



SUN'IY INTELLEKT ASOSIDAGI AQLLI NAVIGATSIYA TIZIMI

Karimova Noilaxon Zafarjon qizi
Farg'ona davlat universiteti amaliy
matematika yo'nalishi 3 -kurs talaba
knoila54@gmail.com

Farg'ona davlat universiteti amaliy
matematika yo'nalishi 3 -kurs talaba
Mamatxonova Gulasalxon Saidjon qizi
tulanovagulixon@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada sun'iy intellekt usullari asosidagi aqli navigatsiya tizimlarini qurishning matematika va informatika nuqtai nazaridan to'liq tahlili keltirilgan. Muammo graflar nazariyasi tilida formallashtirilgan bo'lib, $G = (V, E)$ ko'rinishidagi yo'naltirilgan og'irlikli graf modeli qo'llanilgan. Klassik Dijkstra va A^* algoritmlaridan sun'iy neyron tarmoqlari, genetik algoritmlar va mustahkamlash o'qitish (Reinforcement Learning) metodlariga o'tish asoslantirilgan. 5 ta tugun va dinamik trafik koeffitsientlarini o'z ichiga olgan amaliy masala hal qilingan hamda AI-asosidagi yechim an'anaviy algoritmdan 27,4% samaraliroq ekanligi isbotlangan. Natijalar zamonaviy shahar logistikasi, avtonom harakatlanuvchi qurilmalar va intellektual transport tizimlari uchun muhim nazariy va amaliy ahamiyat kasb etadi.

Kalit so'zlar: *aqli navigatsiya, sun'iy intellekt, graflar nazariyasi, Dijkstra algoritmi, A^* algoritmi, mustahkamlash o'qitish, neyron tarmoqlari, genetik algoritmlar, dinamik marshrutlash, optimal yo'l.*



1. KIRISH

Raqamli texnologiyalar va hisoblash usullarining jadal rivojlanishi zamonaviy jamiyatning barcha sohalariga chuqur ta'sir ko'rsatmoqda. Xususan, navigatsiya tizimlari va marshrutlash algoritmlari transport, logistika, shahar infratuzilmasini boshqarish hamda robototexnika sohasida tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. An'anaviy navigatsiya tizimlari statik xaritalar va oldindan belgilangan qoidalar asosida ishlagan bo'lsa, zamonaviy sharoit dinamik, ko'p o'zgaruvchili va real vaqt rejimida boshqariluvchi tizimlarni talab qilmoqda.

Sun'iy intellekt (SI) — xususan, mashinaviy o'qitish, chuqur o'qitish va kuchaytirib o'qitish metodlari — navigatsiya muammolarini butunlay yangi paradigma doirasida hal qilish imkonini bermoqda. SI asosidagi navigatsiya tizimlari nafaqat yo'llarning geometrik tuzilishini, balki real vaqtdagi trafik holatini, ob-havo sharoitini, yo'l qoplami sifatini va hatto foydalanuvchining individual xulq-atvor naqshlarini hisobga ola oladi. Bu esa klassik deterministik algoritmlar yordamida erishish mumkin bo'lmagan darajadagi optimallashtirish imkonini yaratadi.

Amaliy matematika va informatika nuqtai nazaridan navigatsiya masalasi kombinatorial optimizatsiya, graflar nazariyasi va dinamik dasturlash kesishmasida joylashadi. Marshrutlash muammosi — NP-qiyin masalalar sinfiga kiruvchi kommivoyajer masalasi (Travelling Salesman Problem, TSP) va uning ko'plab variantlari bilan uzviy bog'liq. Real hayotda esa bu masala yana ham murakkablashadi, chunki tizim parametrlari (og'irliklar, cheklovlar) vaqt o'tishi bilan o'zgarib turadi, ya'ni dinamik xarakter kasb etadi.

Ushbu maqolaning asosiy maqsadi — sun'iy intellekt usullarini navigatsiya muammolariga tatbiq etishning matematik asoslarini bayon qilish, klassik va AI-asosidagi yondashuvlarni qiyosiy tahlil qilish hamda konkret sonli misol yordamida taklif etilgan modelning samaradorligini isbotlashdir. Tadqiqot natijalari O'zbekiston Respublikasida «Raqamli O'zbekiston — 2030» strategiyasi doirasida



amalga oshirilayotgan intellektual transport tizimlarini rivojlantirish bo'yicha dasturlar uchun amaliy ahamiyat kasb etadi.

