

Dinamik Proqramlaşdırma və Qərar Ağaclarının Yanaşması ilə İzaholunan Süni İntellekt Agenti

Vüqar Hüseynli

Dövlət Təhlükəsizliyi Xidmətinin Heydər Əliyev adına Akademiyası, Bakı, Azərbaycan
huseynliq@gmail.com

Xülasə— Müasir süni intellekt (Sİ) sistemləri mürəkkəb qərarvermə, optimallaşdırma və vəziyyətlərə keçid problemlərinin həllinə əsaslanır. Bu problemlərin böyük əksəriyyəti dinamik proqramlaşdırma (DP), ağac və qraf strukturlarının birgə istifadəsinə tələb edir. Məqalədə DP-nin optimal qərarların saxlanması və yenidən istifadəsindəki rolu, ağacların qərar ardıcılığını formalaşdırmaq funksiyası və qraf strukturlarının vəziyyət məkanını modelləşdirmədəki əhəmiyyəti sistemli şəkildə araşdırılır. Bundan əlavə, heç bir xarici kitabxanaya ehtiyac olmadan DP, ağac və qraf strukturlarına əsaslanan Sİ alqoritmi və onun riyazi modeli təqdim olunur, iş həm tədris, həm də fundamental tədqiqatlar üçün nəzəri və praktik baza rolunu oynayır.

Açar sözlər— süni intellekt agentləri; dinamik proqramlaşdırma; qərar ağacları; qraflar nəzəriyyəsi.

I. Giriş

Son illərdə süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının sürətli inkişafı nəticəsində qərarvermə, optimallaşdırma və mürəkkəb sistemlərin modelləşdirilməsi sahəsində əhəmiyyətli nailiyyətlər əldə edilmişdir. Xüsusilə maşın öyrənməsi və dərin neyron şəbəkələrinə əsaslanan yanaşmalar müxtəlif tətbiq sahələrində yüksək nəticələr göstərmişdir. Lakin bu modellərin böyük əksəriyyəti “black-box” xarakterli olduğundan, yəni daxili qərar mexanizmləri insan üçün anlaşılan formada təqdim olunmadığından, bir çox kritik sahələrdə onların tətbiqi ciddi məhdudiyyətlərlə üzləşir.

Tibbi diaqnostika, aviasiya, informasiya təhlükəsizliyi, maliyyə analizi və qərar dəstəyi sistemləri kimi sahələrdə yalnız düzgün nəticə əldə etmək kifayət etmir, eyni zamanda həmin nəticənin hansı məntiqi ardıcılıqla və hansı qərarlar əsasında formalaşdığını izah etmək zərurəti yaranır. Bu tələbat izaholunan süni intellekt (Explainable Artificial Intelligence – XAI) anlayışının formalaşmasına və son illərdə intensiv tədqiqat obyektinə çevrilməsinə səbəb olmuşdur.

İzaholunan Sİ yanaşmaları çərçivəsində klassik alqoritmik metodlar yenidən aktualıq qazanmışdır. Dinamik proqramlaşdırma, qərar ağacları və qraflar nəzəriyyəsinə əsaslanan modellər deterministik, şəffaf və riyazi cəhətdən əsaslandırılabilir bilən strukturlar təqdim etdiklərinə görə izaholunabilir baxımından üstün mövqeyə malikdir. Bu metodlar agentin hər bir qərarını əvvəlki vəziyyətlər və optimal seçimlər əsasında formalaşdırmağa imkan verir və nəticədə qərarvermə prosesi addım-addım izlənilə bilər.

Dinamik proqramlaşdırma optimal alt-struktur və təkrarlanan alt-məsələlər prinsiplərinə əsaslanaraq mürəkkəb problemləri daha sadə alt-məsələlərə bölməklə həll edir. Bu yanaşma xüsusilə optimal yolun tapılması, resursların bölüşdürülməsi və vəziyyətlərə keçidlərin qiymətləndirilməsi problemlərində effektiv nəticələr verir. Qraflar nəzəriyyəsi isə vəziyyət məkanını düyünlər və keçidlər şəklində modelləşdirərək agentin mümkün hərəkət trayektoriyalarını formal şəkildə ifadə etməyə imkan yaradır.

