakan), dimana prediksi saat waktu ke- t dipengaruhi oleh hasil prediksi pada waktu $t - 1$. Persegi melambangkan RNN*

$$P(t_i | y_1, \dots, y_{i-1}, x_1, \dots, x_i) = \text{softmax}(\text{MLP}([\text{RNN}^x(x_1, \dots, x_i); \text{RNN}^{\text{tag}}(t_1, \dots, t_{i-1})])) \quad (13.9)$$

13.4 Sequence to Sequence

Pertama-tama, kami ingin mendeskripsikan kerangka *conditioned generation*. Pada kerangka ini, kita ingin memprediksi sebuah kelas y_i berdasarkan kelas yang sudah di-hasilkan sebelumnya (*history* yaitu y_1, \dots, y_{i-1}) dan sebuah *conditioning context* \mathbf{c} (berupa vektor).

Arsitektur yang dibahas pada subbab ini adalah variasi RNN untuk permasalahan *sequence generation*¹². Diberikan sekuens *input* $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_T)$. Kita ingin mencari sekuens *output* $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_M)$. Pada subbab sebelumnya, x_i berkorespondensi langsung dengan y_i , e.g., y_i adalah kelas kata (kategori) untuk x_i . Tetapi, pada permasalahan saat ini, x_i tidak langsung berkorespondensi dengan y_i . Setiap y_i dikondisikan oleh **seluruh** sekuens *input* \mathbf{x} ; i.e., *conditioning context* dan *history* $\{y_1, \dots, y_{i-1}\}$. Panjang sekuens *output* M tidak mesti sama dengan panjang sekuens *input* T . Permasalahan ini masuk ke dalam kerangka *conditioned generation* dimana keseluruhan *input* \mathbf{x} dapat direpresentasikan menjadi sebuah vektor \mathbf{c} (*coding*). Vektor \mathbf{c} ini menjadi variabel pengkondisi untuk menghasilkan *output* \mathbf{y} .

Pasangan *input-output* dapat melambangkan teks bahasa X–teks bahasa Y (translasi), teks-ringkasan, kalimat-*paraphrase*, dsb. Artinya ada sebuah *input* dan kita ingin menghasilkan (*generate/produce*) sebuah *output* yang cocok untuk *input* tersebut. Hal ini dapat dicapai dengan memodelkan pasangan *input-output* $p(\mathbf{y} | \mathbf{x})$. Umumnya, kita mengasumsikan ada kumpulan parameter θ yang mengontrol *conditional probability*, sehingga kita transformasi *conditional probability* menjadi $p(\mathbf{y} | \mathbf{x}, \theta)$. *Conditional probability* $p(\mathbf{y} | \mathbf{x}, \theta)$ dapat difaktorkan sebagai persamaan 13.10. Kami harap kamu mampu membedakan persamaan 13.10 dan persamaan 13.5 (dan 13.8) dengan jeli. Sedikit perbedaan pada formula menyebabkan makna yang berbeda. Objektif *training* adalah untuk meminimalkan *loss function*, sebagai contoh berbentuk *log likelihood function* diberikan pada persamaan 13.11, dimana \mathbf{D} melambangkan *training data*¹³.

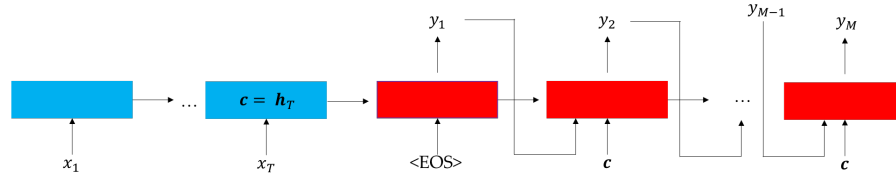
$$p(\mathbf{y} | \mathbf{x}, \theta) = \prod_{t=1}^M p(y_t | \{y_1, \dots, y_{t-1}\}, \mathbf{x}, \theta), \quad (13.10)$$

$$L(\theta) = - \sum_{\{\mathbf{x}, \mathbf{y}\} \in \mathbf{D}} \log p(\mathbf{y} | \mathbf{x}, \theta) \quad (13.11)$$

¹² Umumnya untuk bidang pemrosesan bahasa alami.

¹³ Ingat kembali materi *cross entropy*!

Persamaan 13.10 dapat dimodelkan dengan **encoder-decoder** model yang terdiri dari dua buah RNN dimana satu RNN sebagai *encoder*, satu lagi sebagai *decoder*. *Neural Network*, pada kasus ini, bertindak sebagai *controlling parameter* θ . Ilustrasi encoder-decoder dapat dilihat pada Gambar. 13.18. Gabungan RNN *encoder* dan RNN *decoder* ini disebut sebagai bentuk **sequence to sequence**. Warna biru merepresentasikan *encoder* dan warna merah merepresentasikan *decoder*. “<EOS>” adalah suatu simbol spesial (*untuk praktikalitas*) yang menandakan bahwa sekuens *input* telah selesai dan saatnya berpindah ke *decoder*.



Gambar 13.18. Konsep *encoder-decoder* [78]

Sebuah *encoder* merepresentasikan sekuens *input* \mathbf{x} menjadi satu vektor \mathbf{c} ¹⁴. Kemudian, *decoder* men-decode representasi \mathbf{c} untuk menghasilkan (*generate*) sebuah sekuens *output* \mathbf{y} . Perhatikan, arsitektur kali ini berbeda dengan arsitektur pada subbab 13.3. *Encoder-decoder (neural network)* bertindak sebagai kumpulan parameter θ yang mengatur *conditional probability*. *Encoder-decoder* juga dilatih menggunakan prinsip *gradient-based optimization* untuk *tuning* parameter yang mengkondisikan *conditional probability* [78]. Dengan ini, persamaan 13.10 sudah didefinisikan sebagai *neural network* sebagai persamaan 13.12. “enc” dan “dec” adalah fungsi *encoder* dan *decoder*, yaitu sekumpulan transformasi non-linear.

$$y_t = \text{dec}(\{y_1, \dots, y_{t-1}\}, \text{enc}(\mathbf{x}), \theta) \quad (13.12)$$

Begitu model dilatih, *encoder-decoder* akan mencari *output* $\hat{\mathbf{y}}$ terbaik untuk suatu input \mathbf{x} , dillustrasikan pada persamaan 13.13. Masing-masing komponen *encoder-decoder* dibahas pada subbab-subbab berikutnya. Untuk abstraksi yang baik, penulis akan menggunakan notasi aljabar linear. Kami harap pembaca sudah familiar dengan representasi *neural network* menggunakan notasi aljabar linear seperti yang dibahas pada bab 11.

$$\hat{\mathbf{y}} = \arg \max_{\mathbf{y}} p(\mathbf{y} \mid \mathbf{x}, \theta) \quad (13.13)$$

¹⁴ Ingat kembali bab 12 untuk mengerti kenapa hal ini sangat diperlukan.

