8. prednáška

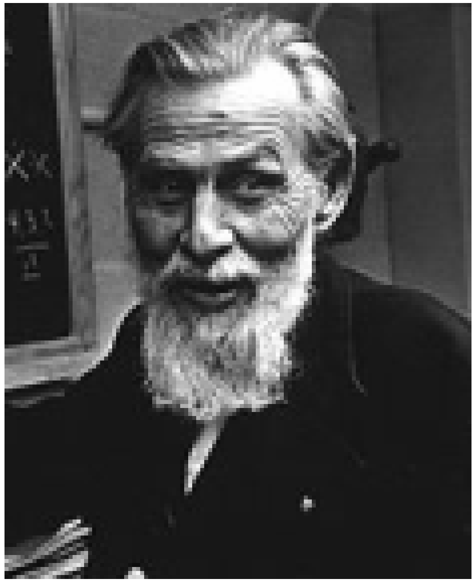
Logické neuróny a neurónové siete

Logické neuróny McCullocha a Pittsa

- Logické neuróny a neurónové siete boli prvý krát študované v publikácii Warrena McCullocha a Waltera Pittsa „*A logical calculus of the ideas immanent to nervous activity*" z r. 1943, ktorá je medzníkom v rozvoji metafory konekcionizmuv umelej inteligencii a kognitívnej vedy.

- V tejto práci bolo s geniálnou jasnozrivosťou ukázané, že neurónové siete sú efektívnym výpočtovým prostriedkom v doméne Boolových funkcií, t. j. ľubovolná Boolova funkcia je simulovaná pomocou neurónovej sieti obsahujúcej logické neuróny.

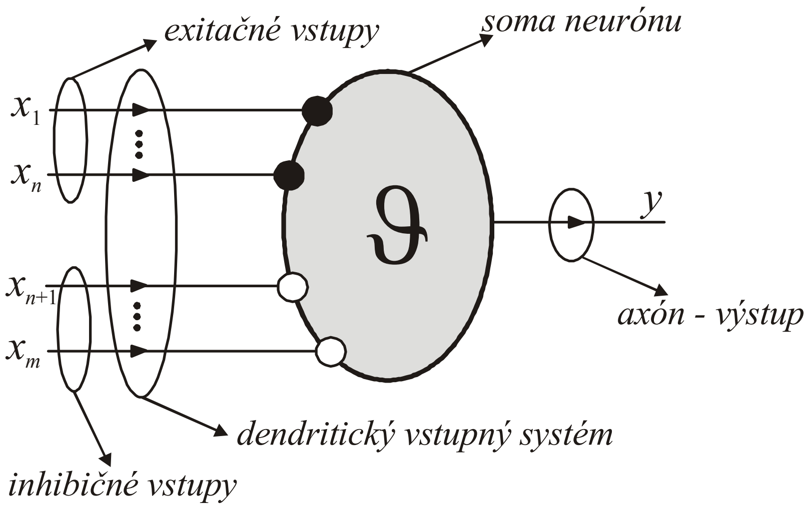
- Hneď úvodom je potrebné konštatovať, že táto práca McCullocha a Pittsa je veľmi ťažko čitateľná, matematicko-logická časť práce zrejme bola písaná Walterom Pittsom, ktorý bol tak v logike ako aj v matematika autodidaktom. Až zásluhou amerických vedcov, logika S. C. Kleeneho a informatika N. Minskeho, táto významná práca bola „preložená“ v druhej polovici 50. rokov minulého storočia do štandardného jazyka súčasnej logiky a matematiky, čím sa stali myšlienky v nej obsiahnuté všeobecne prístupnými a akceptovanými.

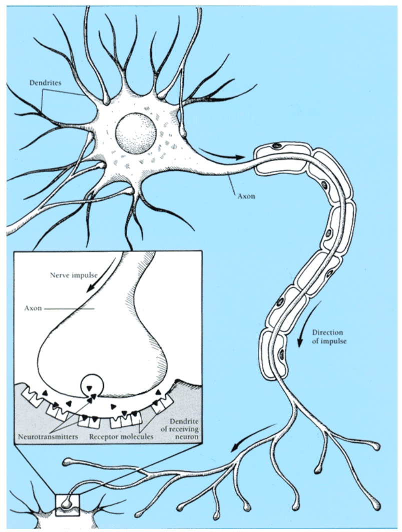


Warren McCulloch (1889 - 1969) a Walter Pitts (1923 - 1969)

Elementárnou jednotkou neurónových sietí je ***logický neurón*** McCullocha a Pittsa (výpočtová jednotka), pričom stav neurónu je binárny (t. j. má dva stavy, 1 alebo 0). Takýto logický neurón možno interpretovať ako jednoduché elektrické zariadenie - relé.

Predpokladajme, že dendritický systém logického neurónu obsahuje tak ***excitačné vstupy*** (opísané binárnymi premennými $x_1, x_2, ..., x_n$, ktoré zosilňujú odozvu), ako aj ***inhibičné vstupy*** (opísané binárnymi premennými $x_{n+1}, x_{n+2}, ..., x_m$, ktoré zoslabujú odozvu)





Aktivita logického neurónu je jednotková, ak *vnútorný potenciál* neurónu definovaný ako rozdiel medzi sumou excitačných vstupných aktivít a inhibičných vstupných aktivít je väčší alebo rovný prahu ϑ, v opačnom prípade je nulová

$$y=\begin{cases}1 & \left(x_1+\ldots+x_n-x_{1+n}-\ldots-x_m\geq-\vartheta\right)\\ 0 & \left(x_1+\ldots+x_n-x_{1+n}-\ldots-x_m<-\vartheta\right)\end{cases}$$

Pomocou jednoduchej krokovej funkcie

$$s\left(\xi\right)=\begin{cases}1 & \left(pre\ \xi\geq 0\right)\\ 0 & \left(pre\ \xi<0\right)\end{cases}$$

môžeme aktivitu y vyjadriť takto:

$$y=s\left(\underbrace{x_1+\ldots+x_n-x_{1+n}-\ldots-x_m}_{\xi}+\vartheta\right)$$

Tento vzťah pre aktivitu logického neurónu môžeme alternatívne interpretovať tak, že excitačné aktivity vstupujú do neurónu cez spoje, ktoré sú ohodnotené jednotkovým váhovým koeficientom (w = 1), zatiaľ čo inhibičné aktivity vstupujú do neurónu cez spoje so záporným jednotkovým váhovým koeficientom (w = -1). Potom aktivitu logického neurónu môžeme vyjadriť takto

$$y = s\left(\underbrace{w_1 x_1 + \ldots + w_m x_m}_{\xi} + \vartheta\right) = s\left(\sum_{i=1}^{m} w_i x_i + \vartheta\right)$$

Kde váhové koeficienty w_{ij} sú definované takto

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \left(spoj\ \ j \to i\ m\acute{a}\ exita\check{c}n\acute{y}\ charakter\right) \\ -1 & \left(spoj\ \ j \to i\ m\acute{a}\ inhibi\check{c}n\acute{y}\ charakter\right) \\ 0 & \left(spoj\ \ j \to i\ neexistuje\right) \end{cases}$$

V neurónovej sieti váhové koeficienty sú fixne a sú určené topológiou syntaktického stromu špecifikujúceho Boolovu funkciu.