Qərar ağacları süni intellekt sistemlərində qərarların ardıcılığını və səbəb-nəticə əlaqələrini strukturlaşdırılmış formada təqdim edən əsas modellərdən biridir. Ağac strukturu vasitəsilə agentin hər bir mərhələdə hansı qərarı niyə verdiyini vizual və məntiqi baxımdan izah etmək mümkündür. Bu xüsusiyyət qərar ağaclarını həm tədris, həm də izaholunan Sİ sistemlərinin qurulması üçün əlverişli edir.

Bu məqalədə dinamik proqramlaşdırma, qraf strukturları və qərar ağaclarının inteqrasiyasına əsaslanan izaholunan süni intellekt agentini təqdim olunur. Təklif edilən yanaşmada vəziyyətlər qrafın düyünləri, keçidlər isə çəkirlər (weights) vasitəsilə modelləşdirilir. Dinamik proqramlaşdırma mexanizmi hər bir vəziyyət üçün minimal xərci hesablayır və optimal qərarları yadda saxlayır. Eyni zamanda, valideyn (parent) göstəriciləri vasitəsilə qərar ağacı formalaşdırılır və agentin seçdiyi yol bərpa edilərək izah edilir.

Məqalənin əsas töhfələri aşağıdakı kimi ümumiləşdirilə bilər:

- Dinamik proqramlaşdırma, qraf və qərar ağacı strukturlarının vahid izaholunan Sİ modeli çərçivəsində inteqrasiyası;
- Heç bir xarici kitabxanadan istifadə olunmadan sadə və deterministik alqoritmin təqdim edilməsi;
- Agentin qərarvermə prosesinin tam izah edilə bilən formada qurulması;
- Tədris və fundamental tədqiqatlar üçün əlverişli nəzəri və praktik baza yaradılması.

II. ƏLAQƏLİ İŞLƏR VƏ NƏZƏRİ ƏSASLAR

Süni intellekt sistemlərinin qurulmasında istifadə olunan metodlar tarixi baxımdan iki əsas istiqamətdə inkişaf etmişdir: statistik-öyrənən modellər və klassik alqoritmik yanaşmalar. Son dövrlərdə dərin öyrənmə metodları geniş yayılmasına

baxmayaraq, izaholunanlıq və deterministik davranış tələb olunan sahələrdə alqoritmik əsaslı modellər hələ də öz aktuallığını qoruyur. Bu bölmədə dinamik proqramlaşdırma, qərar ağacları və qraflar nəzəriyyəsinə əsaslanan yanaşmaların nəzəri əsasları və əlaqəli elmi işlər ümumiləşdirilir.

A. Dinamik proqramlaşdırma yanaşması

Dinamik proqramlaşdırma mürəkkəb optimallaşdırma problemlərinin həlli üçün effektiv alqoritmik yanaşmalardan biridir və ilk dəfə R. Bellman tərəfindən formal şəkildə təqdim edilmişdir. Bu metodun əsasını optimal alt-struktur prinsipi təşkil edir; yəni problemin optimal həlli onun alt-məsələlərinin optimal həllərindən asılıdır. Eyni zamanda, DP təkrarlanan alt-məsələlərin nəticələrini yadda saxlayaraq hesablamada mürəkkəbliyini əhəmiyyətli dərəcədə azaldır.

Dinamik proqramlaşdırma süni intellekt kontekstində vəziyyətlərə keçidlərin qiymətləndirilməsi, optimal yolun tapılması və qərar ardıcılığının formallaşdırılması kimi məsələlərdə geniş tətbiq olunur. Xüsusilə istiqamətli asiklik qraflar (Directed Acyclic Graph) üzərində DP alqoritmləri sadə iterativ mexanizmə malik olub, rekursiv yanaşmalara nisbətən daha stabil və izah edilə bilən struktur təqdim edir. Bu xüsusiyyətlər DP-ni izaholunan süni intellekt modelləri üçün uyğun alətə çevirir.

B. Qərar ağacları və izaholunanlıq

Qərar ağacları süni intellekt və maşın öyrənməsi sahəsində ən geniş yayılmış izaholunan modellərdən biridir. Bu strukturlar qərarvermə prosesini düynələr və budaqlar şəklində təqdim edərək, hər bir qərarın hansı şərtə əsaslandığını aydın şəkildə göstərir. Qərar ağaclarının əsas üstünlüyü onların vizual və məntiqi baxımdan asan başa düşülməsidir.

