

ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ
«ХАРКІВСЬКИЙ КОМП'ЮТЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ДОСЛІДНА РОБОТА

за професійно-практичним напрямком:
на тему:

**Аналітичний огляд та порівняльний аналіз основних
методів вимірювання відстаней лазерними
трекерами.**



*Виконав здобувач
освіти
групи МІТ-311
Рябенко Данііл
Євгенійович
Керівник
Бернадська Т.В.*

Харків 2024

Зміст

Вступ.....	3
Основні методи вимірювання відстаней лазерними трекерами	4
Абсолютний трекер Leica AT500.....	9
Абсолютний трекер Leica AT403.....	14

ВСТУП

Аналізуючи розвиток сучасного виробництва практично у всіх галузях економіки, можна відзначити позитивну закономірність – підвищення якості та точності виготовлення продукції.

У багатьох галузях промисловості, серед яких автомобільна та аерокосмічна, необхідно точно вимірювати тривимірні параметри великих і складних об'єктів. Розвивається спосіб вирішення цього завдання з використанням лазерного трекара – пристрою, вперше запропонованого в кінці 80-х років минулого століття.

Саме трекаер сприяв виникненню і впровадженню мобільних вимірювальних систем в кінці ХХ століття, коли рівень технологій забезпечив виробництво доволі точних координатних машин з досить низькою собівартістю. Сьогодні за точністю найкращі мобільні вимірювальні системи наближаються до стаціонарних, маючи майже на порядок меншу вартість.

Лазерні трекаери, завдяки своїй високій точності та швидкості, знайшли широке застосування в різних галузях, від промислової автоматизації до наукових досліджень. Основою їх роботи є вимірювання часу, за який лазерний імпульс проходить від трекаера до об'єкта та назад. Далі, виходячи з відомої швидкості світла, обчислюється відстань.

Основні методи вимірювання відстаней лазерними трекерами

1. Метод часу прольоту (Time-of-Flight, ToF):

- **Принцип роботи:** Лазерний імпульс випромінюється, відбивається від об'єкта і повертається до приймача. Час прольоту вимірюється високоточним таймером.
- **Переваги:** Висока точність, можливість вимірювання великих відстаней.
- **Недоліки:** Чутливість до перешкод, атмосферних умов.

2. Фазовий метод:

- **Принцип роботи:** Вимірюється фазовий зсув між випромінюваним і прийнятим світловим сигналом.
- **Переваги:** Висока роздільна здатність для вимірювання малих відстаней.
- **Недоліки:** Обмежений діапазон вимірювань, чутливість до багатопроменевого відбиття

3. Триангуляційний метод:

- **Принцип роботи:** Використовується геометрія трикутника. Лазерний промінь проектується на об'єкт, а його зображення фіксується камерою. Відстань обчислюється за кутом нахилу променя і відомою базою між лазерним джерелом і камерою.
- **Переваги:** Можливість вимірювання відстаней до рухомих об'єктів, отримання додаткової інформації про геометрію об'єкта.
- **Недоліки:** Точність залежить від калібрування системи, обмежений діапазон вимірювань.

Порівняльна характеристика методів

Характеристика	Метод часу прольоту	Фазовий метод	Триангуляційний метод
Точність	Висока	Висока для малих відстаней	Залежить від калібрування

Діапазон вимірювань	Великий	Обмежений	Обмежений
Швидкість вимірювань	Висока	Висока	Залежить від частоти кадрів камери
Чутливість до перешкод	Висока	Середня	Низька
Складність реалізації	Середня	Висока	Середня

Лазерний трекер – це високотехнологічний і високоточний вимірювальний пристрій, оснований на принципі стеження за спеціальним відбивачем за допомогою лазерного променя.

Принцип роботи лазерного трекера (рис. 1) полягає в тому, що за його допомогою вимірюють два кути і відстань. Трекер посилає лазерний промінь до спеціального сферичного відбивача діаметром 1.5 або 0,5 дюйма, який кріпиться до досліджуваного об'єкта. Поправка за діаметр відбивача автоматично враховується у всіх результатах. Промінь, відбитий від цілі, повертається по тому ж шляху і трекер приймає його в тій самій точці, звідки він був випущений. Усі кінцеві результати видаються із урахуванням всіх констант і не потребують допоміжних коректувань. Світловідбивачі відрізняються, але найпопулярнішим є рефлектор, умонтований у сферу.