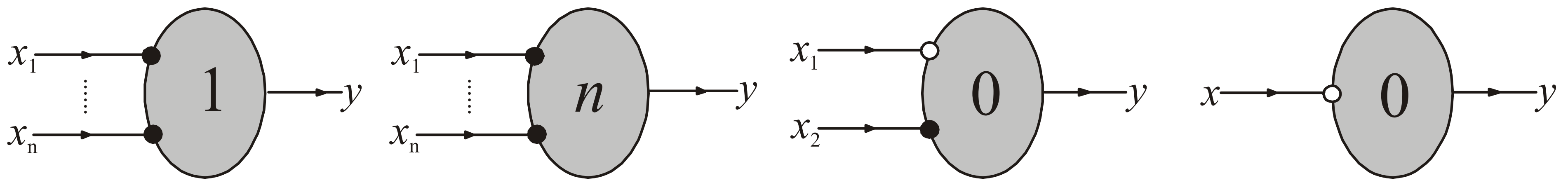
E. D. Adrian

(* 1889 – †1977)

Britský elektrofyziológ, laureát Nobelovej ceny za fyziológiu. Formuloval experimentálne evidentnosti pre neurovedný zákon "všetko alebo nič", ktorý špecifikuje aktivitu neurónov ľudského mozgu.

Culoch a Pitts poznali experimentálne práce Adriana o správaní neurónu "all or none", táto vlastnosť má centrálne postavenie v ich prístupe.

Implementácia elementárnych Boolovych funkcií



Boolova funkcia disjunkcie $y = x_1 \vee \ldots \vee x_n$ *Boolova funkcia konjunkcie* $y = x_1 \wedge \ldots \wedge x_n$ *Boolova funkcia implikácie* $y = x_1 \Rightarrow x_2$ *Boolova funkcia negácie* $y = \neg x$

Štyri realizácie logických neurónov na implementáciu Boolových funkcií disjunkcií, konjunkcií a negácie. Excitačné spoje sú znázornené plným krúžkom, inhibičné prázdnym krúžkom.

Ako príklad uvedenie formulu pre aktivitu logického neurónu, ktorý špecifikuje disjunkciu

$$y_{OR}\left(x_1,x_2\right)=s\left(x_1+x_2-1\right)$$

Funkčné hodnoty tejto Boolovej funkcie sú ukázané v tabuľke

Binárna Boolova funkcia disjunkcie

#	x_1	x_2	$y_{OR}(x_1,x_2)$	$x_1 \vee x_2$
1	0	0	$s(-1)$	0
2	0	1	$s(0)$	1
3	1	0	$s(0)$	1
4	1	1	$s(1)$	1

Z tabuľky vyplýva, že Boolova funkcia y_{OR} simuluje Boolovu funkciu disjunkcie. Podobným spôsobom môžeme verifikovať ak ostatné elementárne boolove funkcie

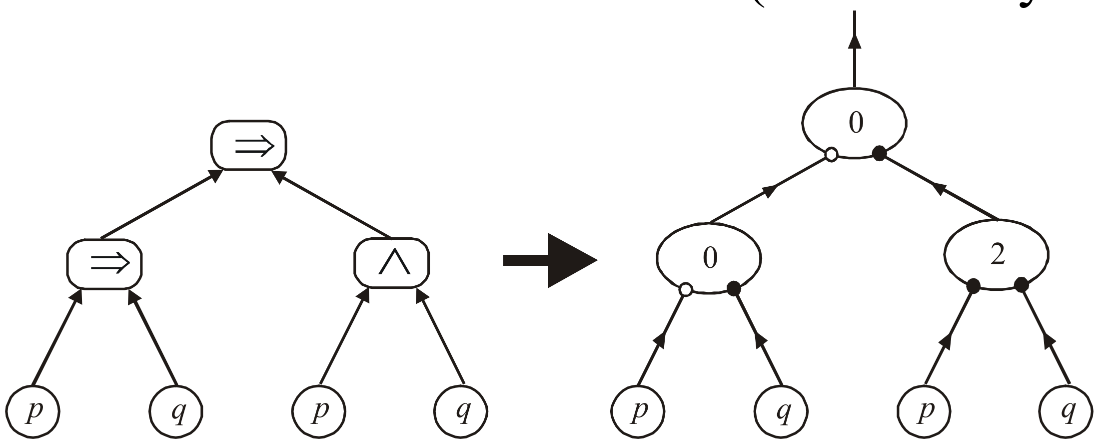
$$y_{AND}\left(x_1,x_2\right)=s\left(x_1+x_2-2\right)$$

$$y_{IMP}\left(x_1,x_2\right)=s\left(-x_1+x_2\right)$$

$$y_{NEG}\left(x_1\right)=s\left(-x_1\right)$$

Neurónové siete

Každá Boolova funkcia je reprezentovaná pomocou ***syntaktického stromu***, ktorý reprezentuje jej rekurentnú výstavbu (zdola nahor) inicializovanú Boolovými premennými a končiacu danou Boolovou funkciou (funkciou výrokovej logiky)



syntaktický strom

A

neurónová sieť

B

Neurónová sieť obsahujúca logické neuróny spojok, ktoré sa vyskytujú v príslušnom syntaktickom strome. Vidíme, že medzi syntaktickým stromom a príslušnou neurónovou sieťou existuje veľmi tesná previazanosť, ich topológia je identická, odlišujú sa len vo vrcholoch. Obrazne môžeme povedať, že neurónovú sieť pre Boolovu funkciu φ zostrojíme pomocou jej syntaktického stromu tak, že vrcholy zo syntaktického stromu, ktoré reprezentujú logické spojky, nahradíme príslušnými logickými neurónmi, koreň syntaktického stromu je zamenený .

Veta. Každá Boolova funkcia môže byť vyjadrená pomocou „neurónovej siete“ zloženej z logických neurónov vyjadrujúcich logické spojky.

Použitie techniky váhových koeficientov umožňuje formálne zjednodušiť teóriu logických neurónov, potom nie je potrebné a-priori odlišovať excitačné a inhibičné vstupy do neurónu

$$x_i = t\left(\sum_j w_{ij} x_j + \vartheta_i\right)$$

kde sumácia prebieha nad všetkými neurónmi, ktoré v neurónovej sieti predchádzajú i-ty neurón. Váhové koeficienty w_{ij} sú definované takto

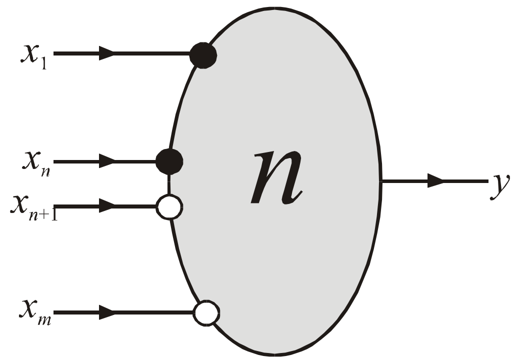
$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & (spoj\ j \rightarrow i\ má\ exitačný\ charakter) \\ -1 & (spoj\ j \rightarrow i\ má\ inhibičný\ charakter) \\ 0 & (spoj\ j \rightarrow i\ neexistuje) \end{cases}$$

To znamená, že v neurónovej sieti váhové koeficienty sú ***fixné*** a sú určené topológiou syntaktického stromu špecifikujúceho Boolovu funkciu.