İzaholunan Sİ kontekstində qərar ağacları yalnız nəticəni deyil, həmin nəticəyə aparacaq qərar ardıcılığını da təqdim edir. Bu xüsusiyyət insan–maşın qarşılıqlı əlaqəsində etimadın formalaşmasına mühüm töhfə verir. Bir çox elmi işlərdə qərar ağacları digər alqoritmik metodlarla, xüsusilə optimallaşdırma və qraf əsaslı modellərlə inteqrasiya edilərək hibrid yanaşmalar yaradılmışdır.

Bu məqalədə qərar ağacı klassik təsnifat modeli kimi deyil, dinamik proqramlaşdırma nəticəsində formalaşan optimal qərarların ardıcılığını saxlayan struktur kimi istifadə olunur. Bu yanaşma agentin verdiyi qərarların səbəb–nəticə əlaqələrini aydın şəkildə izah etməyə imkan verir.

C. Qraflar nəzəriyyəsi və vəziyyətlər fəzasının modelləşdirilməsi

Qraf nəzəriyyəsi süni intellekt sistemlərində vəziyyətlər fəzasının riyazi modelləşdirilməsi üçün fundamental alət hesab olunur. Qrafın düyünləri sistemin mümkün vəziyyətlərini, kənarları isə bu vəziyyətlər arasında keçidləri ifadə edir. Çəkili qraflar keçidlərin qiymətini və ya xərcini nəzərə almağa imkan verdiyindən optimallaşdırma problemlərində xüsusi əhəmiyyət daşıyır.

Bir çox klassik süni intellekt problemləri, o cümlədən planlaşdırma, yol tapma və agent əsaslı modellər qraf strukturları üzərində formallaşdırılır. Yönlü və asiklik qraflar

(DAG) isə dövr olmayan struktura malik olduqlarına görə dinamik proqramlaşdırma ilə birgə istifadəyə xüsusilə uyğundur. Bu tip qraflarda vəziyyətlər ardıcıl şəkildə qiymətləndirilir və optimal qərarlar sadə iterativ mexanizm vasitəsilə əldə edilir.

Təklif olunan modeldə qraf strukturu agentin mümkün vəziyyətlərini və bu vəziyyətlər arasında keçid xərclərini formal şəkildə təqdim edir. Dinamik proqramlaşdırma qraf üzərində optimal yolu hesablamaq üçün istifadə olunur, qərar ağacı isə həmin yolun izahını təmin edən əlavə struktur rolunu oynayır.

D. Mövcud yanaşmaların məhdudiyyətləri

Əlaqəli elmi işlərin təhlili göstərir ki, bir çox müasir Sİ modelləri yüksək dəqiqlik nümayiş etdirsə də, onların qərarvermə mexanizmləri insan üçün anlaşılan deyil. Xüsusilə neyron şəbəkələrə əsaslanan modellərdə qərarların izahı əlavə alətlər və aproksimasiya metodları tələb edir. Bu isə sistemi daha mürəkkəb və qeyri-şəffaf edir [1].

Bu baxımdan, dinamik proqramlaşdırma, qraf və qərar ağaclarına əsaslanan klassik alqoritmik yanaşmalar izaholunanlıq, deterministik davranış və riyazi əsaslandırma baxımından üstünlük təşkil edir. Təklif olunan yanaşma məhz bu üstünlükləri bir model çərçivəsində birləşdirərək izaholunan süni intellekt agentinin qurulmasını hədəfləyir.

III. PROBLEM QOYULUŞU VƏ RIYAZI MODEL

Bu məqalədə nəzərdən keçirilən problem süni intellekt agentinin diskret vəziyyətlər məkanında optimal qərarvermə prosesinin qurulması və həmin prosesin izah edilə bilən formada təqdim edilməsidir. Agentin məqsədi başlanğıc vəziyyətdən son vəziyyətə minimal xərc ilə çatmaq və bu proses ərzində verilən qərarların məntiqi ardıcılığını saxlamaqdan ibarətdir. Problem qraflar nəzəriyyəsi və dinamik proqramlaşdırma çərçivəsində formal şəkildə ifadə olunur.

A. Vəziyyətlər fəzasının formal təsviri

Vəziyyətlər fəzası yönümlü çəkili qraf vasitəsilə modelləşdirilir və aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$G = (V, E) \quad (1)$$

burada,

$V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n-1}\}$ – mümkün vəziyyətlərin sonlu çoxluğu,

$E \subseteq V \times V$ – vəziyyətlər arasında mümkün keçidləri ifadə edən əlaqələr çoxluğudur.

