Modeli sveta in napovedovanje onkraj besedila

Katere raziskovalne smeri se ukvarjajo s predstavitvami, zaznavanjem in delovanjem?



NAPOVEDOVANJE IN DELOVANJE

Skrbno podprta razlaga izrazov, ki raziskovalnih dosežkov ne spreminja v obljube o izdelkih.

SLOVENSKA IZDAJA

september 2026
Praktična uporaba AI

Viri preverjeni 25. septembra 2026.

Video, v katerem kozarec drsi po mizi, je lahko videti prepričljivo. Robot, ki se odloča, ali naj kozarec potisne, potrebuje drugačne dokaze: kaj se zgodi po določenem potisku, kako negotova je napoved in ali izid ostane znotraj varnih meja. Privlačno zaporedje sličic samo po sebi ne odgovori na ta vprašanja.

Izraz »model sveta« zajema več sorodnih raziskovalnih pristopov, ne ene same dogovorjene kategorije izdelkov. Nekateri se učijo strnjenih predstavitev opažanj. Drugi napovedujejo, kako se okolje spremeni po dejanjih. Spet drugi ustvarjajo vidne prihodnje prizore ali pomagajo krmilniku izbirati vedenje. Razlike so jasnejše, če navedemo učni cilj in izvedeni preizkus, namesto da vsako uporabo izraza razumemo kot trditev o razumevanju fizikalnega sveta.

Predstavitev ni pomanjšan film

Predstavitev izbrane informacije o opažanju zakodira v števila. Slika iz kamere vsebuje veliko slikovnih pik; kodirnik jo pretvori v manjši ali drugače urejen nabor značilk, ki jih lahko uporabi naslednji del sistema. Te značilke se ne ujemajo nujno s človeškimi oznakami, kot sta »kozarec« ali »spolzka površina«. Kaj ohranijo, je odvisno od učnega cilja in podatkov.

V modelu dinamike, pogojenem z dejanji, trenutna predstavitev in predlagano dejanje skupaj omogočita napoved poznejšega stanja. S ponavljanjem tega postopka dobimo napovedano zaporedje, eno od možnih prihodnosti. Krmilnik lahko takšna

zaporedja primerja s ciljem. Dekodirnik lahko napovedane predstavitve pretvori tudi v slike, vendar krmilnik za njihovo uporabo ne potrebuje vidnega filma. Članka World Models in DreamerV3 prikazujeta različni razporeditvi teh sestavnih delov.[1] [3]

Predmet raziskave	Kaj napovedujemo oziroma česa se model uči?	Kaj morajo pokazati dokazi?
Napovedna predstavitev	Značilke manjkajočih opažanj	Ali naučene značilke pomagajo pri ločenih nalogah; primer je I-JEPA.[2]
Ustvarjanje videa	Zaporedja slik, lahko prek latentne predstavitve	Vizualna kakovost ne zadošča za dokaz točnih posledic dejanj; V-JEPA 2 ocenjuje tudi prilagojen generativni primerjalni model.[4]
Dinamika, pogojena z dejanji	Prihodnja stanja ob predlaganih dejanjih	Ali napovedi ostanejo uporabne, ko krmilnik dejansko ukrepa.[1][4]
Odločitvena strategija, naučena z zamišljenimi izkušnjami	Vedenje, optimizirano z naučenim modelom	Ali vedenje uspe v okolju naloge, ne le v zamišljenih zaporedjih. [3]
Načrtovanje z naučenim modelom	Izbrano zaporedje dejanj do cilja	Ali izvedena dejanja dosežejo cilj v preverjanih pogojih.[4]

Kategorije se lahko prekrivajo. Generativni model lahko uporabimo za krmiljenje, če dodamo ustrezno pogojevanje z dejanji in ocenjevanje. Negenerativna predstavitev je lahko uporabna, ne da bi ustvarjala slike. Nobena od teh oznak sama po sebi ne določa točnosti ali varnosti.