3-vrstvová neurónová sieť

Architektúra neurónovej siete, ktorá je zostrojená pre danú Boolovu funkciu môže byť podstatne zjednodušená na tzv. 3-vrstvovú neurónovú sieť, t. j. obsahuje vrstvu vstupných neurónov (ktoré len kopírujú vstupné aktivity, nie sú výpočtovými jednotkami), vrstva skrytých neurónov a posledná vrstva obsahujúca výstupný neurón.

Logický neurón, ktorý simuluje konjunktívnu klauzulu, ktorá obsahuje konjunkciu konečného prvku výrokových premenných alebo ich negácií, $y = x_1 \wedge \ldots \wedge x_n \wedge \neg x_{n+1} \wedge \ldots \wedge \neg x_m$.



Táto Boolova funkcia sa rovná 1 len pre $x_1 = ... = x_n = 1$ a $x_{n+1} = ... = x_m = 0$, vo všetkých ostatných pravdivostných kombináciách argumentov jej hodnota je 0 (nepravdivý výrok)

$$val_\tau\left(x_1 \wedge ... \wedge x_n \wedge \neg x_{n+1} \wedge ... \wedge \neg x_m\right) = \begin{cases} 1 & \left(pre\ \tau = \tau_0\right) \\ 0 & \left(pre\ \tau \neq \tau_0\right) \end{cases}$$

kde $\tau_0 = \left(x_1/1, ..., x_n/1, x_{n+1}/0, ..., x_m/0\right)$ je špecifikácia pravdivostných hodnôt premenných. Ľahko sa presvedčíme o tom, že táto klauzula je simulovaná logickým neurónom znázorneným na obrázku, jeho výstupná aktivita je určená formulou

$$y = s\left(x_1 + ... + x_n - x_{n+1} - ... - x_m - n\right)$$

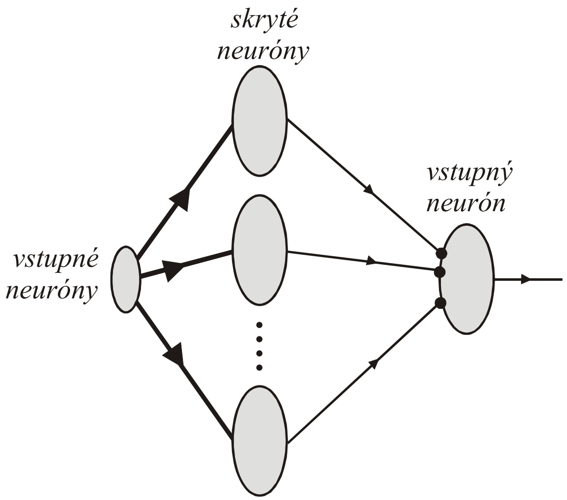
Funkčná hodnota tejto funkcie sa rovná 1 vtedy, ak

$$x_1 + ... + x_n - x_{n+1} - ... - x_m \geq n$$

McCulloch a Pitts taktiež ukázali, že všeobecná neurónová sieť, ktorá je pšecifikovaná syntaktickým stromom, môže byť zjednodušená na 3-vrstvovú neurónovú sieť, ktorá je priradená ekvivalentnou DNF funkciou

$$\varphi_{DNF} = \bigvee_{\substack{\tau \\ \left(val_\tau(\varphi)=1\right)}} x_1^{(\tau)} \wedge x_2^{(\tau)} \wedge \ldots \wedge x_n^{(\tau)}$$

Kde uvažujeme len členy s jednotkovou funkčnou hodnotou



kde skryté neuróny sú priradené konjunktívnzm klauzulám s jednotkovou funkčnou hodnotou.

Príklad

Boolova funkcia je yadaná tabuľkou

#	x_1	x_2	x_3	$y = f\left(x_1, x_2, x_3\right)$	*klauzula*
1	0	0	0	0	-
2	0	0	1	0	-
3	0	1	0	1	$\neg x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3$
4	0	1	1	1	$\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3$
5	1	0	0	0	-
6	1	0	1	1	$x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3$
7	1	1	0	0	-
8	1	1	1	0	-

Potom Boolova funkcia má tento DNF tvar

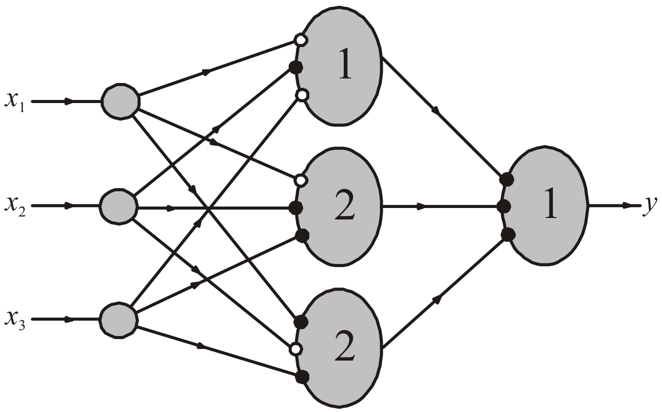
$$y = f\left(x_1, x_2, x_3\right) = \left(\overline{x}_1 \wedge x_2 \wedge \overline{x}_3\right) \vee \left(\overline{x}_1 \wedge x_2 \wedge x_3\right) \vee \left(x_1 \wedge \overline{x}_2 \wedge x_3\right)$$

Táto Boolova funkcia môže byť zjednodušená tak, že prvá a druhá klauzula sa zjednodušia

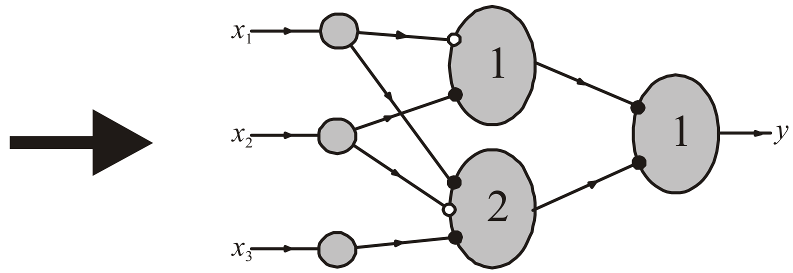
$$\left(\bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_3\right) \vee \left(\bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge x_3\right) = \bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge \underbrace{\left(\bar{x}_3 \vee x_3\right)}_{1} = \bar{x}_1 \wedge x_2$$

Potom

$$y_{opt} = f\left(x_1, x_2, x_3\right) = \left(\bar{x}_1 \wedge x_2\right) \vee \left(x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3\right)$$