Hər bir kənar $(u, v) \in E$ müsbət çəkili xərc funksiyası ilə xarakterizə olunur:

$$w(u, v) > 0 \quad (2)$$

Bu çəki agentin u vəziyyətindən v vəziyyətinə keçməsi üçün tələb olunan xərci ifadə edir. Qrafın yönümlü və asiklik (DAG) olduğu qəbul edilir ki, bu da dinamik proqramlaşdırmanın iterativ şəkildə tətbiqinə imkan yaradır.

B. Məqsəd funksiyası

Agent üçün əsas məqsəd başlanğıc vəziyyətdən verilmiş hədəf vəziyyətinə minimal ümumi xərc ilə çatmaqdır. Bu məqsəd funksiyası aşağıdakı kimi formalizə olunur:

$$\min \sum_{(u,v) \in P} w(u,v) \quad (3)$$

burada P başlanğıc düyünündən hədəf düyününə qədər olan mümkün keçidlər ardıcılığını (yolu) ifadə edir.

C. Dinamik proqramlaşdırma formulu

Dinamik proqramlaşdırma yanaşmasına əsasən, hər bir vəziyyət üçün minimal xərc aşağıdakı rekursiv formula əsasında hesablanır:

$$dp[v] = \min_{(u,v) \in E} (dp[u] + w(u,v)) \quad (4)$$

burada

$dp[v]$ — başlanğıc vəziyyətdən v vəziyyətinə qədər olan minimal xərci göstərir.

Başlanğıc vəziyyət üçün sərhad şərti aşağıdakı kimi verilir:

$$dp[s] = 0 \quad (5)$$

burada s başlanğıc düyünüdür. Digər bütün düyünlər üçün ilkin olaraq:

$$dp[v] = +\infty \quad (6)$$

qəbul edilir [2].

D. Qərar ağacının formalaşdırılması

İzaholunanlığı təmin etmək məqsədilə yalnız minimal xərcin hesablanması kifayət etmir. Hər bir vəziyyət üçün optimal qərarın hansı əvvəlki vəziyyətdən gəldiyini yadda saxlamaq tələb olunur. Bu məqsədlə valideyn funksiyası (parent pointer) müəyyən edilir:

$$parent[v] = u \quad (7)$$

əgər

$$dp[v] = dp[u] + w(u,v) \quad (8)$$

Bu yanaşma nəticəsində başlanğıc vəziyyətdən hədəf vəziyyətinə qədər olan optimal qərar ardıcılığı geriye doğru bərpa edilə bilər. Parent göstəriciləri qərar ağacının strukturunu formalaşdırır və agentin qərarvermə prosesinin izah olunmasını təmin edir.

E. Problemin xüsusiyyətləri

Təklif olunan model aşağıdakı xüsusiyyətlərə malikdir:

- Deterministik qərarvermə mexanizmi;
- Hesablama baxımından səmərəli iterativ DP yanaşması;
- Qraf strukturu üzərində formal riyazi əsaslandırma;
- Qərar ağacı vasitəsilə tam izah edilə bilən nəticə.

Bu riyazi model növbəti bölmədə təqdim edilən alqoritmik yanaşmanın əsasını təşkil edir və süni intellekt agentinin qurulması üçün nəzəri çərçivə yaradır.

IV. DİNAMİK PROQRAMLAŞDIRMA, QRAF STRUKTURU VƏ QƏRAR AĞAQLARININ İNTEQRASIYASI

Bu bölmədə izaholunan süni intellekt agentinin qurulması üçün təklif olunan metod ətraflı şəkildə izah edilir. Yanaşmanın əsas ideyası dinamik proqramlaşdırma, qraf strukturları və qərar ağaclarının vahid alqoritmik çərçivədə birləşdirilməsindən ibarətdir. Bu inteqrasiya agentə optimal qərarlar verməklə yanaşı, həmin qərarların səbəblərini də strukturlaşdırılmış və anlaşılan formada təqdim etməyə imkan yaradır.

A. Sistem arxitekturası

Təklif olunan süni intellekt agentinin arxitekturası üç əsas komponentdən ibarətdir:

- Qraf əsaslı vəziyyət modeli,
- Dinamik proqramlaşdırma mexanizmi,
- Qərar ağacı və izah modulu.