Вимірювання кутів трекером

Лазерний трекер містить два кутові енкодери. Ці пристрої вимірюють кутову орієнтацію двох механічних осей трекера: осі азимута й осі висоти. Кутів, отриманих від енкодерів, і відстані від вимірювача відстаней достатньо для точного визначення положення центра ретрорефлектора. Оскільки центр рефлектора завжди розташований на фіксованій відстані від вимірюваної поверхні, координати вимірюваних точок або поверхонь легко обчислити.

Способи вимірювання відстаней трекером

Вимірювач відстаней може бути двох типів. Це інтерферометр або вимірювач абсолютних відстаней (absolute distance meter, ADM).

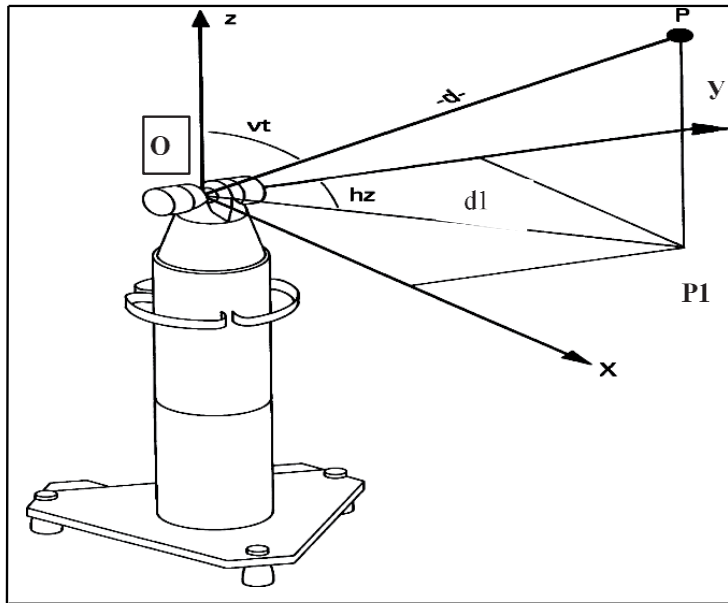


Рисунок 1 – Принципова схема вимірювання лазерним трекером:

XYZ – умовна система координат приладу;

O – початок координат; P – вимірювана точка;

P1 – точка, приведена на горизонтальну площину;

D – нахилена відстань у напрямку вимірюваного предмету;

d1 – приведена до горизонту відстань;

vt – вертикальний кут; hz – горизонтальний кут

Інкрементне вимірювання відстаней здійснюється за допомогою інтерферометра та стабілізованого за частотою гелій-неон лазера. Світло лазера розділяється на два промені. Один скеровується прямо в інтерферометр. Інший випускається трекером, відбивається від рефлектора і на зворотному шляху надходить в інтерферометр. У середині інтерферометра два промені інтерферують, наслідком чого є циклічна зміна амплітуди електромагнітної хвилі щоразу, коли рефлектор наближається чи віддаляється від трекера на відстань, яка дорівнює чверті довжини хвилі ($\sim 0,0158$ мкм).

Електронна схема підраховує кількість циклічних змін (“рахунок смуг”), щоб обчислити віддалі, які проходить світловий сигнал. У міру того, як

оператор переміщає рефлектор в необхідне положення, лазерний промінь рухається услід за ним, залишаючись прив'язаним до центру рефлектора.

Цей метод працює доти, доки лазерний промінь від трекера до рефлектора не натрапить на перешкоду на своєму шляху. Якщо промінь обривається, то показання лічильника втрачають зв'язок з положенням ретрорефлектора і відстань до нього стає невідомою. Коли це трапляється, трекер видає сигнал про помилку! Оператор повинен повторити вимірювання.

Абсолютне вимірювання відстаней (ADM) є широковідомим. Але за останнє десятиріччя цей метод радикально покращився, і тепер його характеристики точності наближаються до інтерферометрів. Перевага методу вимірювання абсолютних відстаней в тому, що він дає змогу просто скерувати промінь на ціль і “вистрілити”. Система ADM вимірює відстань до мети автоматично, навіть якщо промінь перед цим був розірваний.

У трекері з ADM інфрачервоне світло від напівпровідникового лазера відбивається від рефлектора. Його приймає назад трекер, в якому він перетворюється на електричний сигнал. Електронна схема аналізує сигнал для визначення його часу руху туди й назад, перемножує одержане значення на швидкість світла в повітрі і отримує відстань від трекера до рефлектора.

Абсолютне вимірювання відстаней вперше з'явилося в трекерах у середині 90-х. В цей час системи ADM вимірювали дуже повільно для того, щоб забезпечувати сканування поверхонь. Через це всі перші моделі трекерів містили або один інтерферометр, або інтерферометр і вимірник абсолютних віддалей.