13.4.1 Encoder

Seperti yang sudah dijelaskan, *encoder* mengubah sekuens *input* \mathbf{x} menjadi satu vektor \mathbf{c} . Suatu data point pada sekuens *input* x_t (e.g., kata, gambar, suara, dsb) umumnya direpresentasikan sebagai *feature vector* \mathbf{e}_t . Dengan demikian, *encoder* dapat direpresentasikan dengan persamaan 13.14

$$\begin{aligned}\mathbf{h}_t &= f(\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{e}_t) \\ &= f(\mathbf{h}_{t-1}\mathbf{U} + \mathbf{e}_t\mathbf{W})\end{aligned}\quad (13.14)$$

dimana f adalah fungsi aktivasi non-linear; \mathbf{U} dan \mathbf{W} adalah matriks bobot (*weight matrices*—merepresentasikan *synapse weights*).

Representasi *input* \mathbf{c} dihitung dengan persamaan 13.15, yaitu sebagai *weighted sum* dari *hidden states* [53], dimana q adalah fungsi aktivasi non-linear. Secara lebih sederhana, kita boleh langsung menggunakan \mathbf{h}_T sebagai \mathbf{c} [78].

$$\mathbf{c} = q(\{\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_T\}) \quad (13.15)$$

Walaupun disebut sebagai representasi keseluruhan sekuens *input*, informasi awal pada *input* yang panjang dapat hilang. Artinya \mathbf{c} lebih banyak memuat informasi *input* ujung-ujung akhir. Salah satu strategi yang dapat digunakan adalah dengan membalik (*reversing*) sekuens *input*. Sebagai contoh, *input* $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_T)$ dibalik menjadi (x_T, \dots, x_1) agar bagian awal (\dots, x_2, x_1) lebih dekat dengan *decoder* [78]. Informasi yang berada dekat dengan *decoder* cenderung lebih diingat. Kami ingin pembaca mengingat bahwa teknik ini pun tidaklah sempurna.

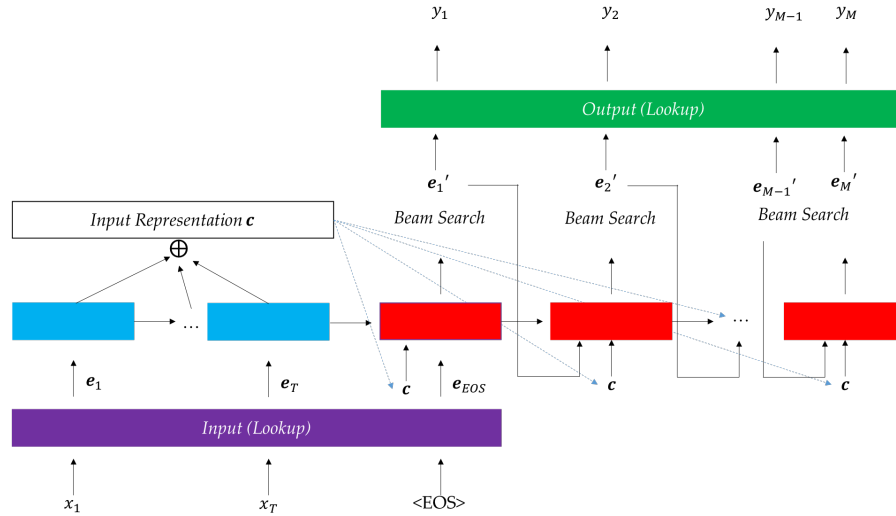
13.4.2 Decoder

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, *encoder* memproduksi sebuah vektor \mathbf{c} yang merepresentasikan sekuens *input*. *Decoder* menggunakan representasi ini untuk memproduksi (*generate*) sebuah sekuens *output* $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_M)$, disebut sebagai proses **decoding**. Mirip dengan *encoder*, kita menggunakan RNN untuk menghasilkan *output* seperti diilustrasikan pada persamaan 13.16.

$$\begin{aligned}\mathbf{h}'_t &= f(\mathbf{h}'_{t-1}, \mathbf{e}'_{t-1}, \mathbf{c}) \\ &= f(\mathbf{h}'_{t-1}\mathbf{H} + \mathbf{e}'_{t-1}\mathbf{E} + \mathbf{c}\mathbf{C})\end{aligned}\quad (13.16)$$

dimana f merepresentasikan fungsi aktivasi non-linear; \mathbf{H} , \mathbf{E} , dan \mathbf{C} merepresentasikan *weight matrices*. *Hidden state* \mathbf{h}'_t melambangkan distribusi probabilitas suatu objek (e.g., POS tag, kelas kata yang **berasal dari suatu himpunan**) untuk menjadi *output* y_t . Umumnya, y_t adalah dalam bentuk *feature-vector* \mathbf{e}'_t .

Dengan penjelasan ini, mungkin pembaca berpikir Gambar. 13.18 tidak lengkap. Kamu benar! Penulis sengaja memberikan gambar simplifikasi. Gambar lebih lengkap (dan lebih nyata) diilustrasikan pada Gambar. 13.19.



Gambar 13.19. Konsep *encoder-decoder* (full)

Kotak berwarna ungu dan hijau dapat disebut sebagai *lookup matrix* atau *lookup table*. Tugas mereka adalah mengubah *input* x_t menjadi bentuk *feature vector*-nya (e.g., *word embedding*) dan mengubah e'_t menjadi y_t (e.g., *word embedding* menjadi kata). Komponen “*Beam Search*” dijelaskan pada subbab berikutnya.

13.4.3 Beam Search

Kita ingin mencari sekuens *output* yang memaksimalkan nilai probabilitas pada persamaan 13.13. Artinya, kita ingin mencari *output* terbaik. Pada suatu tahapan *decoding*, kita memiliki beberapa macam kandidat objek untuk dijadikan *output*. Kita ingin mencari sekuens objek sedemikian sehingga probabilitas akhir sekuens objek tersebut bernilai terbesar sebagai *output*. Hal ini dapat dilakukan dengan algoritma *Beam Search*¹⁵.

