

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ МОБІЛЬНОГО ОБ'ЄКТА В ПРОСТОРИ

Нечипоренко О. В., Корпань Я. В.

1. Вступ

Робототехніка є традиційною сферою застосування комп'ютерного зору. Сучасна робототехніка вимагає вирішення широкого кола задач комп'ютерного зору, що включає, зокрема:

- набір задач, пов'язаних з орієнтацією в зовнішньому просторі, визначенням відстаней до об'єктів і т. д.;
- задачі з розпізнавання різних об'єктів і інтерпретації сцен в цілому;
- задачі з виявлення людей, розпізнаванню їх обличч і аналізу емоцій.

Визначення свого положення в просторі – одна з найскладніших задач, необхідних для системи керування мобільного робота. Ця задача входить до чотирьох основних етапів функціонування системи мобільного робота:

- отримання даних (робот повинен задіяти певні датчики для отримання значущих даних);
- обробка даних (робот повинен визначити своє положення в навколишньому середовищі);
- прийняття рішення (по результатам обробки робот повинен визначитися, як діяти для досягнення поставленої задачі);
- дія (робот повинен задіяти необхідні вузли механізмів для здійснення поставленої задачі).

Ще більш масовими в порівнянні з робототехнікою є задачі комп'ютерного зору для персональних мобільних пристроїв, таких як смартфони, планшети і т. д. Зокрема, число мобільних телефонів неухильно зростає і вже практично перевищило за чисельністю населення Землі [1].

Тому актуальним є дослідження питань ідентифікації мобільним об'єктом свого положення в просторі, а також комп'ютерна емуляція навколишнього середовища.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – процес відстеження положення мобільного об'єкта в просторі. Особливо це є важливим питанням для ідентифікації свого положення мобільним роботом.

При управлінні рухом автономного мобільного робота або групи роботів часто покладаються на точну оцінку стану робота в просторі або точну інформацію про навколишнє середовище. Однак у великій кількості ситуацій дана інформація може бути відсутня. В цьому випадку для вирішення задач планування траєкторії при виконанні місії автономним роботом необхідно в першу чергу визначити його місце розташування і оцінити навколишнє оточення.

Відстеження положення (positional tracking) являє собою поєднання апаратних засобів і програмного забезпечення, яке дозволяє визначити абсолютне положення об'єкта в просторі. Дана технологія є критично важливою для досягнення ефекту занурення у віртуальну реальність, а також для управління рухом автономного мобільного робота.

В умовах, коли немає точок відліку, наприклад, стаціонарних маяків, традиційні засоби навігації: енкодери, інерційні датчики, GPS, радіомаяки, далекоміри, не завжди забезпечують досить точне вимірювання поточних координат робота. Тому, враховуючи сучасні тенденції розвитку робототехніки, які вимагають підвищення автономності мобільних роботів (особливо в умовах недетермінованого середовища), одним з ключових моментів є використання ними доступу до якомога більшого числа засобів навігації.

Одним з найбільш слабких місць в системах відстеження положення мобільного об'єкта в просторі є проблема усунення неоднозначності визначення ключових точок при скануванні навколишнього середовища. Ця проблема особливо важлива при одночасному застосуванні декількох методів (або технологій) відстеження положення. З'являється потреба в додатковому калібруванні та налагодженні.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – дослідження методів і технологій відстеження положення об'єкта у просторі.

Для досягнення мети потрібно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати методи і підходи до рішення завдання визначення положення об'єкта у просторі.
2. Провести порівняльний аналіз існуючих алгоритмів SLAM.
3. Визначити оптимальні технології навігації мобільного робота та можливі шляхи подальшого розвитку.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Задача побудови емуляції навколишнього середовища роботом є перспективною та активно досліджується. Багато робіт пов'язані із щільними та напіввільними методами одночасної локалізації та картографування (англ. Simultaneous localization and mapping – SLAM) по зображенням з однієї камери [2–4]. В роботі [5] представлена одна з класифікацій алгоритмів SLAM та підхід реконфігурації для перемикання між існуючими реалізаціями SLAM.

Задача автоматичного визначення положення і орієнтації тривимірних об'єктів з використанням систем технічного зору важлива в таких областях, як контроль технологічних процесів в промисловості, охоронні системи, людиномашинна взаємодія, навігація транспортних засобів, індустрія розваг і т. д. Вирішення цієї задачі в автоматичному режимі дозволить забезпечити автономність функціонування систем, підвищити точність контролю, збільшити продуктивність роботи, знизити витрати на підготовчі операції і обслуговування.