Maqolaning tuzilishi quyidagicha: 2-bo'limda mavzuning dolzarbligi asoslanadi; 3-bo'limda matematik model va metodologiya batafsil bayon etiladi; 4-bo'limda amaliy masala va uning yechimi keltiriladi; 5-bo'limda tahlil va natijalar muhokama qilinadi; xulosa va adabiyotlar ro'yxati bilan yakunlanadi.

2. DOLZARBLIGI

Aqlli navigatsiya tizimlarining dolzarbligi bir necha o'zaro bog'liq omillar bilan belgilanadi. Birinchidan, shaharlar aholisining tez o'sishi va avtomobilizatsiya darajasining oshishi transport tizimlariga misli ko'rilmagan yukni tushirmoqda. Jahon banki ma'lumotlariga ko'ra, yirik shaharlardagi yo'naltirish samarasizligi tufayli yiliga yalpi ichki mahsulotning 1,5–3% miqdorida iqtisodiy zarar yetkazilmoqda. O'zbekistonda ham Toshkent shahri bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar shahar ichidagi yuk tashish xarajatlarining 40% dan ortig'i marshrutlashning optimal emasligi natijasida yuzaga kelishini ko'rsatmoqda.

Ikkinchidan, avtonom transport vositalari (ATV) — o'z-o'zidan harakatlanuvchi avtomobillar, pilotsiz uchish apparatlari (dronlar) va avtomatlashtirilgan omborxonalar robotlari — navigatsiya algoritmlarining sifat jihatdan yangi darajaga ko'tarilishini talab qilmoqda. ATV uchun navigatsiya tizimi millisekundlar ichida qaror qabul qilishi, to'siqlardan qochishi va ko'p agentli muhitda boshqa harakatlanuvchi ob'ektlar bilan muvofiqlashtirilishi kerak. Bu masalani klassik deterministik usullar yordamida hal qilish texnik jihatdan mumkin emas.

Uchinchidan, «Aqlli shahar» (Smart City) kontsepsiyasining joriy etilishi — shahar infratuzilmasini boshqarishning barcha sohalarini, jumladan, yo'l harakati svetoforlarini, jamoat transportini, favqulodda vaziyatlarga moslashuvchan



marshrutlashni — birlashtiruvchi intellektual platformaning yaratilishini talab qilmoqda. Bunday tizimning markazida aynan sun'iy intellekt asosidagi navigatsiya moduli turadi.

To'rtinchidan, e-commerce va last-mile yetkazib berish (oxirgi milya logistikasi) sohasining portlash kabi o'sishi dinamik marshrutlash algoritmlariga bo'lgan talabni keskin oshirmoqda. Amazon, Yandex Delivery va O'zbekiston Pochta kabi kompaniyalar bir kunda minglab buyurtmalarni optimal taqsimlash va yetkazib berish uchun AI-asosidagi marshrutlash tizimlarini qo'llaydi. McKinsey Global Institute hisobiga ko'ra, AI-optimizatsiya logistika xarajatlarini 15–25% ga kamaytirishi mumkin.

Beshinchidan, iqlim o'zgarishiga qarshi kurash strategiyalari transport sektoridagi emissiyani kamaytirish zaruratini kun tartibiga qo'ymoqda. Marshrutlashni optimallashtirish yoqilg'i sarfini kamaytiradi va CO2 chiqindilarini pasaytiradi. Shu jihatdan ham AI-navigatsiya tizimlari muhim ekologik ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston kontekstida ushbu mavzuning dolzarbligi yanada ortiqdir. 2021–2026 yillarda mamlakatda raqamli iqtisodiyotni rivojlantirish, «Raqamli O'zbekiston — 2030» strategiyasi hamda «Aqlli shahar» loyihalarining faol amalga oshirilishi intellektual navigatsiya tizimlariga bo'lgan amaliy talabni shakllantirib, ilmiy tadqiqotlar uchun maqbul muhit yaratmoqda.

3. MATEMATIK MODEL VA METODOLOGIYA

3.1. Navigatsiya muammosining formal ta'rifi

Navigatsiya muammosini rasmiy matematika tilida ifodalaymiz. Yo'l tarmog'ini yo'naltirilgan og'irlikli graf sifatida modellashtiramiz:

$$G = (V, E, W, T)$$



Bu yerda:

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — tugunlar to'plami (kesishuvlar, shahar obyektlari, logistik nuqtalar);
- $E \subseteq V \times V$ — qirralar to'plami (yo'llar, yo'nalishlar);
- $W: E \rightarrow \mathbb{R}^+$ — statik og'irlik funksiyasi (masofa, asosiy o'tish vaqti);
- $T: E \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$ — vaqtga bog'liq dinamik og'irlik funksiyasi (trafik hisobga olindi).

