

А. О. Каргін<sup>1,2</sup>, О. І. Іванюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## МОДЕЛЬ СИТУАЦІЙНОГО ПЛАНУВАННЯ Й КЕРУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯМИ АВТОНОМНОГО РОБОТУ

**Анотація.** На сьогодні актуальною є проблема навігації автономних мобільних систем в просторі, де можливі обурення. Проблема полягає в тому, що різноманітні збурення, що виникають у процесі руху роботу, не дозволяють реалізувати переміщення вздовж заздалегідь запланованого маршруту й вимагають поточного перепланування відповідно отриманій від датчиків ситуації. Для автономних систем проблема посилюється необхідністю автоматичного формування моделі поточної ситуації на основі даних від сенсорів й інтегруванні цієї моделі ситуації з моделями планування й керування у реальному часі. **Предметом дослідження** є знанняорієнтовані моделі обробки даних від сенсорів, що застосовуються в навігації автономних мобільних систем. **Мета дослідження** – імплементація когнітивної моделі сприйняття, заснованої на правилах, для класу задач ситуаційного керування й перепланування руху автономного роботу вздовж маршруту в умовах перешкод. Дослідити спроможність моделі задовільнити вимогам до автономних систем. **Результати.** Модель сприйняття даних від сенсорів представлена множиною багаторівневих фактів, що у вербальній формі на різних рівнях узагальнення описують поточну ситуацію в оточенні робота. База знань, якою користується робот при навігації, представлена п'ятирівневою ієрархічною структурою нечітких правил: знання про цілі, маршрут й план усунення перешкод, картографічні знання про робочий простір, стратегії й конкретні керівні впливи, необхідні для досягнення мети. Розроблено алгоритм й програму, у якій інтегровані модель сприйняття й модифікована модель Такагі-Сугено, що реалізує ситуаційне керування з переплануванням маршруту. Для дослідження моделі розроблено штучне оточення та наведені результати комп'ютерних експериментів по переміщенню робота по заданому маршруту в оточенні з перешкодами. **Висновки.** Показана спроможність імплементації моделі сприйняття для класу задач навігації роботу. Модель сприйняття, що інтегрована з модифікованою моделлю Такагі-Сугено, вирішує завдання ситуаційного керування з переплануванням маршруту і задовольняє вимогам щодо автономних систем та має переваги в порівнянні з методами програмного та евристичного керування по критеріям гнучкість, масштабованість та опрацювання невизначеності.

**Ключові слова:** мобільний робот; ситуаційне планування та керування; навігація; когнітивна модель сприйняття; нечіткі системи; дані від сенсорів.

### Вступ

**Постановка завдання в загальному вигляді.** Концепція автономних систем (АС) знаходить все більш широке поширення при створенні великомасштабних розподілених в просторі об'єктів. АС включають сукупність компонентів, що реалізують в автономному режимі певну функцію, для виконання якої потрібно різноманітна інформація. Індустріальні АС компонується з автоматичних ліній, ЧПУ верстатів, транспортних систем, роботів [1]. Залізнична [2] і автомобільна [3] галузі в перспективних планах передбачають створення АС на базі розумних автомобілів і розумних поїздів. АС, що виконують функції моніторингу ситуацій включають мобільні пристрої (роботи, безпілотні літальні апарати) для спостереження і отримання інформації. У проектах розумних міст [3], як і у всіх вище перерахованих, основним компонентом АС є розумна автономна машина (РАМ) що переміщується у просторі. Проблема що виникає при створенні РАМ – навігація в умовах перешкод в автономному режимі.

Проблема навігації автономних систем властива мобільній робототехніці. Завдання навігації мобільного роботу розглядається з трьох точок зору [4, 5]: планування маршруту переміщення, локалізація ділянки маршруту де знаходиться робот (локальна навігація) і відображення місцезнаходження роботу на карту оточення. Для автономної навігації роботу важливо одночасне рішення перелічених задач. Такий підхід, відомий як SLAM (simultaneous

localization and mapping) [6, 7], базується на методах й моделях штучного інтелекту [6, 7].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Навігаційні моделі глобального планування маршруту (побудова послідовності керуючих реакцій, які забезпечують переміщення роботу в заздалегідь визначену точку), а також окремі задачі навігації такі, як управління переміщенням, відстеження пройденого шляху, пошук цілі, патрулювання території, збереження цілі в області видимості [8, 9] не можуть бути використані в АС, так як припускають наявність повної інформації про геометрію навколишнього середовища. Більш того, головне обмеження на автономність поведінки накладають, по-перше, традиційний або модифікований метод програмного керування при реалізації плану і, по-друге, припущення про відсутність завад для руху. Цих недоліків позбавлені моделі локального планування шляху [10], коли навколишнє середовище є заздалегідь невідоме або допускається поява перешкод, що порушують попередній опис середовища. Моделі локального планування потенційно можуть бути використані в АС, оскільки РАМ, як правило, не доступні повні знання про навколишнє середовище, реальні середовища є мінливими. Такі моделі засновані на використанні даних від сенсорів про стан навколишнього середовища та онлайн прийняття рішення на основі цих даних про процес переміщення.

Можна виділити два напрямки досліджень підходу на основі сенсорних даних для вирішення завдань навігації: створення евристичних алгоритмів

під конкретне застосування; побудова моделей обробки даних від сенсорів, запозичених у живої природи.

До евристичних алгоритмів розв'язання задачі локального планування переміщень відносять Vector Field Histogram (VFH) і його подальші розвідки – VFH +, VFH \*; Generalized Voronoi Graph (GVG) [11]. Можливості евристичних алгоритмів розглянемо на прикладі сімейства Bug – алгоритмів (Bug1, Bug2, Bug3, Dist Bug, Tangent Bug) [12, 13]. Даний алгоритм дозволяє роботу досягти цілі в процесі переміщення, за умови, що в будь-який момент часу роботу доступна інформація про напрямок на ціль і відстані до неї, робот може виявляти перешкоди на шляху руху і виконувати їх обхід. Зазначені умови підтримуються методами локалізації роботу в навколишньому середовищі, наприклад, бортовою інерційною системою на основі акселерометра та гіроскопа та, опціонально, одометру при наявності вихідних даних про початкові координати роботу і цілі переміщення. Для більшості завдань РАМ не може мати постійний доступ (на всіх етапах переміщення) до даних щодо кінцевої цілі. Тому для досягнення цілі потрібно знати маршрут, що проходить через послідовність підцілей. В умовах перешкод РАМ повинна мати здатність ситуаційного перепланування маршруту [14]. Тому модель формування керуючих реакцій повинна бути інтегрована з моделлю ситуаційного планування. Очевидно, що реалізація зазначених вимог до РАМ не може базуватися на згаданих евристичних алгоритмах.

Моделі обробки даних від сенсорів, що запозичені у живої природи інтенсивно розробляються в рамках напрямків когнітивної робототехніки [15] і вбудованих когнітивних систем [16]. В роботі [17] представлена модель сприйняття, що відноситься до класу моделей на основі сенсорних даних. Запропонована модель сприйняття формує на підставі даних від сенсорів уявлення ситуації у вигляді фактів що мають багатшарову структуру й відображають сенс даних словами різного рівня узагальнення. Така організація дозволила інтегрувати модель сприйняття із моделлю що заснована на правилах (МСП – модель сприйняття, заснована на правилах) [18]. Інтегрована МСП реалізує прийняття керуючих рішень у два етапи обробки даних від сенсорів. На першому етапі виконується інтерпретація просторово-часового набору даних про середовище в якій переміщається РАМ. Результат інтерпретації є структурований факт, що представляє ситуацію на різних рівнях абстрагування у вигляді нечіткого семантичного опису (слів природної мови) [18, 20]. На другому етапі нечіткий висновок за правилами з лінгвістичними змінними (ЛЗ) формує керуючі реакції РАМ. МСП було запропоновано й апробовано на концептуальному рівні для ситуаційного керування переміщеннями вздовж маршруту РАМ. Однак, реалізація МСП у реальних ситуаціях потребує розробки підходу щодо створення багатшарової бази знань для представлення у вигляді нечітких правил безпосередньо маршруту, стану середовища, способів пересунення в умовах обмежень, усунення перешкод на маршруті і таке інше. Це, у свою чергу,

потребує конкретизації компонентів моделі таких як контекстні ЛЗ, увагові ЛЗ та предметні ЛЗ.

