
Primena dubokog Q učenja na automatsko igranje video igara



Matematički fakultet
Univerzitet u Beogradu

Student:
Nikola Milev

Mentor:
Mladen Nikolić

Beograd, 2018.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Mašinsko učenje	3
2.1	Vrste mašinskog učenja	4
2.1.1	Nadgledano mašinsko učenje	4
2.1.2	Nenadgledano mašinsko učenje	6
2.2	Dizajn sistema za mašinsko učenje	6
2.2.1	Podaci	8
2.2.2	Evaluacija modela	8
2.3	Problemi pri mašinskom učenju	8
3	Neuronske mreže	10
3.1	Neuronske mreže sa propagacijom unapred	11
3.1.1	Aktivacione funkcije	12
3.1.2	Optimizacija	14
3.1.3	Prednosti i mane	18
3.2	Konvolutivne neuronske mreže	19
3.2.1	Konvolucija i konvolutivni slojevi	19
3.2.2	Prednosti i mane	20
4	Konvolutivne neuronske mreže	21

5	Markovljevi procesi odlučivanja	22
6	Učenje potkrepljivanjem	23
7	DQN	24
8	Detalji implementacije	25
9	Eksperimentisanje sa elementima algoritma DQN	26

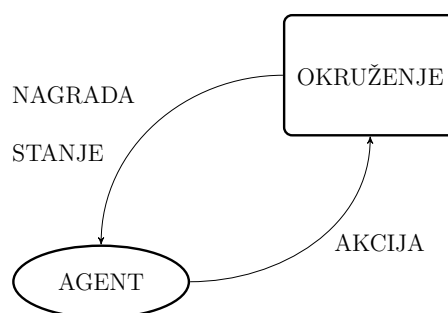
1

Uvod

U maju 1997. godine, Gari Kasparov, tadašnji svetski šampion u šahu, izgubio je meč protiv računarskog sistem pod nazivom "Deep Blue". Skoro dvadeset godina kasnije, program pod nazivom "AlphaGo" pobedio je profesionalnog ljudskog igrača u igri go. Iako su obe igre strateške i igraju se na tabli, između šaha i igre go postoji ogromna razlika. Pravila igre go dosta su jednostavna u odnosu na šah ali je prostor koji opisuje poteze igre go više od 10^{100} puta veći od prostora koji opisuje poteze šaha. Programi koji igraju šah često se zasnivaju na korišćenju stabala pretrage i ovaj pristup jednostavno nije primenljiv na igru go.

Na čemu je onda zasnovan "AlphaGo"? U pitanju je učenje potkrepljivanjem (eng. reinforcement learning). Ovo je vrsta mašinskog učenja koja počiva na sistemu kazne i nagrade. Podrazumeva se da se sistem sastoji od agenta i okruženja u kom agent dela (vrši akcije) i dobija povratne informacije o numeričkoj nagradi i promeni stanja okruženja. Osnovni dijagram ove komunikacije može se videti na slici 1.1. Poput dresiranja psa, nagradama se ohrabruje poželjno ponašanje dok se nepoželjno kažnjava. Cilj jeste ostvariti što veću dugoročnu nagradu. Međutim, agent mora sam kroz istraživanje da shvati kako da dostigne najveću nagradu tako što isprobava različite akcije. Takođe, preduzete akcije mogu da utiču i na nagradu koja se pojavljuje dugo nakon što je sama akcija preduzeta. Ovo zahteva da se uvede pojam buduće nagrade. Pojmovi istraživanja i buduće nagrade su ključni pri učenju potkrepljivanjem.

Pri učenju potkrepljivanjem, najčešće se pretpostavlja da je skup svih mogućih



Slika 1.1: Dijagram komunikacije agenta sa okruženjem pri učenju potkrepljivanjem

stanja okruženja diskretan. Ovo dozvoljava primenu Markovljevih procesa odlučivanja i omogućuje formalan opis problema koji se rešava, kao i pristupa njegovog rešavanja. Formalno predstavljanje problema i rešenja dato je u poglavlju 6.

Učenje potkrepljivanjem jedna je od tri vrste mašinskog učenja, pored nadgledanog i nenadgledanog učenja. Pri nadgledanom učenju, sistem dobija skup ulaznih i izlaznih podataka s ciljem da izvrši generalizaciju nad tim podacima i uspešno generiše izlazne podatke od do sada nevidjenih ulaznih podataka. Pri učenju potkrepljivanjem, ne postoje unapred poznate akcije koje treba preduzeti već sistem na osnovu nagrade mora zaključiti koji je optimalni sled akcija. Iako široko korišćeno, nadgledano učenje nije prikladno za učenje iz novih iskustava, kada ciljni rezultati nisu dostupni. Kod nenadgledanog učenja, često je neophodno pronaći neku strukturu u podacima nad kojima se uči bez ikakvog predašnjeg znanja o njima. Iako učenje potkrepljivanjem liči i na nadgledano i na nenadgledano učenje, agent ne traži strukturu niti postoji unapred određeno optimalno ponašanje¹ već teži maksimizaciji nagrade koju dobija od okruženja.

Učenje potkrepljivanjem ima primene u raznim poljima kao što su industrija, istraživanje podataka, mašinsko učenje (kompanije Gugl (eng. Google) koristi učenje potkrepljivanjem radi automatskog dizajna neuralnih mreža), obrazovanje, medicina i finansije. Ovaj vid mašinskog učenja pokazao se kao dobar i za igranje video igara. U radu objavljenom 2015. godine u časopisu "Nature", "DeepMind" predstavlja sistem koji uči da igra video igre sa konzole Atari 2600, neke čak i daleko bolje od ljudi². U avgustu 2017. godine, OpenAI predstavlja agenta koji isključivo kroz igranje igre i bez predašnjeg znanja o igri stiže nivo umeća dovoljan da pobedi i neke od najboljih ljudskih takmičara u video igri "Dota 2"³.

U naučnom radu koji je objavila kompanija "DeepMind" u časopisu "Nature" predložen je novi algoritam, DQN (deep Q - network), koji koristi spoj učenja uslovljavanjem i duboke neuronske mreže i uspesno savladava razne igre za Atari 2600 konzolu. Sve informacije dostupne agentu jesu pikseli sa ekrana, trenutni rezultat u igri i signal za kraj igre. Algoritam skladišti prethodna iskustva i umesto učenja neuronske mreže na osnovu samo poslednjih akcija i nagrada, prethodno iskustvo se periodično koristi radi treniranja mreže, nasumičnim uzorkovanjem, smanjujući korelaciju između ulaznih podataka. U sklopu ovog rada, ispitana je struktura algoritma DQN i data je implementacija čije su performanse ispitane na manjoj skali od one date u radu, zbog ograničenih resursa. Takodje je eksperimentisano sa elementima samog algoritma i opisano kako oni utiču na njegovo ponašanje.

[MOZDA NESTO O REZULTATIMA KADA IH BUDE]

U sklopu rada opisani su osnovni pojmovi mašinskog učenja (glava 2), zadržavajući se na neuronskim mrežama uopšte (glava 3) i na konvolutivnim neuronskim mrežama (glava 4). Glava 6 posvećena je učenju potkrepljivanjem dok je algoritam DQN u celosti opisan u glavi 7. U glavi 8 data je implementacija kao i njena evaluacija, dok su eksperimenti i njihovi rezultati opisani u glavi 9.

¹Postoji optimalno ponašanje ali ono nije poznato agentu na početku učenja.

