



$$t_{31} = \cos(\widehat{\vec{i}_n, \vec{k}_0}) = -\cos(\Theta_2 - \Theta_3) [\sin \Theta_4 \cos \Theta_6 + \cos \Theta_4 \cos \Theta_5 \sin \Theta_6] - \sin(\Theta_2 - \Theta_3) \sin \Theta_5 \sin \Theta_6; \quad (4)$$

$$t_{12} = \cos(\widehat{\vec{j}_n, \vec{i}_0}) = -\sin \Theta_1 \cos(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_5 - \cos \Theta_1 \sin \Theta_4 \sin \Theta_5 - \sin \Theta_1 \sin(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_4 \sin \Theta_5; \quad (5)$$

$$t_{22} = \cos(\widehat{\vec{j}_n, \vec{j}_0}) = \cos \Theta_1 \sin(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_4 \sin \Theta_5 + \cos \Theta_1 \cos(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_5 - \sin \Theta_1 \sin \Theta_4 \sin \Theta_5; \quad (6)$$

$$t_{32} = \cos(\widehat{\vec{j}_n, \vec{k}_0}) = \sin(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_5 - \cos(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_4 \sin \Theta_5; \quad (7)$$

$$t_{13} = \cos(\widehat{\vec{k}_n, \vec{i}_0}) = \cos \Theta_1 [\cos \Theta_4 \sin \Theta_6 + \sin \Theta_4 \cos \Theta_5 \cos \Theta_6] - \sin \Theta_1 \sin(\Theta_2 - \Theta_3) [\sin \Theta_4 \sin \Theta_6 - \cos \Theta_4 \cos \Theta_5 \sin \Theta_6] - \sin \Theta_1 \cos(\Theta_2 - \Theta_3) \sin \Theta_5 \cos \Theta_6; \quad (8)$$

$$t_{23} = \cos(\widehat{\vec{k}_n, \vec{j}_0}) = \sin \Theta_1 [\cos \Theta_4 \sin \Theta_6 + \sin \Theta_4 \cos \Theta_5 \cos \Theta_6] + \cos \Theta_1 \sin(\Theta_2 - \Theta_3) [\sin \Theta_4 \sin \Theta_6 - \cos \Theta_4 \cos \Theta_5 \cos \Theta_6] + \cos \Theta_1 \cos(\Theta_2 - \Theta_3) \sin \Theta_5 \cos \Theta_6; \quad (9)$$

$$t_{33} = \cos(\widehat{\vec{k}_n, \vec{k}_0}) = \sin(\Theta_2 - \Theta_3) \sin \Theta_5 \cos \Theta_6 - \cos(\Theta_2 - \Theta_3) \times [\sin \Theta_4 \sin \Theta_6 - \cos \Theta_4 \cos \Theta_5 \cos \Theta_6]; \quad (10)$$

$$t_{14} = x_c = -\sin \Theta_1 (a_1 + l_2 \cos \Theta_2) - (l_4 + l_6 \cos \Theta_5) \sin \Theta_1 \cos(\Theta_2 - \Theta_3) - l_6 \sin \Theta_5 [\cos \Theta_1 \sin \Theta_4 + \sin \Theta_1 \sin(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_4]; \quad (11)$$

$$t_{24} = y_c = \cos \Theta_1 (a_1 + l_2 \cos \Theta_2) + (l_4 + l_6 \cos \Theta_5) \cos \Theta_1 \cos(\Theta_2 - \Theta_3) - l_6 \sin \Theta_5 [\sin \Theta_1 \sin \Theta_4 - \cos \Theta_1 \sin(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_4]; \quad (12)$$

$$t_{34} = z_c = s_1 + l_2 \sin \Theta_2 + (l_4 + l_6 \cos \Theta_5) \sin(\Theta_2 - \Theta_3) - l_6 \cos(\Theta_2 - \Theta_3) \cos \Theta_4 \sin \Theta_5. \quad (13)$$

ВИКОРИСТАННЯ ІНДУКТИВНИХ ДАТЧИКІВ ДЛЯ НАВІГАЦІЇ РУХОМОГО РОБОТА У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

А. С. Голуб, Т. О. Постельник

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Індуктивний датчик – це безконтактний пристрій, який використовується для виявлення металевих об'єктів або їх положення. На відміну від оптичних або ультразвукових, індуктивні датчики чутливі лише до металів. Саме тому їх