**Мета статті** – імплементація МСП для класу задач ситуаційного керування й перепланування руху РАМ вздовж маршруту в умовах перешкод. Дослідити вплив перешкод на стійкість керування РАМ. Розглядається три класи перешкод. По-перше, коли через перешкоди фізично недоступно для РАМ ділянка маршруту із декількох суміжних підцілей й потрібно ситуаційне перепланування фрагменту маршруту. По-друге, коли збурення можуть перервати рух РАМ між двома суміжними підцілями маршруту і потрібно ситуаційне керування оминанням перешкоди. По-третє, коли через перешкоди недостатньо інформації для вирішення завдання локалізації РАМ.

### Модель навігації, заснована на даних від сенсорів

Імплементація моделі МСП в навігації (МСПН) базується на припущенні, що в просторі, в якому функціонує РАМ, довільним чином розподілено множину маркерів (Landmark, LM)  $L = \{LM_1, \dots, LM_m\}$ .  $LM_i$  характеризується набором унікальних ознак. На множині  $L$  може бути задано кілька маршрутів. Наприклад,  $j$ -й маршрут переміщення РАМ задається у вигляді впорядкованої послідовності LM  $Route_j = (LM_{j,1}, \dots, LM_{j,p})$ , де  $p$  – довжина маршруту. При переміщенні РАМ по маршруту можуть виникати перешкоди таким чином, що рух між  $LM_{j,i}$ ,  $LM_{j,i+1}$  є неможливим. Перешкоди можна розділити на два види: перешкода, що усувається шляхом «локального об'їзду» та  $LM_{j,i+1}$  в кінцевому підсумку досягається; перешкода, що усувається шляхом зміни фрагмента маршруту таким чином, щоб досягнути наступного доступного LM по маршруту за  $LM_{j,i+1}$ , наприклад,  $LM_{j,i+2}$  або  $LM_{j,i+3}$ . Останній тип перешкоди унеможливає досягнення точки маршруту  $LM_{j,i+1}$  і вимагає відхилення від маршруту з подальшим поверненням до маршруту в точці  $LM_{j,i+n}$  ( $n > 1$ ).

При таких припущеннях МСПН, яка використовується для керування переміщеннями РАМ уздовж маршруту, базується на таких знаннях: цілі й плани переміщень та усунення перешкод; факти, що представляють на основі даних від сенсорів можливі ситуації в оточенні РАМ; правила, що представляють знання про маршрути, робочий простір РАМ та стратегії керування; базові алгоритми керування РАМ в типових ситуаціях.

**1. Множина фактів.** Дані від сенсорів в РАМ обробляються механізмом абстрагування [19, 20] з метою отримання їх опису у вигляді багаторівневого факту у вербальній формі на різних рівнях узагальнення. Факт має нечітку характеристику (НХ), яка показує, наскільки зміст вербального подання ситуації (прототип) відповідає конкретному набору даних від сенсорів РАМ. НХ представляє собою нечітке LR число з гаусовою функцією приналежності. На основі НХ, визначається фактор впевненості (cf) [19, 20].

**2. Знання.** Знання РАМ про ціль, план і маршрут переміщення, про стратегію і конкретні керівні впливи, необхідні для досягнення мети, представлені на різних рівнях абстрагування у вигляді нечітких

правил з використанням фактів різних рівнів узагальнення. У загальному вигляді правила мають однакову (модифікована Такагі-Сугено, MTS) модель (1) для всіх рівнів:

$$R_i^l \text{ IF event}(f_i^l) \text{ and CF}_{-sat} f_i^l \text{ is high} \\ \text{and CF}_{-sat} f_j^{l+1} \text{ is high} \quad (1) \\ \text{THEN cf}_{-sat} f_k^l = 1, \text{ cf}_{-sat} f_i^l = -1, [\text{cf}_{-sat} f_j^{l+1} = -1],$$

де  $CF_{-f_i}$  – ім'я ЛЗ, яка нечітко за допомогою трьох термів (high, low, zero) представляє числове значення фактора впевненості cf факту [19, 20].

В (1) наведено правило  $l$ -го рівня абстрагування, в яке включені:  $f_i^l$  – факт  $l$ -го рівня абстрагування даних від сенсорів,  $sat f_i^l$  – супутник факту  $f_i^l$  що використовується для вказівки на поточну мету  $l$ -го рівня та актуальний контекст що супроводжує процес досягнення мети;  $sat f_i^{l+1}$  – супутник факту  $l+1$ -го рівня абстрагування. Правило активізується подією  $event(f_i^l)$ , що породжується появою даних від сенсорів про ознаки  $i$ -го LM, за умови що поточна підціль переміщення досягнута, про що свідчить активність супутника цього факту  $CF_{-sat} f_i^l \text{ is high}$ . Умова  $CF_{-sat} f_j^{l+1} \text{ is high}$  в правилі (1) вказує на актуальну підціль  $l+1$ -го рівня та зв'язує це правило з актуальним контекстом (правило представляє фазу актуального плану верхнього рівня). Правило при активізації змінює підціль  $l$ -го рівня після досягнення актуальної підціль цього рівня і опційно (при досягненні останньої підціль  $l$ -го рівня) деактуалізує підціль  $l+1$ -го рівня ( $cf_{-sat} f_j^{l+1} = -1$ ).

У статті для вирішення задачі навігації РАМ пропонується така модель стратифікації БЗ за рівнями абстрагування.

На верхньому рівні знаходиться множина правил, які описують цілі РАМ (різні завдання чи функції). Нижче рівнем знаходяться знання про план досягнення мети (опис маршруту переміщень у вигляді послідовності LM через які пролягає маршрут). Ще нижче рівнем організовані картографічні знання: для кожного LM робочого простору даються плани досягнення суміжних з ним LM. На самому нижньому рівні БЗ організовані знання про можливі способи керування актуаторами РАМ (елементарні стратегії управління актуаторами). На рис. 1 в графічному вигляді показано стратифікацію БЗ за рівнями абстрактного представлення керування переміщенням РАМ.

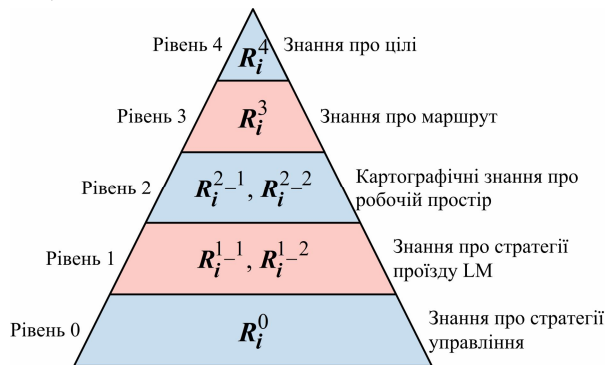


Рис. 1. Стратифікація БЗ за рівнями абстрактного представлення керуючих рішень

**3. Знання про цілі.** Всі цілі РАМ, що вимагають переміщень, задаються зовні й для досягнення мети потребують плану дій (маршруту переміщень). На верхньому рівні БЗ знаходяться правила, що актуалізують знання нижніх рівнів про конкретний маршрут, які використовуються у якості контексту при керуванні переміщеннями. Для кожного  $k$ -го маршруту з  $n_s$  можливих задається таке правило:

$$R_k^4 \text{ IF event}(f_{Start_k}) \text{ and CF}_{-sat} f_{Start_k} \text{ is high} \\ \text{THEN cf}_{-sat} f_{Route_j} = 1, \text{ cf}_{-sat} f_{LM_{j,1}} = 1, \\ \text{cf}_{-sat} f_{Line_{in}} = 1, \text{ cf}_{-sat} f_{Start_1} = -1, \dots, \quad (2) \\ \text{cf}_{-sat} f_{Start_{n_s}} = -1; \\ j = 1, 2, \dots, n_r; k = 1, 2, \dots, n_s.$$