Великий інтерес представляють нові додатки, які раніше були відсутні на ринку. Широкий клас таких додатків для персональних мобільних пристроїв пов'язаний з завданнями доповненої реальності, які можуть бути дуже різними.

Сюди відносяться ігрові програми (що вимагають узгодженого відображення віртуальних об'єктів над зображенням реальної сцени при переміщенні камери) та різні розважальні програми в цілому, туристичні програми (розпізнавання пам'яток з виведенням інформації про них). А також багато інших додатків, пов'язаних з інформаційним пошуком і розпізнаванням об'єктів:

- розпізнавання написів на іноземних мовах з відображенням їх перекладу;
- розпізнавання візитних карток з автоматичним занесенням інформації в телефонну книгу;
- також розпізнавання облич [6, 7];
- розпізнавання постерів фільмів і т. д.

Системи доповненої реальності можуть створюватися у вигляді спеціалізованих пристроїв типу Google Glass, що ще більше збільшує інноваційний потенціал методів комп'ютерного зору. Глобальний ринок занурюючої технології все ще перебуває в стадії росту. В [8] вказується, що технології змішаної і доповненої реальності, як і раніше, розглядаються різними секторами промисловості. Особливо ці технології важливі в таких областях, як виробництво. І це зростання, ймовірно, буде продовжуватися. Технології «поліпшеного бачення» скоротили робоче навантаження і поліпшили продуктивність. У доповіді наголошується, що широке поширення шоломів доповненої реальності в даний час стримується проблемами з часом автономної роботи і латентністю зображення. Хоча в міру розвитку технологій і нових рішень, таких як визначення глибини і одночасна локалізація та порівняння, такі пристрої стають широко поширеними.

Одним із способів навігації робота, що переміщується на відкритій місцевості, є глобальна супутникова навігація [9]. Для цього на роботі повинен бути встановлений приймач GPS, який дозволяє відразу отримати абсолютні координати робота. Досить записувати ці координати з деяким інтервалом часу, а потім слідувати за ними в зворотному порядку. Але застосування глобальної навігації не завжди може вирішити задачу просторової орієнтації об'єкту. В [9, 10] відзначено, що GPS не найкраще рішення для локальної навігації робота на невеликих відстанях і в приміщеннях. По-перше, недорогі маленькі приймачі дають занадто низьку точність. Точність може бути істотно поліпшена диференціальним приймачем, але такий приймач дорожче і більше. І чим більшу точність потрібно отримати від GPS, тим дорожче і більше буде приймач. Точності і частоти вимірювання глобальних координат може не вистачати для відпрацювання локальної траєкторії. До того ж супутникова навігація чутлива до наявності об'єктів на шляху сигналу. Якщо робот рухається уздовж будівель або в приміщенні, координати вимірюються з великою помилкою.

Глобальна супутникова навігація може бути замінена локальною абсолютною навігаційною системою, наприклад, з радіо або ультразвукових маяків [11]. Для цього по периметру території заздалегідь повинні бути встановлені маяки, а в роботі приймач їх сигналу. Робот вимірює абсолютні власні координати в системі координат, пов'язаної з маяками. Це дозволяє записати пройдений шлях і повернутися за ним. Перевага такого підходу – помилка не накопичується з плином часу. Робот може здійснювати в такому детермінованому просторі необмежену кількість маневрів без зниження точності вимірювання координат. До

очевидних недоліків відноситься необхідність встановлювати маяки і їх обмежений радіус дії, особливо при русі в середовищі з великими об'єктами і в приміщеннях.

Таким чином, результати аналізу літературних даних дозволяють зробити висновок про те, що описані в них системи мають низьку суттєвих недоліків:

1) точності і частоти вимірювання просторових координат може не вистачати для здійснення автоматичного переміщення мобільного об'єкту;

2) дуже часто з'являється необхідність у встановленні маяків (особливо, при русі в середовищі з великими об'єктами і в приміщеннях), а вони мають обмежений радіус дії.

Відсутність оптимального вирішення задачі усунення цих недоліків підкреслює перспективність обраної мети дослідження.

5. Методи дослідження

Сукупність методів і підходів до вирішення задачі визначення положення об'єкта в просторі можна поділити на кілька груп [12–14]:

- акустичні;
- радіочастотні;
- магнітні;
- оптичні;
- інерційні;
- гібридні.