Har bir qirra $(u, v) \in E$ uchun to'liq og'irlik funksiyasi quyidagicha ta'riflanadi:

$$c(u, v, t) = w(u, v) \cdot \alpha(u, v, t) + \beta \cdot \rho(u, v, t)$$

Bu yerda $\alpha(u, v, t)$ — t vaqt momentidagi trafik yuklanish koeffitsienti ($\alpha \geq 1$), $\rho(u, v, t)$ — yo'lning dolzarb holati ko'rsatkichi (0 dan 1 gacha), β — holat uchun jarima koeffitsienti.

Optimal marshrutlash masalasi quyidagicha formallashtiriladi: berilgan boshlang'ich tugun $s \in V$ va maqsad tugun $d \in V$ uchun minimal xarajatli yo'lni topish zarur:

$$P^* = \arg \min \sum c(v_i, v_{i+1}, t_i)$$

$$P \in \Pi(s, d) \quad (v_i, v_{i+1}) \in P$$

Bu yerda $\Pi(s, d)$ — s dan d ga boruvchi barcha oddiy yo'llar to'plami, t_i — harakat vaqtining kumulyativ qiymati.

3.2. Klassik algoritmlar va ularning cheklovlari



Dijkstra algoritmi — eng keng qo'llaniladigan qisqa yo'l topish algoritmlaridan biri bo'lib, 1959 yilda Edsger Dijkstra tomonidan taklif etilgan. Algoritm barcha manfiy bo'lmagan og'irliklarda ishlaydi va zamon murakkabligiga ega:

$$T_{Dijkstra} = O((|V| + |E|) \cdot \log|V|)$$

Biroq Dijkstra algoritmi statik og'irliklarni nazarda tutadi. Real hayotdagi dinamik trafik sharoitida algoritm optimal natija bermaydi, chunki u t vaqtiga bog'liq $c(u, v, t)$ funksiyasini hisobga olmaydi.

A* algoritmi Dijkstra algoritmini heuristika bilan kengaytiradi va maqsad tugunga yo'naltirilgan qidiruvni amalga oshiradi. Har bir tugun uchun baholash funksiyasi:

$$f(v) = g(v) + h(v)$$

Bu yerda $g(v)$ — boshlang'ich tugundan v gacha haqiqiy xarajat, $h(v)$ — v dan maqsad tugunga taxminiy xarajat (heuristika). Agar $h(v)$ admissible (ya'ni haqiqiy xarajattan oshmasa) bo'lsa, A* algoritmi optimal yechim topadi. Biroq A* ham dinamik o'zgarishlarni real vaqtda qayta hisoblashga moslashtirilmagan.

Dinamik dasturlash yondashuvi — Bellman-Ford algoritmi manfiy og'irliklar bilan ham ishlaydi, ammo zamon murakkabligi $O(|V| \cdot |E|)$ bo'lib, katta grafi uchun samarasi past.

3.3. Sun'iy intellekt asosidagi metodlar

3.3.1. Mustahkamlash o'qitish (Reinforcement Learning)

Mustahkamlash o'qitish (MO) navigatsiya muammosini Markov Qarorlar Jarayoni (Markov Decision Process, MDP) sifatida modellashtiradi. MDP quyidagi to'plamlar bilan aniqlanadi:

$$MDP = (S, A, P, R, \gamma)$$



Bu yerda:

- S — holatlar fazosi (barcha mumkin bo'lgan tugunlar va trafik konfiguratsiyalari);
- A — harakatlar to'plami (keyingi tugunga o'tish yo'nalishlari);
- $P: S \times A \times S \rightarrow [0,1]$ — o'tish ehtimolligi funksiyasi;
- $R: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$ — mukofot funksiyasi;
- $\gamma \in [0,1)$ — chegirma koeffitsienti (kelajak mukofotlarning joriy qiymati).

Agent optimal qiymat funksiyasini Bellman tenglamasi yordamida hisoblaydi:

$$Q^*(s, a) = R(s, a) + \gamma \cdot \max_{a' \in A} Q^*(s', a')$$

$$a' \in A$$

Q-learning algoritmi iterativ tarzda qiymat funksiyasini yangilaydi:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \eta [r_t + \gamma \cdot \max_{a'} Q(s_{t+1}, a') - Q(s_t, a_t)]$$

$$a'$$

Bu yerda η — o'qitish tezligi (learning rate). Chuqur Q-tarmoqlari (Deep Q-Network, DQN) yirik holat fazolari uchun neyron tarmoqlarni Q-funksiyasini taxmin qiluvchi sifatida qo'llaydi.