На цьому ж рівні БЗ знаходяться правила, які деактуалізують контекст (порцію знань що описують маршрут), коли мета досягнута про що свідчить досягнення останньої точки маршруту, яка описується фактом  $f_{LM_{j,p}}$ . Це така множина правил:

$$R_{j,p}^4 \text{ IF event}(f_{LM_{j,p}}) \text{ and CF}_{-sat} f_{LM_{j,p}} \text{ is high} \\ \text{and CF}_{-sat} f_{Route_j} \text{ is high} \\ \text{THEN cf}_{-sat} f_{Route_j} = -1, \text{ cf}_{-sat} f_{LM_{j,p}} = -1, \quad (3) \\ \text{cf}_{-sat} f_{Start_1} = 1, \dots, \text{cf}_{-sat} f_{Start_{n_s}} = 1; \\ i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n_r.$$

Друга група цілей переміщення РАМ пов'язана з появою перешкод, що порушують нормальний режим переміщення. Аналогічно, як і для вище розглянутих цілей, на верхньому рівні БЗ знаходяться правила що актуалізують знання нижніх рівнів про плани усунення перешкоди та правила що деактуалізують цю порцію знань, коли мета досягнута. В (4) наведено множину правил що актуалізують:

$$R_i^4 \text{ IF event}(f_{Obst_i}) \text{ and CF}_{-sat} f_{Obst_i} \text{ is high} \\ \text{THEN cf}_{-sat} f_{PlanObst_i} = 1, \text{ cf}_{-sat} f_{LM_{i,1}} = 1, \quad (4) \\ i = 1, 2, \dots, n_{ob}.$$

Факти  $f_{Start_k}$  в (2) й  $f_{Obst_i}$  в (4) формуються на основі даних від сенсорів, наприклад, кнопка, що активізує команду на виконання завдання або голосова команда, або сенсор відстані до перешкоди. Для активізації правила, наприклад, (2), крім події  $event(f_{Start_k})$ , потрібна актуальна ціль

$CF_{-sat} f_{Start_k} \text{ is high}$ . Її актуалізацію було виконано механізмом уваги, коли була досягнута попередня ціль цього рівня. Застосування механізмів управління контекстом та перемикання уваги [17] будуть розглянуті нижче. Активне правило (2) актуалізує контекст, що пов'язаний з досягненням поточної мети  $cf_{-sat} f_{Route_j} = 1$  для нижчих рівнів. Крім цього, правило (2) деактуалізує цілі цього рівня  $sat f_{Start_1}, \dots, sat f_{Start_{n_s}}$  щоб унеможливити реалізацію інших команд що можуть надходити до РАМ під час виконання вже прийнятої команди. Аналогі-

чні функції з планування усунення перешкоди, коли вона з'являється виконують правила з групи (4). В обох випадках правила активізують факт-супутник першого LM  $^{sat}f_{LM_{j,1}}$  в маршруті переміщення і плані обходу перешкоди  $^{sat}f_{LM_{i,1}}$ .

**4. Знання про маршрут.** Маршрут, наприклад,  $j$ -й у вигляді впорядкованої послідовності LM  $Route_j = (LM_{j,1}, \dots, LM_{j,p})$  представлений множиною з  $p$  правил. Правило  $R_{j,i}$  описує ділянку маршруту між  $LM_{j,i}$  та  $LM_{j,i+1}$ . Для цієї ділянки маршруту поточною ціллю переміщення є  $LM_{j,i+1}$ , представлений супутником  $^{sat}f_{LM_{j,i+1}}$  факту  $f_{LM_{j,i+1}}$ , що описує ознаки  $LM_{j,i+1}$ . Вхідний LM ділянки шляху представлений фактом  $f_{LM_{j,i}}$ . Нечіткі правила в БЗ представлені відповідно до (1):

$$R_{j,i}^3 \text{ IF } event(f_{LM_{j,i}}) \text{ and } CF_{^{sat}f_{LM_{j,i}}} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{^{sat}f_{Route_j}} \text{ is high} \quad (5) \\ \text{THEN } cf_{^{sat}f_{LM_{j,i+1}}} = 1, \text{ } cf_{^{sat}f_{LM_{j,i}}} = -1; \\ i = 1, 2, \dots, p-1; j = 1, 2, \dots, n_r.$$

**5. Картографічні знання про робочій простір.**  $LM_i$  безпосередньо пов'язаний дорогами зі скінченною множиною LM  $\{LM_j\}$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ) робочого простору. Дорога, яка примикає до  $LM_i$  і йде до  $LM_j$  має ідентифікатор, пов'язаний з її напрямком (північ, схід, південь, захід) або більш детально. Знання в БЗ про карту місцевості представлені множиною правил, що описують дороги, що безпосередньо пов'язують LM, наприклад,  $LM_i$  з усіма іншими  $LM_j$ :

$$R_i^{2-1} \text{ IF } CF_{f_{LM_i}} \text{ is high and } CF_{^{sat}f_{LM_j}} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{^{sat}f_{Out_{dir}}} = 1; \quad (6) \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, k.$$

У правилі (6) цільовий  $LM_j$  представлений супутником  $^{sat}f_{LM_j}$  факта  $f_{LM_j}$ , а вхідний LM представлений двома фактами:  $f_{LM_i}$  та фактом-супутником  $^{sat}f_{Out_{dir}}$  факту  $f_{Out_{dir}}$ , який є ідентифікатором виїзної дороги від  $f_{LM_i}$  що безпосередньо зв'язує його з  $f_{LM_j}$ . Правила (6) не пов'язані з конкретним маршрутом. Вони можуть бути активізовані сенсорними даними про місцезнаходження ПАМ, коли вона знаходиться в оточенні  $LM_i$ .

Якщо ПАМ знаходиться на під'їзній дорозі до деякого LM (в зоні доступу до даних), на основі ідентифікатора цієї дороги формуються ознаки факту  $f_{In_{dir}}$ . Ціллю переміщення ПАМ є виїзна дорога з ідентифікатором, що представлений супутником факту  $^{sat}f_{Out_{dir}}$ . Картографічні знання про те, який маневр потрібно виконати, щоб потрапити з під'їзної дороги на виїзну формують правила такого типу:

$$R_i^{2-2} \text{ IF } CF_{f_{In_{dir}}} \text{ is high and } CF_{^{sat}f_{Out_{dir}}} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{^{sat}f_{Maneuver_{type}}} = 1, cf_{^{sat}f_{Out_{dir}}} = -1. \quad (7)$$

**6. Знання про стратегії проїзду LM.** LM являє собою певне розгалуження доріг або глухий кут. На рис. 2 показані можливі типи розгалужень, які використовувалися в моделі простору. Передбачається, що на кожній з доріг, що примикають до LM, на деякій відстані від розгалуження є розмітка у вигляді суцільної смуги «стоп». Інформація про цю лінію, отримана за допомогою сенсорів ПАМ, формує факт  $f_{Line_{in}}$ . План проїзду LM розчленований на дві фази. Перша фаза це виконання маневру (проїзд прямо або поворот) щоб потрапити до старт-стоп лінії на виїзній дорозі зі старт-стоп лінії на в'їзній дорозі. Друга фаза це початок руху по виїзній дорозі. Знання про маневр на першій фазі представлені правилом (8). Правило актуалізується при появі події (наїзд на старт-стоп лінію,  $event(f_{Line})$ ) і при виконанні умов: безпечна ситуація на розгалуженні доріг ( $CF_{f_{Safe}} \text{ is high}$ ), тип маневру ( $CF_{^{sat}f_{Maneuver_{type}}} \text{ is high}$ ), спосіб виконання маневру ( $CF_{f_{Maneuver_{method}}} \text{ is high}$ ). Дані, на базі яких формується представлення ситуації оточення LM у вигляді фактів  $f_{Safe}$ ,  $f_{Maneuver_{type}}$ ,  $f_{Maneuver_{method}}$ , зберігаються у пам'яті кожного LM й стають доступні сенсорам ПАМ, коли вона знаходиться на старт-стоп лінії. Правило (8) актуалізує супутники фактів: ціль переміщення до старт-стоп лінії на виїзній дорозі  $cf_{^{sat}f_{Line_{out}}} = 1$ , і стратегію управління:

$$R_i^{1-1} \text{ IF } event(f_{Line}) \text{ and } CF_{^{sat}f_{Line_{in}}} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{f_{Safe}} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{^{sat}f_{Maneuver_{type}}} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{f_{Maneuver_{method}}} \text{ is high} \quad (8) \\ \text{THEN } cf_{^{sat}f_{Line_{out}}} = 1, \\ cf_{^{sat}f_{U_{Maneuver_{type}_{method}}}} = 1, \\ cf_{^{sat}f_{Line_{in}}} = -1, cf_{^{sat}f_{Maneuver_{type}}} = -1.$$

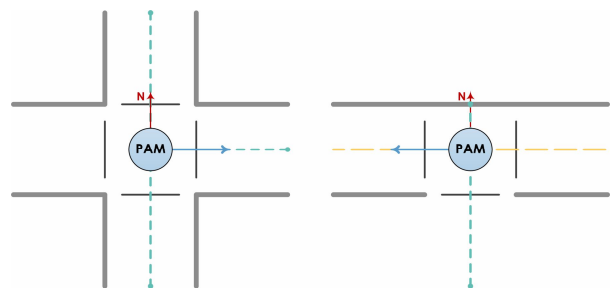


Рис. 2. Типи розгалужень

Правило (9) описує знання про другу фазу – початок руху по виїзній дорозі. На рис. 3 показані можливі типи виїзних доріг, які використовувалися в моделі простору.