Secara sederhana, algoritma *Beam Search* mirip dengan algoritma Viterbi yang sudah dijelaskan pada bab 8, yaitu algoritma untuk mencari sekuens dengan probabilitas tertinggi. Perbedaannya terletak pada *heuristic*. Untuk

¹⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Beam_search

¹⁶ https://en.wikibooks.org/wiki/Artificial_Intelligence/Search/Heuristic_search/Beam_search

```

beamSearch(problemSet, ruleSet, memorySize)
  openMemory = new memory of size memorySize
  nodeList = problemSet.listOfNodes
  node = root or initial search node
  add node to OpenMemory;
  while(node is not a goal node)
    delete node from openMemory;
    expand node and obtain its children, evaluate those children;
    if a child node is pruned according to a rule in ruleSet, delete it;
    place remaining, non-pruned children into openMemory;
    if memory is full and has no room for new nodes, remove the worst
      node, determined by ruleSet, in openMemory;
  node = the least costly node in openMemory;

```

Gambar 13.20. *Beam Search*¹⁶

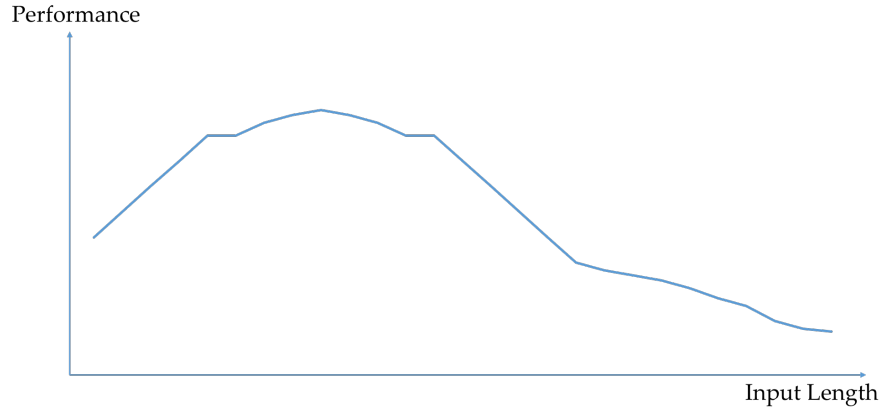
menghemat memori komputer, algoritma *Beam Search* melakukan ekspansi terbatas. Artinya mencari hanya beberapa (B) kandidat objek sebagai sekuens berikutnya, dimana beberapa kandidat objek tersebut memiliki probabilitas $P(y_t | y_{t-1})$ terbesar. B disebut sebagai *beam-width*. Algoritma *Beam Search* bekerja dengan prinsip yang mirip dengan *best-first search* (*best-B search*) yang sudah kamu pelajari di kuliah algoritma atau pengenalan kecerdasan buatan¹⁷. Pseudo-code *Beam Search* diberikan pada Gambar. 13.20 (*direct quotation*).

13.4.4 Attention-based Mechanism

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, model *encoder-decoder* memiliki masalah saat diberikan sekuens yang panjang (*vanishing* atau *exploding gradient problem*). Kinerja model dibandingkan dengan panjang *input* kurang lebih dapat diilustrasikan pada Gambar. 13.21. Secara sederhana, kinerja model menurun seiring sekuens input bertambah panjang. Selain itu, representasi \mathbf{c} yang dihasilkan *encoder* harus memuat informasi keseluruhan *input* walaupun sulit dilakukan. Ditambah lagi, *decoder* menggunakan representasinya \mathbf{c} saja tanpa boleh melihat bagian-bagian khusus *input* saat *decoding*. Hal ini tidak sesuai dengan cara kerja manusia, misalnya pada kasus translasi bahasa. Ketika mentranslasi bahasa, manusia melihat bolak-balik bagian mana yang sudah ditranslasi dan bagian mana yang sekarang (difokuskan) untuk ditranslasi. Artinya, manusia berfokus pada suatu bagian *input* untuk menghasilkan suatu translasi.

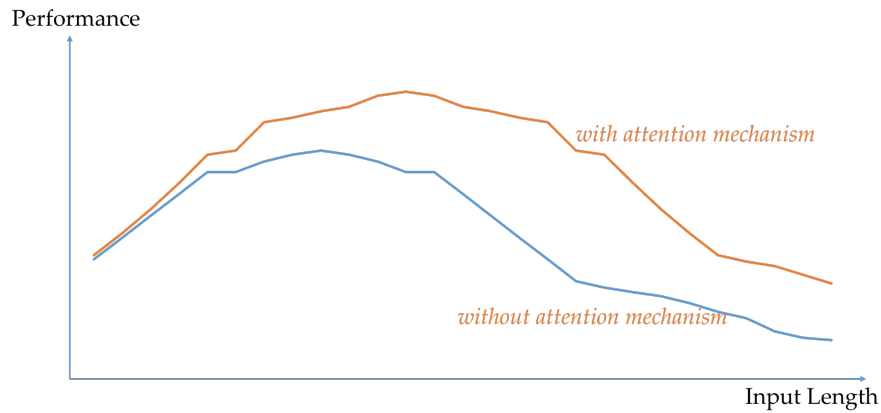
Sudah dijelaskan sebelumnya bahwa representasi sekuens *input* \mathbf{c} adalah sebuah *weighted sum*. \mathbf{c} yang sama digunakan sebagai *input* bagi *decoder* untuk menentukan semua *output*. Akan tetapi, untuk suatu tahapan *decoding* (untuk *hidden state* \mathbf{h}'_t tertentu), kita mungkin ingin model lebih berfokus pada bagian *input* tertentu daripada *weighted sum* yang sifatnya generik. Ide ini adalah hal yang mendasari ***attention mechanism*** [53, 54]. Ide ini sangat

¹⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=j1H3jAAG1EA&t=2131s>



Gambar 13.21. Permasalahan *input* yang panjang

berguna pada banyak aplikasi pemrosesan bahasa alami. *Attention mechanism* dapat dikatakan sebagai suatu *soft alignment* antara *input* dan *output*. Mekanisme ini dapat membantu mengatasi permasalahan *input* yang panjang, seperti diilustrasikan pada Gambar. 13.22.