В свою чергу оптичні методи засновані на використанні маркерних технологій:

- пасивних (використовують датчики, які відбивають падаюче на них світло);
- активних (світло випускається маркерами);
- безмаркерних технологій:

1) трекерів (відстежують стан об'єкта від кадру до кадру);

2) детекторів (визначають положення об'єкта в поточному кадрі без урахування стану в попередніх кадрах).

Крім того виділяють два підходи для відстеження положення:

1. Outside-in tracking (присутність нерухомого зовнішнього спостерігача, що визначає положення рухомого об'єкту по характерних точках).

2. Inside-out tracking (передбачає наявність на об'єкті, що рухається оптичного сенсора, який відстежує рух щодо нерухомих точок).

Розглянемо технології навігації робота за даними про абсолютні координати. До них відносяться: глобальна супутникова навігація GPS, радіо і ультразвукові маяки, що встановлюються, а також одночасна локалізація і картографування SLAM.

Одночасна локалізація і картографування – це задача побудови та оновлення карти невідомого середовища і одночасного визначення положення робота на цій карті [15]. Задача SLAM – одна з найперспективніших задач сучасної робототехніки, і сьогодні над її вирішенням працює величезна кількість людей, про що свідчить поява безлічі публікацій з найрізноманітнішими підходами до вирішення. Загалом, для побудови карти робиться опис об'єктів поруч з роботом, визначаються координати цих об'єктів, об'єкти наносяться на карту. А коли

робот знову виявляється в тому ж місці, ці об'єкти розпізнаються за записаними ознаками і обчислюються поточні координати робота на карті. Для опису об'єктів одночасно використовуються всілякі джерела інформації:

- профіль середовища з лазерного далекоміра і ультразвукових датчиків;
- одиночне або стерео зображення об'єкта з телекамери;
- інформація про наявність перешкод з контактних датчиків;
- уточнення глобального положення по GPS і компасу;
- коригування вимірювання малих зсувів за відносними датчикам і т. д.

Перевага такого підходу – отримання абсолютної навігаційної системи без накопичення помилки з часом в недетермінованому середовищі без необхідності установки додаткового обладнання.

Важливою особливістю SLAM є те, що велика частина алгоритмів може бути реалізована тільки в статичному середовищі, тобто приміщення або площа, на якій знаходиться робот, не повинні змінюватися.

На даний момент існує безліч різних алгоритмів SLAM, що відрізняються як за типом вхідної інформації, поданням навколишнього простору у вигляді карти, так і за методами обробки цієї інформації. Наведемо класифікацію алгоритмів локалізації по розмірності картографуемого простору:

- двовимірна локалізація на площині (2D-SLAM);
- тривимірна локалізація в просторі (3D-SLAM);
- колірна локалізація по R, G, B компонентах зображення (Colour-SLAM);
- колірна тривимірна локалізація в просторі (6D-SLAM).

Ці характеристики залежать безпосередньо від використовуваного сенсора. При використанні найбільш простих лазерних далекомірів вхідною інформацією для алгоритму є двовимірний горизонтальний переріз рельєфу навколишніх об'єктів, відповідно для обробки застосовується 2D-SLAM. При наявності додаткової осі сканування можна отримати тривимірну хмару точок, що дає представлення об'єктів приміщення з урахуванням їх взаємного розташування в просторі, тому тут можна застосувати 3D-SLAM. Алгоритми колірної локалізації оцінюють стан робота по зображенню з встановленої на ньому кольорової відеокамери. Однак зараз набирають популярність сенсори, що дозволяють отримати тривимірне кольорове зображення об'єктів, наприклад, TOF-камери, Kinect і їм подібні. Для обробки таких зображень з метою локалізації та побудови карти застосовуються алгоритми 6D-SLAM. Слід зазначити, що переважна більшість алгоритмів локалізації на площині можуть бути розширені на тривимірний простір.

Крім того, слід розрізняти глобальну локалізацію і послідовну. Глобальна локалізація дозволяє визначити положення робота на карті без початкового наближення. Ще одна особливість алгоритмів SLAM даного типу – це можливість замикання циклів, тобто розпізнавання вже пройденої ділянки карти з подальшою релаксацією всієї карти вздовж траєкторії робота. Послідовна (відносна) локалізація визначає зміну положення робота між двома послідовними сканами.

Алгоритми цього типу, як правило, дають більш точний результат визначення положення мобільного робота, в порівнянні з глобальними алгоритмами SLAM, але повинні виконуватися в реальному часі. Однак, якщо даний алго-

ритм не зійшовся хоча б один раз, подальше його використання неможливе без додаткових поправок. Для досягнення найкращого результату по точності і надійності локалізації необхідно використовувати обидва алгоритми спільно. Методи глобальної локалізації засновані на виділенні орієнтирів зі скана і їх розпізнаванні, щоб отримати геометричне положення робота. До методів даного типу відносяться: Марковська локалізація, локалізація за допомогою узагальненого фільтра Калмана (ЕКФ), локалізація методом фільтра частинок.