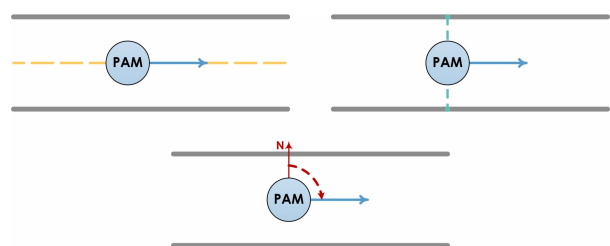


Рис. 3. Типи доріг

Актуалізується правило подією наїзду на старт-стоп лінію при очікуванні її на виїзній дорозі  $CF_{-}^{sat}f_{Line\_out}$  is high. При заданому типі руху по виїзній дорозі  $CF_{-}f_{Moving\_method}$  is high актуалізується стратегія управління  $cf_{-}^{sat}f_{U\_Moving\_method} = 1$  і цільова ситуація до появи якої дана стратегія управління залишається актуальною  $cf_{-}^{sat}f_{Line\_in} = 1$ .

$$R_i^{1-2} \text{ IF event}(cf_{-}f_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{Line\_out} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}f_{Moving\_method} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{Line\_out} = -1, \\ cf_{-}^{sat}f_{U\_Moving\_method} = 1, cf_{-}^{sat}f_{Line\_in} = 1. \quad (9)$$

**7. Знання про стратегії управління.** Стратегія управління реалізується контролером, наприклад, ПД, нейро або нечітким, який заснований на певному алгоритмі управління за прямими або зворотним зв'язкам [21]. Правило (10) активує контролер що керує маневром (проїзд від в'їзної старт-стоп лінії до виїзної старт-стоп лінії розгалуження яке представлено LM, рис. 2). Правило (11) активує контролер що керує проїздом відповідним методом (рис.3) від виїзної старт-стоп лінії одного LM до в'їзної старт-стоп лінії другого LM:

$$R_i^0 \text{ IF } CF_{-}^{sat}f_{U\_Maneuver\_type\_method} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Line\_out} \text{ is high} \\ \text{THEN } U\_Maneuver\_type\_method; \quad (10)$$

$$R_i^0 \text{ IF } CF_{-}^{sat}f_{U\_Moving\_method} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Line\_in} \text{ is high} \\ \text{THEN } U\_Moving\_method. \quad (11)$$

### Експерименти

Для дослідження моделі було розроблено штучне оточення у вигляді ортогонального лабіринту (рис. 4). В ключових точках лабіринту (розгалуженнях та глухих кутах) містяться LM. Рух по дорогам між LM організовано з використанням трьох сенсорних систем: на основі лінії розмітки (на рис. 4 показано жовтим кольором) з використанням сенсора лінії; на основі відстані до обмежуючих стін (показано зеленим кольором) з використанням далекомірив; на основі руху по азимуту (показано червоним кольором) з використанням цифрового компасу.

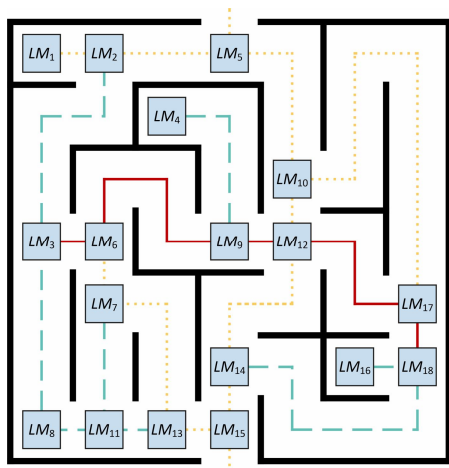


Рис. 4. Оточення для експериментів

У відповідності до описаної моделі сформована чотирьох шарова БЗ, що описує знання про цілі, різні маршрути в штучному оточенні, картографічні знання про робочий простір, знання про способи управління актуаторами РАМ. Для апробації підходу було розроблено програму що реалізує обробку даних від сенсорів на основі знань (2)-(10) за модифікованою моделлю Такагі-Сугено що включає механізми відстеження контексту та перемикання уваги.

Нижче наведено приклад одного з проведених експериментів. База правил (2)-(10) конкретизована для одного маршруту  $Route_1 = (LM_5, LM_2, LM_3, LM_6, LM_7, LM_{13}, LM_{15})$  (рис. 4). Конкретизовані правила (2), (3) мають вигляд:

$$R_1^4 \text{ IF event}(f_{Start_1}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{Start_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{Route_1} = 1, cf_{-}^{sat}f_{LM_5} = 1, \\ cf_{-}^{sat}f_{Line\_in} = 1, cf_{-}^{sat}f_{Start_1} = -1, \dots, \\ cf_{-}^{sat}f_{Start_4} = -1; \\ R_{1,6}^4 \text{ IF event}(f_{LM_{15}}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{LM_{15}} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{Route_1} = -1, cf_{-}^{sat}f_{LM_{15}} = -1, \\ cf_{-}^{sat}f_{Start_1} = 1, \dots, cf_{-}^{sat}f_{Start_4} = 1. \quad (12)$$

Правила (5) що безпосередньо описують маршрут  $Route_1$  представлені нижче:

$$R_{1,1}^3 \text{ IF event}(f_{LM_5}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{LM_5} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{LM_2} = 1, cf_{-}^{sat}f_{LM_5} = -1; \\ R_{1,2}^3 \text{ IF event}(f_{LM_2}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{LM_2} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{LM_3} = 1, cf_{-}^{sat}f_{LM_2} = -1; \\ R_{1,3}^3 \text{ IF event}(f_{LM_3}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{LM_3} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{LM_6} = 1, cf_{-}^{sat}f_{LM_3} = -1; \\ R_{1,4}^3 \text{ IF event}(f_{LM_6}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{LM_6} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{LM_7} = 1, cf_{-}^{sat}f_{LM_6} = -1; \\ R_{1,5}^3 \text{ IF event}(f_{LM_7}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{LM_7} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{LM_{13}} = 1, cf_{-}^{sat}f_{LM_7} = -1; \\ R_{1,6}^3 \text{ IF event}(f_{LM_{13}}) \text{ and } CF_{-}^{sat}f_{LM_{13}} \text{ is high} \\ \text{and } CF_{-}^{sat}f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{LM_{15}} = 1, cf_{-}^{sat}f_{LM_{13}} = -1. \\ R_3^{2-1} \text{ IF } CF_{-}f_{LM_2} \text{ is high and } CF_{-}^{sat}f_{LM_3} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{Out\_S} = 1; \\ R_6^{2-1} \text{ IF } CF_{-}f_{LM_3} \text{ is high and } CF_{-}^{sat}f_{LM_6} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{Out\_E} = 1; \\ R_9^{2-1} \text{ IF } CF_{-}f_{LM_5} \text{ is high and } CF_{-}^{sat}f_{LM_2} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{-}^{sat}f_{Out\_W} = 1; \quad (13)$$

$R_{12}^{2,1}$  IF CF $_f$  $_{LM_6}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{LM_7}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  = 1;  
 $R_{15}^{2,1}$  IF CF $_f$  $_{LM_7}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{LM_{11}}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  = 1;  
 $R_{16}^{2,1}$  IF CF $_f$  $_{LM_7}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{LM_{13}}$  is high (14)  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_E}$  = 1;  
 $R_{27}^{2,1}$  IF CF $_f$  $_{LM_{11}}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{LM_{13}}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_E}$  = 1;  
 $R_{28}^{2,1}$  IF CF $_f$  $_{LM_{13}}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{LM_{15}}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_E}$  = 1.