Gambar 13.22. Menggunakan vs. tidak menggunakan *attention*

Dengan menggunakan *attention mechanism*, kita dapat mentransformasi persamaan 13.16 pada *decoder* menjadi persamaan 13.17

$$\mathbf{h}'_t = f'(\mathbf{h}'_{t-1}, \mathbf{e}'_{t-1}, \mathbf{c}, \mathbf{k}_t) \quad (13.17)$$

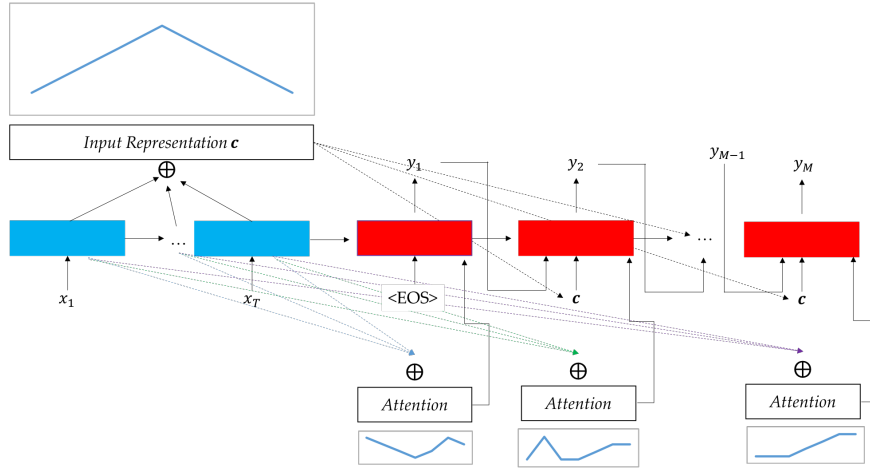
dimana \mathbf{k}_t merepresentasikan seberapa (*how much*) *decoder* harus memfokuskan diri ke *hidden state* tertentu pada *encoder* untuk menghasilkan *output* saat ke- t . \mathbf{k}_t dapat dihitung pada persamaan 13.18

$$\mathbf{k}_t = \sum_{i=1}^T \alpha_{t,i} \mathbf{h}_i$$

$$\alpha_{t,i} = \frac{\exp(\mathbf{h}_i \cdot \mathbf{h}'_{t-1})}{\sum_{z=1}^T \exp(\mathbf{h}_z \cdot \mathbf{h}'_{t-1})} \quad (13.18)$$

dimana T merepresentasikan panjang *input*, \mathbf{h}_i adalah *hidden state* pada *encoder* pada saat ke- i , \mathbf{h}'_{t-1} adalah *hidden state* pada *decoder* saat ke $t - 1$.

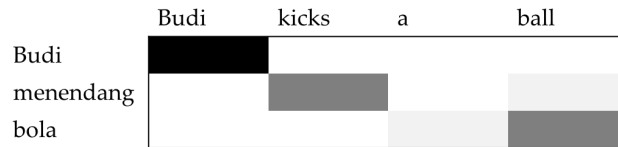
Sejatinya \mathbf{k}_t adalah sebuah *weighted sum*. Berbeda dengan \mathbf{c} yang bernilai sama untuk setiap tahapan *decoding*, *weight* atau bobot ($\alpha_{t,i}$) masing-masing *hidden state* pada *encoder* berbeda-beda untuk tahapan *decoding* yang berbeda. Perhatikan Gambar. 13.23 sebagai ilustrasi (lagi-lagi, bentuk *encoder-decoder* yang disederhanakan). Terdapat suatu bagian grafik yang menunjukkan distribusi bobot pada bagian *input representation* dan *attention*. Distribusi bobot pada *weighted sum* \mathbf{c} adalah pembobotan yang bersifat generik, yaitu berguna untuk keseluruhan (rata-rata) kasus. Masing-masing *attention* (semacam *layer* semu) memiliki distribusi bobot yang berbeda pada tiap tahapan *decoding*. Walaupun *attention mechanism* sekalipun tidak sempurna, ide ini adalah salah satu penemuan yang sangat penting.



Gambar 13.23. *Encoder-decoder with attention*

Seperti yang dijelaskan pada bab 11 bahwa *neural network* susah untuk dimengerti. *Attention mechanism* adalah salah satu cara untuk mengerti *neu-*

ral network. Contoh yang mungkin lebih mudah dipahami diberikan pada Gambar. 13.24 yang merupakan contoh kasus mesin translasi [53]. *Attention mechanism* mampu mengetahui *soft alignment*, yaitu kata mana yang harus difokuskan saat melakukan translasi bahasa (bagian *input* mana berbobot lebih tinggi). Dengan kata lain, *attention mechanism* memberi interpretasi kata pada *output* berkorespondensi dengan kata pada *input* yang mana. Sebagai informasi, menemukan cara untuk memahami (interpretasi) ANN adalah salah satu tren riset masa kini [52].



Gambar 13.24. *Attention mechanism* pada translasi bahasa [53]. Warna lebih gelap merepresentasikan bobot (fokus/*attention*) lebih tinggi. Sebagai contoh, kata “menendang” berkorespondensi paling erat dengan kata “kicks”