Qraf əsaslı model agentin mövcud olduğu mühitdəki bütün mümkün vəziyyətləri və bu vəziyyətlər arasında icazə verilən keçidləri təsvir edir. Dinamik proqramlaşdırma mexanizmi bu qraf üzərində optimal qərarların hesablanması təmin edir. Qərar ağacı isə DP nəticəsində əldə olunan optimal qərar ardıcılığını saxlayaraq agentin davranışını izah edən struktur rolunu oynayır.

Bu komponentlərin qarşılıqlı əlaqəsi agentin həm effektiv, həm də izah edilə bilən davranış nümayiş etdirməsini təmin edir.

B. Qraf üzərində iterativ dinamik proqramlaşdırma

Qrafın yönümlü və asiklik (DAG) olduğu fərz edildiyindən, dinamik proqramlaşdırma iterativ şəkildə həyata keçirilir. Qrafın düyünləri topoloji ardıcılıqla emal olunur və hər bir düyün üçün minimal xərc hesablanır. Bu yanaşma rekursiv çağırışlardan qaçmağa və hesablama prosesinin şəffaflığını artırmağa imkan verir.

Hər bir vəziyyət üçün DP cədvəli aşağıdakı qaydaya əsasən yenilənir:

- Cari vəziyyətin bütün çıxış kənarları nəzərdən keçirilir;
- Keçid xərci cari vəziyyətin minimal xərci ilə toplanır;
- Əgər yeni hesablanan dəyər mövcud dəyərdən kiçikdirsə, DP cədvəli yenilənir.

Bu mexanizm agentin bütün mümkün qərarları sistemli şəkildə qiymətləndirməsinə və optimal yolu seçməsinə şərait yaradır.

C. Qərar ağacının qurulması

Dinamik proqramlaşdırma yalnız optimal nəticəni verməklə kifayətlənmir, eyni zamanda qərar ağacının formalaşdırılması

üçün zəruri məlumatları da təmin edir. Hər bir vəziyyət üçün optimal qərarın hansı əvvəlki vəziyyətdən əldə edildiyini saxlamaq məqsədilə valideyn göstəricilərindən istifadə olunur.

Valideyn göstəriciləri vasitəsilə aşağıdakı imkanlar yaranır:

- Optimal qərar ardıcılığının bərpası;
- Agentin hər bir mərhələdə hansı qərarı niyə verdiyinin izahı;
- Qərar yolunun ağac strukturu şəklində təqdim edilməsi.

Bu yanaşmada qərar ağacı klassik maşın öyrənməsi modeli kimi deyil, optimal qərarların strukturlaşdırılmış izah mexanizmi kimi çıxış edir [3].

D. Alqoritmin iş prinsipi

Təklif olunan alqoritmin ümumi iş prinsipi aşağıdakı mərhələlərdən ibarətdir:

- 1) Qrafın vəziyyətlər və keçid qiymətləri ilə birlikdə təyin edilməsi;
- 2) Dinamik proqramlaşdırma cədvəlinin başlanğıc vəziyyətə uyğun olaraq tərtib edilməsi;
- 3) Qraf üzərində iterativ DP keçidlərinin icrası;
- 4) Valideyn göstəricilərinin yenilənməsi;
- 5) Hədəf vəziyyət üçün optimal yolun bərpası;
- 6) Qərar ağacı vasitəsilə nəticənin izah edilməsi.

Bu mərhələlər agentin qərarvermə prosesini həm hesablama, həm də məntiqi baxımdan ardıcıl və şəffaf edir.

E. Hesablama mürəkkəbliyi

Təklif olunan alqoritmin hesablama mürəkkəbliyi qrafın ölçüsündən asılıdır. Əgər $|V|$ düyünlərin, $|E|$ isə əlaqələrin sayını göstərirsə, alqoritmin zaman mürəkkəbliyi aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$O(|V| + |E|) \quad (9)$$

Bu mürəkkəblik DAG üzərində optimal yol tapılması üçün minimal hesab olunur və böyük ölçülü problemlər üçün də praktik tətbiq imkanı yaradır. Yaddaş mürəkkəbliyi isə əsasən DP və parent massivlərinin saxlanması ilə məhdudlaşır.

F. Metodun üstünlükləri

Təklif olunan metod aşağıdakı üstünlüklərə malikdir:

- Tam izah edilə bilən qərarvermə prosesi;
- Deterministik və stabillik təmin edən alqoritmik struktur;
- Xarici kitabxanalardan asılı olmayan sadə implementasiya;
- Tədris və tədqiqat məqsədləri üçün uyğunluq.