²UBACI NEKU REFERENCU

³<https://blog.openai.com/dota-2/>

2

Mašinsko učenje

Mašinsko učenje počelo je da stiće veliku popularnost devedesetih godina prošlog veka zahvaljujući potrebi i mogućnosti da se uči iz ogromne količine dostupnih podataka i uspešnosti ovog pristupa u tome. Za popularizaciju mašinskog učenja početkom 21. veka najzaslužnije su neuronske mreže, u toj meri da je pojam mašinskog učenja često poistovećen sa pojmom neuronskih mreža. Ovo, naravno, nije tačno; sem neuronskih mreža, postoje razne druge tehnike, kao što su metod potpunih vektora, genetski algoritmi, itd.

Mašinsko učenje nastalo je iz čovekove želje da oponaša prirodne mehanizme učenja kod čoveka i životinja kao jedne od osnovnih svojstava inteligencije i korišćenja dobijenih rezultata u cilju praktične upotrebe. Termin mašinsko učenje prvi je upotrebio pionir veštačke inteligencije, Artur Semjuel¹, koji je doprineo razvoju veštačke inteligencije istražujući igru dame (eng. checkers) i tražeći način da stvori računarski program koji na osnovu iskusa može da savlada ovu igru².

Mašinsko učenje može se definisati kao disciplina koja se bavi izgradnjom prilagodljivih računarskih sistema koji su sposobni da poboljšaju svoje performanse koristeći informacije iz iskustva³. No, u biti mašinskog učenja leži generalizacija, tj. indukcija. Dve vrste zaključivanja, indukcija⁴ i dedukcija⁵ imaju svoje odgovarajuće discipline u sklopu veštačke inteligencije: mašinsko učenje i automatsko rezonovanje. Kao što se indukcija i dedukcija razlikuju, i mašinsko učenje i automatsko rezonovanje imaju različite oblasti primene. Automatsko rezonovanje zasnovano je na matematičkoj logici i koristi se kada problem čovek relativno lako može formulisati ali ga, često zbog velikog prostora mogućih rešenja, ne može jednostavno rešiti. U ovoj oblasti, neophodno je dobiti apsolutno tačna rešenja, ne dopuštajući nikakav nivo greške. Pri mašinskom učenju, teže je formalno definisati problem jer postoji relativno visok nivo apstrakcije. Čovek neke od ovih problema lako rešava a neke ne. Ukoliko je neophodno napraviti sistem koji prepoznaje lica na slikama, kako definisati problem? Od čega se tačno sas-

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_learning – da li da citiram Wiki ili njihov izvor?

²<http://infolab.stanford.edu/pub/voy/museum/samuel.html> – kako citirati izvor sa veba?

³<http://poincare.matf.bg.ac.rs/~janicic/courses/vi.pdf> – pretpostavljam da stavim referencu ka literaturi gde će knjiga biti navedena?

⁴Indukcija – zaključivanje od pojedinačnog ka opštem

⁵Dedukcija – zaključivanje od opšteg ka konkretnom

toji lice? Kako prepoznati elemente lica? Metodama automatskog rezonovanja bilo bi nemoguće definisati ovaj problem i rešiti ga. Mašinsko učenje, s druge strane, pokazalo se kao dobar pristup. Ono što je još karakteristično za mašinsko učenje jeste da rešenje ne mora biti savršeno tačno, iako se tome teži, i nivo prihvatljivog odstupanja zavisi od problema i konteksta primene.

Ova oblast je kroz manje od 20 godina od popularizacije postala deo svakodnevnice. U sklopu društvene mreže Fejsbuk (eng. Facebook) implementiran je sistem za prepoznavanje lica koji preporučuje profile osoba koje se nalaze na slikama. Razni veb servisi koriste metode mašinskog učenja radi stvaranja sistema za preporuke (artikala u prodavnicama, video sadržaja na platformama za njihovo gledanje, itd). i sistema za detekciju prevara. Mnoge firme koje se bave trgovinom na berzi imaju sisteme koji automatski trguju deonicama. U medicini, jedna od primena mašinskog učenja jeste za uspostavljanje dijagnoze. Još neke primene su u marketingu, za procesiranje prirodnih jezika, bezbednost, itd.

2.1 Vrste mašinskog učenja

Kada se priča o određenoj vrsti mašinskog učenja, podrazumevaju se vrste problema, kao i načini za njihovo rešavanje. Prema problemima koji se rešavaju, mašinsko učenje deli se na tri vrste: nadgledano učenje (eng. supervised learning), nenadgledano učenje (eng. unsupervised learning) i učenje potkrepljivanjem (eng. reinforcement learning). Iako se podela mnogih autora sastoji samo iz nadgledanog i nenadgledanog učenja, postoji razlika između učenja potkrepljivanjem i preostale dve vrste. U nastavku su dati opisi pristupa nadgledanog i nenadgledanog učenja. Učenju uslovljavanjem, kao centralnoj temi ovog rada, posvećeno je više pažnje u poglavlju 6.

2.1.1 Nadgledano mašinsko učenje

Pri nadgledanom mašinskom učenju, date su vrednosti ulaza i izlaza koje im odgovaraju za određeni broj slučajeva. Sistem treba na osnovu već datih veza za pojedinačne parove da ustanovi kakva veza postoji između tih parova i izvrši generalizaciju, odnosno, ukoliko ulazne podatke označimo sa x a izlazne sa y , sistem treba da odredi funkciju f takvu da

$$y \approx f(x)$$

Pri uspešno rešenom problemu nadgledanog učenja, funkcija f davaće tačna rešenja i za podatke koji do sada nisu viđeni. Ulazne vrednosti nazivaju se atributima (eng. features) a izlazne ciljnim promenljivima (eng. target values). Ovim opisom nije određena dimenzionalnost ni za ulazne ni za izlazne promenljive, iako je dimenzija izlazne promenljive uglavnom 1. Funkcija f naziva se modelom.

Skup svih mogućih funkcija odgovarajuće dimenzionalnosti bio bi previše veliki za pretragu i zbog toga se uvode pretpostavke o samom modelu. Pretpostavlja da je

definisan skup svih dopustivih modela i da je potrebno naći najpogodniji element tog skupa. Najčešće je taj skup određen parametrima, tj. uzima se da funkcija zavisi od nekog parametra w koji je u opštem slušaju višedimenzioni i tada se funkcija označava sa $f_w(x)$.

Neophodno je uvesti funkciju greške modela (eng. loss function), odnosno funkciju koja opisuje koliko dati model dobro određuje izlaz za dati ulaz. Ova funkcija se najčešće označava sa L i $L(y, f_w(x))$ predstavlja razliku između željene i dobijene vrednosti za pojedinačni par promenljivih. No, nijedan par promenljivih nije dovoljan za opis kvaliteta modela već treba naći funkciju koja globalno ocenjuje odstupanje modela od stvarnih vrednosti. U praksi, podrazumeva se postojanje uzorka:

$$D = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, N\}$$

i uvodi se empirijski rizik, odnosno sledeća funkcija:

$$E(w, D) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(y_i, f_w(x_i))$$

koja se još naziva prosečnom greškom. Neretko se skup D ne navodi već se njegovo postojanje podrazumeva. Uobičajeno, algoritmi nadgledanog mašinskog učenja zasni-vaju se na minimizaciji prosečne greške. Ipak, treba imati u vidu da ovaj pristup nije teorijski zagarantovan i da to zavisi od skupa modela po kom se vrši minimizacija.