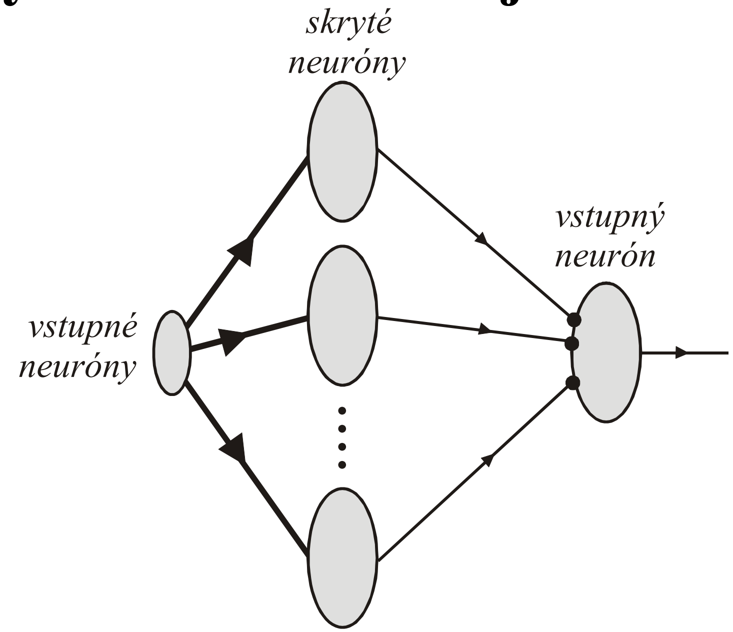


štandardná neurónová sieť



optimálna neurónová sieť

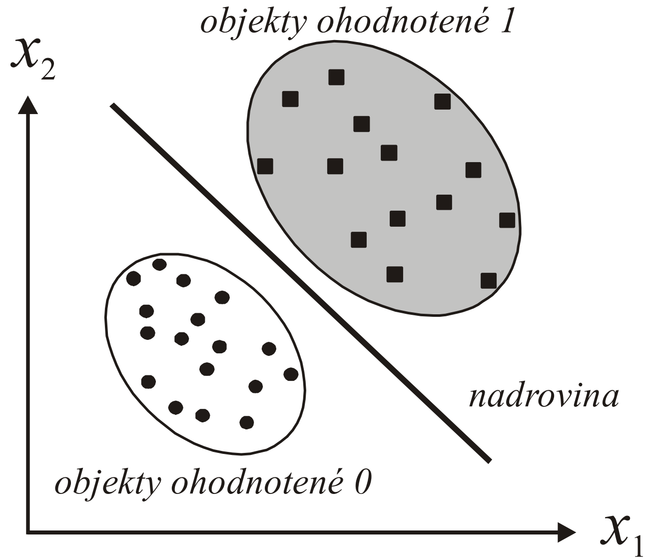
Všeobecný tvar 3-vrstvovej neurónovej siete



3-vrstvové neurónové siete obsahujúce logické neuróny sú *univerzálne výpočtové zariadenia* pre doménu Boolových funkcií. Tento výsledok predznačil moderný výsledok neurónových sietí z prelomu 80. a 90. rokov minulého storočia, podľa ktorého trojvrstvové dopredné neurónové siete so spojitou aktivačnou funkciou majú vlastnosť univerzálneho aproximátora

Veta. *Ľubovoľná Boolova funkcia f je simulovaná pomocou 3-vrstvovej neurónovej siete.*

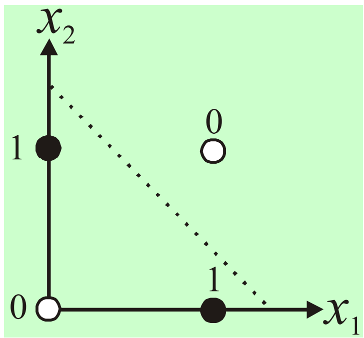
Môžeme si položiť otázku, aké Boolove funkcie je schopný vyjadriť jeden logický neurón? Výpočtová funkcia logického neurónu rozdeľuje priestor vstupov na dva polpriestory pomocou roviny $w_1x_1 + w_2x_2 + ... + w_nx_n = \vartheta$, pre koeficienty w_i=0,±1. Hovoríme, že Boolova funkcia $f(x_1, x_2, ..., x_n)$ je *lineárne separovateľná*, ak existuje taká rovina $w_1x_1 + w_2x_2 + ... + w_nx_n = \vartheta$, ktorá separuje priestor vstupných aktivít tak, že v jednej časti priestoru sú vrcholy ohodnotené 0, zatiaľ čo v druhej časti priestoru sú vrcholy ohodnotené 1



Veta 8.3. *Logický neurón je schopný simulovať Boolove funkcie, ktoré sú lineárne separovateľné.*

Klasický príklad Boolovej funkcie, ktorá nie je lineárne separovateľná, je výroková spojka exkluzívna disjunkcia (XOR), ktorá je formálne definovaná ako negácia ekvivalencie $(x \oplus y) \Leftrightarrow \neg(x \equiv y)$, potom $\varphi_{XOR}(x,y) = x \oplus y$.

#	x	y	$\varphi_{XOR}(x,y)$
1	0	0	0
2	0	1	1
3	1	0	1
4	1	1	0



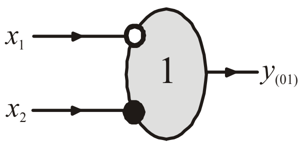
Ak si jej funkčné hodnoty vynesieme do stavového priestoru x - y dostaneme diagram, z ktorého jasne vyplýva, že táto funkcia ***nie je*** lineárne separovateľná.

Zostrojíme neurónovú sieť, ktorá simuluje túto elementárnu lineárne neseparovateľnú funkciu XOR v tvare DNF

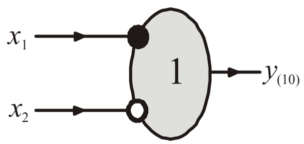
#	x	y	$\varphi_{XOR}(x,y)$
1	0	0	0
2	0	1	1
3	1	0	1
4	1	1	0

$\neg x_1 \wedge x_2$

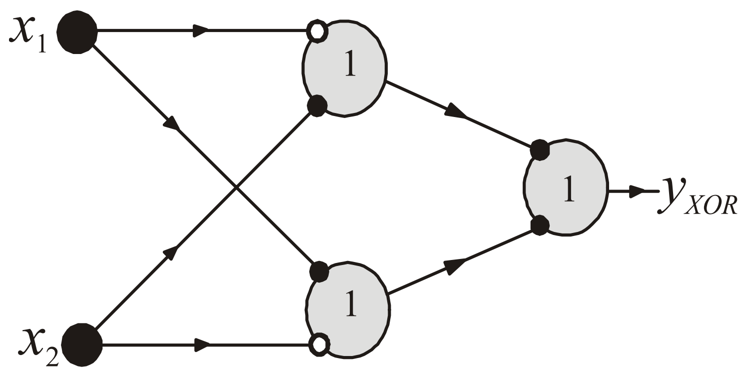
$x_1 \wedge \neg x_2$



A



B



C

Diagram C reprezentuje 3-vrstvovú neurónovú sieť, ktorá ako skryté neuróny obsahuje neuróny z diagramu A a B, výstupný neurón reprezentuje disjunkciu výstupných aktivít zo skrytých neurónov.

