

Belöningsbaserad Inläarning

Reinforcement Learning

1 Definition av problemet

- Inlärningssituationen
- Belöningens roll
- Förenklande antaganden
- Centrala begrepp

2 Känd omgivning

- Bellmans ekvation
- Lösningmetoder

3 Okänd omgivning

- Monte-Carlo metoden
- Temporal-Difference
- Q-Learning
- Sarsa-Learning

4 Förbättringar

- Nyttan av att göra fel
- Eligibility Trace

- 1 Definition av problemet
 - Inlärningsituationen
 - Belönings roll
 - Förenklande antaganden
 - Centrala begrepp
- 2 Känd omgivning
 - Bellmans ekvation
 - Lösningmetoder
- 3 Okänd omgivning
 - Monte-Carlo metoden
 - Temporal-Difference
 - Q-Learning
 - Sarsa-Learning
- 4 Förbättringar
 - Nyttan av att göra fel
 - Eligibility Trace

Belöningsbaserad inläring

Reinforcement Learning

Inläring av ett beteende utan tillgång till facit.

Belöningsbaserad inläring

Reinforcement Learning

Inläring av ett beteende utan tillgång till facit.

- En **belöning** ger information om hur bra det går

Belöningsbaserad inläring

Reinforcement Learning

Inläring av ett beteende utan tillgång till facit.

- En **belöning** ger information om hur bra det går
- Belöningen kommer inte *samtidigt* som man gör något bra
Temporal credit assignment

Belöningsbaserad inläring

Reinforcement Learning

Inläring av ett beteende utan tillgång till facit.

- En **belöning** ger information om hur bra det går
- Belöningen kommer inte *samtidigt* som man gör något bra
Temporal credit assignment
- Belöningen anger inte *vad* som var bra
Structural credit assignment

Modell för inlärningsituationen

Modell för inlärningsituationen

- En **agent** interagerar med sin **omgivning**

Modell för inlärningsituationen

- En **agent** interagerar med sin **omgivning**
- Agenten utför **handlingar**

Modell för inlärningsituationen

- En **agent** interagerar med sin **omgivning**
- Agenten utför **handlingar**
- Handlingarna påverkar omgivningens **tillstånd**

Modell för inlärningsituationen

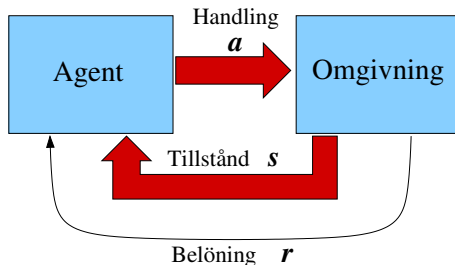
- En **agent** interagerar med sin **omgivning**
- Agenten utför **handlingar**
- Handlingarna påverkar omgivningens **tillstånd**
- Agenten observerar omgivningens tillstånd

Modell för inlärningssituationen

- En **agent** interagerar med sin **omgivning**
- Agenten utför **handlingar**
- Handlingarna påverkar omgivningens **tillstånd**
- Agenten observerar omgivningens tillstånd
- Agenten får även en **belöning** från omgivningen

Modell för inlärningssituationen

- En **agent** interagerar med sin **omgivning**
- Agenten utför **handlingar**
- Handlingarna påverkar omgivningens **tillstånd**
- Agenten observerar omgivningens tillstånd
- Agenten får även en **belöning** från omgivningen



Uppgiften för agenten

Hitta ett beteende som maximerar den *totala* belöningen.

Uppgiften för agenten

Hitta ett beteende som maximerar den *totala* belöningen.

Hur lång framtid ska vi ta hänsyn till?

Uppgiften för agenten

Hitta ett beteende som maximerar den *totala* belöningen.

Hur lång framtid ska vi ta hänsyn till?

- Begränsad tidshorisont

$$\max \left[\sum_{t=0}^h r_t \right]$$

Uppgiften för agenten

Hitta ett beteende som maximerar den *totala* belöningen.