$R_2^{2,2}$  IF CF $_f$  $_{In_N}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Out_E}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_left}$  = 1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_E}$  = -1;  
 $R_3^{2,2}$  IF CF $_f$  $_{In_N}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_forward}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  = -1;  
 $R_4^{2,2}$  IF CF $_f$  $_{In_N}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Out_W}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_right}$  = 1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_W}$  = -1;  
 $R_7^{2,2}$  IF CF $_f$  $_{In_E}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_left}$  = 1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  = -1;  
 $R_{14}^{2,2}$  IF CF $_f$  $_{In_W}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Out_E}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_forward}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_E}$  = -1;  
 $R_{15}^{2,2}$  IF CF $_f$  $_{In_W}$  is high and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_right}$  = 1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Out_S}$  = -1;

Картографічні знання (6), (7) про робочій простір (рис. 4) представлені 9-ю правилами (14), (15). Знання про стратегії проїзду розгалужень що на рис. 3 показані відповідними LM представлені множиною нижче наведених правил:

$R_1^{1,1}$  IF event( $f_{Line}$ ) and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Safe}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_right}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Maneuver_mark}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_right_mark}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  = -1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_right}$  = -1;  
 $R_3^{1,1}$  IF event( $f_{Line}$ ) and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Safe}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_left}$  is high (16)  
 and CF $_f$  $_{Maneuver_mark}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_left_mark}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  = -1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_left}$  = -1;  
 $R_9^{1,1}$  IF event( $f_{Line}$ ) and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Safe}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_right}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Maneuver_azim}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  = 1,

cf $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_right_azim}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  = -1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_right}$  = -1;  
 $R_{11}^{1,1}$  IF event( $f_{Line}$ ) and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Safe}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_left}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Maneuver_azim}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_left_azim}$  = 1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  = -1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Maneuver_left}$  = -1.

$R_1^{1,2}$  IF event( $f_{Line}$ ) and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Moving_mark}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  = -1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{U_Moving_mark}$  = 1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  = 1;  
 $R_2^{1,2}$  IF event( $f_{Line}$ ) and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Moving_dist}$  is high (17)  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  = -1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{U_Moving_dist}$  = 1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  = 1;  
 $R_3^{1,2}$  IF event( $f_{Line}$ ) and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  is high  
 and CF $_f$  $_{Moving_azim}$  is high  
 THEN cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  = -1,  
 cf $_{sat}$  $_f$  $_{U_Moving_azim}$  = 1, cf $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  = 1.

Знання про можливі стратегії управління представлені множиною правил:

$R_1^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_right_mark}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  is high  
 THEN U $_Maneuver_right_mark$ ;  
 $R_3^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_left_mark}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  is high  
 THEN U $_Maneuver_left_mark$ ;  
 $R_9^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_right_azim}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  is high  
 THEN U $_Maneuver_right_azim$ ;  
 $R_{11}^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Maneuver_left_azim}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_out}$  is high  
 THEN U $_Maneuver_left_azim$ ;  
 $R_{13}^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Moving_mark}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 THEN U $_Moving_mark$ ;  
 $R_{14}^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Moving_dist}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 THEN U $_Moving_dist$ ;  
 $R_{15}^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Moving_azim}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 THEN U $_Moving_azim$ ;  
 $R_{16}^0$  IF CF $_{sat}$  $_f$  $_{U_Obst_i}$  is high  
 and CF $_{sat}$  $_f$  $_{Line_in}$  is high  
 THEN U $_Obst_i$ . (18)

Передбачається що в довільний момент контролю може бути реалізована тільки одна стратегія керування. Цю умову реалізують модифіковані (18)

правила. Наприклад, правило  $R_1^0$  в (18) прийме вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_1^0 \quad & \text{IF CF}_{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_mark} \text{ is high} \\
 & \text{and CF}_{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
 & \text{THEN } U\_Maneuver\_right\_mark, \\
 & cf_{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_left\_mark} = -1, \\
 & cf_{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_azim} = -1, \dots, \\
 & cf_{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_azim} = -1.
 \end{aligned} \quad (19)$$

Нижче наведено алгоритм що реалізує MTS модель обробки даних від сенсорів й прийняття керуючих рішень. На кожному такті керування виконуються обчислення що приведені на рис. 5.

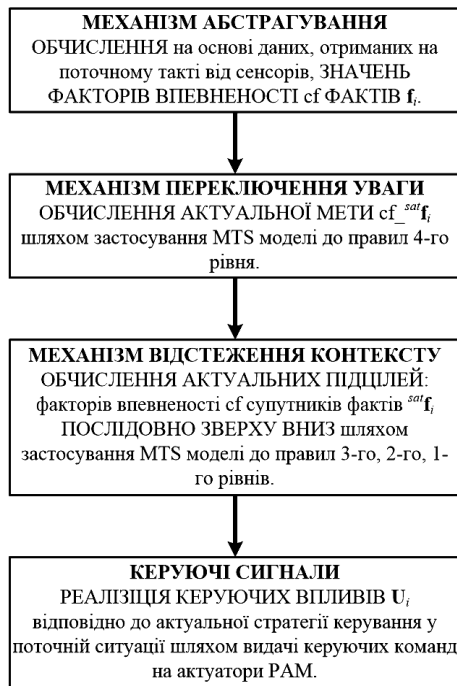


Рис. 5. Алгоритм формування керуючих впливів по модифікованій моделі TS

Модифікація моделі TS зводиться до наступного. По-перше, правило у полі ЯКЩО може мати терм  $event(f_i)$ . Це означає що правило застосовується механізмом виведення (МВ) TS у випадку, коли сталася подія: фактор впевненості факту  $f_i$  на поточному кроці обробки даних прийняв значення  $cf_{f_i} > \varepsilon$ , а на попередньому кроці ця умова не виконувалася. Коли на поточному кроці з фактом  $f_i$  події не відбувається, то правило, яке входить факт  $f_i$  вимикається з обробки механізмом TS (в класичних продукційних системах штучного інтелекту це правило є таким що викреслюється). По-друге, якщо супутник  $sat \mathbf{f}_i$  факту  $f_i$  активовано  $cf_{sat} \mathbf{f}_i = 1$  (поточна мета актуальна), то механізм контексту приділяє ідентифікації події цим фактом більш уваги, що реалізовано шляхом зменшення порогу  $\varepsilon$  в умові визначення події  $cf_{f_i} > \varepsilon - \Delta$ , де  $\Delta$  – експериментально обрана константа. Інші пояснення до алгоритму дані нижче при обговоренні результатів емуляції (табл. 1) проїзду РАМ по маршруту  $Route_1$ . У першому стовбці наведено множину фактів та їх супут-

ників що задіяні в маршруті  $Route_1$ . Інші стовбці відповідають подіям що породжуються зміною ситуації при переміщенні РАМ вздовж маршруту.

Крок 0. Початкова ситуація: РАМ знаходиться в режимі очікування будь якої події про що свідчать  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Start_1} = 1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Obst_i} = 1$ .

Крок 1. На цьому кроці відбулася подія  $cf_{f_{Start_1}} > \varepsilon - \Delta$  для  $\varepsilon = 0.75$ ,  $\Delta = 0.25$ , оскільки  $cf_{f_{Start_1}} = 0.8$ . В табл. 1 комірки для факторів впевненості, значення яких мало місце на початку кроку обробки MTS відображені зеленим кольором, події для цих фактів – рожевим, результати обчислень правил – жовтим. Для цієї ситуації МВ MTS буде застосовано тільки одне правило на верхньому рівні  $R_1^4$ , яке визначить  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Route_1} = 1$ ,

$cf_{sat} \mathbf{f}_{LM_5} = 1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1$ . Умови для активізації будь яких правил нижчих рівнів відсутні, тому немає більш змін в статусі фактів.