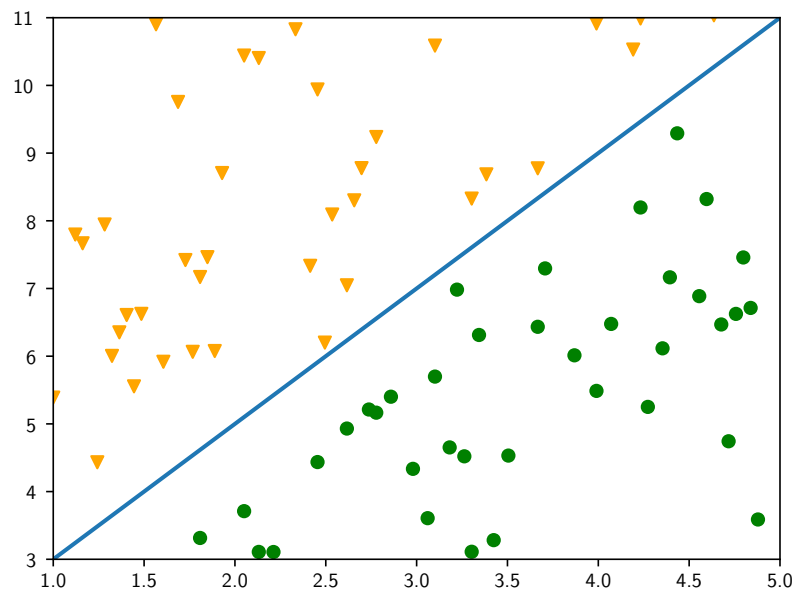
Postoje dva osnovna tipa nadgledanog mašinskog učenja:

- Klasifikacija
- Regresija

Klasifikacija (eng. classification) predstavlja oblast mašinskog učenja gde je cilj predvideti klasu u kojoj se ciljna promenljiva nalazi. Neki od primera klasifikacije su svrstavanje slika na one koje sadrže ili ne sadrže lice, označavanje nepoželjne (spam) elektronske pošte i prepoznavanje objekata na slikama. Najjednostavniji primer klasifikacije može se videti na slici 2.1, gde su trouglovima označeni podaci iznad prave $y = 2x + 1$ a krugovima podaci ispod date prave.

Regresija se odnosi na skup problema (i rešenja) u kojima je ciljna promenljiva neprekidna. Na primer, cene nekretnina mogu se predvideti na osnovu površine, lokacije, populacije koja živi u komšiluku, itd. Često korišćena vrsta regresije jeste linearna regresija. U slučaju linearne regresije, podrazumeva se da je funkcija $f_w(x)$ linearna u odnosu na parametar w . Iako se ovo na prvi pogled čini kao prilično jako ograničenje, to nije slučaj; kako za atribut ne postoji zahtev za linearnosti, oni pre pravljenja linearne kombinacije mogu biti proizvoljno transformisani. Primer linearne regresije jeste aproksimacija polinomom:

$$f_w(x) = w_0 + \sum_{i=1}^N w_i x^i$$



Slika 2.1: Binarna klasifikacija tačaka u skladu sa položajem u odnosu na pravu $2x + 1$

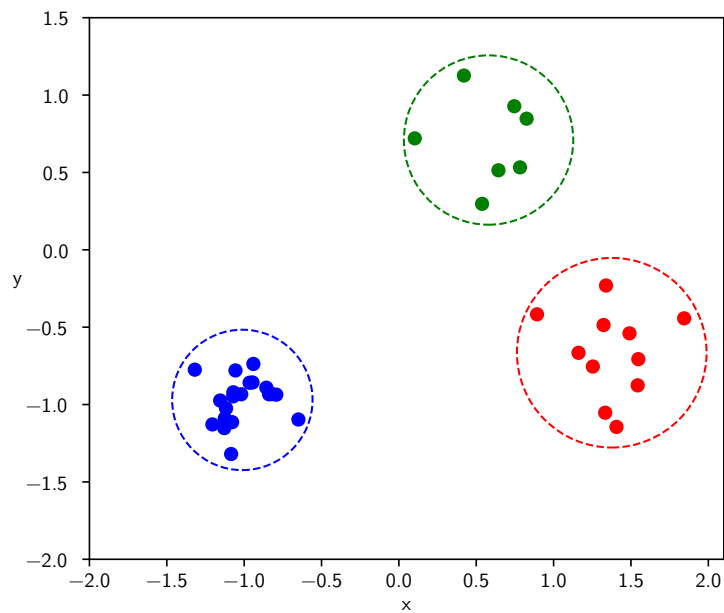
2.1.2 Nenadgledano mašinsko učenje

Nenadgledano učenje obuhvata skup problema (i njihovih rešenja) u kojima sistem prihvata ulazne podatke bez izlaznih. Ovo znači da sistem sam mora da zaključi kakve zakonitosti važe u podacima. Kako nije moguće odrediti preciznost sistema pa je cilj naći najbolji model u odnosu na neki kriterijum koji je unapred zadat. Jedan primer nenadgledanog mašinskog učenja je klasterovanje: sistem grupiše neoznačene podatke u odnosu na neki kriterijum koji nije unapred poznat. Svaka grupa (klaster) sastoji se iz podataka koji su međusobno slični i različiti od elemenata preostalih grupa u odnosu na taj kriterijum. Jednostavan primer klasterovanja po numeričkim atributima x i y može se videti na slici 2.2.

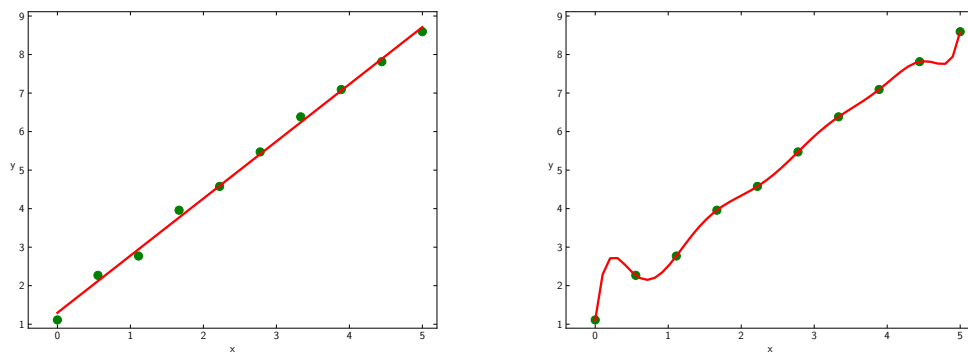
2.2 Dizajn sistema za mašinsko učenje

Okvirno, koraci u rešavanju problema su sledeći:

- Prepoznavanje problema mašinskog učenja (nadgledano učenje, nenadgledano učenje, učenje potkrepljivanjem);
- Prikupljanje i obrada podataka, zajedno sa odabirom atributa;
- Odabir skupa dopustivih modela;
- Odabir algoritma učenja; moguće je odabrati postojeći algoritam ili razviti neki novi koji bolje odgovara problemu



Slika 2.2: Klasterovanje



Slika 2.3: Primer odabira modela pri linearnoj regresiji polinomom

- Izbor mere kvaliteta učenja;
- Obuka, evaluacija i, ukoliko je neophodno, ponavljanje nekog od prethodnih koraka radi unapređenja naučenog modela

Prilikom odabira modela treba imati na umu vrstu problema koja se rešava, količinu podataka, zakonitosti koje važe u podacima, itd. Slika 2.3 prikazuje razliku između dva modela iz skupa dopustivih modela za linearnu regresiju polinomom nad 10 različitih tačaka. Na levom delu slike prikazan je polinom reda 1 (prava) a na desnom delu prikazan je polinom reda 10. Iako će polinom reda 10 savršeno opisivati 10 tačaka sa slike, vidi se da su one raspoređene blizu prave i, uprkos većem odstupanju takvog modela od podataka za učenje, jasno je da je prava bolji izbor.