Сьогодні деякі вимірювачі абсолютних віддалей володіють достатньою швидкістю, щоб забезпечити високошвидкісне сканування без втрати точності.

Деякі сучасні трекери містять лише ADM і не використовують інтерферометр для вимірів. Інша функція трекера – управління променем, що випускається. Один тип трекерів випускає промінь безпосередньо зі своєї конструкції, що обертається. Інший тип відбиває лазерний промінь від

дзеркала, що обертається. У будь-якому випадку трекер скеровує промінь в потрібному напрямі за допомогою повороту механічних осей.

У багатьох випадках трекер утримує промінь в центрі швидкісного рефлектора, що пересувається. Він виконує це, скеровуючи частину відбитого рефлектором променя в детектор позиції. Якщо промінь лазера потрапляє не в центр рефлектора, то відбитий промінь теж не потрапляє в центр детектора позиції, і формується сигнал помилки. Цей сигнал контролює обертання механічних осей, щоб утримати промінь лазера у центрі рефлектора.

Абсолютний трекер Leica AT500

Абсолютний трекер Leica AT500 має ергономічний дизайн та його загальний вигляд зображено на рис.2. У надлегкий корпус вимірювального блоку AT500 вбудовані всі основні компоненти системи: контролер з живленням від батареї, система моніторингу навколишнього середовища, бездротовий зв'язок та вимірювальний модуль. Повний діапазон вимірювання з рефлексом абсолютним трекером AT500 поширюється на об'єм діаметром 320 метрів, що робить його ідеальним рішенням для перевірки великих конструкцій, таких як антени або кораблі.



Рисунок 2 - Загальний вигляд абсолютного трекера Leica AT500

Технології абсолютного трекера Leica AT500

В покладено технології абсолютного інтерферометру (AIFM), що застосовують кутові енкодери, інтерферометр (IFM) для вимірювань відносних відстаней з високою швидкістю в динаміці і абсолютний далекомір (ADM) для визначення абсолютних відстаней.

Кутові енкодери

Система вимірювань кутів складається з кодованого скляного кола та чотирьох кутових датчиків, завдяки чому проводиться чотириразове зчитування даних. Чотири окремі датчики зменшують систематичні та періодичні помилки, що виникають при вимірюваннях кутів, отже загальна точність вимірювань зростає.

Абсолютний інтерферометр (AIFM)

Для кращого розуміння принципу роботи абсолютного інтерферометра розглянемо окремо два компоненти його складових: абсолютний далекомір (ADM) та інтерферометр (IFM). Обидва рішення мають свої сильні та слабкі сторони.

Інтерферометр (IFM)

Інтерферометр дозволяє визначати відносні відстані (тобто відстань між двома точками) із субмікронною точністю. Лазерний промінь направляється трекером на відбивач і повертається, при цьому обидва промені (прямий та зворотний) оцінюються трекером одночасно. Під час руху відбивача промінь, що повертається, теж рухається і хвилі обох променів починають перетинати один одного, утворюючи хвилю суперпозиції (рис.3). Кожне зміщення променя дорівнює накладенню хвиль в суперпозицію і зміні відстані в $\frac{1}{2}$ довжини хвилі лазера. Звідси і виходить термін інтерферометра «що зчитує»: якщо відомий напрямок руху і кількість разів виникнення піків суперпозицій, то він множиться на $\frac{1}{2}$ довжини хвилі лазерного променя і в результаті виходить точне збільшення відстані.

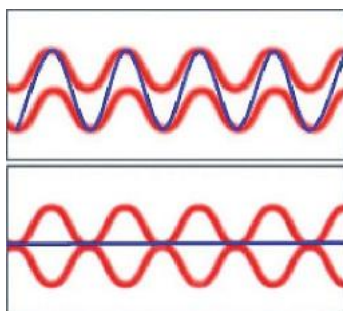


Рисунок 3 – Утворення хвилі суперпозиції інтерферометром

Частота оновлення збільшення залежить тільки від швидкості переміщення відбивача. Все це робить інтерферометр ідеальним інструментом для виконання вимірювань у динаміці. Тому що зовсім не важливо, з якою швидкістю рухається відбивач, будь-які його переміщення фіксуються системою на субмікронному рівні.

Інтерферометр може визначати відносні відстані з точністю субмікронної, проте він не може визначати абсолютні відстані, тобто. не маючи відомої початкової точки!