Крок 2. Актуалізовані на попередньому кроці ціль переміщення  $sat \mathbf{f}_{Route_1}$  та перша підціль маршруту  $sat \mathbf{f}_{LM_5}$  активізувало механізм переключення уваги. Це дозволило на поточному кроці обробки даних обчислити значення фактів у тому числі  $cf_{f_{LM_5}} = 0.9$  і зареєструвати подію  $cf_{f_{LM_5}} > \varepsilon - \Delta$ . Для цієї ситуації МВ MTS на третьому рівні буде активізовано правило  $R_{1,1}^3$ , яке визначить

$cf_{sat} \mathbf{f}_{LM_5} = -1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{LM_2} = 1$ . На першому підрівні другого рівня на цьому кроці з'являється факт  $cf_{f_{In\_N}} = 1$ , через що буде активізовано правило  $R_9^{0-1}$ , в результаті визначається  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Out\_W} = 1$ . На другому підрівні другого рівня активізується правило  $R_4^{2-2}$ , що визначає  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Out\_W} = -1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Maneuver\_right} = 1$ . В табл. 1 блакитним кольором показано факт, що на одному кроці активізується та деактивізується.

Крок 3. На цьому кроці відбулася подія  $cf_{f_{Line}} > \varepsilon - \Delta$  оскільки  $cf_{f_{Line}} = 0.8$ . З'являються факти  $f_{Maneuver\_mark} = 1$  та  $LM \mathbf{f}_{Safe} = 1$ . Застосовується правило  $R_1^{1-1}$ , тобто  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = 1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_mark} = 1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = -1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Maneuver\_right} = -1$ .  $cf_{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_mar} = 1$ . Правило нульового рівня  $R_1^0$  запускає на виконання стратегію  $U_{Maneuver\_right\_mark}$ .

Крок 4. На цьому кроці відбулася подія  $cf_{f_{Line}} > \varepsilon - \Delta$ , оскільки  $cf_{f_{Line}} = 0.9$ . З'являється факт  $f_{Moving\_mark}$ . Застосовується правило  $R_1^{1-2}$ , що визначає  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1$ ,  $cf_{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_mark} = 1$  та  $cf_{sat} \mathbf{f}_{Line\_int} = 1$ . Правило  $R_{13}^0$  для якого виконується умова  $cf_{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_mark} = 1$  запускає на виконання стратегію  $U_{Moving\_mark}$ . РАМ починає рух до  $LM_2$  (рис. 4).

Крок 4а. На цьому кроці ситуація, коли РАМ рухається між  $LM_5$  й  $LM_2$  без перешкод, задовольняє вимогам тільки одного правила  $R_{13}^0$  в (18) із зауваженнями (19). Згідно цього правила стратегія керування зберігається без змін.

Таблиця 1 – Результати комп’ютерного експерименту cf\_f<sub>i</sub>

Факт	Номери кроків обробки даних від сенсорів																		
	0	1	2	3	4	4a	4б	4в	5	...	14	14a	14б	14в	14г	14д	14е	15	...
f <sub>Start1</sub>	-1	0.8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Start1</sub>	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Route1</sub>	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	1	1	...
f <sub>Obst1</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Obst1</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	1	1	...
sat f <sub>U Obst1</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Obst1 mark</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>LM5</sub>	-1	-1	0.9	0.9	0.9	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>LM5</sub>	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>LM2</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>LM2</sub>	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>LM3</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>LM3</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>LM7</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>LM7</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>LM11</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	...
sat f <sub>LM11</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>LM13</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...
sat f <sub>LM13</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	1	1	1	1	1	1	1	-1	...
f <sub>LM15</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>LM15</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Out E</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Out S</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Out W</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>In N</sub>	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	...
f <sub>In E</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>In W</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...
sat f <sub>Maneuver left</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Maneuver right</sub>	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>Maneuver forward</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>Line</sub>	-1	-1	-1	0.8	0.9	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	...
sat f <sub>Line in</sub>	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	...	1	1	-1	1	1	-1	1	1	...
sat f <sub>Line out</sub>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	...
f <sub>Safe</sub>	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	...
f <sub>Maneuver mark</sub>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0.8	-1	...	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	...
sat f <sub>Maneuver mark</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>U Maneuver left mark</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...
sat f <sub>U Maneuver right mark</sub>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>U Maneuver forward mark</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f <sub>Moving dist</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	...
f <sub>Moving mark</sub>	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
sat f <sub>U Moving dist</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	...
sat f <sub>U Moving mark</sub>	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
U <sub>Maneuver left mark</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
U <sub>Maneuver right mark</sub>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
U <sub>Maneuver forward mark</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	...
U <sub>Moving dist</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	...
U <sub>Moving mark</sub>	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
U <sub>Obst1</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...

Крок 4б. На цьому кроці моделюється поява перешкоди на шляху РАМ. Для спрощення припускається, що факт f<sub>Obst<sub>i</sub></sub> у правилі (4) достовірно ідентифікує перешкоду, наприклад, яку можливо об’їхати справа на основі даних від сенсору відстані. Нижче наведені додаткові правила які активують стратегію керування оминанням перешкоди поки знову не з’явиться розмітка:

$$\begin{aligned}
 &R_i^4 \text{ IF event}(f_{Obst_i}) \text{ and CF}_{-sat} f_{Obst_i} \text{ is high} \\
 &\text{ THEN cf}_{-sat} f_{U_{Obst_i}} = 1, \\
 &\text{ cf}_{-sat} f_{Maneuver\_mark} = 1, \text{ cf}_{-sat} f_{Obst_i\_mark} = 1; \quad (20) \\
 &R_i^0 \text{ IF event}(f_{Maneuver\_mark}) \\
 &\text{ and CF}_{-sat} f_{Maneuver\_mark} \text{ is high} \\
 &\text{ and CF}_{-sat} f_{Obst_i\_mark} \text{ is high}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{ THEN cf}_{-sat} f_{U_{Moving\_mark}} = 1, \\
 &\text{ cf}_{-sat} f_{Maneuver\_mark} = -1, \\
 &\text{ cf}_{-sat} f_{Obst_i\_mark} = -1.
 \end{aligned}$$

Крок 5. Аналогічно до кроку 2, коли досягнуто LM<sub>2</sub>. Кроки 6-13 відображають симуляцію безперешкодного руху на ділянках (LM<sub>2</sub>, LM<sub>3</sub>, LM<sub>6</sub>, LM<sub>7</sub>). Кроки 5, 8, 11, 14 описують ситуації, коли виникає подія, пов’язана із прибуттям РАМ до чергового LM за маршрутом f<sub>LM<sub>1</sub>,i</sub>. З’являється факт, що описує напрямок під’їзду до LM f<sub>In<sub>dir</sub></sub>. Актуалізуються супутники фактів чергового цільового LM за даним маршрутом sat f<sub>LM<sub>1</sub>,i+1</sub>, напрямку виїзду з LM sat f<sub>Out<sub>dir</sub></sub> та типу маневру sat f<sub>Maneuver<sub>type</sub></sub>, що необхідно виконати для проїзду LM. Кроки 6, 9, 12, 15 . описують ситуації, коли виникає подія досягнення старт-стоп лінії на в’їзній дорозі f<sub>Line</sub>. З’являються факти f<sub>Maneuver<sub>method</sub></sub>



методу виконання маневру для проїзду LM та безпечності проїзду  $f_{Safe}$ . Актуалізуються супутники фактів появи старт-стоп лінії на виїзній дорозі  $^{sat}f_{Line\_out}$  та стратегії проїзду LM. Запускається стратегія керування рухом  $U_{Maneuver\_type\_method}$ . На кроках 7, 10, 13, 16 виникає подія досягнення старт-стоп лінії на виїзній дорозі  $f_{Line}$  відповідних LM. З'являється факт методу руху по виїзній дорозі  $f_{Moving\_method}$ . Актуалізуються супутники фактів появи старт-стоп лінії на виїзній дорозі  $^{sat}f_{Line\_in}$  та стратегії руху на виїзних дорогах. Запускаються стратегії керування рухом на виїзних дорогах  $U_{Moving\_method}$ . Крок 17 описує подію появи ознак кінцевого LM за маршрутом  $f_{LM14}$ . Виконується деактуалізація факту руху по маршруту  $^{sat}f_{Route1}$ . Актуалізуються факти, що показують готовність РАМ до виконання нових завдань  $^{sat}f_{Start1}$ .