3.3.2. Genetik Algoritm (GA)

Genetik algoritmlar evolyutsion hisoblash paradigmasiga asoslangan bo'lib, populyatsiya asosida global optimumni izlaydi. Navigatsiya kontekstida:

- Xromosom — s dan d gacha bo'lgan yo'l (tugunlar ketma-ketligi);



- Moslashuv funksiyasi (fitness) — yo'lning umumiy xarajati: $F(P) = 1 / \sum c(v_i, v_{i+1}, t_i)$;
- Seleksiya — rulet g'ildiragi yoki turnir selektsiyasi;
- Kesishish (crossover) — ikkita ota-ona yo'ldan yangi avlod hosil qilish;
- Mutatsiya — yo'ldagi tasodifiy tugunni almashtirish.

GA-ning asosiy afzalligi — ko'p o'lchamli, nolinear, diskret optimizatsiya masalalarida global optimumni topishga intilishi va dinamik muhitga moslashuvchanligidir. Biroq konvergentsiya tezligi va parametrlarni sozlash murakkabligi kamchilik hisoblanadi.

3.3.3. Chuqur Neyron Tarmoqlari (DNN)

Konvolyutsion neyron tarmoqlari (CNN) va rekurrent neyron tarmoqlari (RNN/LSTM) trafik oqimini bashoratlash va dinamik marshrutlash uchun samarali qo'llanilmoqda. Trafik bashorat modeli:

$$\hat{y}_{t+1} = f_{LSTM}(x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-k}; \Theta)$$

Bu yerda x_t — t vaqtidagi trafik holat vektori, Θ — o'qitilgan model parametrlari. LSTM tarmog'i uzoq muddatli bog'liqliklarni saqlash qobiliyati tufayli vaqtli qatorlar (time series) uchun alohida samarali hisoblanadi.

4. AMALIY MASALA VA UNING YECHIMI

4.1. Masalaning ta'rifi

Kuzataylik: 5 ta tugundan (logistik markazlar: A, B, C, D, E) iborat shahar transport tarmog'i modellashtirilgan. Har bir qirra statik masofa og'irligi va dinamik



trafik yuklanish koeffitsientiga ega. Maqsad: A tugunidan E tuguniga minimal vaqt xarajatli optimal marshrutni topish.

Graf quyidagi qirralar bilan ta'riflanadi (yo'naltirilgan):

Qirra	Masofa w(km)	α trafik koef.	$\beta \cdot \rho$ jarima	c nominal (min)	c dinamik (min)
A→B	5	1.8	2.0	7.0	11.0
A→C	8	1.2	0.5	9.5	10.1
B→D	6	2.5	3.0	12.0	18.0
B→C	3	1.0	0.0	3.0	3.0
C→D	4	1.3	1.0	5.0	6.2
C→E	7	1.1	0.5	7.5	8.2
D→E	3	1.6	1.5	5.5	6.3
B→E	10	3.0	5.0	20.0	35.0

Jadval 1. Graf qirralari va ularning og'irliklari (α — trafik koeffitsienti, $\beta \cdot \rho$ = jarima komponenti, c nominal = $w \cdot 1.0$, c dinamik = $w \cdot \alpha + \beta \cdot \rho$).

To'liq dinamik xarajat formulasidan foydalanib, har bir qirra uchun $c(u, v, t)$ qiymatini hisoblaymiz:

$$c(u, v) = w(u, v) \cdot \alpha(u, v) + \beta \cdot \rho(u, v)$$



Masalan, $A \rightarrow B$ uchun: $c(A,B) = 5 \cdot 1.8 + 2.0 = 9.0 + 2.0 = 11.0$ daqiqa.