2.2.1 Podaci

Mašinsko učenje bavi se generalizacijom nad nepoznatim objektima na osnovu već viđenih objekata. Pod pojmom objekta misli se na pojedinačni podatak koji sistem vidi. Koriste se još i izrazi primerak i instanca. Vrednosti podataka pripadaju nekom unapred zadatom skupu. Podaci mogu biti različitog tipa: numerički ili kategorički. Skupovi koji određuju vrednosti kojima se instance određuju nisu unapred zadati i neophodno ih je odrediti na način pogodan za rešavanje konkretnog problema. Na primer, ukoliko je neophodno razvrstati slike životinja i biljaka na te dve kategorije, informacija o količini zelene boje na slici može biti prilično korisna, dok pri razvrstavanju vrste biljaka u zavisnosti od lista ovaj podatak skoro nije upotrebljiv (ali podatak o nijansi zelene boje može biti). Dakle, dobar izbor atributa imaće veliki uticaj na kasnije korake učenja. Podaci se sistemu daju kao vektori atributa.

Podaci se neretko pre slanja sistemu obrađuju na neki način; ovaj postupak zove se pretprocesiranje. Postoje mnogi razlozi za pretprocesiranje a glavni cilj jeste da se dobiju objekti nad kojima učenje može da se desi. Međutim, i to zavisi od problema. Nekada će nepotpuni objekti, podaci koji ne sadrže sve informacije neophodne za učenje, biti izbačeni iz skupa podataka koji se razmatra, a u nekom drugom slučaju, i oni će biti korišćeni. Jedan primer pretprocesiranja jeste pretvaranje slike koja je u boji u crno beli zapis.

2.2.2 Evaluacija modela

Nakon obučavanja (treniranja), neophodno je izvršiti evaluaciju dobijenog modela. Na koji god način se ovo izvršava, podaci korišćeni za obučavanje ne smeju se koristiti za evaluaciju modela. Često se pribegava podeli podataka na skupove za obučavanje i za testiranje. Skup za obučavanje obično iznosi dve trećine skupa ukupnih podataka. No, kako različite podele skupa mogu izazvati dobijanje različitih modela, slučajno deljenje nije najbolji izbor. Često korišćena tehnika jeste unakrsna validacija. Ovaj pristup podrazumeva podelu skupa podataka D na K podskupova približno jednake veličine, S_i za $i = 1, \dots, K$. Tada se za svako i model trenira na skupu $D \setminus S_i$ a evaluacija se vrši pomoću podataka iz S_i . Posle izvedenog postupka za sve i , kao konačna ocena uzima se prosečna ocena svakog od K treniranja i evaluacija modela. Za vrednosti K uobičajeno se uzimaju vrednosti 5 ili 10. Ovaj metod vodi pouzdanijoj oceni kvaliteta modela.

2.3 Problemi pri mašinskom učenju

Kao što je podrazumevano pri pomenu pojma generalizacije, nije dovoljno odrediti funkciju koja dobro određuje izlazne vrednosti na osnovu promenljivih nad kojima se uči već je poželjno i novim ulaznim podacima dodeliti tačnu izlaznu vrednost. Oдавde se može videti da je primer lošeg sistema za mašinsko učenje onaj sistem koji će izuzetno dobro naučiti da preslikava ulazne vrednosti iz skupa za učenje u odgovarajuće izlazne

vrednosti ali u situaciji kada se iz tog skupa izade neće davati zadovoljavajuće rezultate. Ovaj problem ima svoje ime: preprilagođavanje. Postoji i problem potprilagođavanja, koji podrazumeva da se sistem nije dovoljno prilagodio podacima. I preprilagođavanje i potprilagođavanje predstavljaju veliki problem ukoliko do njih dođe. Primer preprilagođavanja može se videti na slici 2.3. Polinomom stepena 10 model se savršeno prilagodio podacima za trening ali neće biti u stanju da izvrši generalizaciju za nove podatke.

Na još jedan od mogućih problema nailazi se u slučaju neprikladnih podataka. Moguće je da ulazni atributi ne daju dovoljno informacija o izlaznim. Takođe je moguće da podataka jednostavno nema dovoljno. U ovom slučaju, sistem ne dobija dovoljno bogat skup informacija kako bi uspešno izvršio generalizaciju. S druge strane, moguće je da postoji prevelika količina podataka. Tada se pribegava pažljivom odabiru podataka koji se koriste za učenje ali ovo u opštem slučaju treba izbegavati jer su podaci izuzetno vredan element procesa mašinskog učenja. Još jedan problem vezan za podatke može biti njihova nepotpunost. Na primer, moguće je da u nekim instancama postoje nedostajuće vrednosti atributa.

Kako je najčešće potrebno pretprocesirati podatke u sklopu procesa mašinskog učenja, moguće je da u ovom postupku dođe do greške. Primera radi, prilikom rada sa konvolutivnim neuronskim mrežama, o kojima će biti reči u jednom od narednih glava, nekada se slike u boji pretvaraju u crno-bele. Ako se primeni transformacija koja onemogućuje razlikovanje objekata koji su različiti u početnoj slici a razlikovanje je neophodno za ispravno učenje sistema, tada proces treniranja neće teći kako je planirano.

Problem može da nastane i ukoliko nije odabran pravi algoritam za učenje, ukoliko se loše pristupilo procesu optimizacije, prilikom lošeg procesa evaluacije i, naravno, prilikom loše implementacije algoritma. Sve ove prepreke moguće je prevazići ali je jasno da je neophodno biti izuzetno pažljiv prilikom celog procesa mašinskog učenja.

3

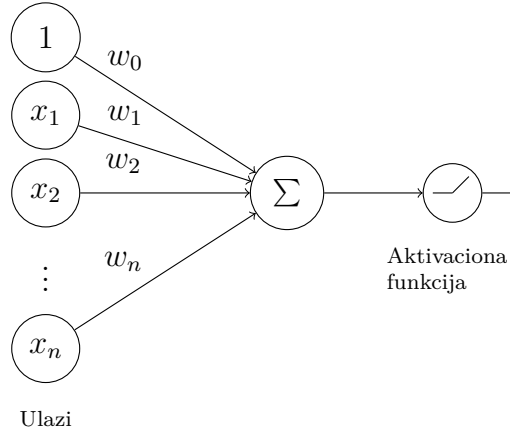
Neuronske mreže

Neuronske mreže (eng. neural networks) predstavljaju danas izuzetno popularan vid mašinskog učenja. Ovi modeli izuzetno su fleksibilni i imaju široku primenu. Koriste se za prepoznavanje govora, prevođenje, prepoznavanje oblika na slikama, upravljanje vozilima, uspostavljanje dijagnoza u medicini, igranje igara itd. [Neuronskim mrežama može se aproksimirati proizvoljna neprekidna funkcija.] Pun naziv je veštačka neuronska mreža (eng. artificial neural network, skr. ANN) jer se ovakvi modeli idejno zasnivaju na načinu na koji mozak funkcioniše. Osnovne gradivne jedinice, neuroni, zasnovani su na neuronima u mozgu, dok veze između njih predstavljaju sinapse¹. Te veze opisuju odnose između neurona i obično im se dodeljuje numerička težina.