Príklad

Zostrojme neurónovú sieť, ktorá simuluje sčítanie dvoch binárnych číslic (nazývana polosumátor – semi adder)

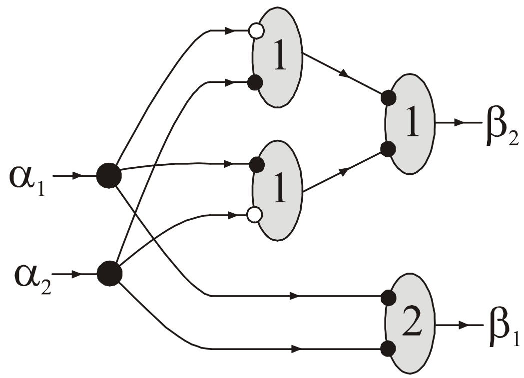
$$\begin{array}{r} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \hline \beta_1\beta_2 \end{array}$$

kde jednotlivé binárne premenné výsledku – sumy sú určené takto:

$$\beta_1 = \alpha_1 \wedge \alpha_2$$

$$\beta_2 = \alpha_1 \oplus \alpha_2 \equiv \left(\neg\alpha_1 \wedge \alpha_2\right) \vee \left(\alpha_1 \wedge \neg\alpha_2\right)$$

Príslušná neurónová sieť je znázornená na obrázku 8.10.



Príklad polosumátora môžeme ľahko zovšeobecniť na „plný sumátor“ (full adder)

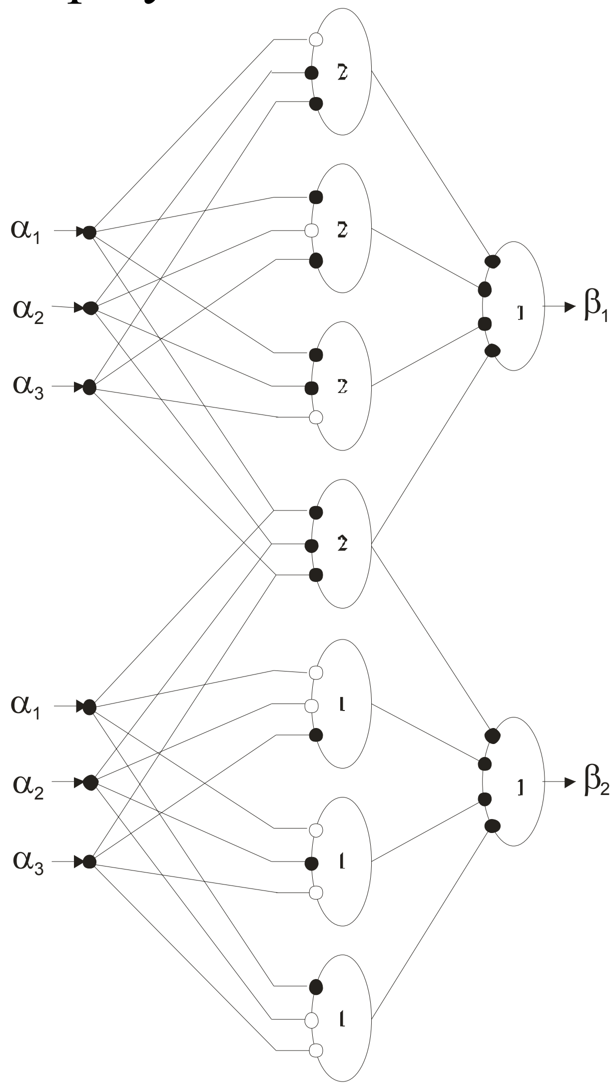
$$\begin{array}{r} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \hline \beta_1\beta_2 \end{array}$$

Ktorý je špecifikovaný tabuľkou

#	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2
1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1
3	0	1	0	0	1
4	0	1	1	1	0
5	1	0	0	0	1
6	1	0	1	1	0
7	1	1	0	1	0
8	1	1	1	1	1

$$\beta_1 = \overline{\alpha}_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\overline{\alpha}_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\overline{\alpha}_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3$$
$$\beta_2 = \overline{\alpha}_1\overline{\alpha}_2\alpha_3 + \overline{\alpha}_1\alpha_2\overline{\alpha}_3 + \alpha_1\overline{\alpha}_2\overline{\alpha}_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3$$

3-vrstvová neurónová sieť pre plný sumátor



Logický neurón vyššieho rádu

Logické neuróny sú schopné korektne klasifikovať len lineárne separovateľné Boolove funkcie. Toto podstatné obmedzenie logických neurónov môže byť odstránené pomocou logických neurónov vyšších rádov, ktorých aktivita je určená yahrnutím členov vyšších rádov

$$y = s\left(\underbrace{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i<j)}}^{n} w_{ij} x_i x_j + \ldots + \vartheta}_{\xi}\right)$$

Ak potenciál neurónu ξ obsahuje aj kvadratické a prípadne aj ďalšie členy, potom sa nazýva "*logický neurón vyššieho rádu*". Podľa Minského a Paperta platí nasledujúca veta, ktorá hovorí o tom, že perceptróny vyššieho rádu sú schopné simulovať aj množiny objektov, ktoré nie sú lineárne separovateľné.

Veta. Ľubovolná Boolova funkcia *f* je simulovaná logickým neurónom vyššieho rádu.

Príklad

Ako ilustračný príklad vety študujme Boolovu funkciu *XOR*, ktorá nie je lineárne separovateľná a ktorej funkčné hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.1. Nech aktivita logického neurónu je určená pomocou kvadratického potenciálu (čiže sa jedná o logicky neurón druhého rádu)

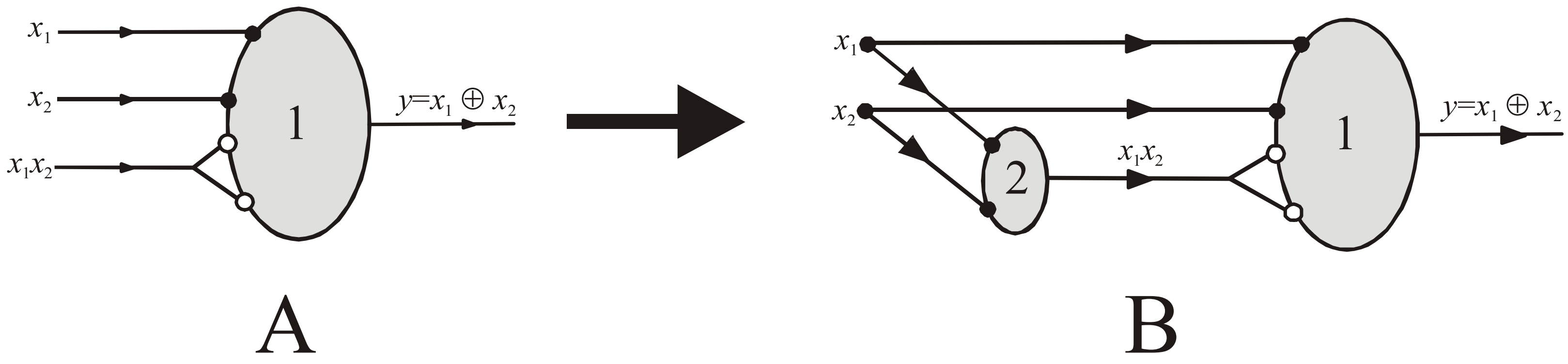
$$y = s\left(\underbrace{w_1x_1 + w_2x_2 + w_{12}x_1x_2}_{\xi} - \vartheta\right)$$