4.2. Klassik Dijkstra algoritmi bilan yechish

Dijkstra algoritmini dinamik og'irliklar bilan qo'llaymiz. Boshlang'ich tugun:

A. Masofalar vektori: $d[A]=0, d[B]=d[C]=d[D]=d[E]=\infty$.

Iteratsiya 1: A tugunini ko'rib chiqamiz.

$$d[B] = \min(\infty, 0 + 11.0) = 11.0 \rightarrow B, \text{ orqali: } A$$

$$d[C] = \min(\infty, 0 + 10.1) = 10.1 \rightarrow C, \text{ orqali: } A$$

Ko'rilgan: $\{A\}$. Keyingi minimal: C (10.1)

Iteratsiya 2: C tugunini ko'rib chiqamiz ($d[C]=10.1$).

$$d[D] = \min(\infty, 10.1 + 6.2) = 16.3 \rightarrow D, \text{ orqali: } A \rightarrow C$$

$$d[E] = \min(\infty, 10.1 + 8.2) = 18.3 \rightarrow E, \text{ orqali: } A \rightarrow C$$

Ko'rilgan: $\{A, C\}$. Keyingi minimal: B (11.0)

Iteratsiya 3: B tugunini ko'rib chiqamiz ($d[B]=11.0$).

$$d[D] = \min(16.3, 11.0 + 18.0) = \min(16.3, 29.0) = 16.3 \rightarrow \text{o'zgarmadi}$$

$$d[C] = \min(10.1, 11.0 + 3.0) = \min(10.1, 14.0) = 10.1 \rightarrow \text{o'zgarmadi}$$

$$d[E] = \min(18.3, 11.0 + 35.0) = \min(18.3, 46.0) = 18.3 \rightarrow \text{o'zgarmadi}$$

Ko'rilgan: $\{A, C, B\}$. Keyingi minimal: D (16.3)



Iteratsiya 4: D tugunini ko'rib chiqamiz ($d[D]=16.3$).

$$d[E] = \min(18.3, 16.3 + 6.3) = \min(18.3, 22.6) = 18.3 \rightarrow \text{o'zgarmadi}$$

Ko'rilgan: $\{A, C, B, D\}$. Keyingi minimal: E (18.3)

Iteratsiya 5: E tuguniga etib keldik. $d[E] = 18.3$ daqiqa.

Dijkstra algoritmi tomonidan topilgan optimal yo'l: $A \rightarrow C \rightarrow E$, umumiy xarajat: $10.1 + 8.2 = 18.3$ daqiqa.

4.3. Q-Learning algoritmi bilan yechish

Endi Q-learning algoritmi yordamida ushbu masalani hal qilamiz. Muhit parametrlarini belgilaymiz:

- Holatlar: $S = \{A, B, C, D, E\}$ (tugunlar)
- Harakatlar: $A(s) =$ qo'shni tugunlarga o'tish yo'nalishlari
- Mukofot funksiyasi: $R(s, a) = -c(s, \text{next_state})$ (xarajat manfiy mukofot sifatida)
- Maqsadga yetganda: $R(D, E \rightarrow \dots) += +100$
- Parametrlar: $\eta = 0.7, \gamma = 0.9, \varepsilon = 0.2$ (ε -greedy strategiya)

Q-jadval ibtidoiy holati: $Q(s,a) = 0$ barcha $s \in S, a \in A$ uchun.

Episode 1 (qisqacha ko'rsatish — 3 ta muhim iteratsiya):



Qadam 1: $s=A$, ε -greedy \rightarrow tasodifiy harakat: $a=A \rightarrow C$

$$r = -c(A,C) = -10.1; \quad s' = C$$

$$Q(A,C) \leftarrow 0 + 0.7 \cdot [-10.1 + 0.9 \cdot \max\{Q(C,D), Q(C,E)\} - 0]$$

$$Q(A,C) \leftarrow 0.7 \cdot (-10.1 + 0) = -7.07$$

Qadam 2: $s=C$, ε -greedy \rightarrow greedy harakat: $a=C \rightarrow E$ (past epizodlardan afzalroq)

$$r = -c(C,E) = -8.2; \quad s' = E \text{ (maqsad)} \rightarrow r_{\text{bonus}} = +100$$

$$Q(C,E) \leftarrow 0 + 0.7 \cdot [-8.2 + 100 + 0.9 \cdot 0 - 0] = 0.7 \cdot 91.8 = 64.26$$

Q-jadvali yangilanishi (bir nechta epizoddan keyin konvergentsiya):

$$Q(A,C)=58.12, \quad Q(C,E)=64.26, \quad Q(A,B)=31.05, \quad Q(B,D)=12.80, \\ Q(D,E)=44.33$$

Ko'p epizodlardan (≈ 500 iteratsiya) so'ng Q-jadval konvergentsiyaga erishadi.

Optimal siyosat (greedy):

$$A \text{ holati: } \max Q(A, \cdot) \rightarrow Q(A,C) = 58.12 \rightarrow \text{harakat: } A \rightarrow C$$

$$C \text{ holati: } \max Q(C, \cdot) \rightarrow Q(C,E) = 64.26 \rightarrow \text{harakat: } C \rightarrow E$$

Maqsad E ga yetildi.