13.4.5 Variasi Arsitektur Sequence to Sequence

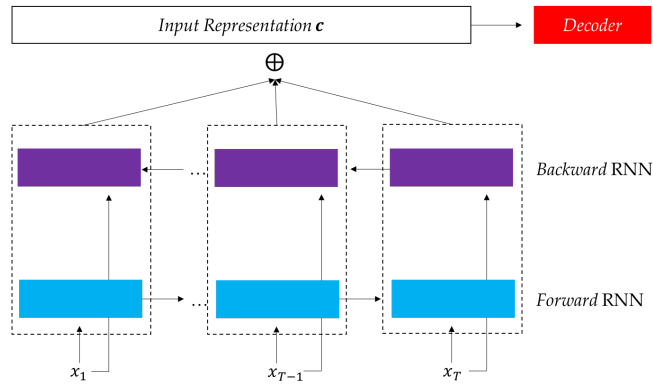
Selain RNN, kita juga dapat menggunakan *bidirectional* RNN (BiRNN) untuk mengikutsertakan pengaruh baik *hidden state* sebelum $(\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_{t-1})$ dan setelah $(\mathbf{h}_{t+1}, \dots, \mathbf{h}_T)$ untuk menghitung *hidden state* sekarang (\mathbf{h}_t) [82, 83, 84]. BiRNN menganggap \mathbf{h}_t sebagai gabungan (*concatenation*) *forward hidden state* $\mathbf{h}_t^{\rightarrow}$ dan *backward hidden state* $\mathbf{h}_t^{\leftarrow}$, ditulis sebagai $\mathbf{h}_t = \mathbf{h}_t^{\rightarrow} + \mathbf{h}_t^{\leftarrow}$ ¹⁸. *Forward hidden state* dihitung seperti RNN biasa yang sudah dijelaskan pada subbab *encoder*, yaitu $\mathbf{h}_t^{\rightarrow} = f(\mathbf{h}_{t-1}^{\rightarrow}, \mathbf{e}_t)$. *Backward hidden state* dihitung dengan arah terbalik $\mathbf{h}_t^{\leftarrow} = f(\mathbf{h}_{t+1}^{\leftarrow}, \mathbf{e}_t)$. Ilustrasi *encoder-decoder* yang menggunakan BiRNN dapat dilihat pada Gambar. 13.25.

Selain variasi RNN menjadi BiRNN kita dapat menggunakan *stacked RNN* seperti pada Gambar. 13.26 dimana *output* pada RNN pertama bertindak sebagai *input* pada RNN kedua. *Hidden states* yang digunakan untuk menghasilkan representasi *encoding* adalah RNN pada tumpukan paling atas. Kita juga dapat menggunakan variasi *attention mechanism* seperti *neural checklist model* [85] atau *graph-based attention* [86]. Selain yang disebutkan, masih banyak variasi lain yang ada, silahkan eksplorasi lebih lanjut sendiri.

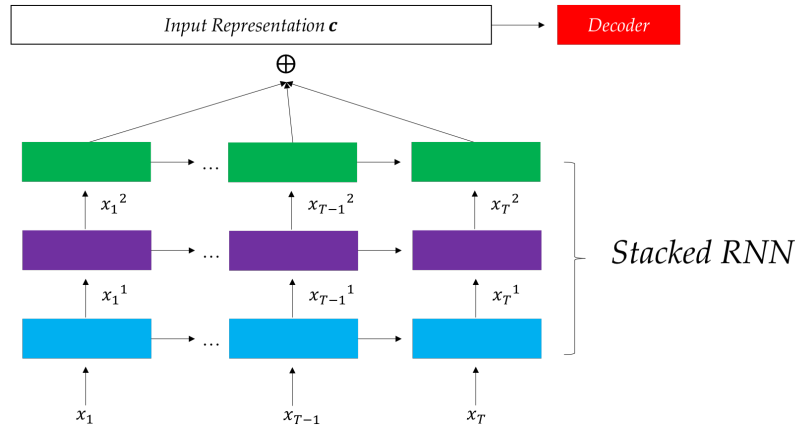
13.4.6 Rangkuman

Sequence to sequence adalah salah satu bentuk *conditioned generation*. Artinya, menggunakan RNN untuk menghasilkan (*generate*) suatu sekuens *output* yang

¹⁸ Perhatikan! + disini dapat diartikan sebagai penjumlahan atau konkatenasi



Gambar 13.25. Encoder-decoder dengan BiRNN



Gambar 13.26. Encoder-decoder dengan stacked RNN

dikondisikan oleh variabel tertentu. Diklat ini memberikan contoh bagaimana menghasilkan suatu sekuens *output* berdasarkan sekuens *input* (*conditioned on a sequence of input*). Selain *input* berupa sekuens, konsep ini juga dapat diaplikasikan pada bentuk lainnya. Misalnya, menghasilkan *caption* saat input yang diberikan adalah sebuah gambar [87]. Kita ubah *encoder* menjadi sebuah CNN (ingat kembali subbab 13.1) dan *decoder* berupa RNN [87]. Gabungan CNN-RNN tersebut dilatih bersama menggunakan metode *backpropagation*.

Perhatikan, walaupun memiliki kemiripan dengan *hidden markov model*, *sequence to sequence* bukanlah *generative model*. Pada *generative model*, kita ingin memodelkan *joint probability* $p(x, y) = p(y | x)p(x)$ (walaupun secara tidak langsung, misal menggunakan teori Bayes). *Sequence to sequence* adalah *discriminative model* walaupun *output*-nya berupa sekuens, ia tidak memodelkan $p(x)$, berbeda dengan *hidden markov model*. Kita ingin memodelkan *conditional probability* $p(y | x)$ secara langsung, seperti *classifier* lainnya (e.g.,

logistic regression). Jadi yang dimodelkan antara *generative* dan *discriminative model* adalah dua hal yang berbeda.

Pada subbab ini, penulis memberikan contoh *attention mechanism* yang beroperasi antara *encoder* dan *decoder*. Masih banyak variasi lainnya seperti *self-attention*, *multi-head attention* dan *hierarchical-attention* [88, 89]. Walaupun motivasi dan penggunaan variasi *attention mechanism* berbeda-beda, konsep dasarnya sama yaitu mengekstrak (atau mengambil) informasi dari bagian *network* lainnya.

13.5 Arsitektur Lainnya

Selain arsitektur yang sudah dipaparkan, masih banyak arsitektur lain baik bersifat generik (dapat digunakan untuk berbagai karakteristik data) maupun spesifik (cocok untuk data dengan karakteristik tertentu atau permasalahan tertentu) sebagai contoh, *Restricted Boltzman Machine*¹⁹ dan *Generative Adversarial Network* (GAN)²⁰. Saat buku ini ditulis, GAN dan *adversarial training* sedang populer.

13.6 Architecture Ablation

Pada bab 9, kamu telah mempelajari *feature ablation*, yaitu memilih-milih elemen pada *input* (untuk dibuang), sehingga model memiliki kinerja optimal. Pada *neural network*, proses *feature engineering* mungkin tidak sepenting pada model-model yang sudah kamu pelajari sebelumnya (e.g., model linear) karena ia dapat memodelkan interaksi yang kompleks dari seluruh elemen *input*. Pada *neural network*, masalah yang muncul adalah memilih arsitektur yang tepat, seperti menentukan jumlah *hidden layers* (dan berapa unit). Contoh lain adalah memilih fungsi aktivasi yang cocok. Walaupun *neural network* memberikan kita kemudahan dari segi pemilihan fitur, kita memiliki kesulitan dalam menentukan arsitektur. Terlebih lagi, alasan memilih suatu jumlah *units* pada suatu *layer* (e.g., 512 dibanding 256 *units*) mungkin tidak dapat dijustifikasi dengan sangat akurat. Pada *feature ablation*, kita dapat menjustifikasi alasan untuk menghilangkan suatu fitur. Pada *neural network*, kita susah menjelaskan alasan pemilihan karena *search space*-nya jauh lebih besar.