Postoji nekoliko različitih vrsta neuronskih mreža. Tipičan primer jesu neuronske mreže sa propagacijom unapred. Ime proističe iz činjenice da podaci teku od ulaza mreže do izlaza, bez postojanja ikakve povratne sprege. Neuronske mreže sa propagacijom unapred sastoje se iz slojeva neurona. Ukoliko se u ovaj model uvede neki tip povratne sprege, tada se govori o rekurentnim neuronskim mrežama. Pri radu sa slikama i raznim drugim vrstama signala, najčešće se koriste konvolutivne neuronske mreže, o kojima će biti reči kasnije. Ono što je zajedničko je da su neuronske mreže sposobne za izdvajanje određenih karakteristika u podacima koji se obrađuju. To znači da se vrši kreiranje novih atributa na osnovu već postojećih. Taj proces naziva se ekstrakcijom atributa i smatra se da je to jedan od najbitnijih razloga za delotvornost neuronskih mreža.

Za uspeh neuronskih mreža zaslužna je njihova fleksibilnost ali su rezultati dobijeni najpre eksperimentisanjem. Naime, veliki deo zaključaka o ponašanju neuronskih mreža u raznim situacijama nije teorijski potkrepljen. Stoga, istraživački rad vezan za neuronske mreže zahteva dosta pokušaja da bi se došlo do uspeha.

¹Sinapsa je struktura koja omogućuje komunikaciju između neurona.



Slika 3.1: Neuron

3.1 Neuronske mreže sa propagacijom unapred

Neuronske mreže sa propagacijom unapred jedna su od najkorišćenijih vrsta neuronskih mreža. Gradivni elementi ovakvog modela, neuroni (koji se još nazivaju i jedinicama), organizuju se u slojeve koji se nadovezuju i time čine neuronsku mrežu. Organizacija neurona i slojeva, uključujući i veze između neurona, predstavlja arhitekturu mreže. Prvi sloj mreže naziva se ulaznim slojem dok se poslednji sloj naziva izlaznim slojem. Neuroni prvog sloja kao argumente primaju ulaze mreže dok neuroni svakog od preostalih slojeva kao svoje ulaze prihvataju izlaze prethodnog sloja. Svi slojevi koji svoje izlaze prosleđuju narednom sloju nazivaju se skrivenim slojevima. Mreže sa više od jednog skrivenog sloja nazivaju se dubokim neuronskim mrežama. Broj slojeva mreže određuje njenu dubinu. Termin "duboko učenje" nastao je baš iz ove terminologije.

Svaki neuron opisuje se pomoću vektora $w = (w_0, \dots, w_n)$ koji se naziva vektorom težina. Ulazni parametar $x = (x_1, \dots, x_n)$ linearno se transformiše na sledeći način:

$$f_w(x) = w_0 + \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (3.1)$$

a zatim se primenjuje takozvana aktivaciona funkcija, g . Izlaz iz neurona je $g(f_w(x))$ i, uprkos linearnosti prve transformacije, izlaz ne mora biti linearna transformacija ulaza, tj. g najčešće nije linearna funkcija. Za g bira se nelinearna funkcija jer se u suprotnom kao celokupna transformacija koju neuron vrši dobija linearna funkcija; na ovaj način, mreža bi predstavljala linearnu funkciju i ne bi bilo moguće njom aproksimirati nelinearne funkcije dovoljno dobro. Vrednost w_0 naziva se slobodnim članom. Nekada se vektor x transformiše tako da bude oblika $x = (1, x_1, \dots, x_n)$ kako bi izraz (3.1) imao kraći zapis $f_w(x) = w \cdot x$, gde \cdot označava skalarni proizvod.

Model, tj. neuronska mreža, formalno se definiše na sledeći način:

$$\begin{aligned} h_0 &= x \\ h_i &= g_i(W_i h_{i-1} + w_{i0}), \text{ za } i = 1, \dots, L \end{aligned}$$

gde je x vektor ulaza u mrežu predstavljen kao kolona, W_i je matrica čija j -ta vrsta predstavlja vektor težina j -tog neurona u sloju i a w_{i0} je kolona slobodnih članova svih jedinica u sloju i . Funkcije g_i su nelinearna aktivaciona funkcija i za vektor $t = (t_1, \dots, t_n)$, $g_i(t)$ predstavlja kolonu $(g_i(t_1), \dots, g_i(t_n))^T$. Na ovaj način dobija se funkcija čiji su parametri W_i i w_{i0} za $i = 1, \dots, L$. Ako se parametri označe sa w , tada se model zapisati kao f_w . Parametri w mogu se pronaći matematičkom optimizacijom nekog kriterijuma kvaliteta modela. Taj proces opisan je u delu 3.1.2.

3.1.1 Aktivacione funkcije

Preteča neuronskih mreža, perceptron, je model koji se sastoji samo iz jednog neurona čija je aktivaciona funkcija data sledećim izrazom:

$$g(x) = \begin{cases} 1, & \text{ako } x \geq 0 \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$$

Definicija aktivacione funkcije perceptrona znači da njegova primena ima relativno jako ograničenje. S obzirom na to da će ulaz u funkciju g biti linearna kombinacija ulaza i parametara, perceptron će moći da napravi podelu prostora određenu hiperravni². Ukoliko skup ulaznih podataka nije moguće podeliti linearnom funkcijom, ovakvo ponašanje nije zadovoljavajuće.

Dakle, neophodno je naći druge funkcije koje služe kao aktivacione funkcije. Poželjna svojstva aktivacione funkcije su:

- Nelinearnost: Kao što je objašnjeno ranije, kompozicija linearnih funkcija daje linearnu funkciju, što onemogućuje dovoljno preciznu aproksimaciju nelinearnih funkcija;
- Diferencijabilnost: Optimizacija se najčešće vrši metodima koji koriste gradijent funkcije;
- Monotonost: Ako aktivaciona funkcija nije monotona, povećavanje nekog od težinskih parametara neurona, umesto da poveća izlaz i time proizvede jači signal, može imati suprotan efekat;
- Ograničenost: Ukoliko vrednosti unutar neuronske mreže nisu ograničene, moguće je da dođe do pojavljivanja ogromnih vrednosti koje potencijalno dovode do prekoračenja. Ograničene aktivacione funkcije ovo znatno ublažuju.

Dozvoljeno je da aktivaciona funkcija ne poseduje neko od navedenih svojstava ali ovime se može znatno smanjiti brzina konvergencije.

Najčešće korišćene aktivacione funkcije su:

²Hiperravan je uopštenje ravni u trodimenzionom prostoru; predstavlja potprostor dimenzije za 1 manje od prostora u kom se nalazi.

- Sigmoidna funkcija: $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$
- Tangens hiperbolički: $\tanh(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$
- Ispravljena linearna jedinica: $\text{ReLU}(x) = \max(0, x)$

Sigmoidna funkcija bila je najkorišćenija aktivaciona funkcija pri radu sa neuron-skim mrežama. Ograničena je (sve slike nalaze se u intervalu $(-1, 1)$), monotona i diferencijabilna u svakoj tački skupa \mathbb{R} . Međutim, što se argument više udaljava od nule, to nagib funkcije postaje manji. To znači da će gradijent funkcije biti mali i da će učenje teći jako sporo.

Tangens hiperbolički srodan je sigmoidnoj funkciji ($\tanh(x) = 2\sigma(x) - 1$) ali je imala veći uspeh od sigmoidne funkcije. U okolini nule, ova funkcija slična je identičkoj, što olakšava učenje. Međutim, i pri korišćenju ove funkcije može se naići na problem sa malim gradijentima ukoliko se argument dovoljno udalji od nule.