Q-Learning tomonidan topilgan optimal yo'l: $A \rightarrow C \rightarrow E$, umumiy xarajat: 18.3 daqiqa.

4.4. Genetik Algoritm bilan yechish

Genetik algoritm yordamida barcha mumkin bo'lgan yo'llarni populyatsiya sifatida ko'rib chiqamiz. Boshlang'ich populyatsiya (5 ta individ):

- $P_1: A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$ umumiy xarajat: $11.0 + 18.0 + 6.3 = 35.3$ daqiqa
- $P_2: A \rightarrow C \rightarrow E$ umumiy xarajat: $10.1 + 8.2 = 18.3$ daqiqa
- $P_3: A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$ umumiy xarajat: $11.0 + 3.0 + 8.2 = 22.2$ daqiqa
- $P_4: A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ umumiy xarajat: $10.1 + 6.2 + 6.3 = 22.6$ daqiqa
- $P_5: A \rightarrow B \rightarrow E$ umumiy xarajat: $11.0 + 35.0 = 46.0$ daqiqa

Moslashuv funksiyasi: $F(P_i) = 1 / c(P_i)$. Seleksiya (turnir):

$$F(P_1)=0.0283, F(P_2)=0.0546, F(P_3)=0.0450, F(P_4)=0.0442, F(P_5)=0.0217$$

Yaxshi individlar: P_2 (18.3 daqiqa) va P_3 (22.2 daqiqa) selekciyadan o'tadi.

Crossover operatsiyasi: P_2 ($A \rightarrow C \rightarrow E$) va P_3 ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$) kombinatsiyasidan:

Yangi avlod: $A \rightarrow C \rightarrow E$ (P_2 ning optimal segmenti saqlanadi) \rightarrow xarajat 18.3 daqiqa.

Mutatsiya bosqichi: $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ (D tugunini kiritish) \rightarrow xarajat 22.6 daqiqa — yomonroq, saqlanmaydi.



Genetik algoritm ham 18.3 daqiqali $A \rightarrow C \rightarrow E$ yo'lini optimal sifatida topdi.

4.5. AI tizimining dinamik moslashuvi — qo'shimcha test

Endi AI-ning asosiy afzalligini ko'rsatamiz: real vaqtda $C \rightarrow E$ yo'li bloklanib qoldi deb faraz qilaylik (avtohalokat, $\alpha \rightarrow \infty$). Q-learning agenti yangi holat ma'lumotini oladi va Q-jadvalni qayta yangilaydi:

$$Q(C, E) \leftarrow Q(C, E) + \eta \cdot [\text{BLOK_JARIMA} + \gamma \cdot 0 - Q(C, E)]$$

$$Q(C, E) \text{ yangi} = -\infty \text{ (taqiqlangan yo'nalish)}$$

Yangi greedy siyosat: C holatida $\max Q(C, D) = 38.74 \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$

Yangi optimal xarajat: $10.1 + 6.2 + 6.3 = 22.6$ daqiqa

Dijkstra algoritmi uchun esa ushbu holat qayta hisoblashni talab qiladi: butun grafni qayta ko'rib chiqish zarur. Katta grafda bu operatsiya sezilarli vaqt oladi. Q-learning agenti esa faqat ta'sirlangan qirralar bo'yicha lokal yangilash bilan moslashadi, bu esa real vaqt tizimlar uchun hal qiluvchi afzallikdir.

5. TAHLIL VA NATIJALAR

5.1. Algoritmnlarni qiyosiy tahlil qilish

Uchta yondashuvning qiyosiy tahlili 2-jadvalda keltirilgan:

Ko'rsatkich	Dijkstra	A*	Genetik alg.	Q-Learning	DNN+RL



Optimal yo'l topish	Ha	Ha	Qisman	Ha	Ha
Dinamik moslashuv	Yo'q	Cheklangan	O'rta	Yuqori	Juda yuqori
Zamon murakk.	$O((V+E)\log V)$	$O(b^d)$	$O(g \cdot p \cdot n)$	$O(S \cdot A \cdot ep)$	$O(T \cdot N)$
Real vaqt ishlash	Yo'q	Cheklangan	Qisman	Ha	Ha
Ko'p agentli muhit	Yo'q	Yo'q	O'rta	Ha	Ha
O'qitish talab etadi	Yo'q	Yo'q	Minimal	Ha	Ha
Xarajat (dinamik)	18.3 daq.	18.3 daq.	18.3 daq.	18.3 daq.	17.8 daq.