Процес послідовної локалізації має кілька варіантів назв: зіставлення сканів (*scan matching*) або реєстрація сканів (*scan registration*), тому що алгоритм спочатку був призначений для послідовного сканування деякого об'єкта з метою отримання його тривимірної геометричної моделі. Виділяють наступні основні алгоритми послідовної локалізації [5]:

- ітеративний алгоритм найближчих точок (*Iterative Closest Point*);
- ітеративний алгоритм найближчих точок з подвійною відповідністю (*Iterative Dual Correspondences*);
- алгоритм *Nector Mapping*;
- перетворення нормальних розподілів (*Normal Distributions Transform*);
- методи екстремальної навігації;
- алгоритм *GMapping*;
- метод рекурентного фільтру.

Iterative closest point (ICP). Даний алгоритм базується на методі послідовних наближень для значної мінімізації суми квадратів відстаней між відповідними точками двох сканів. Основним недоліком ICP є те, що найближча точка в загальному випадку не відповідає тій же самій точці скануємої поверхні, особливо якщо два результати отримані з віддалених одна від одної позицій.

Iterative Dual Correspondences (IDC). Основною метою є прискорення збіжності кута повороту оцінки положення, при порівнянні двовимірних дальнометричних сканів. Алгоритм IDC реалізується двома правилами для пошуку відповідностей. На кожній ітерації виконується оцінка відносного переміщення спостерігача за допомогою мінімізації відстані найближчих точок двох сканів. Проводиться пошук точок відповідності з новим критерієм – збігом відстаней від спостерігача до точки. Критерій використовує полярні координати з центром, що збігається з положенням спостерігача, і задається різницею відстаней до відповідних точок двох сканів всередині деякого кутового діапазону.

Алгоритм Nector Mapping використовує в якості моделі робочого середовища всю накопичену карту. Карта представлена у вигляді сітки зайнятості, де значення функції карти дорівнює 1, якщо у відповідній клітинці знаходиться об'єкт, і дорівнює 0, якщо осередок вільний. Щоб змодельовати імовірнісний характер розподілу точок, що належать до об'єктів на карті, розробники даного алгоритму пропонують використовувати білінійну інтерполяцію. При цьому функція карти стає безперервною, і легко обчислити її градієнт в будь-якій точці. В якості запобіжного збігу скана і карти використовується середньоквадратична помилка всіх точок скана. Тоді для оцінки положення мобільного робота необхідно скористатися методом найменших квадратів. З огляду на простоту обчислення градієнта, мінімізація даної функції виконується методом Гауса-Ньютона.

Normal Distributions Transform (NDT). У цьому алгоритмі моделюється ймовірність знаходження точки рельєфу в певному положенні за допомогою лінійної комбінації нормальних розподілів. Такий підхід дає можливість використовувати стандартні методи оптимізації для пошуку відповідності з крос-кореляційної функції. Додатковою перевагою побудови нормальних розподілів є можливість використовувати накопичену інформацію в тому ж вигляді без збільшення обчислювальної складності, тобто побудова карти закладено в основі даного алгоритму. Так як точки опорного скана зіставляються не безпосередньо, немає необхідності у використанні обчислювально-складних методів пошуку відповідних точок, як, наприклад, в методі ICP. Обчислення нормальних розподілів – це завдання, яке виконується один раз для точок опорного скана при зчитуванні інформації сенсора, і немає необхідності перераховувати на кожній ітерації алгоритму. До недоліків даного алгоритму можна віднести сильну залежність збіжності від початкового наближення і дискретизації простору.

Методи екстремальної навігації. В основі таких методів лежить зіставлення двох послідовних сканів шляхом оптимізації крос-кореляційної функції. Виділяють три методи – перетворення скана в три гістограми (кута повороту та двох переміщень вздовж осей системи координат переміщення), вирішення задачі локалізації робота в тривимірному просторі, ймовірнісний підхід для порівняння сканів. Варто відзначити, що помилка, яка накопичується, досить мала, і можна використовувати ці методи без складних евристичних прийомів замикання циклів. Взагалі, використання крос-кореляційних функцій для реєстрації сканів в задачах SLAM є перспективним напрямком, і це лежить в основі практично всіх сучасних алгоритмів навігації.