Особливої уваги заслуговують кроки 14, 14а, 14б, 14в. На 14-му кроці досягнуто  $LM_7$ . На кроці 14а моделюється небезпечна ситуація: рух на ділянці  $LM_7 - LM_{13}$  небезпечний ( $CF_{f_{Safe}}$  is low). Тому правило з (16) не буде активізованим і, як наслідок, не буде визначена стратегія керування. Якщо базу знань доповнити правилами об'їзду з  $LM_7$  через  $LM_{11}$  до  $LM_{13}$ , то далі рух по маршруту буде продовжений. Нижче наведено правило об'їзду небезпечної ділянки

$$R_{j,7}^3 \quad \text{IF } CF_{f_{Safe}} \text{ is low and } CF_{f_{LM_{13}}}^{sat} \text{ is high and } CF_{f_{LM_7}} \text{ is high} \\ \text{THEN } cf_{f_{LM_{11}}}^{sat} = 1, \quad cf_{f_{detour}}^{sat} = 1$$

після активізації якого будуть активізованими правила з (14), що вкажуть напрям виїзду до  $LM_{11}$  і правила нижчих рівнів що активізують стратегію управління рухом від  $LM_7$  через  $LM_{11}$ . Кроки 14г, 14д, 14е описують ситуації проїзду від  $LM_{11}$  до  $LM_{13}$ . Оскільки поточна ціль перерваного руху по маршруту

$CF_{f_{LM_{13}}}^{sat}$  is high весь час об'їзду залишається активною, то при досягненні  $LM_{11}$  планування маршруту відбувається на початковій базі правил що і для маршруту без перешкод.

Особливість полягає в необхідності деактивізації факту  $cf_{f_{detour}}^{sat} = -1$ .

## Висновки і напрямки подальших досліджень

Дослідження моделі сприйняття, заснованої на правилах, показали спроможність її імплементації для класу задач навігації роботу. Модель сприйняття що інтегрована з модифікованою моделлю Такагі-Сугено вирішує завдання ситуаційного керування та перепланування маршруту і задовольняє вимогам щодо автономних систем та має переваги в порівнянні з методами програмного та евристичного керування за такими критеріями:

- гнучкість забезпечується завдяки представленню нечіткими правилами різного рівня узагальнення знання про цілі, маршрут й план усунення перешкод, картографічні знання про робочій простір, стратегії і конкретні керівні рішення, що дозволяє адаптувати знання під конкретні умови без переграмування системи керування;

- масштабованість забезпечується заміною фрагментів бази знань. На рівні маршрутів додаються нові правила що задають ділянки маршруту між двома суміжними маркерами. На рівні картографічних даних додаються правила що описують зв'язки нових маркерів з існуючими. На рівні функціональних можливостей роботу додаються правила що описують нові стратегії поведінки та керування роботом. На рівні інформаційного забезпечення додаються нові факти що описують відповідні концепти, побудовані на даних від доданих в систему нових сенсорів;

- опрацювання невизначеності забезпечується механізмами відстеження контексту та перемикання уваги, завдяки яким знання про перешкоди та стратегії їх подолання автоматично застосовуються у небезпечних ситуаціях. Результати комп'ютерних експериментів підтвердили можливості роботу щодо автономного виконання завдання у ситуаціях коли, по-перше, перешкоди що потребують ситуаційного перепланування фрагменту маршруту або усунення завади шляхом переключення на іншу стратегію, по-друге, через перешкоди недостатньо інформації для вирішення завдання локалізації роботу.

Подальші дослідження націлені на створення механізмів адаптації й навчання щодо автоматичної побудови картографічних знань.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mintchell G. Industry 4.0 survey: building the digital enterprise. 2016. URL: <https://themanufacturingconnection.com/2016/09/industry-4-0-survey-building-digital-enterprise>.
2. Darlington P. Rail industry capability delivery plan. 2017. URL: <https://www.railengineer.co.uk/2017/02/16/rail-industry-capability-delivery-plan>.
3. Duarte F., Ratti C. The impact of autonomous vehicles on cities: a review. *Journal Of Urban Technology*. 2018. No. 25 (4), pp. 3-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2018.1493883>.
4. Stachniss C. *Robotic mapping and exploration*. Springer-Verlag Berlin, 2009. 198 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01097-2>.
5. Rone W., Ben-Tzvi P. Mapping, localization and motion planning in mobile multi-robotic systems. *Robotica*. Cambridge University Press, 2013. No. 31 (1), pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574712000021>.
6. Bresson G., Alsayed Z., Yu L., Glaser S. Simultaneous localization and mapping: a survey of current trends in autonomous driving. *IEEE Trans. On Intelligent Vehicles*, 2017. No. 2 (3), pp. 194-220. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2749181>.
7. Fuentes-Pacheco J., Ruiz-Ascencio J., Rendón-Mancha J. Visual simultaneous localization and mapping: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 2012. No. 43 (1), pp. 55-81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9365-8>.
8. Hoy M., Matveev A., Savkin A. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey. *Robotica*, 2014. No. 33 (3), pp. 463-497. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0263574714000289>.
9. Lv T., Zhao C., Bao J. A global path planning algorithm based on bidirectional SVGA. *Journal Of Robotics*, 2017. Vol. 2017, pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8796531>.

10. Lu Y., Xue Z., Xia G., Zhang, L. A survey on vision-based UAV navigation. *Geo-Spatial Information Science*, 2018. No. 21(1), pp. 21-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420509>.
11. Mac T., Copot C., Tran D. De Keyser, R. Heuristic approaches in robot path planning: A survey. *Robotics And Autonomous Systems*, 2016. Vol. 86, pp. 13-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.08.001>.
12. Yufka A., Parlaktuna O. Performance comparison of bug algorithms for mobile robots. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, 2009. pp. 61-65. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2043.7920>.
13. McGuire K., de Croon G., Tuyls, K. A comparative study of bug algorithms for robot navigation. *Robotics And Autonomous Systems*, 2019. Vol. 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103261>.
14. Russel S., Norvig, P. *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice Hall, 2010, 1132 p.
15. Asada M., Hosoda K., Kuniyoshi Y., Ishiguro H., Inui T. Cognitive Developmental Robotics: A Survey. *IEEE Trans. On Autonomous Mental Development*, 2009. No. 1 (1), pp. 12-34. DOI: <https://doi.org/10.1109/tamd.2009.2021702>.
16. Alippi C. *Intelligence for Embedded Systems*. Springer International Publishing, 2014. 283 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05278-6>.
17. Kargin A., Petrenko, T. Spatio-Temporal Data Interpretation Based on Perceptual Model. In Mashtalir V., Ruban I., and Levashenko V. (eds) *Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data*, Studies in Computational Intelligence, 2020. Vol. 876. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0_3).
18. Kargin A., Panchenko S., Vasiljevs A., Petrenko, T. Implementation of cognitive perception functions in fuzzy situational control model. *Procedia Computer Science*, 2019. Vol. 149, pp. 231-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.128>.
19. Каргин А.А., Петренко Т.Г. Абстрагирование и категоризация в умных машинах на основе гранулярных вычислений. *Вісник НТУ "ХПИ"*, 2017. №50. С. 130-141. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2017.50.06>.
20. Каргин А.А. Введение в интеллектуальные машины. Кн. 1. Интеллектуальные регуляторы. Норд-Пресс, Донецк, 2010. 526 с.
21. Kargin A., Ivaniuk O., Galych G., Panchenko A. Polygon for smart machine application. *2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies*. IEEE, 2018. Pp. 464-468. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409178>.