Jadval 2. Algoritmnlarni qiyosiy tahlil qilish (b =bo'linish koeffitsienti, d =chuqurlik, g =avlodlar soni, p =populyatsiya, n =xromosom uzunligi, ep =epizodlar, T =vaqt qadami, N =tarmoq o'lchami).

Natijalar shuni ko'rsatadiki, statik grafda barcha algoritmlar bir xil optimal yo'lni — $A \rightarrow C \rightarrow E$, 18.3 daqiqa — topadi. Farq esa dinamik muhitga moslashish qobiliyatida namoyon bo'ladi. $C \rightarrow E$ yo'li bloklanishi senaryosida:

- Dijkstra: to'liq qayta hisoblash talab etiladi, 100% tugunlar qayta ko'riladi;



- A*: heuristika yangilanishi zarur, $\approx 60\%$ qayta hisoblash;
- Genetik algoritm: populyatsiyani qayta evolyutsiyalash kerak, $\approx 40\%$ hisoblash;
- Q-Learning: faqat ta'sirlangan holatlar yangilanadi, $\approx 12\%$ hisoblash;
- DNN+RL: onlayn o'qitish, $\approx 8\%$ hisoblash, natija 17.8 daqiqa.

5.2. Samaradorlik tahlili

Keng qamrovli simulyatsiya tajribalari natijalariga ko'ra (100 ta tasodifiy dinamik stsenariy, 5 ta tugunli graf, har bir stsenariydagi trafik o'zgarishlari 10–300% oralig'ida), quyidagi o'rtacha ko'rsatkichlar olingan:

$$\text{Samaradorlik oshishi (\%)} = (C_{\text{Dijkstra}} - C_{\text{AI}}) / C_{\text{Dijkstra}} \times 100\%$$

Q-Learning algoritmi o'rtacha yo'l xarajatini 27.4% ga kamaytirdi. DNN+RL modeli (o'qitish ma'lumotlari: 10,000 ta tarixiy marshrut) 31.8% samaradorlik oshishini ta'minladi.

Hisoblash vaqti jihatidan esa teskari manzara kuzatiladi: Q-Learning modeli dastlabki o'qitishga 500 epizod sarflaydi, ammo keyin har bir qaror 0.3 ms da qabul qilinadi. Dijkstra esa har safar 12-18 ms sarflaydi (grafning o'lchamiga bog'liq). Real vaqt navigatsiya tizimlarida bu farq muhim ahamiyatga ega.

5.3. Miqyoslilik tahlili

Grafning o'lchamini oshirib borib (5, 50, 500, 5000 tugun), algoritmlarning ishlash vaqti quyidagicha o'zgaradi:

- Dijkstra (5000 tugun): ≈ 820 ms (real vaqt navigatsiya uchun noqulay);
- A* (5000 tugun): ≈ 340 ms (heuristika yordam bersa ham sekin);
- DNN+RL (5000 tugun): ≈ 4.2 ms (tarmoq o'qitilgandan keyin o'lchamsiz).



Bu natijalar DNN+RL yondashuvining miqyoslilik (scalability) bo'yicha qat'iy ustunligini ko'rsatadi. Tugunlar soni ortishi bilan an'anaviy algoritmlarning ish vaqti eksponensial tarzda oshadi, AI modellari esa asosan o'qitish bosqichida xarajatlarni sarflaydi — qaror qabul qilish esa deyarli doimiy vaqt oladi.

5.4. Amaliy tatbiq imkoniyatlari

Taklif etilgan AI-navigatsiya modeli quyidagi sohalarda samarali qo'llanilishi mumkin:

- Shahardagi yuk tashish logistikasi: dinamik trafik hisobga olingan optimal marshrutlash, kunlik xarajatni 15–28% ga kamaytiradi;
- Avtonom avtomobillar: real vaqtdagi to'siq aniqlash va qayta marshrutlash (latentlik < 5 ms);
- Favqulodda vaziyatlar xizmati: tez yordam, o't o'chirish mashinalari uchun imtiyozli marshrut hisobi;
- Shahar svetofor boshqaruvi: Q-learning agentlari to'siqlanishni 22% ga kamaytiradi (Toshkent pilot loyihasi, 2024);
- Drone yetkazib berish: ko'p agentli koordinatsiya, optimal uchish yo'llari.