13.7 Transfer Learning

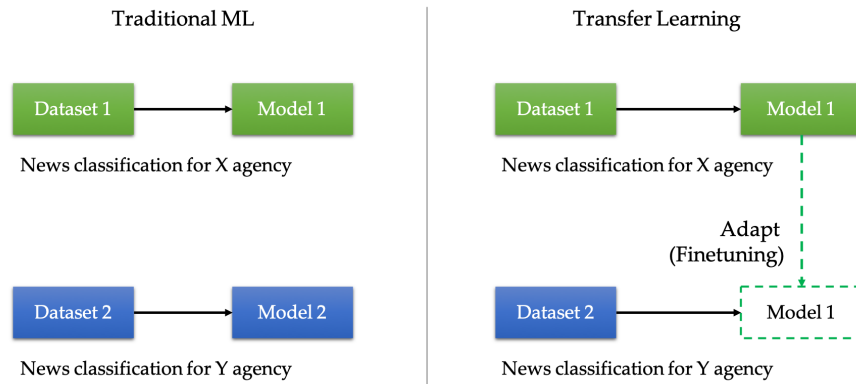
Walau konsep *transfer learning* (TL) tidak terbatas pada *neural network*, subbab ini membahas pemanfaatan TL paling umum pada *neural network*. Pembaca dipersilahkan mengeksplorasi lebih lanjut.

¹⁹ <https://deeplearning4j.org/restrictedboltzmannmachine>

²⁰ <https://deeplearning4j.org/generative-adversarial-network>

Bayangkan kondisi berikut. Ada dua orang, Haryanto dan Wira. Saat masih kecil, Wira pernah belajar cara memainkan Ukulele, sedangkan Haryanto tidak. Ketika kedua orang tersebut belajar memainkan gitar, menurutmu siapa yang bisa menguasai gitar lebih cepat?

Pada TL, kita ingin menggunakan suatu pengetahuan (*knowledge*) pada suatu *task* T_1 , untuk menyelesaikan permasalahan *task* T_2 [90, 91]. Kita memiliki asumsi bahwa T_1 memiliki kaitan dengan T_2 , sedemikian sehingga fasih pada T_1 akan menyebabkan kita fasih pada T_2 (atau lebih fasih dibandingkan tidak menguasai T_1 sama sekali). Perhatikan Gambar 13.27 yang mengilustrasikan perbedaan pembelajaran mesin biasa dan penggunaan TL. Pada pembelajaran mesin biasa, kita melatih model untuk masing-masing *task*. Pada TL, kita menggunakan model yang sudah ada, disebut ***pretrained model***, untuk *task* baru. Selain dimotivasi oleh kemiripan kedua *tasks*, TL juga dimotivasi oleh ketersediaan data. Misal dataset untuk *task* T_1 banyak, sedangkan untuk *task* T_2 sedikit. Berhubung T_1 dan T_2 memiliki kemiripan, model dapat T_1 yang diadaptasi untuk T_2 akan konvergen lebih cepat dibanding melatih model dari awal untuk T_2 .



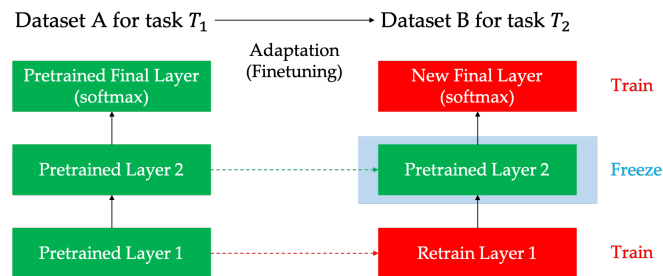
Gambar 13.27. Pembelajaran mesin tradisional vs. menggunakan *transfer learning*



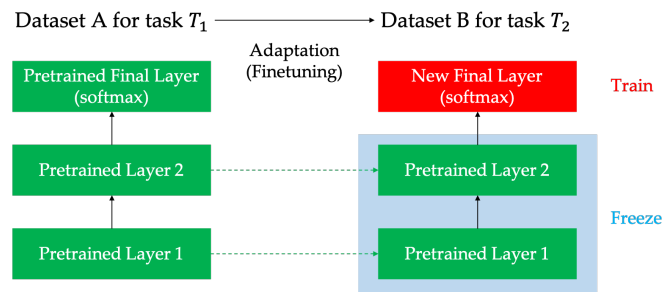
Gambar 13.28. Proses *transfer learning*

Proses mengadaptasi suatu *pretrained model* disebut **finetuning** (Gambar 13.28). Pertama-tama kita ganti *layer* terakhir pada *pretrained model* menggunakan *layer* baru yang diinisialisasi secara *random*²¹. Kemudian, kita lakukan *finetuning*. Secara umum, ada tiga cara untuk melakukan *finetuning*.

1. **Freeze some layers.** Kita *freeze* beberapa *layer* (parameternya tidak diperbaharui saat *finetuning*), kemudian latih *layer* lainnya. Ilustrasi diberikan pada Gambar 13.29.
2. **Train only new last layer.** Kita *freeze* semua *layer*, kecuali *layer* terakhir untuk task T_2 . Ilustrasi diberikan pada Gambar 13.30
3. **Train all layers.** Setelah mengganti *layer terakhir*, kita latih semua *layer* untuk task T_2 . Ilustrasi diberikan pada Gambar 13.31.



Gambar 13.29. *Freeze some layers*



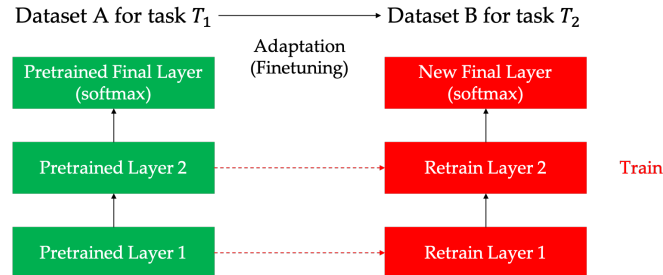
Gambar 13.30. *Train only new last layer*

Demikian konsep paling dasar TL. Selebihkan, penulis menyarankan untuk membaca *paper* atau tutorial terkait, seperti dibawah berikut.