Hur lång framtid ska vi ta hänsyn till?

- Begränsad tidshorisont

$$\max \left[\sum_{t=0}^h r_t \right]$$

- Oändlig tidshorisont

$$\max \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \right]$$

Kräver nedskrivning av framtida belöningar ($0 < \gamma < 1$)

Belöningsfunktionen

Belöningsfunktionen styr vilken uppgift som ska lösas

Belöningsfunktionen

Belöningsfunktionen styr vilken uppgift som ska lösas

- Spel (Schack, Backgammon)

Belöningsfunktionen

Belöningsfunktionen styr vilken uppgift som ska lösas

- Spel (Schack, Backgammon)
Belöning bara i slutet: $+1$ vid vinst, -1 vid förlust

Belöningsfunktionen

Belöningsfunktionen styr vilken uppgift som ska lösas

- Spel (Schack, Backgammon)
Belöning bara i slutet: $+1$ vid vinst, -1 vid förlust
- Undvika misstag (cykla, ramla, ...)

Belöningsfunktionen

Belöningsfunktionen styr vilken uppgift som ska lösas

- Spel (Schack, Backgammon)
Belöning bara i slutet: $+1$ vid vinst, -1 vid förlust
- Undvika misstag (cykla, ramla, ...)
Belöning -1 i slutet (när man misslyckas)

Belöningsfunktionen

Belöningsfunktionen styr vilken uppgift som ska lösas

- Spel (Schack, Backgammon)
Belöning bara i slutet: $+1$ vid vinst, -1 vid förlust
- Undvika misstag (cykla, ramla, ...)
Belöning -1 i slutet (när man misslyckas)
- Hitta kort/snabb/billig väg till målet

Belöningsfunktionen

Belöningsfunktionen styr vilken uppgift som ska lösas

- Spel (Schack, Backgammon)
Belöning bara i slutet: +1 vid vinst, -1 vid förlust
- Undvika misstag (cykla, ramla, ...)
Belöning -1 i slutet (när man misslyckas)
- Hitta kort/snabb/billig väg till målet
Belöning -1 hela tiden

Förenklande antaganden

Förenklande antaganden

- Diskret tid

Förenklande antaganden

- Diskret tid
- Ändligt antal handlingar a_i

$$a_i \in a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$$

Förenklande antaganden

- Diskret tid
- Ändligt antal handlingar a_i

$$a_i \in a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$$

- Ändligt antal tillstånd s_i

$$s_i \in s_1, s_2, s_3, \dots, s_m$$

Förenklande antaganden

- Diskret tid
- Ändligt antal handlingar a_i

$$a_i \in a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$$

- Ändligt antal tillstånd s_i

$$s_i \in s_1, s_2, s_3, \dots, s_m$$

- Omgivningen är en konstant MDP
(*Markov Decision Process*)

Förenklande antaganden

- Diskret tid
- Ändligt antal handlingar a_i

$$a_i \in a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$$

- Ändligt antal tillstånd s_i

$$s_i \in s_1, s_2, s_3, \dots, s_m$$

- Omgivningen är en konstant MDP
(*Markov Decision Process*) Belöningen och nästa tillstånd
beror bara på s , a och slumpen

Förenklande antaganden

- Diskret tid
- Ändligt antal handlingar a_i

$$a_i \in a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$$

- Ändligt antal tillstånd s_i

$$s_i \in s_1, s_2, s_3, \dots, s_m$$

- Omgivningen är en konstant MDP
(*Markov Decision Process*) Belöningen och nästa tillstånd
beror bara på s , a och slumpen
- Deterministisk eller icke-deterministisk omgivning