Абсолютний далекомір (ADM)

Абсолютний далекомір визначає абсолютні відстані з високою точністю. Абсолютному далекоміру властиве таке поняття, як час інтеграції. Цей час необхідне виконання операцій з обчислення позиції відбивача. Модуль ADM використовує модульований та поляризований інфрачервоний лазерний промінь. Необхідно знати три основні параметри визначення відстані:

- Довжина хвилі джерела світла
- Швидкість світла
- Частота модуляції поляризованого світла

Частота модуляції є ключовим параметром ADM. Відбита хвиля аналізується певний період для визначення точки мінімуму. Цей якісний вимір хвилі є стрибкоподібним типом виміру, який «скаче» вперед і назад по точці мінімуму хвилі, щоб розрахувати виміряне середнє значення (рис.4).

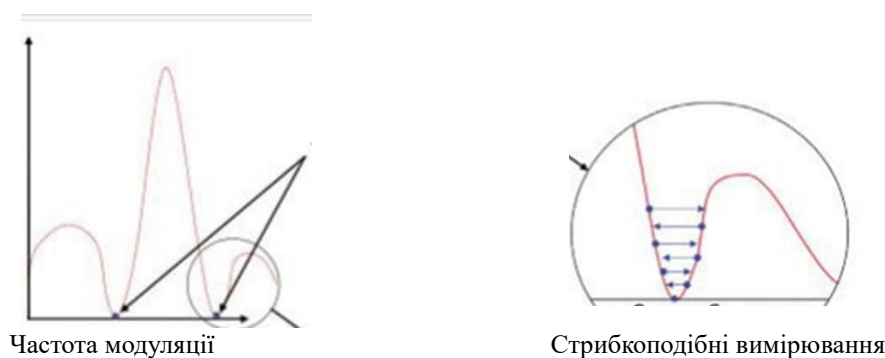


Рисунок 4 – Графічне зображення стрибкоподібних вимірювань

Відбивач повинен залишатися нерухомим під час цих стрибкоподібних вимірів. Якщо відбивач рухається у цей час, то форма хвилі змінюється, і точка мінімуму зміщується. Отже, абсолютний далекомір не може використовуватися для визначення рухливих цілей.

Абсолютний інтерферометр (AIFM)

Абсолютний інтерферометр (AIFM) це модуль, який поєднує в собі інтерферометр (IFM), для динамічних вимірювань та абсолютний далекомір (ADM), для вимірювань абсолютних відстаней. Обидві системи роблять вимірювання на відбивач одночасно, що дозволяє динамічно відстежувати рухому мету з найвищою точністю. Як тільки трекер захоплює відбивач, інтерферометр (IFM) починає проводити вимірювання відносного зміщення. Навіть якщо відбивач переміщається з максимальною швидкістю та прискоренням, інтерферометр дозволяє визначати це зміщення з точністю субмікронної і передавати ці дані в модуль далекоміра (ADM). Далекомір аналізує хвилю, як описано вище, і використовує інформацію від інтерферометра (IFM) для розрахунку всього зміщення. Як тільки обчислюється точка мінімуму, абсолютна відстань передається назад інтерферометр (IFM). Цей процес перетворює інтерферометр із відносного інструменту на інтерферометр з відомою базовою відстанню, більш відомий, як абсолютний інтерферометр – AIFM.

Прив'язка до прямовисної лінії («Orient-to-Gravity», OTG) / Датчик кута нахилу (інклінометр).

Двоосьовий інклінометр розташований усередині корпусу трекера. Він може працювати у різних режимах, залежно від стійкості поверхні, де встановлено трекер:

- Прив'язка до прямовисної лінії
- Моніторинг
- Інклінометр вимкнено

В ідеалі, коли інструмент прив'язаний до прямовисної лінії, вісь його обертання паралельна цій лінії. Однак у реальних умовах це неможливо. Під

час процедури прив'язки до прямовисної лінії система замірює відхилення (двох кутів) осі обертання інструменту від прямовисної лінії. У разі роботи трекера в режимі прив'язки до прямовисної лінії, кожен вимір трекера коригується цими двома кутами.

Крім того, інклінометр може використовуватися для моніторингу положення осі обертання трекера.

Кожен з трекерів поєднує в собі кілька систем таких як відеосистема, електронний рівень, портативна метеостанція, вбудована система дистанційного управління, інтерфейс бездротової передачі даних, система автономного живлення. Завдяки цьому лазерні трекери Leica здатні виконувати завдання у важких умови виробництва з підвищеною вологістю, запиленістю, в широкому діапазоні температур, при наявності спалахів від електрозварювання тощо.

Абсолютний трекер Leica AT403

Абсолютний трекер Leica AT403 – це пристрій з технологією прямого сканування Wave Form Digitisation, яка раніше не використовувалася спеціалізованими метрологічними системами.