- <https://www.cs.uic.edu/~liub/Lifelong-Learning-tutorial-slides.pdf>

²¹ Penulis rasa, hal ini hampir wajib hukumnya

- <https://www.aclweb.org/anthology/attachments/N19-5004.Presentation.pdf>



Gambar 13.31. Train all layers

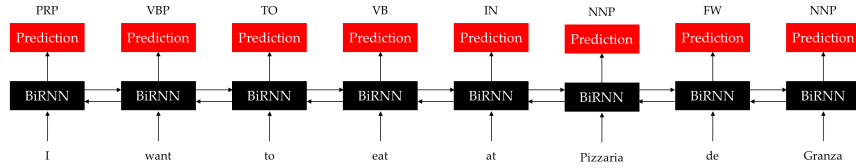
13.8 Multi-task Learning

Subbab ini akan menjelaskan *framework* melatih model pembelajaran mesin menggunakan *multi-task learning* (MTL). Walaupun konsep MTL tidak terbatas pada *neural network*, bab ini membahas konsep tersebut menggunakan arsitektur *neural network* sebagai contoh (karena itu dimasukkan ke dalam bab ini). Kami hanya memberikan penjelasan paling inti MTL menggunakan contoh yang sederhana.

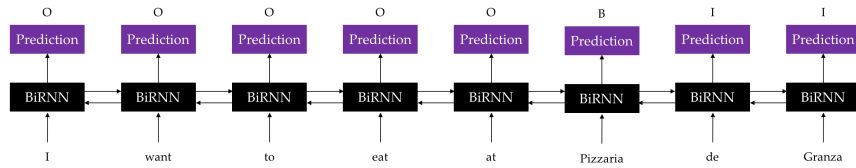
Pada MTL, kita melatih model untuk mengerjakan beberapa hal yang mirip sekaligus. Misalnya, melatih POS *tagger* dan *named-entity recognition* [92], mesin penerjemah untuk beberapa pasangan bahasa [93], klasifikasi teks [94] dan *discourse parsing* [95]. Karena model dilatih untuk *tasks* yang mirip, kita berharap agar model mampu mendapatkan “intuisi” untuk menyelesaikan permasalahan. “Intuisi” tersebut dapat diaplikasikan pada beberapa *task*. Perbedaan TL (dalam konteks pembahasan sebelumnya) dan MTL terletak pada *timing* pelatihan. Apabila pada TL, model untuk *task* T_1 dan T_2 dilatih pada waktu yang berbeda, sedangkan untuk MTL, dilatih bersamaan.

Perhatikan Gambar 13.32, ilustrasi permasalahan POS *tagging*. Diberikan *input* sekuens kata \mathbf{x} , kita ingin mencari sekuens *tag* \mathbf{y} terbaik untuk melambangkan kelas tiap kata. Kami harap kamu masih ingat definisi permasalahan tersebut karena sudah dibahas pada bab-bab sebelumnya. Kita ingin memodelkan *conditional probability* $p(\mathbf{y} \mid \mathbf{x}, \theta)$. POS *tagging* adalah salah satu *sequence tagging task*, dimana setiap elemen *input* berkorespondensi dengan elemen *output*. Kita dapat melatih model BiRNN ditambah dengan MLP untuk melakukan prediksi kelas kata.

Sekarang kamu perhatikan Gambar 13.33 yang mengilustrasikan *named entity recognition task* (NER). *Named entity* secara sederhana adalah objek

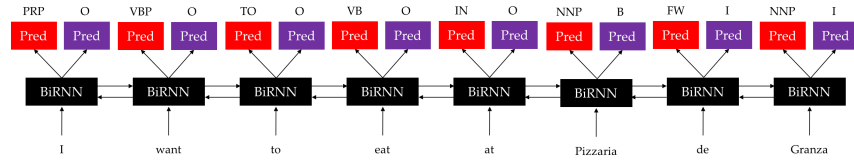
Gambar 13.32. POS *tagger*

yang bernama, misal lokasi geografis, nama perusahaan, dan nama orang. Pada NER, kita ingin mengekstraksi *named entity* yang ada pada *input*. *Task* ini biasanya direpresentasikan dengan *BIO coding scheme*. Artinya, *output* untuk NER adalah pilihan B (*begin*), I (*inside*) dan O (*outside*). Apabila suatu kata adalah kata pertama dari suatu *named entity*, kita mengasosiasikannya dengan *output* B. Apabila suatu kata adalah bagian dari *named entity*, tetapi bukan kata pertama, maka diasosiasikan dengan *output* I. Selain keduanya, diasosiasikan dengan *output* O. Seperti *POS tagging*, NER juga merupakan *sequence tagging* karena kita ingin memodelkan $p(\mathbf{y} \mid \mathbf{x}, \theta)$ untuk \mathbf{x} adalah *input* dan \mathbf{y} adalah *output* (BIO).

Gambar 13.33. *Named Entity Recognition*

POS tagging dan NER dianggap sebagai *task* yang “mirip” karena keduanya memiliki cara penyelesaian masalah yang mirip. Selain dapat diselesaikan dengan cara yang mirip, kedua *task* tersebut memiliki *nature* yang sama. Dengan alasan ini, kita dapat melatih model untuk *POS tagging* dan NER dengan kerangka *multi-task learning*. Akan tetapi, menentukan apakah dua *task* memiliki *nature* yang mirip ibarat sebuah seni (butuh *sense*) dibanding *hard science* [1].