широко застосовують в різних сферах: у промисловому виробництві для контролю розташування металевих деталей на конвеєрних лініях; у робототехніці для забезпечення точного позиціонування вузлів і механізмів; у системах безпеки для виявлення відкривання металевих дверей або люків; в автомобілебудуванні; літакобудуванні; залізничній техніці тощо. На виробництві робот переміщується за нанесеними на підлозі лініями. Проте у процесі експлуатації лінії поступово стираються через рух транспорту або стають недостатньо видимі через забруднення і робот втрачає орієнтацію, що призводить до його зупинки та простою. Щоб усунути цю проблему на підлогу замість намальованої лінії можна укласти металеву смугу, а на робот встановити три індуктивні датчики. Індуктивні датчики розташувати так, щоб фіксувати наявність металевої смуги під роботом. Центральний датчик буде утримувати основну траєкторію, а бокові датчики відстежувати відхилення: якщо метал виявляє тільки один з бокових датчиків, робот коригує курс відповідно до напрямку. Завдяки цьому буде забезпечуватися плавний і точний рух уздовж заданої траєкторії навіть при можливих локальних пошкодженнях смуги. Переваги такого рішення полягають в тому, що індуктивні датчики працюють без збоїв навіть при великому забрудненні або частковому зношенні металевої смуги; металева смуга значно довговічніша за фарбовану лінію; підвищується стабільність роботи роботизованого транспорту та зменшуються витрати на обслуговування.

Проте сильні коливання температури, забруднення поверхонь металевим пилом або стружкою, інтенсивне електромагнітне поле, нестабільне живлення, а також робота з різними металами може призводити до нестабільної роботи датчика або помилкових спрацьовувань. Крім того, виявлено, що при застосуванні індукційних датчиків для навчальних роботів, що виконують стеження за металевою смугою, виникає низка типових технічних викликів. В результаті експлуатації такого мобільного робота були встановлені наступні типові проблеми використання індукційних датчиків у мобільних роботах для стеження за металевою смугою та шляхи їх вирішення, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Типові проблеми використання індукційних датчиків у мобільних роботах для стеження за металевою смугою та шляхи їх вирішення

Типова проблема	Опис проблеми	Метод запобігання або вирішення
Нестабільність спрацювання датчиків	Залежність сигналу від типу металу, відстані та стану поверхні	Індивідуальне калібрування для конкретного типу металевої смуги
Флуктуації сигналу через зовнішні завади	Електромагнітні шуми викликають випадкові сплески або затухання сигналу	Використання цифрової фільтрації (ковзне середнє, експоненційне згладжування)
Втрати точності при перетворенні сигналу	Невірне масштабування або недостатня частота дискретизації	Оптимальний вибір параметрів ADC (аналогово-цифрового перетворення) та частоти опитування датчиків
Проблеми налаштування порогів спрацювання	Занадто високий або занадто низький поріг спричиняє втрату сигналу або хибні спрацьовування	Використання адаптивного або динамічного налаштування порогових значень



Втрата траєкторії через нестабільні сигнали	Тимчасове зникнення сигналу призводить до сходу з траєкторії	Реалізація алгоритмів прогнозування руху на основі останніх валідних вимірювань
Конфлікт сигналів від кількох датчиків	Невизначеність при різних показаннях сенсорів	Розробка алгоритмів об'єднання даних (мажоритарне голосування, центр ваги сигналів)
Нестабільність реакції на відхилення	Надто різке або надто повільне реагування на втрату смуги	Впровадження PID-регулювання або інших методів плавного коригування
Некоректна організація обробки в реальному часі	Затримки в обробці сенсорних даних призводять до нестійкої поведінки робота	Побудова неблокуючих алгоритмів та оптимізація пріоритетів задач

У частині вивчення основ сенсорики та обробки сигналів основною проблемою є нестабільність спрацювання індукційних датчиків через різницю електричних та магнітних властивостей різних металів. Нерівності поверхні, а також електромагнітні перешкоди навколишнього середовища можуть призводити до флуктуацій сигналу, що вимагає застосування методів цифрової фільтрації. Перетворення аналогових сигналів у цифрові дані супроводжується ризиком втрати точності через неправильний вибір масштабування або недостатню частоту дискретизації. Додаткову складність становить налаштування порогів спрацювання: занадто високі пороги можуть призводити до втрати сигналу від смуги, тоді як занижкі – до хибних спрацювань на випадкові металеві об'єкти.