Definition av problemet
Känd omgivning
Okänd omgivning
Förbättringar

Inlärningsituationen
Belönings roll
Förenklade antaganden
Centrala begrepp

Agentens interna representation

Agentens interna representation

- *Policy*

Den handling agenten väljer i varje tillstånd

$$\pi(s) \mapsto a$$

Agentens interna representation

- *Policy*

Den handling agenten väljer i varje tillstånd

$$\pi(s) \mapsto a$$

- *Värdefunktionen*

Förväntad framtida belöning från s när man följer policy π

$$V^\pi(s) \mapsto \mathbb{R}$$

Klassiskt modellproblem: *Grid World*

Klassiskt modellproblem: *Grid World*

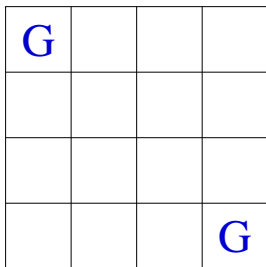
- Varje **tillstånd** representeras av en plats i ett rutnät

Klassiskt modellproblem: *Grid World*

- Varje **tillstånd** representeras av en plats i ett rutnät
- Agenten **handlar** genom att gå till andra rutor

Klassiskt modellproblem: *Grid World*

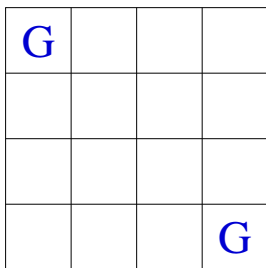
- Varje **tillstånd** representeras av en plats i ett rutnät
- Agenten **handlar** genom att gå till andra rutor



Trivial labyrint

Klassiskt modellproblem: *Grid World*

- Varje **tillstånd** representeras av en plats i ett rutnät
- Agenten **handlar** genom att gå till andra rutor



Trivial labyrint

Belöning: -1 i varje steg
tills man når något av
måltillstånden (G)

Värdet av ett tillstånd beror av aktuell policy.

Värdet av ett tillstånd beror av aktuell policy.

0	-1	-2	-3
-1	-2	-3	-2
-2	-3	-2	-1
-3	-2	-1	0

V vid
optimal policy

Värdet av ett tillstånd beror av aktuell policy.

0	-1	-2	-3
-1	-2	-3	-2
-2	-3	-2	-1
-3	-2	-1	0

V vid
optimal policy

0	-14	-20	-22
-14	-18	-22	-20
-20	-22	-18	-14
-22	-20	-14	0

V vid
slumpmässig policy

- 1 Definition av problemet
 - Inlärningssituationen
 - Belöningens roll
 - Förenklande antaganden
 - Centrala begrepp
- 2 **Känd omgivning**
 - Bellmans ekvation
 - Lösningsmetoder
- 3 Okänd omgivning
 - Monte-Carlo metoden
 - Temporal-Difference
 - Q-Learning
 - Sarsa-Learning
- 4 Förbättringar
 - Nyttan av att göra fel
 - Eligibility Trace

Modell av omgivningen

Modell av omgivningen

- Var hamnar vi?

$$\delta(s, a) \mapsto s'$$

Modell av omgivningen

- Var hamnar vi?

$$\delta(s, a) \mapsto s'$$

- Hur mycket belöning får vi?

$$r(s, a) \mapsto \mathbb{R}$$

Modell av omgivningen

- Var hamnar vi?

$$\delta(s, a) \mapsto s'$$

- Hur mycket belöning får vi?

$$r(s, a) \mapsto \mathbb{R}$$

Värdet av olika tillstånd hänger ihop

Modell av omgivningen

- Var hamnar vi?

$$\delta(s, a) \mapsto s'$$

- Hur mycket belöning får vi?

$$r(s, a) \mapsto \mathbb{R}$$

Värdet av olika tillstånd hänger ihop

Bellmans ekvation:

$$V^\pi(s) = r(s, \pi(s)) + \gamma \cdot V^\pi(\delta(s, \pi(s)))$$

Kan man lösa *Bellmans ekvation*?

$$V^\pi(s) = r(s, \pi(s)) + \gamma \cdot V^\pi(\delta(s, \pi(s)))$$

Kan man lösa *Bellmans ekvation*?