Pre jednotlivé riadky tabuľky 2.3 funkcie *XOR* platí

$$\begin{aligned} &-\vartheta < 0 \\ w_2 \quad &-\vartheta \geq 0 \\ w_1 \quad &-\vartheta \geq 0 \\ w_1 + w_2 + w_{12} &-\vartheta < 0 \end{aligned}$$

Postupným riešením týchto nerovníc dostaneme, že váhové koeficienty a prah majú napr. takéto riešenie

$$\vartheta = 1, w_1 = w_2 = 1, w_{12} = -2 \qquad (8.17)$$



Znázornenie logického neurónu druhého rádu simulujúceho funkciu *XOR*, kde excitačné vstupné aktivity sú binárne premenné x_1 a x_2, inhibičná aktivita je priradená premennej druhého rádu x_1x_2. Výstupná aktivita z je určená pomocou krokovej funkcie, $z = s\left(x_1 + x_2 - 2x_1x_2 - 1\right)$, priamou verifikáciou sa presvedčíme, že simuluje funkciu *XOR*.

Pojem lineárnej separovateľnosti Boolových funkcií je ľahko zovšeobecniteľný na kvadratickú (kubickú,…) separovateľnosť pomocou kvadratickej (kubickej,…) nadplochy.

Definícia. Boolova funkcia f sa nazýva *kvadraticky separovateľná*, ak existujú také váhové koeficienty w_i, w_{ij} a prahový faktor ϑ, že pre každú špecifikáciu premenných $x_1, x_2, \dots, x_n$ platí

$$y_{req}\left(x_1, x_2, \dots, x_n\right) = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i<j)}}^{n} w_{ij} x_i x_j \geq \vartheta$$

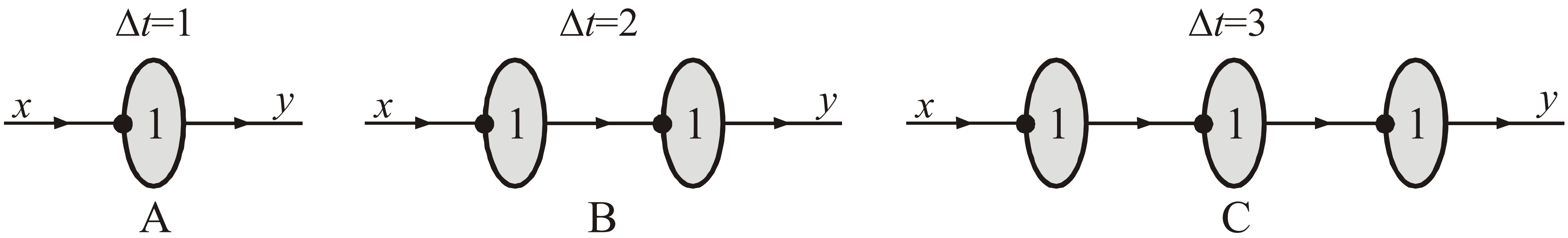
$$y_{req}\left(x_1, x_2, \dots, x_n\right) = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i<j)}}^{n} w_{ij} x_i x_j < \vartheta$$

Konštrukcia binárnych obvodov

Logické neuróny môžu byť použité na konštrukciu jednoduchých binárnych obvodov [4,7], ich kombináciou môžeme zostrojiť už zložité zariadenia, akými sú napr. rôzne sčítačky, násobičky a podobne.

Časový posunovač

Časový posunovač je taký binárny obvod, ktorý posunie tok signálu o niekoľko vopred zvolených jednotiek. Študujme jednoduchý obvod



ktorý realizuje posun o predpísaný počet jednotiek.

Aktivitu neurónu v čase *t* môžeme vyjadriť takto

$$y^{(t)} = t\left(x^{(t-1)} - 1\right)$$

Vstupný signál v čase *t* sa transformuje na výstupný signál v čase *t*+1

$$x^{(t)} = 0 \Rightarrow y^{(t+1)} = t\left(-1\right) = 0,\, x^{(t)} = 1 \Rightarrow y^{(t+1)} = t\left(0\right) = 1$$

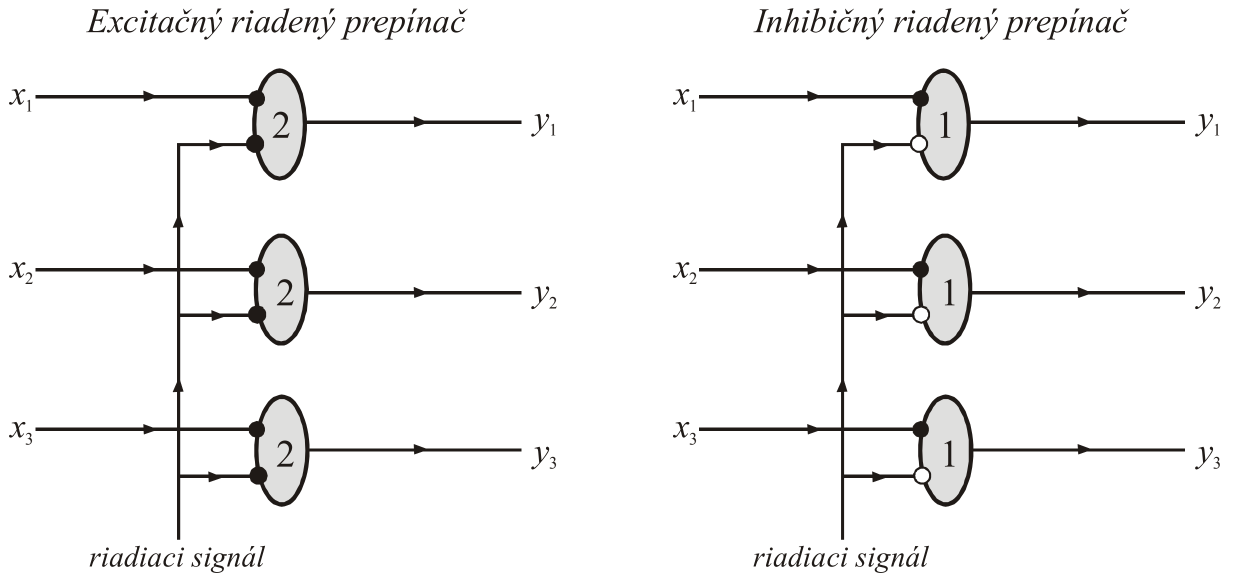
Vstupná a výstupná sekvencia pre jednotkový časový posunovač

čas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	7	7
vstup x	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	..	..
výstup y	#	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	..

Sériovým zapojením jednotkových posunovačov dostaneme posunovače o dve, tri, .. časové jednotky, pozri diagramy B a C.