Štirje raziskovalni primeri z različnimi trditvami

Ha in Schmidhuber sta v članku *World Models* iz leta 2018 združila vizualni kodirnik, rekurentni model časovnih sprememb in majhen krmilnik. Vizualni del je stisnil slikovne sličice, rekurentni del pa napovedoval porazdelitev prihodnjih latentnih stanj glede na dejanja in predhodni potek.[1] »Latentno« pomeni, da je stanje notranja predstavitev, ne izvirna zbirka slikovnih pik. Porazdelitev dopušča več možnih izidov, namesto da bi vztrajala pri eni prihodnosti.

V poskusu VizDoom Take Cover sta avtorja zbrala zaporedja naključnih dejanj, naučila model in znotraj naučenega navideznega okolja optimizirala krmilnik. Nato sta ga preverila v izvirnem igralnem okolju.[1] Šlo je za prenos iz naučenega približka v programirano igro, ne iz videa na nenadzorovano fizično delovišče. Članek je opisal tudi krmilnike, ki so izkoriščali napake modela, med drugim vedenje, ki je navideznim pošastim preprečevalo običajno streljanje.[1] Model je lahko uporaben in hkrati vsebuje napake, ki jih je mogoče izkoristiti.

Članek o I-JEPA iz leta 2023 je obravnaval drugo vprašanje. Njegova arhitektura Image-based Joint-Embedding Predictive Architecture je iz vidnega kontekstnega območja napovedovala

predstavitve skritih delov slike, namesto da bi te dele rekonstruirala slikovno piko za slikovno piko.[2] Ločen ciljni kodirnik je pripravljal značilke, ki jih je bilo treba napovedati. Med učenjem so prilagajali kontekstni kodirnik in napovedovalnik, ciljni kodirnik pa posodabljali z eksponentnim drsečim povprečjem uteži kontekstnega kodirnika.[2] Preprosteje povedano: ciljna mreža je sledila zglajeni zgodovini učeče se mreže, namesto da bi jo neodvisno prilagajali vsaki napaki napovedi.

Avtorji so naučene slikovne značilke ocenjevali pri nalogah, kot so razvrščanje, štetje predmetov in napovedovanje globine.[2] To so preizkusi uporabnosti predstavitev po protokolih iz članka. Navedeni I-JEPA ni robotski krmilnik, pogojen z dejanji, skrivanje dela mirujoče slike pa ni ista naloga kot napovedovanje posledic potiska. Predstavitev lahko prepozna skodelico, vendar še vedno izpusti njeno maso, trenje pri oprijemu ali skrito vsebino.

Različica DreamerV3 iz januarja 2023 povezuje naučeno dinamiko s spodbujevalnim učenjem. Uči model sveta, kritika, ki ocenjuje prihodnjo skupno nagrado, in akterja, ki izbira dejanja. Akter in kritik se vedenja učita iz zaporedij, ki jih napoveduje model sveta.[3] Članek poroča o rezultatih v določenih krmilnih in igralnih okoljih, med drugim o pridobivanju diamantov v Minecraftu brez človeških zgledov ali vnaprej načrtovanega stopnjevanja učnih nalog.[3] To so poskusi, o katerih poročajo avtorji, ne preizkusi, ponovljeni za ta vodič.

Pri povzemanju zlahka izgubimo uporabno podrobnost: med interakcijo z okoljem ta različica DreamerV3 izbira dejanja iz akterja, ne da bi takrat načrtovala s pogledom v prihodnje korake.

[3] Zamišljene izkušnje uporablja za učenje odločitvene strategije; ni nujno, da pred vsakim dejanskim dejanjem znova preišče drevo možnih prihodnosti. Tudi uporaba enakih nastavitev algoritma pri različnih nalogah ne pomeni, da en predhodno naučen agent že obvlada vse naloge. Učni postopek še vedno uporablja izkušnje iz okolja.