## REFERENCES

1. Mintchell, G. (2016), "Industry 4.0 survey: building the digital enterprise". Available at: <https://themanufacturingconnection.com/2016/09/industry-4-0-survey-building-digital-enterprise>.
2. Darlington, P. (2017), "Rail industry capability delivery plan". Available at: <https://www.railengineer.co.uk/2017/02/16/rail-industry-capability-delivery-plan>.
3. Duarte, F. and Ratti, C. (2018), "The impact of autonomous vehicles on cities: a review", *Journal Of Urban Technology*, No. 25 (4), pp. 3-18, DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2018.1493883>.
4. Stachniss, C. (2009), *Robotic mapping and exploration*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 198 p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01097-2>.
5. Rone, W. and Ben-Tzvi, P. (2013), "Mapping, localization and motion planning in mobile multi-robotic systems," *Robotica*. Cambridge University Press, No. 31 (1), pp. 1-23, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574712000021>.
6. Bresson, G., Alsayed, Z., Yu, L. and Glaser, S. (2017), "Simultaneous localization and mapping: a survey of current trends in autonomous driving", *IEEE Trans. On Intelligent Vehicles*, No. 2 (3), pp. 194-220, DOI: <https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2749181>.
7. Fuentes-Pacheco, J., Ruiz-Ascencio, J. and Rendón-Mancha, J. (2012), "Visual simultaneous localization and mapping: a survey", *Artificial Intelligence Review*, No. 43 (1), pp. 55-81, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9365-8>.
8. Hoy, M., Matveev, A. and Savkin, A. (2014), "Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey", *Robotica*, No. 33 (3), pp. 463-497, DOI: <https://doi.org/10.1017/s0263574714000289>.
9. Lv, T., Zhao, C. and Bao, J. (2017), "A global path planning algorithm based on bidirectional SVGA", *Journal Of Robotics*, Vol. 2017, pp. 1-11, DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8796531>.
10. Lu, Y., Xue, Z., Xia, G. and Zhang, L. (2018), "A survey on vision-based UAV navigation", *Geo-Spatial Information Science*, No. 21 (1), pp. 21-32, DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420509>.
11. Mac, T., Copot, C., Tran, D. and De Keyser, R. (2016), "Heuristic approaches in robot path planning: A survey", *Robotics And Autonomous Systems*, Vol. 86, pp. 13-28, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.08.001>.
12. Yufka, A. and Parlaktuna, O. (2009), "Performance comparison of bug algorithms for mobile robots", *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, pp. 61-65, DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2043.7920>.
13. McGuire, K., de Croon, G. and Tuyls, K. (2019), "A comparative study of bug algorithms for robot navigation", *Robotics And Autonomous Systems*, Vol. 121, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103261>.
14. Russel, S. and Norvig, P. (2010), *Artificial intelligence: a modern approach*, Prentice Hall, 1132 p.
15. Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H. and Inui, T. (2009), "Cognitive Developmental Robotics: A Survey", *IEEE Trans. On Autonomous Mental Development*, No. 1 (1), pp. 12-34, DOI: <https://doi.org/10.1109/tamd.2009.2021702>.
16. Alippi, C. (2014), *Intelligence for Embedded Systems*, Springer International Publishing, 283 p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05278-6>.
17. Kargin, A. and Petrenko, T. (2020), "Advances in spatio-temporal segmentation of visual data" in Mashtalir, V., Ruban, I., and Levashenko, V. (eds) *Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data*, Studies in Computational Intelligence, Vol. 876. Springer, Cham, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0_3).
18. Kargin, A., Panchenko, S., Vasiljevs, A. and Petrenko, T. (2019), "Implementation of cognitive perception functions in fuzzy situational control model", *Procedia Computer Science*, Vol. 149, pp. 231-238, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.128>.
19. Kargin, A. and Petrenko, T. (2017), "Абстрагирование и категоризация в умных машинах на основе гранулярных вычислений [Abstraction and categorization in smart machines based on granular computations]", *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*, No. 50, pp. 130-141, DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2017.50.06>.
20. Kargin, A. (2010) *Введение в интеллектуальные машины. Книга 1. Интеллектуальные регуляторы* [Introduction to intelligent machines. Book 1. Intelligent Regulators], Nord-Press, Donetsk, 526 p.
21. Kargin, A., Ivaniuk, O., Galych, G. and Panchenko, A. (2018), "Polygon for smart machine application", *2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies*, IEEE, pp. 464-468, DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409178>.

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Каргін Анатолій Олександрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна;

**Anatolii Kargin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [kargin@kart.edu.ua](mailto:kargin@kart.edu.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

**Іванюк Олександр Ігорович** – аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна;

**Oleksandr Ivaniuk** – PhD student of the Department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [ivaniuk@kart.edu.ua](mailto:ivaniuk@kart.edu.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4007-2215>.

**Модель ситуационного планирования и управления перемещениями автономного робота**

А.А. Каргин, А.И. Иванюк

**Аннотация.** На сегодня актуальной является проблема навигации автономных мобильных систем в пространстве где возможны возмущения. Проблема заключается в том, что различные возмущения, возникающие в процессе движения робота, не позволяют реализовать перемещение вдоль заранее запланированного маршрута и требуют текущей перепланировки в соответствии с полученной от датчиков ситуации. Для автономных систем проблема усугубляется необходимостью автоматического формирования модели текущей ситуации на основе данных от сенсоров и интегрировании этой модели ситуации с моделями планирования и управления в реальном времени. **Предметом исследования** является знаниеориентированные модели обработки данных от сенсоров, применяемые в навигации автономных мобильных систем. **Цель исследования** – имплементация когнитивной модели восприятия, основанной на правилах, для класса задач ситуационного управления и перепланировки движения автономного робота вдоль маршрута в условиях помех. Исследовать способность модели удовлетворить требованиям к автономным системам. **Результаты.** Модель восприятия данных от сенсоров представлена множеством многоуровневых фактов, в вербальной форме на разных уровнях обобщения, описывающих текущую ситуацию в окружении робота. База знаний, которой пользуется робот при навигации, представлена пятиуровневой иерархической структурой нечетких правил: знания о целях, маршруте и плане устранения препятствий, картографические знания о рабочем пространстве, стратегиях и конкретных управляющих воздействиях, необходимых для достижения цели. Разработаны алгоритм и программа, в которой интегрированы модель восприятия и модифицированная модель Такаги-Сугено, которая реализует ситуационное управление с перепланировкой маршрута. Для исследования модели разработаны искусственное окружение и приведены результаты компьютерных экспериментов по перемещению робота по заданному маршруту в окружении с препятствиями. **Выводы.** Показана состоятельность имплементации модели восприятия для класса задач навигации робота. Модель восприятия, интегрированная с модифицированной моделью Такаги-Сугено, решает задачи ситуационного управления с перепланировкой маршрута и удовлетворяет требованиям автономных систем и имеет преимущества по сравнению с методами программного и эвристического управления по критериям гибкости, масштабируемости и обработки неопределенности.

**Ключевые слова:** мобильный робот; ситуационное планирование и управление; навигация; когнитивная модель восприятия; нечеткие системы; данные от сенсоров.

**Autonomous robot motion control situational planning model**

Anatolii Kargin, Oleksandr Ivaniuk

**Abstract.** Today, the urgent problem is the autonomous mobile systems navigation in a space where disturbances are possible. The problem is that various disturbances that occur during the robot motion do not allow movement along a pre-planned route and require ongoing re-planning in accordance with the situation received from the sensors. For autonomous systems, the problem is complicated by the need to automatically generate the current situation model based on data from sensors and integrate this situation model with real-time planning and control models. **The subject of the research** is the knowledge-based models of processing data from sensors used in the autonomous mobile systems navigation. **The purpose of the study** is the implementation of a rule-based perception cognitive model for the situational control tasks class and re-planning the autonomous robot motion along a route under interference. Investigate the model ability to meet the autonomous systems requirements. **Results.** Perception data model from sensors is represented by multilevel facts set, in verbal form at generalization different levels, describing the current situation in the robot environment. The knowledge base that the robot uses when navigating is represented by the fuzzy rules five-level hierarchical structure: knowledge about the goals, route and plan for obstacles avoidance, cartographic knowledge about the workspace, strategies and specific control actions necessary to achieve the goal. An algorithm and a program in which the perception model and the modified Takagi-Sugeno model are integrated, which implements situational control with route re-planning have been developed. To study the model, an artificial environment was developed and the results of computer experiments on moving the robot along a given route surrounded by obstacles are presented. **Conclusions.** The consistency of the perception model implementation for the robot navigation tasks class is shown. The perception model, integrated with the modified Takagi-Sugeno model, solves the situational control problems with route re-planning and satisfies the autonomous systems requirements and has advantages over the program methods and heuristic management according to the criteria of flexibility, scalability and processing of uncertainty.

**Keywords:** mobile robot; situational planning and control; navigation; perception cognitive model; fuzzy systems; data from sensors.