Bu üstünlüklər təklif olunan yanaşmanı izaholunan süni intellekt sistemlərinin qurulması üçün effektiv alternativə çevirir.

V. EKSPERİMENTAL NÜMUNƏ VƏ QƏRAR AĞACININ QURULMASI

Təklif olunan izaholunan süni intellekt agentinin işləmə mexanizmini nümayiş etdirmək üçün sadə çəki yönümlü qraf üzərində eksperimental nümunə nəzərdən keçirilmişdir. Qrafın düyünləri agentin mümkün vəziyyətlərini, əlaqələri isə bu vəziyyətlər arasında keçidləri və keçid xərclərini ifadə edir. Qraf “qonşuluq siyahısı” formasında təqdim olunur ki, bu da alqoritmin sadə və aydın implementasiyasını təmin edir.

Algorithm 1 Dinamik Proqramlaşdırma ilə Minimal Xərcin Hesablanması

```

1: Giriş: Qraf G, Başlanğıc S, Hədəf T
2: Çıxış: Minimal xərc və Optimal qərar yolu
3:  $dp[0 \dots n] \leftarrow \infty$ 
4:  $valideyn[0 \dots n] \leftarrow -1$ 
5:  $dp[S] \leftarrow 0$ 
6: for hər bir düyün  $u \in G$  do
7:   for hər bir qonşu  $(v, xərc) \in C[u]$  do
8:     if  $dp[u] + xərc < dp[v]$  then
9:        $dp[v] \leftarrow dp[u] + xərc$ 
10:       $valideyn[v] \leftarrow u$ 
11:     end if
12:   end for
13: end for
14:  $yol \leftarrow []$ ,  $hazrki \leftarrow T$ 
15: while  $hazrki \neq -1$  do
16:    $yol.append(hazrki)$ 
17:    $hazrki \leftarrow valideyn[hazrki]$ 
18: end while
19: return  $dp[T]$ , Tərs(yol)

```

A. Qraf modelinin təsviri

Nümunə qraf aşağıdakı vəziyyətlərdən və keçidlərdən ibarətdir:

Keçid	Xərc
0 → 1	2
0 → 2	4
1 → 3	7
1 → 4	3
2 → 4	1
4 → 3	2

Qraf yönümlü və asiklik (DAG) olduğundan, dinamik proqramlaşdırmanın iterativ tətbiqi üçün əlverişlidir.

B. Alqoritmin psevdokod vasitəsilə implementasiyası

Aşağıdakı psevdokod dinamik proqramlaşdırma, qraflar nəzəriyyəsi və qərar ağacı yanaşmalarının sintezini nümayiş etdirir. Təqdim olunan alqoritm hər bir vəziyyət üçün minimal xərci hesablayır və optimal qərar ardıcılığını bərpa etmək üçün valideyn göstəricilərindən (parent pointers) istifadə edir. Bu struktur həm mürəkkəb qərarların optimallaşdırılmasını, həm də nəticəyə gedən yolun vizuallaşdırılmasını təmin edir.

C. Dinamik proqramlaşdırma nəticələrinin təhlili

Alqoritmin icrası nəticəsində hər bir düyün üçün başlanğıc vəziyyətdən minimal xərc hesablanır. Bu nümunədə hədəf düyün üçün minimal xərc:

$$dp[3] = 7 \quad (10)$$

D. Qərar yolunun bərpası və optimal qərar ardıcılığı

Validəyn göstəricilərindən istifadə etməklə hədəf vəziyyətdən başlanğıc vəziyyətə doğru geriye izləmə aparılır. Nəticədə formalaşan optimal yol:

$$0 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \quad (11)$$

Bu yolun ümumi xərci:

$$2 + 3 + 2 = 7 \quad (12)$$

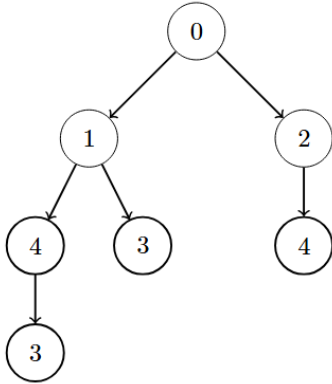
Qeyd etmək lazımdır ki, qrafda başqa alternativ yol da mövcuddur:

$$0 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \quad (13)$$

Lakin alqoritmə istifadə olunan müqayisə şərti ($<$) və qrafın iterasiya ardıcılığı səbəbindən ilk tapılan optimal yol ($0 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$) parent massivində saxlanmışdır. Bu xüsusiyyət agentin deterministik və izaholunan davranışını təmin edir.