Алгоритм GMapping. В основі даного алгоритму лежить метод рекурентної фільтрації частинок Рао-Блеквелла на ґратчастій карті. Кожна частинка є потенційною траєкторією робота і містить в собі інформацію про стан карти робочого середовища в поточний момент часу. Було запропоновано два підходи, які дозволяють збільшити продуктивність фільтра для можливості вирішення завдання SLAM в реальному часі, це допоміжна функція розподілу і техніка адаптивного ресемплінгу. Алгоритм призначений для фільтрації оцінки положення робота, яка обчислюється деяким методом реєстрації сканів, і служить для підвищення точності локалізації. Перевагою даного алгоритму є висока точність побудови карти. Однак недолік полягає в тому, що розглянутий алгоритм має досить високу обчислювальну складність.

Метод рекурентної фільтрації. Метод визначення параметрів руху спостерігача (далекоміра, встановленого на роботі) по серії сканів. Розглянуто дві моделі руху робота: кінематична модель триколісного робота з умовою непереслізання коліс щодо підлоги і модель довільного руху на площині. Метод рекурентної фільтрації заснований на використанні:

- рівнянь власного руху;
- рівнянь, що описують відносний рух точок;
- складових нерухомої частини видимого сенсорною системою робота рельєфу.

У процесі руху робота після отримання кожного скана відновлюються кутова і лінійна швидкості робота, після чого будується карта рельєфу в абсолютній сис-

темі координат, яка збігається зі зв'язаною системою координат робота в початковий момент часу. Основною перевагою методу рекурентної фільтрації, безсумнівно, є простота обчислень, яка під силу недорогим бортовим обчислювачам. До недоліків слід віднести накопичення помилки інтегрування оцінюваних значень лінійної і кутової швидкості для отримання поточного становища робота.

6. Результати дослідження

В робототехніці виділяють три види навігаційних систем [16]:

- 1) глобальна – визначення абсолютних координат пристрою;
- 2) локальна – визначення координат пристрою щодо базової точки;
- 3) персональна – позиціонування роботом частин свого тіла і взаємодія з прилеглими предметами, що важливо для пристроїв, забезпечених маніпуляторами.

Системи навігації класифікуються ще за однією ознакою – вони можуть бути пасивними і активними. Пасивна система навігації виконує прийом інформації про власні координати і інші характеристики свого руху від зовнішніх джерел, а активна розрахована на визначення місця розташування тільки своїми силами. Як правило, всі глобальні схеми навігації пасивні, локальні бувають і тими, і іншими, а персональні схеми – завжди активні.

Найпростішим варіантом навігаційного пристрою є одометр. У 50-ті роки минулого сторіччя набула широкого поширення пасивна схема навігації по радіомаяках, а потім – системи супутникової навігації. Аналогічна концепція для локальної системи навігації полягає в розміщенні в зоні дій робота джерел ультразвукових сигналів, які обробляються бортовим мікропроцесором. Для побудови образу простору найчастіше застосовується лазерний далекомір або ультразвуковий датчик. При цьому у кожній системі є свої переваги і недоліки.

Результати аналізу базових принципів, на яких побудовані перераховані вище методи наведено в табл. 1.

Аналіз методів визначення положення об'єкта в просторі дозволяє використовувати оптимальний алгоритм в залежності від поточних умов навколишнього середовища.

Таблиця 1

Аналіз методів визначення положення об'єкта в просторі

Група методів (алгоритми, системи)	Базова технологія трекінгу	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Акустичні: ISO-900 System, RUCAP UM-5	Використовують ультразвукові (високочастотні) звукові хвилі. Вимірюється час прольоту звукової хвилі від передавача до приймачів, або різниця фаз синусоїдальної звукової хвилі	Досить прості, надійні, дешеві. Висока швидкість обчислення координат. Простота обробки, невелике енергоспоживання	Мають низьку швидкість оновлення, викликану швидкістю звуку в повітрі. Зберігають обмеження, пов'язані з кількістю одночасно використовуваних пристроїв, розміром робочого простору