$$V^\pi(s) = r(s, \pi(s)) + \gamma \cdot V^\pi(\delta(s, \pi(s)))$$

- Direkt lösning (linjärt ekvationssystem)

Kan man lösa *Bellmans ekvation*?

$$V^\pi(s) = r(s, \pi(s)) + \gamma \cdot V^\pi(\delta(s, \pi(s)))$$

- Direkt lösning (linjärt ekvationssystem)
- Iterativt (*value iteration*)

$$V_{k+1}^\pi(s) \leftarrow r(s, \pi(s)) + \gamma \cdot V_k^\pi(\delta(s, \pi(s)))$$

Hur får man fram en optimal policy π^* ?

Hur får man fram en **optimal policy** π^* ?

Lätt om man visste den optimala värdefunktionen V^* :

$$\pi^*(s) = \operatorname{argmax}_a (r(s, a) + \gamma \cdot V^*(\delta(s, a)))$$

Hur får man fram en **optimal policy** π^* ?

Lätt om man visste den optimala värdefunktionen V^* :

$$\pi^*(s) = \operatorname{argmax}_a (r(s, a) + \gamma \cdot V^*(\delta(s, a)))$$

Optimala varianten av Bellmans ekvation

$$V^*(s) = \max_a (r(s, a) + \gamma \cdot V^*(\delta(s, a)))$$

Hur får man fram en **optimal policy** π^* ?

Lätt om man visste den optimala värdefunktionen V^* :

$$\pi^*(s) = \operatorname{argmax}_a (r(s, a) + \gamma \cdot V^*(\delta(s, a)))$$

Optimala varianten av Bellmans ekvation

$$V^*(s) = \max_a (r(s, a) + \gamma \cdot V^*(\delta(s, a)))$$

Svår att lösa

Hur får man fram en **optimal policy** π^* ?

Lätt om man visste den optimala värdefunktionen V^* :

$$\pi^*(s) = \operatorname{argmax}_a (r(s, a) + \gamma \cdot V^*(\delta(s, a)))$$

Optimala varianten av Bellmans ekvation

$$V^*(s) = \max_a (r(s, a) + \gamma \cdot V^*(\delta(s, a)))$$

Svår att lösa

Policy iteration:

Iterera policy och värdeberäkningarna växelvis

- 1 Definition av problemet
 - Inlärningssituationen
 - Belöningens roll
 - Förenklande antaganden
 - Centrala begrepp
- 2 Känd omgivning
 - Bellmans ekvation
 - Lösningsmetoder
- 3 Okänd omgivning**
 - Monte-Carlo metoden
 - Temporal-Difference
 - Q-Learning
 - Sarsa-Learning
- 4 Förbättringar
 - Nyttan av att göra fel
 - Eligibility Trace

Vanligen är $r(s, a)$ och $\delta(s, a)$ inte kända av agenten

Vanligen är $r(s, a)$ och $\delta(s, a)$ inte kända av agenten

V^π måste skattas genom **erfarenhet**

Vanligen är $r(s, a)$ och $\delta(s, a)$ inte kända av agenten

V^π måste skattas genom **erfarenhet**

Monte-Carlo tekniken

Vanligen är $r(s, a)$ och $\delta(s, a)$ inte kända av agenten

V^π måste skattas genom **erfarenhet**

Monte-Carlo tekniken

- Starta från slumpmässig s

Vanligen är $r(s, a)$ och $\delta(s, a)$ inte kända av agenten

V^π måste skattas genom **erfarenhet**

Monte-Carlo tekniken

- Starta från slumpmässig s
- Följ π , lagra belöningar och s_t

Vanligen är $r(s, a)$ och $\delta(s, a)$ inte kända av agenten

V^π måste skattas genom **erfarenhet**

Monte-Carlo tekniken

- Starta från slumpmässig s
- Följ π , lagra belöningar och s_t
- När man nått målet, uppdatera $V^\pi(s)$ -skattningen för alla besökta tillstånd med den framtida belöning man verkligen fick