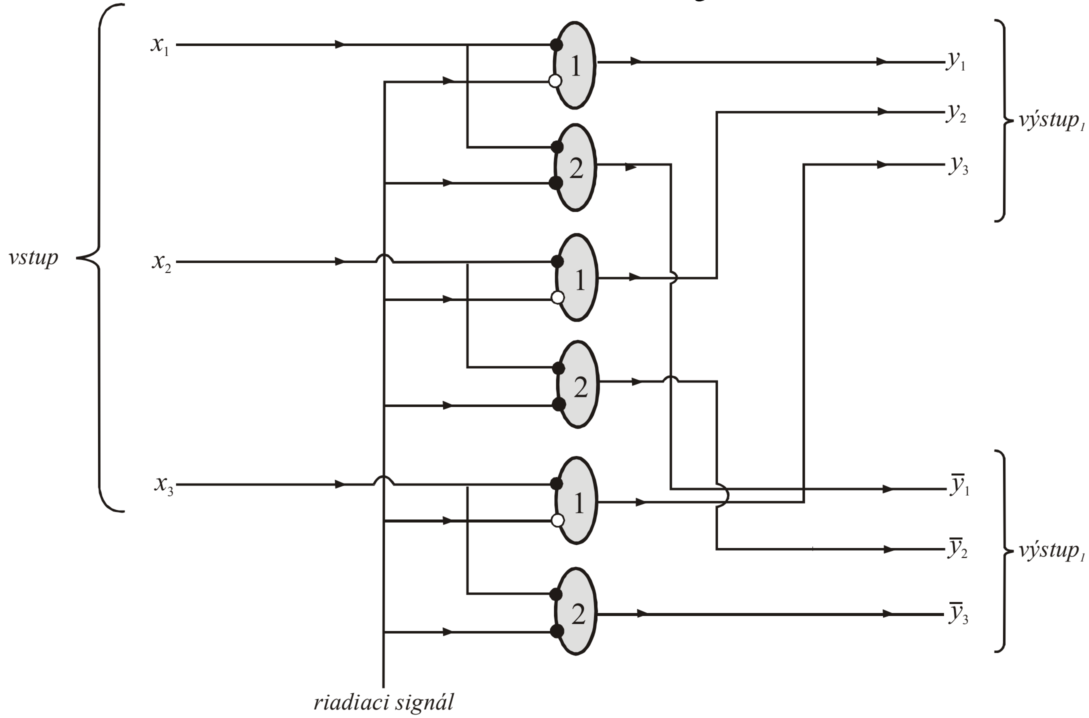
Riadený prepínač

Riadený prepínač pomocou riadiaceho signálu zapína alebo vypína tok signálu. Tak ak v excitačnom riadenom prepínači je riadiaci signál jednotkový, potom prepínač prepúšťa signál na výstup prepínača. V alternatívnom prípade, pre inhibične riadený prepínač, nulový riadiaci signál spôsobuje prenos signálu na výstup. Tieto dva prepínače sú znázornené na obr. 8.9.



Kombináciou excitačného a inhibičného prepínača zostrojíme riadené rozdvojovacie zariadenie.

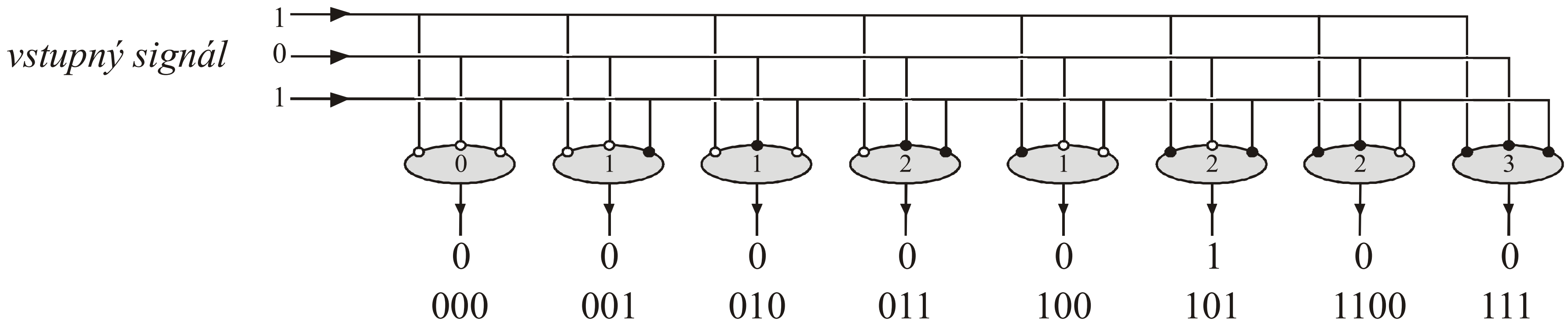
Neurónová sieť riadeného rozdvojovacieho zariadenia



Ak riadiaci signál je jednotkový (nulový), potom vstup je riadený na 1. výstup (2.výstup). Obrazne môžeme povedať, že riadiaci signál pôsobí ako „prepínač“ do 1. alebo 2. polohy.

Binárny paralelný dekodér

Budeme študovať paraleny dekodér pre tri binárne číslice. Predpokladáme, že informácia do dekodéra prichádza prostredníctvom impulzov cez tri paralelne vlákna, pozri obr. 8.12. Dekódér obsahuje osem nezávislých elementov – neurónov, z ktorých každý dekóduje jednu možnú binárnu kombináciu prichádzajúcich signálov.



Všeobecná diskusia k neurónovým sieťam

- Neurónové siete zložené z logických neurónov sú univerzálnym aproximátorom Boolových funkcií (t. j. každá Boolova funkcia môže byť ňou reprezentovaná). Podstatným ohraničením logických neurónov je, že klasifikujú len Boolove funkcie, ktoré sú lineárne separovateľné. Bolo ukázané práve McCullochom a Pittsom, že toto ohraničenie logického neurónu je prekonané neurónovými sieťami. Druhá alternatívna možnosť, ako prekonať toto ohraničenie lineárnej separovateľnosti, sú logické neuróny vyššieho rádu, ktoré navrhli Minski a Pappert. Tieto vlastnosti logického neurónu môžeme sumarizovať tak, že tieto sú univerzálnym výpočtovým zariadením v doméne Boolových fikcií.

- Ďalší, nemenej zaujímavý aspekt neurónových sietí obsahujúcich logické neuróny je skutočnosť, že poskytujú informatický a výpočtový pohľad na vzťah medzi mysľou a mozgom (známy filozofický problém „myseľ – telo" alebo "duša –telo" problém, ktorý vo filozofii patrí medzi centrálne problémy). Práve, moderná neuroveda, prostredníctvom neurónových sietí (v najjednoduchšom priblížení vyjadrených pomocou logických neurónov) ponúka vedecké riešenie tohto problému.

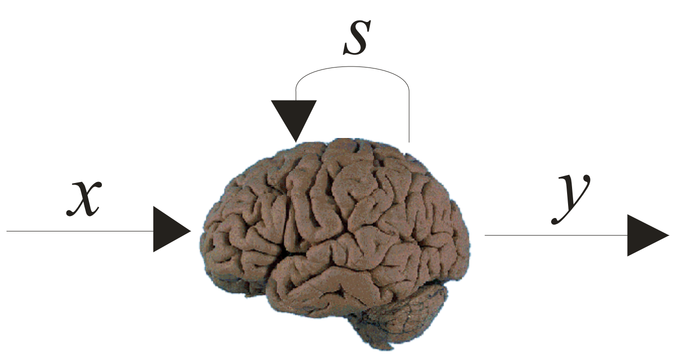
- Neurovedný pohľad umelej inteligencie a kognitívnej vedy na komplex mozog–myseľ je založený na predpoklade, že mozog je mohutný paralelný počítač, ktorý transformuje vstupné údaje $\boldsymbol{x}$ (produkované zrakom, sluchom, čuchom a pod.) na motorické impulzy $\boldsymbol{y}$ (pričom táto transformácia je závislá od vnútorného stavu $\boldsymbol{s}$ (pozri diagram A). Táto neurovedná interpretácia mozgu na mikroskopickej (neurálnej) úrovni neumožňuje priame štúdium vyšších kognitívnych aktivít (riešenie problémov, porozumenie ľudskej reči, a pod.).