Članek V-JEPA 2 iz junija 2025 loči predhodno učenje iz opažanj od poznejšega učenja, pogojenega z dejanji. Začetni model se uči iz videa in slik, ne da bi bil pogojen z robotskimi dejanji. Avtorji nato zamrznejo video kodirnik in s podatki o robotskih interakcijah naučijo napovedovalnik, pogojen z dejanji. Tako nastane V-JEPA 2-AC.**[4]** Razlika je pomembna: samo gledanje videa ne daje enakih dokazov kot opazovanje zabeleženih posledic ukazanih dejanj.

Članek za učenje dela, pogojenega z dejanji, opisuje manj kot 62 ur robotskega videa iz zbirke DROID, poleg precej večjega nabora za predhodno učenje. »Neoznačeno« tu ne pomeni podatkov brez dejanj ali stanja robota: avtorji uporabljajo video in podatke o stanju končnega člena robota, ne uporabljajo pa oznak nalog, uspešnosti ali nagrad.**[4]** Poročajo o načrtovanju na podlagi ciljnih slik z rokami Franka v dveh laboratorijih, ki nista bila vključena v DROID, brez zbiranja učnih podatkov s tam nameščenih robotov. **[4]** »Zero-shot« se nanaša na ta pogoj prenosa; ne pomeni, da prej ni bilo nobenega učenja na robotskih podatkih.

Omejitve so konkretne. Skupina je ročno preizkusila različne položaje kamere, preden je izbrala takšnega, ki je deloval v njenih poskusih. Pri prijemanju in prestavljanju predmetov je model poleg slike končnega cilja prejel še dve sliki vmesnih ciljev; med cilji je preklapljal po vnaprej določenem številu korakov. Članek

obravnava tudi kopičenje napak pri daljših napovedanih zaporedjih in odvisnost od slikovnih ciljev.[4] Poročana primerjava načrtovanja vključuje postavitev V-JEPA 2-AC z 800 vzorci, 10 ponovitvami izpopolnjevanja in obzorjem enega dejanja; izračun posameznega dejanja je na eni kartici RTX 4090 trajal 16 sekund. [4] To je pogoj poskusa, ne obljuba o odzivnem času kateregakoli današnjega izdelka ali vsake izvedbe.

Izmišljen rastlinjak: primerjava dejanj pred izbiro

Predstavljajmo si izmišljenega pridelovalca, ki raziskuje odločitve o ogrevanju majhnega rastlinjaka. To je računski učni model, ne naučen sistem, vrtnarsko priporočilo ali krmilnik, povezan z opremo. Predpostavimo začetno notranjo temperaturo 18 °C, stalno zunanjo temperaturo 10 °C in desetminutni korak odločanja. Grelnik je izklopljen, a = 0, ali vklopljen, a = 1.

Pridelovalec zapiše poenostavljeno pravilo dinamike, v katerem je x notranja, o pa zunanja temperatura:

```
x_next = 0.9*x + 0.1*o + 2.5*a
```

Koeficienti so izmišljeni. Prva člena opisujeta približevanje zunanji temperaturi, zadnji pa predpostavljeni učinek ogrevanja. Naučen model bi lahko iz opažanj in dejanj ocenil bolj zapleteno povezavo. Ročno zapisana enačba še ni nevronski model sveta. Omogoča pa pregled mehanizma načrtovanja, preden začnemo razmišljati o naučenih alternativah.

Načrtujemo dva koraka naprej s ciljem 20 °C. Uporabimo ponazoritveno merilo J, ki združuje kvadrat napake končne temperature in pribitek 0,5 za vsak interval z vklopljenim grelnikom:

```
J = (x2 - 20)^2 + 0.5*(a0 + a1)
```

To je izbran način ocenjevanja, ne račun v evrih ali fizikalni zakon. Utež določa kompromis med uporabo grelnika in temperaturno napako. Dodamo še neodvisno zgornjo mejo: zavrnemo vsak predlog, ki v kateremkoli koraku napoveduje temperaturo nad 21 °C. Izmišljena meja prikazuje omejitev; ni varna meja gojenja za katerokoli določeno rastlino.