Uprkos tome što za razliku od prethodne dve funkcije nije ni ograničena ni diferencijabilna u svim tačkama domena, danas je ispravljena linearna jedinica najpopularniji izbor za aktivacionu funkciju. Funkcija je jednaka identitetu desno od nule i stoga se gradijent ne menja. Takođe, verovatnoća da se traži gradijent u tački u kojoj funkcija nije diferencijabilna je mala. Ipak, ni ova funkcija nije bez mana; problem često pravi deo levo od nule, gde je funkcija konstantna. To znači da je gradijent nula i da se prilikom optimizacije težine neurona neće izmeniti. Zbog nedostatka promene, može se desiti da neki neuroni u mreži postanu pasivni, tj. da im izlaz postane 0. Za ovaj problem postoje rešenja; jedno jeste da izlaz funkcije desno od nule ne bude konstanta 0 već αx , za neko malo α . Ta modifikovana ReLU funkcija naziva se nakošena ispravljena linearna jedinica (eng. leaky rectified linear unit).

Iako sve ove funkcije imaju prednosti i mane u odnosu na preostale, ne postoji jedinstveni izbor nego je na osnovu problema neophodno zaključiti koju je aktivacionu funkciju najbolje koristiti.

Izlazni sloj

Neuronske mreže koriste se pri regresiji, određivanju funkcije koja opisuje vezu između ulaza i izlaza, i klasifikaciji, svrstavanje ulaznih vektora u jednu od konačnog broja kategorija. Pri regresiji, u poslednjem sloju ne primenjuje se aktivaciona funkcija. Proces optimizacije svodi se na minimizaciju funkcije greške. Kod rešavanja problema klasifikacije (u N kategorija), koristi se funkcija mekog maksimuma (eng. softmax):

$$\text{softmax}(x) = \left(\frac{e^{x_1}}{\sum_{i=1}^N e^{x_i}}, \dots, \frac{e^{x_N}}{\sum_{i=1}^N e^{x_i}} \right)$$

Suma ovako dobijenog vektora je 1 i stoga može predstavljati diskretnu raspodelu verovatnoća. Za vrednost aproksimacije uzima se kategorija kojoj odgovara najviša vrednost izlaznog vektora. Za optimizaciju pri radu sa probabilističkim problemima, kao što je problem klasifikacije, primenjuje se metod maksimalne verodostojnosti (eng.

maximum likelihood estimate), odnosno traži se maksimum sledećeg izraza:

$$P(y_1, \dots, y_N | x_1, \dots, x_N)$$

3.1.2 Optimizacija

Ukoliko je neuronska mreža predstavljena kao funkcija f_w , gde su w parametri mreže, neophodno je izvršiti minimizaciju³ funkcije koja predstavlja kriterijum kvaliteta aproksimacije. Problem optimizacije u slučaju neuronskih mreža težak je zbog nekonveksnosti. Ona čini neke metode teško primenljivim ili izuzetno sporim. Moguće je i završiti u lokalnom optimumu funkcije. Uobičajeno se koriste metodi zasnovani na gradijentu funkcije. Postoje metodi drugog reda, zasnovani na hesijanu⁴ ali je njegovo računanje u slučaju većeg broja parametara preskupo.

Učenje funkcioniše na sledeći način za fiksirane ulaze x posmatra se njima uparen izlaz y i $f_w(x)$ a zatim i $L(y, f_w(x))$, odnosno funkcija greške između stvarne i očekivane vrednosti. Koristeći algoritam propagacije unazad (3.1.2) uz neki od algoritama za optimizaciju, vrši se minimizacija funkcije L u odnosu na parametre mreže, w .

Metod gradijentnog spusta i stohastičkog gradijentnog spusta

Gradijent funkcije $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ u tački $x = (x_1, \dots, x_n)$ označava se sa ∇f i predstavlja vektor parcijalnih izvoda u toj tački:

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(x) \right)$$

Gradijent funkcije u tački x predstavlja pravac i smer najbržeg rasta funkcije pa $-\nabla f(x)$ predstavlja pravac smer najbržeg opadanja funkcije. Kako se najčešće minimizuje funkcija greške, u oznaci L , na dalje je korišćeno to ime za funkciju umesto f .

Metod gradijentnog spusta jedan je od najstarijih metoda optimizacije. Iterativnim pristupom minimizuje se konveksna diferencijabilna funkcija. Polazeći od nasumično odabrane tačke i prateći pravac i smer gradijenta u svakom koraku, dolazi se do minimuma funkcije. Iterativni korak definisan je na sledeći način:

$$w_{k+1} = w_k - \alpha_k \nabla L(w_k), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.2)$$

gde je w_0 ta nasumično odabrana početna tačka a α_k je pozitivan realan broj koji se naziva veličinom koraka ili stopom učenja (eng. learning rate). Za funkciju greške u

³Naravno, optimizacioni metodi primenjuju se i na maksimizaciju ali je u slučaju mašinskog učenja najčešće neophodno minimizovati funkciju greške.

⁴Hesijan je matrica parcijalnih izvoda drugog reda.

ovom slučaju uzima se srednjekvadratno odstupanje:

$$\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \|y_i - f_w(x_i)\|_2^2$$

Bitno je pažljivo odabrati veličinu koraka jer ova vrednost može uticati na konvergenciju. Jedan primer odabira veličine koraka jeste niz za koji važe Robins Monroovi uslovi⁵:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k = \infty \qquad \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k^2 < \infty$$

Jednostavniji pristup bio bi da se odabere mali pozitivan parametar α i da za svako k važi $\alpha_k = \alpha$.

Postavlja se i pitanje koliko koraka načiniti pre zaustavljanja. U praksi se koristi nekoliko kriterijuma kao što su zaustavljanje kada su dve uzastopne vrednosti w_k i w_{k+1} dovoljno bliske, kada su vrednosti funkcije za dve uzastopne vrednosti dovoljno bliske ali se može zaustaviti i nakon unapred određenog broja koraka. Postoji još kriterijuma i moguće ih je kombinovati.

Iako jednostavan i široko primenljiv metod optimizacije, gradijentni spust nije najbolji izbor. Naime, pravac najbržeg uspona funkcije nije uvek i pravac koji osigurava najbrže približavanje optimumu funkcije. U praksi, gradijentni spust ume da proizvodi cik-cak kretanje koje dovodi do spore konvergencije. Takođe, za jedan iterativni korak neophodno je proći kroz sve parove ulaza i izlaza, što u slučaju velikog skupa podataka za obučavanje može biti jako velika količina podataka.

Za obučavanje neuronskih mreža češće se koristi metod stohastičkog gradijentnog spusta. Pretpostavka je da je funkcija koja se optimizuje oblika:

$$L(w) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i(w)$$

odnosno da se može predstaviti kao prosek nekih N funkcija. Kako je neuronska mreža jedan od metoda mašinskog učenja, na raspolaganju je skup za obučavanje pa se funkcija greške na celom skupu može predstaviti kao prosek grešaka na pojedinačnim instancama skupa. Novi oblik jednakosti (3.2) je:

$$w_{k+1} = w_k - \alpha_k \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \nabla L_i(w_k) \right), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

. Pri korišćenju stohastičkog gradijentnog spusta za minimizaciju funkcije greške, iterativni korak izgleda ovako:

$$w_{k+1} = w_k - \alpha \nabla L_i(w_k)$$

Postoje razni načini za odabir i u nekom koraku, kao što je $i = k(\bmod N) + 1$, gde je N veličina skupa za obučavanje. Još jedan primer je nasumični odabir instance u svakom

⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Stochastic_approximation

koraku. Kakav god način izbora bio, neophodno je iskoristiti sve greške. Moguće je proći greške iz skupa za obučavanje i nekoliko puta dok se ne postigne željeni nivo aproksimacije.