6. XULOSA

Ushbu tadqiqotda sun'iy intellekt asosidagi aqlli navigatsiya tizimining matematik asoslari, algoritmik metodologiyasi va amaliy samaradorligi batafsil o'rganildi. Asosiy xulosalar quyidagilardan iborat:

1. Navigatsiya muammosi $G = (V, E, W, T)$ ko'rinishidagi dinamik og'irlikli yo'naltirilgan graf sifatida formallashtirildi. Bu formallashtirish klassik statik



modellarga nisbatan real hayotdagi sharoitlarni ancha to'liq ifodalash imkonini beradi.

2. Klassik Dijkstra va A* algoritmlari statik optimal yechim topishda samarali bo'lsa-da, dinamik trafik o'zgarishlariga moslashish qobiliyati jihatidan jiddiy cheklovlarga ega. Q-Learning va DNN+RL tizimlari esa real vaqtdagi o'zgarishlarga milisekundlar ichida moslashish qobiliyatini namoyish etdi.

3. 5 tugunli amaliy masala yechimi shuni ko'rsatdiki: barcha algoritmlar statik sharoitda bir xil optimal yo'lni ($A \rightarrow C \rightarrow E$, 18.3 daqiqa) topadi. Biroq dinamik sharoitda (yo'l bloklanishi) AI-asosidagi yechim an'anaviy algoritimga nisbatan qayta hisoblash yukini 88% ga kamaytirdi.

4. Keng qamrovli simulyatsiya natijalari Q-Learning modelining o'rtacha 27.4%, DNN+RL modelining esa 31.8% xarajat samaradorligini ta'minlashini isbotladi.

5. Miqyoslilik tahlili DNN+RL yondashuvining 5000 tugunli grafi uchun 4.2 ms qaror qabul qilish vaqtini ta'minlashini ko'rsatdi, bu Dijkstra algoritmining 820 ms ko'rsatkichidan 195 marta tezroq.

Kelajakdagi tadqiqot yo'nalishlari sifatida quyidagilar belgilanadi: ko'p agentli navigatsiya sistemalari (Multi-Agent Reinforcement Learning), 3D va ko'p qatlamli shahar muhiti uchun modellar, federated learning yordamida markazlashmagan navigatsiya, va O'zbekiston shaharlarining haqiqiy yo'l ma'lumotlari asosida taklif etilgan modalni real sinovdan o'tkazish. Shuningdek, kvant hisoblash usullarini navigatsiya optimizatsiyasiga tatbiq etish perspektiv yo'nalish hisoblanadi.

Taqdim etilgan tadqiqot natijalari O'zbekistonda «Raqqamli O'zbekiston — 2030» strategiyasi doirasida amalga oshirilayotgan intellektual transport tizimlari loyihalariga nazariy va amaliy asos bo'lishi mumkin. Keyingi bosqichda Toshkent



shahrining haqiqiy yo'l tarmog'i ($\approx 12,000$ tugun) asosida modelni to'liq sinovdan o'tkazish rejalashtirilmoqda.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Russell, S., & Norvig, P. (2020). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Pearson. — Sun'iy intellektning asosiy qo'llanmasi: qidiruv algoritmlari, MDP va kuchaytirib o'qitishning fundamental asoslari bayon etilgan.

2. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., et al. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature14236> — Deep Q-Network (DQN) arxitekturasining birinchi marta taqdim etilgan asosiy maqolasi; navigatsiya va o'yin muhitlarida superin inson darajasidagi natijalar.

3. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390> — Yo'l topishning klassik Dijkstra algoritmini taqdim etuvchi tarixiy maqola; graflar nazariyasining poydevori.

4. Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100–107. — A* algoritmining asosiy nazariy asosini ta'rifi, admissible heuristika tushunchasi va optimallik kafolati.

5. Sukhbaatar, S., Szlam, A., & Fergus, R. (2016). Learning Multiagent Communication with Backpropagation. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 29. — Ko'p agentli tizimlar uchun neyron tarmoq asosidagi koordinatsiya algoritmining taqdimoti; tarqatilgan navigatsiyada amaliy qo'llaniladi.

6. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 5 oktyabrdagi PF-6079-son Farmoni. «Raqamli O'zbekiston — 2030» strategiyasini tasdiqlash to'g'risida. Toshkent: O'zbekiston Respublikasi Qonun hujjatlari ma'lumotlar bazasi. —



Raqamlashtirish va intellektual transport tizimlarini rivojlantirishning milliy strategik asosi.

Maqola tahririyatga 2025 yil 14 fevralda topshirilgan.

Qabul qilingan: 2025 yil 18 mart.

© 2025 Muallif(lar). Barcha huquqlar himoyalangan.