- Neurálny prístup je vhodný na štúdium elementárnych kognitívnych aktivít (napr. prvotné spracovanie vizuálnej informácie zo sietnice oka). Vyššie kognitívne aktivity mozgu sú študované na symbolickej úrovni, založeného na predstave, *že ľudský mozog je počítač,* ktorý pracuje podľa týchto princípov (ktoré tvoria základ tzv. *symbolickej paradigmy*), ktorý

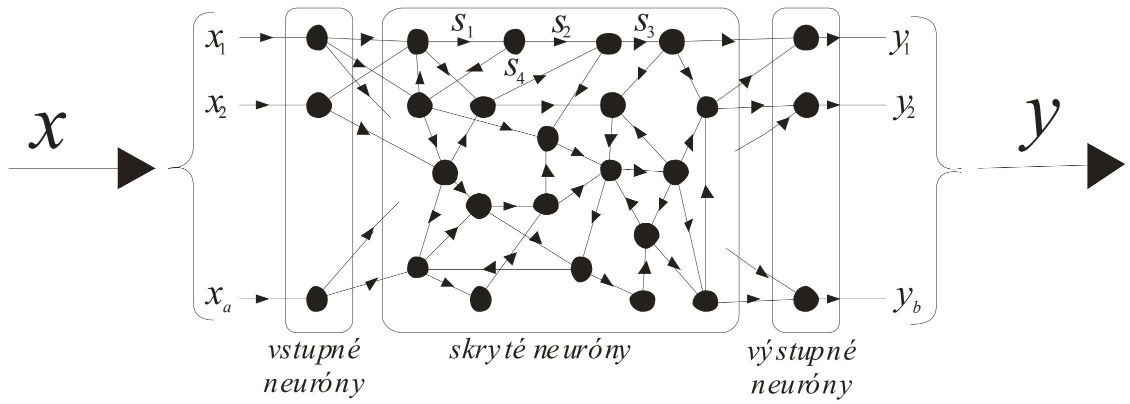
  (1) transformuje symboly pomocou syntaktických pravidiel na iné symboly, pričom

  (2) myšlienky sú symbolické reprezentácie implementované pomocou jazyka myslenia, a

  (3) mentálne procesy sú kauzálne sekvencie symbolov generované syntaktickými pravidlami.



A



B

(A) Kybernetická interpretácia mozgu ako „zariadenia“, ktoré transformuje vstup ***x*** na výstup ***y***, pričom táto transformácia je ovplyvnená vnútorným stavom ***s*** . Touto špecifikáciou mozgu môžeme dostať dve rôzne odozvy $\boldsymbol{y}_1$ a $\boldsymbol{y}_2$ na rovnaký vstup ***x***. (B) Konekcionistický (neurálny) model mozgu pomocou neurónovej siete, ktorá obsahuje (1) vstupné neuróny (napr. percepčné neuróny retiny oka), (2) skryté neuróny, na ktorých prebieha transformácia vstupu na výstup a (3) výstupné neuróny (napr. neuróny riadiace motorické aktivity). Aktivity skrytých neurónov tvoria vnútorný stav neurónovej siete, rôzne počiatočné nastavenie týchto aktivít zapríčiňuje rôznu odozvu na rovnaké vstupné aktivity ***x***.

- Použitie termínu „počítač“ obvykle evokuje predstavu sekvenčného počítača von neumannovskej architektúry (napr. personálne počítače majú túto architektúru), kde je možné striktne oddeliť hardware od software; kde na tom istom počítači – hardware môže byť vykonávaných nepreberné množstvo rozdielnych programov – softwarov. Pre tieto von neumannovské počítače existuje striktná dichotómia medzi počítačom a programom – t. j. medzi hardwarom a softwarom. Žiaľ, paradigma mysle ako počítača implikuje u mnohých ľudí predstavu, že je možné oddeliť mozog od mysle, ako dva „nezávislé“ fenomény, kde mozog hrá úlohu hardwaru, zatiaľ čo myseľ je software (vykonávaný na hardwaru – mozgu).

- Mozog môže byť chápaný ako mohutný paralelný počítač, ktorého výpočtové jednotky sú neuróny s extrémne jednoduchou výpočtovou prahovou aktivitou (verbálne vyjadrenou vetou - víťaz berie všetko). Možno konštatovať, *že schopnosť mozgu vykonávať nielen kognitívne aktivity, ale byť aj pamäťou, je plne zakódovaná do jeho architektúry*.

- Na základe týchto neurovedných poznatkov bazálneho charakteru môžeme konštatovať, že počítačová paradigma ľudského mozgu sa musí formulovať tak, že mozog je paralelne distribuovaný počítač (obsahujúci obrovské množstvo neurónov, elementárnych procesorov, ktoré sú medzi sebou poprepájané do zložitej neurónovej siete). Program v tomto paralelnom počítači je priamo zabudovaný do architektúry neurónovej siete, t. j. *ľudský mozog je jednoúčelový paralelný počítač reprezentovaný neurónovou sieťou*, ktorý nie je možné preprogramovať bez zmeny jeho architektúry. Z týchto všeobecných úvah vyplýva, že myseľ s mozgom tvoria jeden integrálny celok; myseľ v tomto prístupe sa chápe ako program vykonávaný mozgom, avšak tento program je špecifikovaný architektúrou distribuovanej neurónovej siete reprezentujúcej mozog.

- Mozog a myseľ tvoria dva rôzne pohľady na ten istý objektu:

  (1) Keď hovoríme o mozgu, myslíme tým „hardwarovú“ štruktúru, biologicky realizovanú neurónmi a ich synaptickými spojmi (formálne reprezentovanú neurónovou sieťou), v opačnom prípade,

  (2) keď hovoríme o mysli, myslíme tým kognitívne a iné aktivity mozgu, realizované výpočtami neurónovej siete reprezentujúcej mozog.

- Na záver tejto kapitoly poznamenajme, že logické neuróny McCullocha a Pittsa majú v informatike, umelej inteligencii a kognitívnej vede mimoriadne postavenie, sú nielen univerzálnym aproximátorom v doméne Boolovych funkcií (umožňujú realizovať jednoduchú syntézu elektronických zariadení pre realizáciu štandardných binárnych operácií, ktoré sa opakované mnohokrát vyskytujú pri návrhu počítačov, čoho si prvý všimol von Neumann), ale majú význam až "filozofický", tvoria prirodzenú teóriu pre interpretáciu mozgu ako paralelného výpočtového zariadenia a riešenia problému vzťahu medzi mysľou a mozgom.

The End