Kako ova aproksimacija može biti prilično neprecizna, pribegava se kompromisu: prilikom iterativnog koraka ne koriste se pojedinačne instance već prosek nekog podskupa skupa za obučavanje (eng. minibatch). Pri treniranju neuronskih mreža, ovo je uobičajeni pristup.

Ovom aproksimacijom mogu se izbeći lokalni minimumi funkcije. Metod stohastičkog gradijentnog spusta manje je računski zahtevna od gradijentnog spusta ali je manje precizna i neophodan je veći broj iteracija kako bi se dostigao minimum.

Postoje razni metodi optimizacije koji se koriste pri mašinskom učenju. Neki menjaju veličinu koraka u zavisnosti od prethodnih izračunatih koraka i gradijenata. Takvi metodi nazivaju se adaptivnim metodima optimizacije. Primer adaptivnih metoda optimizacije su Adam i RMSProp.

RMSProp

Algoritam RMSProp (eng. root mean square propagation) predložio je Džof Hinton na jednom od svojih predavanja na sajtu Kursera ⁶. Ovo je algoritam optimizacije korišćen prilikom razvijanja DQN algoritma. Glavna ideja je čuvanje dosadašnjeg otežanog proseka kvadrata gradijenta funkcije koji će biti obeležen sa g_k . Simbol \odot obeležava pokoordinatno množenje dva vektora. Kako algoritam nije objavljen u radu, može se naći veliki broj implementacija. U nastavku je predstavljen algoritam u skladu sa implementacijom iz biblioteke Keras, koja je korišćena za implementaciju DQN algoritma u ovom radu.

$$\begin{aligned} g_0 &= 0 \\ g_{k+1} &= \gamma g_k + (1 - \gamma) \nabla L(w_k) \odot \nabla L(w_k) \\ \alpha_0 &= \alpha \\ \alpha_{k+1} &= \frac{\alpha_k}{1 + d(k+1)} \end{aligned}$$

Tada se iterativni korak definiše:

$$w_{k+1} = w_k - \frac{\alpha_{k+1}}{\sqrt{g_{k+1}} + \varepsilon} \nabla L(w_k)$$

Sve operacije vrše se pokoordinatno. Parametar γ pripada poluotvorenom intervalu $[0, 1)$. U svom predavanju, Hinton predlaže da njegova vrednost bude 0.9. Preporučena vrednost za veličinu koraka odnosno stopu učenja, u oznaci α , je 0.001 dok d označava faktor opadanja za parametar α . Parametar ε služi da bi se izbeglo deljenje nulom i obično je reda veličine 10^{-8} .

⁶http://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides_lec6.pdf

Adam

Adam (eng. adaptive moment estimation) jedan je od najčešćih algoritama za optimizaciju korišćen pri obučavanju neuronskih mreža. Algoritam Adam zasnovan je na korišćenju ocena prvog i drugog momenta gradijenta, datim sledećim formulama:

$$\begin{aligned} m_0 &= 0 \\ v_0 &= 0 \\ m_{k+1} &= \beta_1 m_k + (1 - \beta_1) \nabla L(w_k) \\ v_{k+1} &= \beta_2 v_k + (1 - \beta_2) \nabla L(w_k) \odot \nabla L(w_k) \end{aligned}$$

Ocena prvog momenta, m_0 , predstavlja otežani prosek pravca kretanja dok ocena drugog momenta, v_0 , predstavlja otežani prosek kvadrata norme gradijenata. Međutim, ove dve ocene su pristrasne ka početnoj vrednosti, u ovom slučaju 0⁷. Da bi se to ispravilo, vrši se sledeća korekcija:

$$\begin{aligned} \hat{m}_{k+1} &= \frac{m_{k+1}}{1 - \beta_1^{k+1}} \\ \hat{v}_{k+1} &= \frac{v_{k+1}}{1 - \beta_2^{k+1}} \end{aligned}$$

Na kraju, iterativni korak dat je ispod. Dodavanje skalara ε na vektor v_{k+1} predstavlja dodavanje tog skalara svakom članu datog vektora. Korenovanje, deljenje i oduzimanje vrše se pookordinatno.

$$w_{k+1} = w_k - \alpha \frac{\hat{m}_{k+1}}{\sqrt{\hat{v}_{k+1}} + \varepsilon}$$

Parametar α naziva se veličina koraka ili stopa učenja. Vrednosti parametara β_1 i β_2 ograničene su na skup $[0, 1]$ i preporučene vrednosti su 0.9 i 0.999, redom, dok se za ε preporučuje vrednost 10^{-8} . Kao i u algoritmu RMSProp, svrha parametra ε je izbegavanje deljenja sa nulom. Takođe nalik algoritmu RMSProp opisanom iznad, moguće je uvesti stopu opadanja parametra α .

Intuicija kojom se vodi algoritam Adam jeste da dužina svakog koraka zavisi od osobina funkcije u regionu u kom se trenutno vrši optimizacija. Ovaj algoritam pokazao se kao superioran u odnosu na ostale algoritme za optimizaciju, u opštem slučaju.

Metod propagacije unazad

Metod propagacije unazad jedan je od najznačajnijih algoritama pri radu sa neuronskim mrežama. Zasniva se na korišćenju parcijalnog izvoda složene funkcije kako bi se izračunao gradijent funkcije koju predstavlja neuronska mreža. Na primer, ukoliko su date funkcije $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ i $f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$, tada se parcijalni izvod funkcije $f \circ g$

⁷Ovde se misli na 0 vektor istih dimenzija kao x_k u slučaju prvog momenta i skalar 0 u slučaju drugog momenta

odnosno $f(g)$ po i -toj promenljivoj za $i = 1, \dots, n$ računa:

$$\partial_i(f \circ g) = \sum_{j=1}^m (\partial_j f \circ g) \partial_i g_j$$

Svaka iteracija algoritma propagacije unazad sastoji se od tri koraka:

- Proširivanja do sada izračunatog parcijalnog izvoda izvodom aktivacione funkcije za dati sloj po pravilima računanja parcijalnog izvoda složene funkcije;
- Računanja vrednosti gradijenta prema parametrima jedinica datog sloja. Kako se pre aktivacione funkcije računa linearna kombinacija, ovaj gradijent je vektor vrednosti koji taj sloj dobija i ovaj korak se vrši množenjem tim vektorom;
- Proširivanja do sada izračunatog parcijalnog izvoda izvodom te linearne kombinacije po ulazima prateći pravilo za računanje parcijalnog izvoda složene funkcije.

Jednostavan primer rada algoritma propagacije unazad za složenu funkciju $f \circ g \circ h$ izgleda:

$$\begin{aligned} f(g(h(x)))' &= \\ &= f'(g(h(x)))g'(h(x))h'(x) \\ &= f'(g(h(x)))g'(h(x))h'(x) \end{aligned}$$

Sada su prikazani potpuni alati za optimizaciju neuronske mreže sa propagacijom unapred. Treba imati u vidu da je algoritam propagacije unazad računski skup i da pri radu sa velikim neuronskim mrežama proces učenja može biti jako skup. Takođe, sem težina same neuronske mreže, na proces učenja utiču razni drugi parametri kao što su arhitektura mreže, podela podataka na skupove za obučavanje i testiranje i parametri algoritama za optimizaciju. Ovi parametri nazivaju se metaparametrima i neretko je neophodno pokušavati razne njihove kombinacije dok ponašanje mreže ne dostigne željeni nivo. Često se umesto traženja metaparametara pribegava korišćenju unapred poznate kombinacije za koju je već pokazano da daje željene rezultate pri rešavanju nekog problema.