Vanligen är $r(s, a)$ och $\delta(s, a)$ inte kända av agenten

V^π måste skattas genom **erfarenhet**

Monte-Carlo tekniken

- Starta från slumpmässig s
- Följ π , lagra belöningar och s_t
- När man nått målet, uppdatera $V^\pi(s)$ -skattningen för alla besökta tillstånd med den framtida belöning man verkligen fick

Mycket långsam konvergens

Temporal Difference

Temporal Difference

Idén bakom Temporal Difference:

Utnyttja att finns två skattningar för värdet av ett tillstånd:
före och efter

Temporal Difference

Idén bakom Temporal Difference:

Utnyttja att finns två skattningar för värdet av ett tillstånd:
före och efter

- Vad man tror **innan** man handlat

$$V^{\pi}(s_t)$$

Temporal Difference

Idén bakom Temporal Difference:

Utnyttja att finns två skattningar för värdet av ett tillstånd:
före och efter

- Vad man tror **innan** man handlat

$$V^{\pi}(s_t)$$

- Vad man tror **efter** man handlat

$$r_{t+1} + \gamma \cdot V^{\pi}(s_{t+1})$$

Viktig observation:

Den andra skattningen är bättre!

Viktig observation:

Den andra skattningen är bättre!

Uppdatera skattningen av värdet i riktning mot den bättre

Viktig observation:

Den andra skattningen är bättre!

Uppdatera skattningen av värdet i riktning mot den bättre

$$V^{\pi}(s_t) \leftarrow V^{\pi}(s_t) + \eta [r_{t+1} + \gamma \cdot V^{\pi}(s_{t+1}) - V^{\pi}(s_t)]$$

Viktig observation:

Den andra skattningen är bättre!

Uppdatera skattningen av värdet i riktning mot den bättre

$$V^\pi(s_t) \leftarrow V^\pi(s_t) + \eta [r_{t+1} + \gamma \cdot V^\pi(s_{t+1}) - V^\pi(s_t)]$$

Mått på **överraskningen** / **besvikelsen**

Viktig observation:

Den andra skattningen är bättre!

Uppdatera skattningen av värdet i riktning mot den bättre

$$V^{\pi}(s_t) \leftarrow V^{\pi}(s_t) + \eta [r_{t+1} + \gamma \cdot V^{\pi}(s_{t+1}) - V^{\pi}(s_t)]$$

Mått på **överraskningen** / **besvikelsen**

Lär sig *betydligt snabbare* än Monte-Carlo tekniken

Problem:

Även om man har skattat V bra kan man inte räkna ut π
eftersom agenten inte känner δ och r !

Problem:

Även om man har skattat V bra kan man inte räkna ut π eftersom agenten inte känner δ och r !

Trick:

Skatta $Q(s, a)$ istället för $V(s)$

Problem:

Även om man har skattat V bra kan man inte räkna ut π eftersom agenten inte känner δ och r !

Trick:

Skatta $Q(s, a)$ istället för $V(s)$

$Q(s, a)$: Förväntad total belöning när man gör a från s .

Problem:

Även om man har skattat V bra kan man inte räkna ut π eftersom agenten inte känner δ och r !

Trick:

Skatta $Q(s, a)$ istället för $V(s)$

$Q(s, a)$: Förväntad total belöning när man gör a från s .

$$\pi(s) = \operatorname{argmax}_a Q(s, a)$$

$$V^*(s) = \max_a Q^*(s, a)$$

Hur kan vi lära oss Q ?

Hur kan vi lära oss Q ?

Även Q -funktionen kan läras med Temporal-Difference

Hur kan vi lära oss Q ?

Även Q -funktionen kan läras med Temporal-Difference

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \eta \left[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right]$$

s' är nästa tillstånd.