Wave Form Digitisation (WFD) – це перевірена технологія, використовується в геодезичних інструментах високої роздільної здатності. Вона поєднує технологію вимірювання часу проходження та зсуву фаз, забезпечуючи швидкий вимір на великих відстанях, не вимагаючи розміщення мішені на об'єкті, що вимірюється (рис.5).

Хоча технологія WFD деякий час використовувалася в геодезичному вимірювальному устаткуванні, тільки зараз, вперше точність цієї технології була доведена до рівня метрологічних вимог.

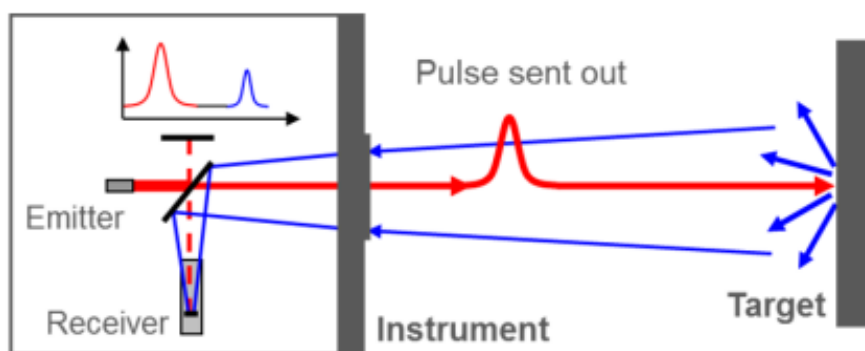


Рисунок 5- Технологія прямого сканування Wave Form Digitisation

Tracker AT403 може виконувати безконтактні вимірювання з рівнем похибки (1σ) у межах 100 мікрон – на цілий порядок точніший, ніж попередні вимірювальні системи WFD.

Щоб оцифрувати деталь або поверхню, трекер AT403 послідовно вимірює мережу точок у межах області, заданою користувачем (рис. 6).

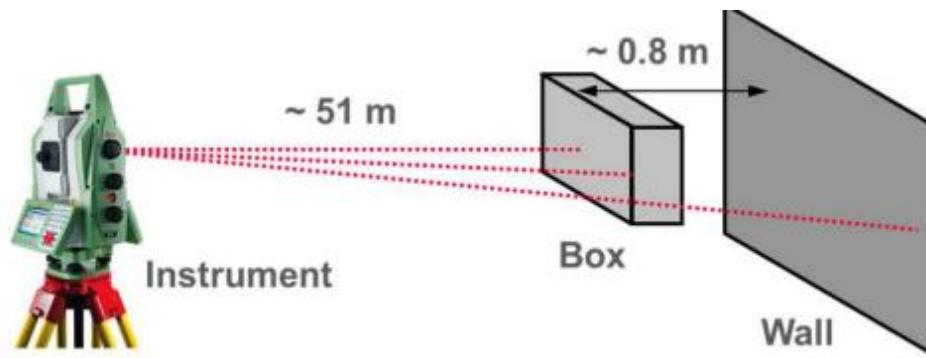


Рисунок 6 - Схематичне зображення тесту виміру до краю

Таке “вибіркове сканування” дозволяє підвищити ефективність використання результатів вимірювань та аналізу даних, ніж вимір повної напівсфери, що зазвичай використовується в геодезичних системах високої роздільної здатності.

Область сканування визначається або просто за допомогою вбудованої камери загального виду або шляхом вибору номінальних даних або даних САПР за допомогою прикладного програмного забезпечення.

Для мінімізації участі оператора у полі зору AT403 можна об'єднати кілька областей сканування з окремими параметрами сітки, сканування яких буде виконуватись за один прогін. Крім того, вид сітки сканування також може задаватися користувачем, при цьому щільність сканування вибирається у значеннях від 0,5 до 1000 мм при заданій відстані до об'єкта виміру. Це дозволяє оператору надійно контролювати належний баланс між скануванням деталі та швидкістю процесу вимірювання.

Перелік джерел інформації

1. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник : у 2 т. / М. М. Дорожовець, В. П. Мотало, Б. І. Стадник та ін. ; за ред. Б. І. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – Т. 1 та Т.2. Основи метрології. – 532 с.
2. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посібник Харків, НТУ "ХПІ", 2005.
3. Дорожовець М.М. Опрацювання результатів вимірювань: навч. посібник Львів, Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007.
4. Чинков В.М. Цифрові вимірювальні прилади: навч. посібник Харків, НТУ "ХПІ", 2008.

Інтернет ресурси <https://www.koda.ua/ukr/>