3.1.3 Prednosti i mane

Neuronske mreže pokazale su se kao jako korisne za rešavanje praktičnih problema zbog svoje izuzetne fleksibilnosti. Međutim, za proces obučavanja neuronske mreže neophodno je imati veliku količinu podataka. Proces učenja može biti izuzetno spor, posebno ukoliko se uvede isprobavanje raznih vrednosti metaparametara. Velika fleksibilnost može izazvati i preprilagođavanje podacima i time učiniti performanse mreže nad novim podacima lošim. Postoje i problemi pri optimizaciji kao što su takozvani problemi nestajućih i eksplodirajućih gradijenata. Iako su u stanju da konstruišu nove

atribute na osnovu starih, struktura obučene mreže nije čitljiva za ljude. U nekim situacijama, ovo može izazvati probleme. Na primer, ukoliko klijent podnese zahtev za kredit i neuronska mreža odluči da nije podoban, nije moguće objasniti razlog odbijanja. Neuronske mreže takođe su dosta računski i razvojno zahtevne. Nekada će neki već poznat algoritam dati sasvim zadovoljavajuće rešenje dok razvoj neuronske mreže može biti skup i po pitanju vremena razvijanja sistema i po pitanju kasnijeg rada sistema. Kako ne postoje teorijske smernice za rad sa neuronskim mrežama, odluke vezane za razvoj sistema neophodno je donositi empirijski.

3.2 Konvolutivne neuronske mreže

Konvolutivne neuronske mreže (eng. convolutional neural networks; skraćeno CNN), nekad nazivane samo konvolutivne mreže, često se koriste pri obradi signala kao što su slike. Razlog za njihovu uspešnost u ovom poslu je sposobnost konstruisanja novih atributa ali iz sirovog signala. Za konstruisanje novih atributa nije neophodna ljudska intervencija već mreža sama treba da ustanovi koja svojstva signala su bitna učenjem takozvanih filtera. Kako je iz jednostavnijih atributa neophodno konstruisati složenije, konvolutivne mreže skoro uvek su duboke mreže.

Opšta arhitektura konvolutivne neuronske mreže podrazumeva smenjivanje dve vrste slojeva, konvolutivnih, na koje se primenjuje nelinearna aktivaciona funkcija, i agregacionih (eng. pooling), koji će biti opisani u nastavku. Nekada se ista vrsta sloja ponavlja više puta. Na izlaze poslednjih od ovakvih slojeva obično se nadovezuje mreža sa propagacijom unapred zarad učenja nad atributima koje su prethodni slojevi konstruisali.

3.2.1 Konvolucija i konvolutivni slojevi

Osnovna operacija koju koriste konvolutivne mreže jeste konvolucija, po kojoj je ovaj tip modela i dobio ime. Konvolucija dve funkcije, f i g obeležava se simbolom $*$ i u neprekidnom slučaju izgleda:

$$(f * g)(x) = \int f(t)g(x - t)dt$$

Neprekidni slučaj nije uvek moguće primeniti i najčešće se koristi dvodimenziona diskretna konvolucija. Neka su f i g matrice dimenzija $m \times n$ i $p \times q$. Konvolucija matrica f i g data je izrazom:

$$(f * g)_{i,j} = \sum_{k=0}^{p-1} \sum_{l=0}^{q-1} f_{i-k,j-l} g_{k,l} \quad (3.3)$$

Ovaj izraz računa se za sve (ispravne) kombinacije indeksa i i j i dobijena matrica je konvolucija matrica f i g . U ovom radu, ovaj oblik konvolucije je bitan i biće jedini razmatran. Matrica f naziva se ulazom a g filterom ili kernelom jer se pomoću nje izdvajaju neke informacije iz ulaza. Oduzimanje indeksa u sumi može biti zamenjeno sabiranjem; u ovom kontekstu nema bitne razlike.

Treba primetiti da izraz (3.3) nije definisan za sve i i j . Bitno je da su svi indeksi u svojim granicama. Ovo znači da će rezultat primene konvolucije biti manje dimenzije nego početna matrica f . Kako to nekada nije poželjno, uvodi se proširivanje (eng. padding) matrice f takvo da rezultat konvolucije bude istih dimenzija kao početna matrica f . Jedan od načina da se ovo postigne je da se proširuje nulama ili da se proširi vrednostima koje su na obodu matrice f . Uz to, neretko se prekače izračunavanje za neke i i j , u zavisnosti od određenog pomeraja (eng. stride).

Konvolutivni sloj sastoji se takođe od jedinica, kao i sloj u neuronskoj mreži sa propagacijom unapred, ali je bitna razlika to što sve jedinice jednog konvolutivnog sloja dele parametre, odnosno filter. Ovo znači da se primena jednog sloja u konvolutivnoj mreži može posmatrati kao prevlačenje filtera koji je predstavljen tim parametrima preko celog signala. U jednodimenzionom slučaju, jedinice sloja su organizovane u niz a u dvodimenzionom slučaju u matricu. U dvodimenzionom slučaju, primena jedinice na poziciji (i, j) može se shvatiti kao konkretizacija izraza (3.3) gde je f izlaz prethodnog sloja (eventualno proširen) a g matrica parametara datog sloja.

Kao što je pomenuto, u konvolutivnoj mreži pojavljuju se i slojevi agregacije. Oni predstavljaju primenu neke funkcije agregacije nad nekim delom prethodnog sloja. I ovde je moguće uvesti pomeraj. Jedan primer je agregacija maksimumom gde se za svaku okolinu određene veličine računa maksimalni element i daje kao izlaz na odgovarajućoj poziciji. Pri agregaciji dolazi do gubitka informacije o tome gde se tačno nalazi neko svojstvo, što je često prihvatljivo ponašanje. Na primer, pri detekciji lica, u slučaju da je zaključeno da slika sadrži nos i dva oka, bez obzira na njihovu poziciju, jako je mala verovatnoća da ne sadrži i lice. Agregacija smanjuje dimenzije narednih slojeva pa se smanjuje broj parametara u njima i time računaska zahtevnost opada.

3.2.2 Prednosti i mane

U neuronskim mrežama sa propagacijom unapred, veze između dva sloja neurona uglavnom su guste, odnosno jedan neuron prihvata izlaze svih ili velikog broja neurona iz prethodnog sloja. Prilikom korišćenja konvolutivnih neuronskih mreža, jedna primena filtera ne koristi sve informacije iz prethodnog sloja. Na ovaj način se dosta smanjuje broj operacija za izračunavanje izlaza mreže i postiže se veća memorijska efikasnost.

Težine jednog neurona u neuronskoj mreži sa propagacijom unapred koriste se tačno jednom pri izračunavanju izlaza mreže. S druge strane, jedan filter primenjuje se na sve pozicije ulaza⁸ tako da je iskorišćenost njegovih parametara dosta veća nego u slučaju klasičnog neurona. Ova pojava naziva se deljenjem parametara.

Još jedno bitno svojstvo konvolutivnih neuronskih mreža je to što su neosetljive na translaciju. Tačnije, translacija ulaza pa primena konvolucije ima isti efekat kao primena konvolucije koju prati translacija.

⁸U zavisnosti od pomeraja i proširivanja, postoje slučajevi kada se neki elementi u nekom koraku zanemaruju ali se filter uvek prevlači preko ulaza.

4

Markovljevi procesi odlučivanja

5

Učenje potkrepljivanjem

6

DQN

7

Detalji implementacije

8

Eskperimentisanje sa elementima algoritma DQN