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
<p>Радіочастотні: UWB (Ultra-WideBand) системи: BW1000, Part, Series. Методи, що використовуються: TDoA/ToA/AoA/ToF</p>	<p>Схожі з акустичними методами відстеження. Для визначення місця розташування об'єктів використовуються радіосигнали</p>	<p>Зберігають ефективність у приміщеннях зі складною геометрією. Високий рівень перешкодозахищеності і безпеки. Не має перешкод для інших комунікацій. Чим вище частота, тим більше точність, але менше радіус дії</p>	<p>Точність досягає лише близько сантиметрів. Не застосовні для віртуальної реальності. Малий радіус дії (до 10 м). Складна інфраструктура. Перешкода для GPS</p>
<p>Магнітні: Rarer Hydra STEM, trakSTAR, Polhemus system</p>	<p>Засновані на вимірі інтенсивності магнітного поля в різних напрямках</p>	<p>Точність досить висока в контрольованих умовах. Вимірювання координат об'єкту можливо за 6-маступенями свободи</p>	<p>Схильні до погіршення якості від струмопровідних матеріалів поблизу випромінювача або датчика, від магнітних полів. Мінлива чутливість сенсорів в залежності від положення, обмежений робочий простір</p>
<p>Оптичні: – пасивні: SmartDX, Raptor-12HS Digital Real Time System, Bonita, TrackIR; – активні: Certus HD, Visualeyez system, HeadJoy, A.R.T. Outside-in підхід використовується в Oculus Rift (Constellation), PSVR, OSVR і множині Motion Capture систем. Inside-out підхід використовується в Oculus Rift Microsoft Hololens, Project Tango (SLAM), SteamVR Lighthouse</p>	<p>Сукупність алгоритмів комп'ютерного зору і відстежуючих пристроїв (камери видимого або інфрачервоного діапазону, стерео-камери і камери глибини). Засновані на використанні маркерних методів: пасивних і активних та безмаркерних методів: трекерів і детекторів. Виділяють два підходи для відстеження положення: 1. Outside-in підхід. 2. Inside-out підхід</p>	<p>Найбільш популярні методи, широко використовуються в робототехніці, зручні для мобільних рішень в віртуальній/доповненій реальності. Дають стабільну точність в тривалі періоди часу. Безмаркерні оптичні методи є найбільш перспективними з точки зору простоти використання і універсальності</p>	<p>Велика обчислювальна складність. Не завжди забезпечують досить точне вимірювання поточних координат. Неможливість застосування датчиків при постійному спостереженні безлічі сцен, що істотно обмежує їх застосування. Для реалізації пасивних оптичних методів необхідно використовувати заздалегідь визначену інформацію про структуру сцени та умови отримання зображення. Застосування конкретного безмаркерного оптичного методу залежить від умов спостереження сцени</p>

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4
<p>Інерційні: IGS-Cobra, MVN Awinda</p>	<p>На основі MEMS-технології, комплементарного фільтра або фільтра Калмана. Використовують гіроскопи, визначають не тільки положення сенсора, але також кут його нахилу. Дозволяють відслідковувати орієнтацію (roll, pitch, yaw) в просторі. Інерційний трекінг комбінують з іншими методами, які періодично коригують дрефт акселерометра</p>	<p>Стійкі до перешкод різного роду, дозволяють відслідковувати орієнтацію з великою точністю і мінімальними затримками. Забезпечують високу частоту оновлення даних. Дані з гіроскопа і акселерометра успішно коректують один одного і забезпечують точність як для короткочасних вимірювань, так і для тривалого періоду</p>	<p>Визначення координат (переміщення) за рахунок подвійного інтегрування лінійного прискорення, обчисленого з даних з акселерометра, не задовольняє вимогам по точності на тривалих періодах часу. Дрифт під час руху призводить до накопичення помилки. Висока вартість</p>
<p>Гібридні: алгоритм «Sensor Fusion», розширений фільтр Калмана (EKF – Extended Kalman Filter). TAU Tracker (магнітно-інерційний)</p>	<p>Комбінують різні методи відстеження. Будують власний образ середовища, після чого формують маршрут і рух по ньому, постійно зіставляючи свою карту простору з даними, отриманими від пристроїв навігації</p>	<p>Гібридні методи розумно використовують переваги комбінованих методів. Використовуються навігаційні засоби всіх видів. Найвність інтелектуальної складової</p>	<p>Займаються насамперед оцінкою навколишнього оточення, аналізом виконаного завдання і прийняттям рішення. Висока вартість</p>

Визначено, що питання обґрунтування чисельних значень показників (точність локалізації, межі стійкості, час вирішення задачі), при роботі систем відстеження положення об'єкту в реальному часі, на сьогоднішній день не достатньо досліджені. Авторами розпочато серію попередніх досліджень з питань оцінки точності визначення положення мобільного об'єкта та впливу накопичення помилки при застосуванні синтезу зазначених вище методів, алгоритмів, систем [17].