Щодо принципів стеження за лінією, критичним є питання надійної реалізації алгоритмів позиціонування. Втрата траєкторії можлива через відсутність адаптивної обробки нестабільних або обривчастих сигналів від металевої смуги. Наявність кількох датчиків дозволяє підвищити точність визначення положення робота, однак при цьому зростає ймовірність виникнення конфліктів між сигналами, що вимагає розробки алгоритмів консенсусної обробки даних. Також важливими є питання оптимізації динаміки реакції системи: надто агресивна реакція на відхилення може викликати нестійкі коливання, тоді як повільна відповідь спричиняє нездатність оперативно відновити траєкторію.

У той же час, при реалізації задач створення простих алгоритмів на базі мікроконтролерних платформ (Arduino, Raspberry Pi) для стеження за металевою смугою або ухилення від перешкод виникає низка характерних викликів, пов'язаних із апаратними обмеженнями, архітектурою програмного забезпечення та особливостями обробки даних у реальному часі.

Однією з ключових проблем є обмежені обчислювальні ресурси, які ускладнюють реалізацію алгоритмів із складною логікою прийняття рішень або багаторівневою обробкою сенсорних даних. Це обмежує частоту оновлення керуючих сигналів, що критично впливає на швидкість і стабільність руху робота. Низька пропускну здатність мікроконтролера особливо проявляється при необхідності паралельної обробки кількох сенсорних каналів у режимі реального часу. Ще однією поширеною проблемою є відсутність належної обробки помилок у базових алгоритмах. При побудові стратегій ухилення або повернення на траєкторію студенти часто ігнорують обробку граничних ситуацій, таких як короткочасна втрата сигналу від усіх сенсорів або зіткнення з перешкодою. Відсутність



захисних механізмів може призвести до неконтрольованої поведінки робота або зациклення алгоритму. При розробці стратегій ухилення також часто виникають труднощі з визначенням критеріїв прийняття рішень: недостатньо гнучкі або надто жорсткі порогові значення можуть спричинити нестабільне реагування на зміну траєкторії або надмірне «переосмислення» руху, що погіршує ефективність системи. Крім того, студенти можуть зіштовхнутися з проблемою некоректного пріоритетування задач в архітектурі програмного забезпечення. Наприклад, недооцінка важливості обробки переривань або погано організована взаємодія між сенсорними модулями і виконавчими механізмами може спричинити затримки та неправильні команди. Типові помилки програмування та методів їх запобігання наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Типові помилки програмування при використанні індукційних датчиків у мобільних роботах та методи їх запобігання

Типова проблема	Опис проблеми	Метод запобігання
Нестача обробки граничних ситуацій	Відсутність реакції на втрату всіх сенсорних сигналів чи раптові помилки	Реалізація системи обробки винятків (safe mode, аварійне гальмування)
Затримки у реакції	Повільне оновлення команд через погану організацію коду	Використання обробки переривань і оптимізованих безперервних циклів
Погана фільтрація шуму сенсорів	Коливання сигналів призводять до помилкових рішень	Реалізація фільтрації ковзним середнім або експоненційного згладжування
Жорсткі порогові значення	Невміння адаптувати поведінку робота до різних умов середовища	Використання адаптивних порогів або логіки нечітких множин (fuzzy logic)
Неефективне управління ресурсами контролера	Блокування процесів через неправильно організовану обробку задач	Побудова неблокуючих алгоритмів на базі finite state machines (FSM)
Відсутність плавного коригування руху	Змістий або нестабільний рух через різкі команди	Впровадження пропорційного або PID-регулювання при відхиленні від траєкторії
Неоптимізовані стратегії ухилення	Робот застрягає або робить зайві рухи при виявленні перешкод	Реалізація ієрархічних стратегій ухилення з пріоритетами для різних сценаріїв

Таким чином, успішна реалізація робототехнічних систем для стеження за металевою смугою вимагає комплексного підходу до обробки сигналів датчиків, налаштування алгоритмів стеження та адаптивного керування рухом у реальному часі. Ефективне використання індукційних датчиків у навчальних мобільних роботах потребує точного калібрування сенсорів, застосування фільтрації даних, адаптивного налаштування порогів і розробки стабільних алгоритмів стеження за траєкторією з урахуванням реального часу. Ефективне програмування мобільних роботів вимагає не лише базових навичок у створенні логічних алгоритмів, але й глибокого розуміння принципів реального часу, обробки помилок і оптимізації ресурсів системи.