Zaporedje grelnika

Izklop, izklop

Temperatura po 1. koraku	17,2 °C
Po 2. koraku	16,48 °C
Vrednost J	12,3904
Znotraj predpostavljene meje?	Da

Izklop, vklop

Temperatura po 1. koraku	17,2 °C
Po 2. koraku	18,98 °C
Vrednost J	1,5404
Znotraj predpostavljene meje?	Da

Vklop, izklop

Temperatura po 1. koraku	19,7 °C
Po 2. koraku	18,73 °C
Vrednost J	2,1129
Znotraj predpostavljene meje?	Da

Vklop, vklop

Temperatura po 1. koraku	19,7 °C
Po 2. koraku	21,23 °C
Vrednost J	2,5129
Znotraj predpostavljene meje?	Ne

Ogrevanje v drugem intervalu na primer da 0,9 × 17,2 + 0,1 × 10 + 2,5 = 18,98 °C. Vrednost merila je (18,98 − 20)² + 0,5 = 1,5404. Ob teh predpostavkah ima zaporedje izklop, nato vklop najnižjo

vrednost med dovoljenimi možnostmi. Pri poznejšem ogrevanju se pred končno meritvijo izgubi manj dodane toplote. Izračun pokaže tudi šibkost cilja: ocenjuje končno napako, ne vseh temperatur med potekom.

Pri krmilniku s pomičnim obzorjem izvedemo samo prvo dejanje. Sistem nato odčita novo temperaturo in ponovno načrtuje. V-JEPA 2-AC uporablja soroden vzorec: načrtuje s prihodnjimi predstavitvami, izvede prvo dejanje in znova načrtuje, čeprav so robotska opažanja in optimizacija precej bolj zapleteni od te enačbe.**[4]**

Izmišljeni pridelovalec mora odločiti, ali je začasni padec temperature sprejemljiv in ali kratko obzorje zanemarja pomembne poznejše učinke. Dodana najnižja dovoljena temperatura v vsakem koraku bi lahko spremenila izbrano zaporedje. To so zahteve, ki jih je treba določiti pred učenjem ali preizkušanjem, ne podrobnosti, o katerih lahko odloči vizualno prepričljiva napoved.

Ko je napačna napoved videti uporabna

Predpostavimo, da vhodni podatek o zunanji temperaturi napačno ostane pri 10 °C, dejanska zunanja temperatura pa je 0 °C. Po isti izmišljeni enačbi prvi korak z izklopljenim grelnikom doseže 16,2 °C namesto napovedanih 17,2 °C. To je izračun ob spremenjenem pogoju, ne zabeležen dogodek v rastlinjaku. Če sistem neopazno nadaljuje iz lastne napovedi, napaka postane izhodišče za naslednje odločitve.

Ponovno odčitavanje tipala razkrije odstopanje, modela pa ne popravi samodejno. Vzrok je lahko napačen vremenski podatek, okvarjeno tipalo, odprta zračna loputa ali neustrezna enačba dinamike. Smiselno zasnovan krmilnik bi prenehal zaupati nepodprtim napovedim, uporabil ločeno določeni rezervni način in ohranil opažanja za preiskavo. Naučen model ne sme biti edini del sistema, ki uveljavlja omejitve opreme.

Manj očitna napaka so manjkajoče informacije v predstavitvi. Kamera lahko pokaže liste, ne pa vlažnosti tal; stisnjen vektor značilk lahko zavrže celo informacije, ki so bile vidne. Točno napovedovanje ohranjenih značilk ne more povrniti dejstev, ki jih predstavitev nikoli ni zajela. Članek V-JEPA 2 izrecno navaja, da zmožnosti modela sveta v predstavitvenem prostoru omejujejo informacije o stanju, ki so v njem zakodirane.**[4]**

Načrtovanje doda novo težavo: namenoma išče navidezno ugodne prihodnosti. Zaporedje je lahko videti posebej dobro zato, ker vodi v slabo modelirano območje, ne zato, ker je res učinkovito. Zloraba, opisana v *World Models*, to težavo nazorno pokaže.**[1]** Lepše ustvarjene sličice ne bi nujno odpravile napake v dinamiki. Pomemben preizkus je, ali izbrana dejanja še vedno delujejo, ko jih izvedemo v predvidenem okolju.