E. Qərar ağacının vizual təsviri

Formalaşan qərar ağacı aşağıdakı kimi təsvir edilə bilər:



Şəkil 1: Qərar ağacı və vəziyyətlər arası keçidlər

- **Kök düyün:** 0 — başlanğıc vəziyyət
- **Optimal budaq:** $0 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ (qalın xətlə vurğulanır)
- **Alternativ keçidlər** ($0 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$) həmişə mövcuddur, lakin parent massivinə görə seçilmir.

F. İzaholunanlıq aspekti

Qərar ağacı agentin hər bir mərhələdə verdiyi qərarın səbəbini açıq göstərir:

- Niyə $0 \rightarrow 1$ seçildi, $0 \rightarrow 2$ yox?
- Niyə $1 \rightarrow 4$ seçildi, $1 \rightarrow 3$ yox?
- Hər bir seçilmiş keçid optimal xərcə necə təsir etdi?

Bu xüsusiyyət izaholunan süni intellekt (Explainable AI) üçün vacibdir və agentin qərar vermə məntiqini insan üçün başa düşülən edir [4].

NƏTİCƏ

Təklif olunan izaholunan süni intellekt agentini həm nəzəri, həm də praktik baxımdan süni intellekt sahəsində baza rolunu oynayır. Dinamik proqramlaşdırma, qraf strukturları və qərar ağaclarının inteqrasiyası agentin optimal qərarları sistemli şəkildə tapmasına, hər bir qərarın səbəbini izah etməsinə və deterministik nəticələr əldə etməsinə imkan verir.

Üstünlüklər

- Optimal qərarların sisteməlik tapılması;
- Qərar ağacı vasitəsilə hər bir seçimin səbəbini izah olunması;
- Deterministik davranış və təkrarlanan nəticələrin təmin olunması;
- Xarici kitabxanalardan asılı olmaması.

Məhdudiyyətlər

- Hal-hazırda yalnız DAG-lar üçün optimallaşdırılmışdır; dövrəli qraflar əlavə strategiya tələb edir;
- Standart implementasiyada bütün optimal yollar saxlanmır; yalnız ilk tapılan yol seçilir;
- Böyük qraflarda DP və parent massivlərinin yaddaş sərfiyyatı artır.

Gələcək işlər

- Dövrəli qraflar və mürəkkəb vəziyyət məkanlarında agentin tətbiqi;
- Bütün optimal yolların eyni zamanda saxlanması və vizual təhlili;
- Stoxastik və real vaxt mühitlərində izaholunan agentlərin sınaqdan keçirilməsi;
- İnsan-robot qarşılıqlı təsirdə izaholunan qərar ağaclarının tətbiqi.

ƏDƏBİYYAT

- [1] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 4th Edition, MIT Press, 2022.
- [2] P. Felzenszwalb, D. Huttenlocher, “Dynamic Programming and Graph Algorithms in Computer Vision,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 33, no. 4, pp. 721–740, 2011.
- [3] E. Demirović, P. J. Stuckey, J. Bailey, “Optimal Classification Trees via Dynamic Programming,” *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 34, no. 04, pp. 3325–3332, 2020.
- [4] Q. Ma, J. Stachurski, “Dynamic Programming Deconstructed,” *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 94, pp. 181–205, 2018.

An Artificial Intelligence Agent Explained Using Dynamic Programming and Decision Tree Approaches

Vugar Huseynli

The Academy of the State Security Service of the Republic of Azerbaijan named after Heydar Aliyev, Baku, Azerbaijan

Abstract— Modern Artificial Intelligence (AI) systems rely on the resolution of complex decision-making, optimization, and state-transition problems. The majority of these problems require the integrated use of dynamic programming (DP), tree, and graph structures.

This paper systematically investigates the role of DP in storing and reusing optimal decisions, the function of trees in structuring decision sequences, and the significance of graph structures in modeling the state space. Furthermore, an AI algorithm based on DP, tree, and graph structures is presented, along with its mathematical model, without the need for any external libraries. The work provides both a theoretical and practical foundation suitable for educational and fundamental research purposes.

Keywords— artificial intelligence agents; dynamic programming; decision trees; graph theory.