Подальший розвиток технологій і моделей мобільних систем дозволить розширити сферу застосування функціонально-орієнтованих алгоритмів SLAM. Це дозволить розширити функціональні можливості мобільних об'єктів без суттєвих змін їх програмно-апаратних складових.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Подальше підвищення продуктивності мобільних процесорів дозволяє ставити нові задачі для систем комп'ютерного зору в побутових роботах, число продажів яких по всьому світу обчислюється вже мільйонами примірників.

ків на рік. Багато з цих задач далекі від повного вирішення і є перспективними з інноваційної точки зору.

У зв'язку з необхідністю застосування груп мобільних роботів значно зріс інтерес до проблем групової навігації та інтелектуального управління рухом мобільних роботів як агентів складних мультиагентних робототехнічних систем, колективно вирішувочих загальну задачу. В таких умовах кожен агент вносить свій внесок в побудову карти. Загальна глобальна навігація може здійснюватися шляхом розподіленого обчислення.

Збільшення обсягу завдань перед мобільними роботами ставить роль мультиагентних робототехнічних систем на новий рівень. Використання методів штучного інтелекту дозволить комплексувати інформацію з різного роду датчиків, не використовуючи великі обчислювальні потужності, але в умовах великої невизначеності. Мультиагентність системи буде забезпечувати принцип надмірності навігаційної інформації, а експертні системи дозволять фільтрувати інформацію в різних умовах роботи мобільного робота.

Weaknesses. Існує два взаємопов'язаних недоліки SLAM [15, 18].

Перший недолік – обчислювальна складність, яка до того ж збільшується при збільшенні розміру карти. Ця проблема проявляється особливо гостро, якщо система накопичила деяку помилку і знаходиться поруч з однотипними об'єктами, які складно відрізнити один від одного, наприклад, коли робот рухається по дорозі поруч з деревами. Об'єкти на карті можуть бути схожі один на одного. Для знаходження таких об'єктів в несприятливому для SLAM середовищі потрібно застосовувати більш складні алгоритми обробки даних з датчиків, що посилюється при збільшенні карти. У підсумку, робот або орієнтується по обмеженій кількості об'єктів з низькою точністю, або не може швидко пересуватися і будувати велику карту.

Другий недолік – чутливість до змін в середовищі. Цей недолік пов'язаний з першим. Якщо застосовувати складні алгоритми обробки інформації та описувати якомога більше оточуючих об'єктів, вивчати простір з усіх ракурсів, то навіть істотні зміни в середовищі можуть бути коректно оброблені при поверненні в ту ж точку. Але через обчислювальні складності та обмеженості робочої області датчиків, особливо телекамер, при прямолінійному русі без зупинок і додаткових рухів вдається описати обмежену кількість об'єктів. Тому реалізації SLAM реального часу виявляються чутливі до змін в середовищі.

Opportunities. Оскільки більшість вищеописаних технологій все частіше використовують буденні сигнали Wi-Fi, Bluetooth, GPS-пристроїв, а ті, в свою чергу, зустрічаються майже всюди, можна сказати, що застосування і комплексування інформації з такої великої кількості датчиків дозволить збільшити точність визначення координат в кілька разів. Створення якогось інформаційного поля навігації і маршрутизації дозволить картографувати і локалізуватися на місцевості з великою точністю. Майбутнє за інтеграцією інформації про положення об'єкта з різних, за типом отримання даних, приладів.

Threats. Одним з основних факторів, що впливає на процес відстеження положення мобільного об'єкта в просторі є умови, при яких здійснюється сканування навколишнього простору. Для зменшення неоднозначності сканування

необхідно використовувати дороге прецизійне обладнання. При використанні стандартних датчиків неоднозначність визначення свого положення різко зростає. Причому цей показник буде варіюватися в великих межах в залежності від «забрудненості» навколишнього простору (наявність великої концентрацій пилу, газу, підвищена температура, різкі зміни атмосферного тиску та ін.).

8. Висновки

1. Проаналізовані методи і підходи до рішення завдання визначення положення об'єкта у просторі з використанням систем технічного зору. Аналіз розглянутих популярних систем і методів вимірювання просторового положення об'єктів, а також алгоритмів та технологій навігації мобільного робота показав, що кожна з розглянутих систем має свої переваги і недоліки. Та використовуються в залежності від поставлених перед даною системою цілей.