Napovedovanje in krmiljenje ocenjujemo ločeno

Pri predlogu za rastlinjak najprej preverimo napovedi na shranjenih zaporedjih opažanj in dejanj, ki niso bila uporabljena pri učenju ali izbiri modela. Izmerimo temperaturno napako v naslednjem koraku in pri daljšem obzorju. Ločimo celotna

vremenska obdobja, namesto da sosednje meritve naključno razdelimo: sosednji odčitki so lahko skoraj podvojeni. Model primerjamo s preprostim izhodiščem, na primer z napovedjo, da temperatura ostane nespremenjena, delovanje ob nenadnih vremenskih spremembah pa poročamo posebej.

Zabeležena zaporedja imajo omejitev. Pokažejo, kaj se je zgodilo po dejansko izvedenih dejanjih, ne pa vseh možnosti, ki bi jih lahko obravnaval načrtovalec. Če grelnik v blagem vremenu nikoli ni bil vklopljen, ti zapisi sami po sebi ne morejo potrditi modelove napovedi učinka takšnega vklopa. Za preverjanje posledic neizbranih dejanj potrebujemo ustrezne eksperimentalne dokaze ali neodvisno utemeljen simulator. Manjša napaka napovedovanja na znanih zaporedjih te vrzeli ne odpravi.

Nato sistem odločanja primerjamo s preprostim termostatskim pravilom v dovoljenem in omejenem preizkusu. Spremljamo čas zunaj izbranega temperaturnega območja, porabo energije, pogostost posegov in napake, ne le lastnega cilja modela. Če model podaja intervale negotovosti, njihovo pokritost preverimo na ločenih testnih podatkih, namesto da bi podatek o zaupanju obravnavali kot jamstvo. Model z dobrimi povprečnimi napovedmi se lahko blizu temperaturne meje še vedno odloča slabo.

Pri raziskavi robotike ustrezna vprašanja zadevajo začetne pogoje, predmete, kamere, opise ciljev, število poskusov, človeško pomoč in čas do izvedbe dejanja. Pri videosistemu je smiselno preverjati vizualno neprekinjenost in prepričljivost gibanja,

vendar to ne nadomesti nadzorovanega preverjanja povezave med dejanjem in izidom. Če različne preizkuse združimo v eno lestvico, skrijemo, kaj je moral posamezen sistem sploh narediti.

Ti članki prikazujejo določene mehanizme predstavitve, napovedovanja in krmiljenja. Ne dokazujejo, da je na voljo splošno uporaben delavec za poljubno delavnico ali rastlinjak. Uporaben predlog navede opazovano stanje, vmesnik za dejanja, obzorje napovedi, cilj in neodvisnega ocenjevalnika. Če to manjka, je »model sveta« še vedno raziskovalna oznaka, ne dovolj informacij za odločitev, ali lahko sistemu zaupamo nalogo.

Viri

Številke virov veljajo za ta vodnik. Povezave vodijo do izvirnih dokumentov. Pred uporabo preverite besedilo, pogoje uporabe in razpoložljivost storitev.

[1] **World Models**
https://arxiv.org/pdf/1803.10122v4

[2] **Self-Supervised Learning from Images with a Joint-Embedding Predictive Architecture**
https://arxiv.org/pdf/2301.08243v3

[3] **Mastering Diverse Domains through World Models**
https://arxiv.org/pdf/2301.04104v1

[4] **V-JEPA 2: Self-Supervised Video Models Enable Understanding, Prediction and Planning**
https://arxiv.org/pdf/2506.09985v1