Hur kan vi lära oss Q ?

Även Q -funktionen kan läras med Temporal-Difference

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \eta \left[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right]$$

s' är nästa tillstånd.

Litet problem: max-operationen kräver att man söker igenom alla tänkbara handlingar i nästa steg.

SARSA-learning

SARSA-learning

Nästan samma som Q-learning, men man låter **aktuell policy** bestämma a' :

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \eta [r + \gamma Q(s', a') - Q(s, a)]$$

SARSA-learning

Nästan samma som Q-learning, men man låter **aktuell policy** bestämma a' :

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \eta [r + \gamma Q(s', a') - Q(s, a)]$$

Har fått sitt namn av att "erfarenhets-tuplerna" har formen

$$\langle s, a, r, s', a' \rangle$$

- 1 Definition av problemet
 - Inlärningssituationen
 - Belöningens roll
 - Förenklande antaganden
 - Centrala begrepp
- 2 Känd omgivning
 - Bellmans ekvation
 - Lösningmetoder
- 3 Okänd omgivning
 - Monte-Carlo metoden
 - Temporal-Difference
 - Q-Learning
 - Sarsa-Learning
- 4 Förbättringar**
 - Nyttan av att göra fel
 - Eligibility Trace

Vad gör man när...

Vad gör man när...

- Omgivningen är inte fullt observerbar

Vad gör man när...

- Omgivningen är inte fullt observerbar
- Tillstånden är alltför många

Vad gör man när...

- Omgivningen är inte fullt observerbar
- Tillstånden är alltför många
- Tillstånden är inte diskreta

Vad gör man när...

- Omgivningen är inte fullt observerbar
- Tillstånden är alltför många
- Tillstånden är inte diskreta
- Agenten handlar i kontinuerlig tid

Exploration–Exploitation dilemmat

Om man följer en policy baserad på aktuell skattning av Q
konvergerar Q inte säkert mot Q^*

Exploration–Exploitation dilemmat

Om man följer en policy baserad på aktuell skattning av Q
konvergerar Q inte säkert mot Q^*

Enkel lösning:

Använd en policy som har viss sannolikhet att ”göra fel”

Exploration–Exploitation dilemmat

Om man följer en policy baserad på aktuell skattning av Q konvergerar Q inte säkert mot Q^*

Enkel lösning:

Använd en policy som har viss sannolikhet att ”göra fel”

- ϵ -greedy

Gör ibland (med sannolikheten ϵ) en slumpmässig handling istället för den som verkar bäst (giriga)

Exploration–Exploitation dilemmat

Om man följer en policy baserad på aktuell skattning av Q konvergerar Q inte säkert mot Q^*

Enkel lösning:

Använd en policy som har viss sannolikhet att ”göra fel”

- ϵ -greedy

Gör ibland (med sannolikheten ϵ) en slumpmässig handling istället för den som verkar bäst (giriga)

- Softmax

Vikta sannolikheten att göra olika handlingar med hur bra de verkar

Ytterligare uppsnabbning

Ytterligare uppsnabbning

Idé: TD-uppdateringarna kan utnyttjas till att förbättra skattningen även av tillstånd där vi varit tidigare.

Ytterligare uppsnabbning

Idé: TD-uppdateringarna kan utnyttjas till att förbättra skattningen även av tillstånd där vi varit tidigare.

$$\forall s, a : Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \eta [r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \cdot e$$

e är ett kvardröjande spår (**eligibility trace**) som beskriver hur länge sedan man var i s och gjorde a .

Ytterligare uppsnabbning

Idé: TD-uppdateringarna kan utnyttjas till att förbättra skattningen även av tillstånd där vi varit tidigare.

$$\forall s, a : Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \eta [r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \cdot e$$

e är ett kvardröjande spår (**eligibility trace**) som beskriver hur länge sedan man var i s och gjorde a .

Kallas ofta **TD(λ)** där λ är tidskonstanten för avklingningen av spåret