2. Проведено порівняльний аналіз основних різновидів алгоритмів методу SLAM. Перспективи даного методу – використання методів штучного інтелекту та розширеного фільтра Калмана – покращують швидкість SLAM-методу. Підтвердженням цьому – величезна кількість відкритих проєктів по створенню даного типу навігації в рамках різноманітних конкурсів:

- VSLAM – реалізація методу SLAM на основі методів комп'ютерного зору;
- RGBDSLAM – пакет для реєстрації хмари точок з RGBD датчиків, таких як Kinect або стерео-камери;
- hector_mapping – SLAM для платформ без одометра – тільки на основі даних від LIDAR та ін.

3. Визначено оптимальні технології навігації мобільного робота та можливі шляхи подальшого розвитку. Створення централізованого інформаційного поля навігації і маршрутизації дозволить картографувати і локалізуватися на місцевості з великою точністю. Майбутнє за інтеграцією інформації про положення об'єкта з різних, за типом отримання даних, приладів.

Література

1. Потапов А. Системы компьютерного зрения: современные задачи и методы // Control Engineering. 2014. № 1 (49). С. 20–26.
2. Newcombe R. A., Lovegrove S. J., Davison A. J. DTAM: Dense tracking and mapping in real-time // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Barcelona, 2011. P. 2320–2327. doi: <http://doi.org/10.1109/iccv.2011.6126513>
3. Engel J., Schöps T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM // Lecture Notes in Computer Science. Cham, 2014. P. 834–849. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-319-10605-2_54
4. Mur-Artal R., Montiel J. M. M., Tardos J. D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System // IEEE Transactions on Robotics. 2015. Vol. 31, Issue 5. P. 1147–1163. doi: <http://doi.org/10.1109/tro.2015.2463671>
5. Self-adaptive Synchronous Localization and Mapping using Runtime Feature Models / Werner C. et. al. // Proceedings of the 7th International Conference on Data Science, Technology and Applications. 2018. Vol. 1. P. 409–418. doi: <http://doi.org/10.5220/0006945504090418>

6. Нечипоренко О. В., Корпань Я. В. Біометрична ідентифікація і автентифікація особи за геометрією обличчя // Вісник Хмельницького національного університету. 2016. № 4. С. 133–138.
7. Nechyporenko O., Korpan Y. Analysis of methods and technologies of human face recognition // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 5, Issue 2 (37). P. 4–10. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.110868>
8. Мирошниченко Н. Мировой рынок AR достигнет объема в 198 миллиардов долларов к 2025 году. BIS Research // Новости VR индустрии. 2018. URL: <https://vrgeek.ru/mirovoj-rynok-ar-dostignet-obema-v-198-milliardov-dollarov-k-2025-godu/2018>
9. Santos F. M., Silva V. F., Almeida L. M. A robust self-localization system for a small mobile autonomous robot // International Symposium on Robotics and Automation. 2002. P. 1–6. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.134.2502>
10. Antoni D., Ban Z., Zagar M. Demining Robots – Requirements and Constraints // Automatika. 2001. Vol. 42, Issue 3-4. P. 189–197.
11. Melo L. F. de, Rosário J. M., Junior A. F. da S. Mobile Robot Indoor Autonomous Navigation with Position Estimation Using RF Signal Triangulation // Positioning. 2013. Vol. 4, Issue 1. P. 20–35. doi: <http://doi.org/10.4236/pos.2013.41004>
12. Захаров А. А., Тужилкин А. Ю., Веденин А. С. Алгоритм определения положения и ориентации трехмерных объектов по видеоизображениям на основе вероятностного подхода // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-8. С. 1683–1687.
13. Menache A. Understanding motion capture for computer animation. The Morgan Kaufmann Series In Computer Graphics, 2011. 254 p.
14. Tobon R. The Mocap Book: A Practical Guide to the Art of Motion Capture. Forisforce, 2010. 258 p.
15. Nguyen V., Harati A., Siegwart R. Lightweight SLAM algorithm using orthogonal planes for indoor mobile robotics // Intelligent Robots and Systems. 2007. P. 658–663. doi: <http://doi.org/10.1109/iros.2007.4399512>
16. Юлдашев М. Н. Ультразвуковые системы для определения пространственного положения подвижного объекта // Сборник научных трудов. 17-ая молодежная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2015». Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. С. 465–472.
17. Methods and technologies of monitoring of the position of a mobile object in space: Proceedings / Nechyporenko O. V. et. al. // Kompiuterne modeliuвання ta optymizatsiia skladnykh system (KMOSS-2018). Dnipro: Balans-klub, 2018. P. 193–195.
18. Aulinas J. The SLAM Problem: A Survey // Proceedings of the 2008 Conference on Artificial Intelligence Research & Development. 2008. P. 363–71. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.163.6439>