Ide utama MTL adalah melatih *shared model/shared representation*. Sebagai ilustrasi, perhatikan Gambar 13.34. Sebelumnya, kita melatih dua model dengan BiRNN yang dilewatkan pada MLP. Pada saat ini, kita melatih BiRNN yang dianggap sebagai *shared representation*. BiRNN diharapkan memiliki “intuisi” untuk menyelesaikan kedua permasalahan, berhubung keduanya memiliki *nature* yang sama. Setiap *hidden layer* pada BiRNN dilewatkan pada MLP untuk melakukan prediksi pada masing-masing *task*. Tujuan utama MTL adalah untuk meningkatkan kinerja. Kita melatih model

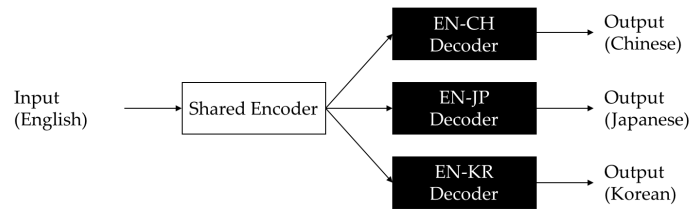


Gambar 13.34. *Multi-task Learning* untuk POS tagging dan NER

untuk *task X* dengan meminjam “intuisi” penyelesaian dari *task Y* dengan harapan “intuisi” yang dibawa dari *task Y* dapat memberikan informasi tambahan untuk penyelesaian *task X*.



(a) Sequence to Sequence Machine Translation



(b) Machine Translation in Multi-task Setting

Gambar 13.35. *Multi-task Learning* pada mesin translati

Perhatikan contoh berikutnya tentang MTL pada mesin translati (Gambar 13.35). Pada permasalahan mesin translati, kita melatih model menggunakan data paralel kombinasi pasangan bahasa X - Y . Penggunaan MTL pada mesin mesin translati pada umumnya dimotivasi oleh dua alasan.

- Pada kombinasi pasangan bahasa tertentu, tersedia *dataset* dengan jumlah yang banyak. Tetapi, bisa jadi kita hanya memiliki *dataset* berukuran kecil untuk bahasa tertentu. Sebagai contoh, data mesin translati untuk pasangan English-Dutch lebih besar dibanding English-Indonesia. Karena kedua kombinasi pasangan bahasa memiliki *nature* yang cukup sama, kita dapat menggunakan MTL sebagai kompensasi data English-Indonesia yang sedikit agar model pembelajaran bisa konvergen. Dalam artian, *encoder* yang dilatih menggunakan sedikit data kemungkinan memiliki performa yang kurang baik. Dengan ini, kita latih suatu *encoder* menggu-

nakan data English-Dutch dan English-Indonesia agar model bisa konvergen.

- Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, kita ingin menggunakan “intuisi” penyelesaian suatu permasalahan untuk permasalahan lainnya, berhubung solusinya keduanya mirip. Dengan hal ini, kita harap kita mampu meningkatkan kinerja model. Sebagai contoh, kombinasi pasangan bahasa English-Japanese dan English-Korean, berhubung bahasa target memiliki struktur yang mirip.

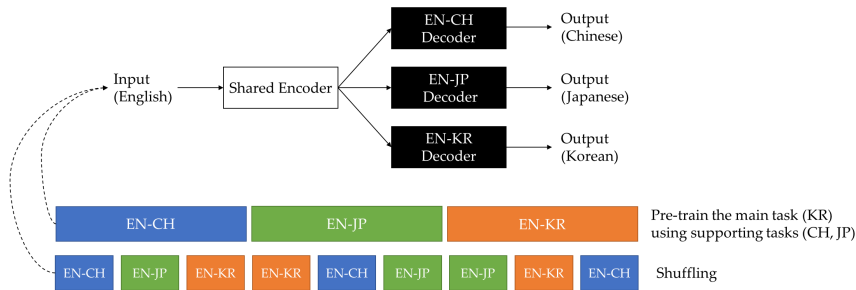
Pada kerangka MTL, *utility function* atau objektif *training* adalah meminimalkan *joint loss* semua *tasks* (hal ini juga membedakan TL dan MTL), diberikan pada persamaan 13.19. Kita dapat mendefinisikan *loss* pada kerangka MTL sebagai penjumlahan *loss* pada masing-masing *task*, seperti pada persamaan 13.20. Apabila kita menganggap suatu *task* lebih penting dari *task* lainnya, kita dapat menggunakan *weighted sum*, seperti pada persamaan 13.21. Kita juga dapat menggunakan *dynamic weighting* untuk memperhitungkan *uncertainty* pada tiap *task*, seperti pada persamaan 13.22 [96], dimana σ melambangkan varians *task-specific loss*.

$$\mathcal{L}_{\text{MTL}} = q(\mathcal{L}_{T_1}, \dots, \mathcal{L}_{T_D}) \quad (13.19)$$

$$q(\mathcal{L}_{T_1}, \dots, \mathcal{L}_{T_D}) = \sum_i^D \mathcal{L}_{T_i} \quad (13.20)$$

$$q(\mathcal{L}_{T_1}, \dots, \mathcal{L}_{T_D}) = \sum_i^D \alpha_i \mathcal{L}_{T_i} \quad (13.21)$$

$$q(\mathcal{L}_{T_1}, \dots, \mathcal{L}_{T_D}) = \sum_i^D \frac{1}{2\sigma_i^2} \mathcal{L}_{T_i} + \ln 2\sigma_i^2 \quad (13.22)$$



Gambar 13.36. Multi-task Learning setup

Saat melatih MTL, tujuan *training* dapat mempengaruhi proses penyajian data. Seumpama saat melatih mesin translasi untuk English- $\{\text{Chinese, Japanese, Korean}\}$, kita ingin menganggap English-Korean sebagai *main task* sementara sisanya sebagai *supporting task*, kita dapat melakukan *pre-training* menggunakan data English-Chinese dan English-Japanese terlebih dahulu, diikuti oleh English-Korean (tetapi *loss* tetap *joint loss*). Pada kasus ini, penggunaan *joint weighted loss* dapat dijustifikasi. Di lain pihak, apabila kita menganggap semua *tasks* penting, kita dapat melakukan data *shuffling* sehingga urutan *training data* tidak bias pada *task* tertentu. Pada kasus ini, penggunaan *joint loss-sum* dapat dijustifikasi. Ilustrasi diberikan pada Gambar 13.36.

Soal Latihan

13.1. POS *tagging*

Pada subbab 13.3, disebutkan bahwa *bidirectional recurrent neural network* lebih cocok untuk persoalan POS *tagging*. Jelaskan mengapa! (hint pada bab 8)

13.2. Eksplorasi

Jelaskanlah pada teman-temanmu apa dan bagaimana prinsip kerja:

- (a) *Boltzman Machine*
- (b) *Restricted Boltzman Machine*