Systemy znaczników wizyjnych w precyzyjnej lokalizacji robotów

1. Wstęp i kontekst strategiczny lokalizacji wizyjnej

W zaawansowanej robotyce mobilnej precyzyjna estymacja stanu stanowi fundament autonomii, warunkując stabilność algorytmów nawigacyjnych, omijanie przeszkód oraz realizację inspekcji strukturalnych. W kontekście Przemysłu 4.0 oraz zaawansowanej logistyki, pasywna lokalizacja oparta na znacznikach fiducjalnych (fiducial markers) stała się strategicznym komponentem systemów AGV/AMR.

Osiągnięcie precyzji sub-decymetrowej nie jest jedynie parametrem technicznym, lecz krytycznym wymogiem bezpieczeństwa i wydajności operacyjnej, umożliwiającym precyzyjne dokowanie z tolerancją rzędu milimetrów.

Fundamentem systemów wizyjnych jest estymacja pozy w sześciu stopniach swobody (6-DOF), określająca translację i rotację kamery względem znacznika. Proces ten opiera się na macierzy kalibracji kamery (K) oraz uwzględnieniu parametrów dystorsji (radialnej i tangencjalnej).

Wybór geometrii znacznika – kwadratowej (AprilTag) lub kołowej – determinuje fundamentalne parametry stabilności matematycznej i odporności na zjawisko niespójności klatek odniesienia (frame inconsistency).

---

2. Architektura i mechanika detekcji znaczników kwadratowych (AprilTag)

Standard AprilTag (np. rodzina 36H10) dominuje w robotyce profesjonalnej jako rozwiązanie open-source o wysokiej skuteczności identyfikacji przy umiarkowanych zasobach obliczeniowych.

Proces detekcji:

1. Obliczanie gradientów pikseli.
2. Grupowanie komponentów o podobnych atrybutach.
3. Dopasowywanie linii metodą ważonych najmniejszych kwadratów (LSQ).
4. Ekstrakcja czworokątów (quad shapes), rektyfikacja homograficzna i dekodowanie ładunku cyfrowego.

Największą zaletą AprilTag jest cyfrowe kodowanie oparte na odległości Hamminga, zapewniające niemal zerowy wskaźnik fałszywych detekcji oraz wysoką odporność na zmienne oświetlenie i duże dystanse.

Jednak estymacja pozy oparta na czterech narożnikach generuje znaczne zaszumienie (jitter), szczególnie przy odchyleniu osi Z kamery od środka znacznika.

---

3. Specyfika i zalety znaczników kołowych

Znaczniki kołowe stanowią alternatywę dla systemów o wysokich wymaganiach geometrycznych. Ich rzut perspektywiczny zawsze przyjmuje formę elipsy.

Algorytmika i identyfikacja

Detekcja wykorzystuje korespondencję stożkową (conic correspondence) całego konturu elipsy. Stosowane jest dopasowanie elipsy oparte na dekompozycji wartości osobliwych (SVD-based ellipse fitting).

Kluczowym elementem jest Pyramidal Cross-Correlation Optimizer, realizujący wielopoziomowe przeszukiwanie i dopasowanie 16-bitowego kodu rozmieszczonego w segmentach kątowych (angular bins).

Wykorzystanie całego konturu elipsy zamiast czterech punktów krytycznych zwiększa odporność na szum i umożliwia odzyskanie pozy przy częściowej okluzji.

Orientacja znacznika zakodowana jest w cyklicznym 16-bitowym ładunku (payload).

---

4. Analiza krytyczna źródeł błędów (AprilTag)

Główne źródła błędów:

- odległość,
- kąt patrzenia,
- rotacja wokół osi yaw (φ).

Zjawisko frame inconsistency powoduje matematyczne przesunięcie początku układu współrzędnych, interpretowane jako fałszywy ruch robota.

Eliminacja tych niedokładności wymaga wieloetapowej optymalizacji obejmującej:

- korekcję programową,

- stabilizację sprzętową,
- modelowanie probabilistyczne.

---

5. Etap I – Soft Yaw Axis Correction (SYAC)

SYAC jest pasywną korekcją programową eliminującą niespójność ramek odniesienia.

Transformacja współrzędnych:

- $\bar{x} = x + z \cos \varphi$
- $\bar{y} = z \sin \varphi$
- $\bar{\omega} = \varphi - \tan^{-1}(z \sin \varphi / (x + z \cos \varphi))$
- $\bar{\theta} = \arctan(z \sin \varphi / (x + z \cos \varphi))$

W warunkach eksperymentalnych przy odchyleniu 110° błąd w osi X został zredukowany z 40 cm do 5 cm.

Efekty:

- redukcja błędów systematycznych,
- stabilizacja odczytów,
- poprawa spójności trajektorii.

Ograniczenie: spadek efektywności przy ekstremalnych kątach widzenia.

---

6. Etap II – Active Correction with Yaw Axis Gimbal (ACYG)

ACYG eliminuje geometryczne przyczyny szumu poprzez fizyczne wyrównanie osi optycznej kamery.

Architektura:

- jednoosiowy gimbal,
- kontroler PID,
- utrzymywanie $\varphi \approx 0$.

Wyzwanie inżynieryjne: asymetria częstotliwości

- detekcja: 10–11 Hz

- pętla gimbala: 8 Hz

Wdrożenie SYAC + ACYG:

- redukcja wariancji błędu w osi X z 112 cm² do 0,29 cm² (70 cm),
- poprawa dokładności w osi Y z 2,56 cm do 0,54 cm,
- osiągnięcie precyzji sub-centymetrowej.

---

7. Etap III – Modelowanie probabilistyczne (Procesy Gaussowskie)

W środowiskach dynamicznych stosuje się regresję opartą na Procesach Gaussowskich (GP) do budowy pose-indexed probabilistic sensor model.

Model:

- estymuje wariancję jako funkcję pozy robota,
- dostarcza dynamiczną miarę niepewności.

Integracja z Monte Carlo Localization (MCL):

- wykorzystanie oczyszczonych danych,
- płynna estymacja trajektorii,
- filtrowanie szumu poprzez wagowanie wariancją.

---

8. Analiza porównawcza: AprilTag vs Znaczniki Kołowe

Cecha	AprilTag	Znaczniki Kołowe
Geometria detekcji	4 narożniki	Cały kontur
Metoda estymacji	Homografia + K	Dekompozycja stożkowa + SVD
Odporność na okluzje	Średnia	Bardzo wysoka
Czułość na yaw	Bardzo wysoka	Niska
Prędkość	40–60 FPS	100 FPS

Wniosek:

- Znaczniki kołowe oferują wyższą natywną precyzję geometryczną.

- AprilTag dominuje dzięki cyfrowemu kodowaniu (odległość Hamminga).
- Niedoskonałości geometryczne AprilTag mogą być niwelowane przez SYAC, ACYG i GP.

---

9. Wytyczne implementacyjne dla systemów sub-decymetrowych

- Implementacja AprilTag: zalecana w środowiskach outdoor i przy zmiennym oświetleniu; wymagana fuzja z IMU i filtrem EKF.
- Implementacja znaczników kołowych: optymalna dla precyzyjnej manipulacji i bliskiego zasięgu.
- Rekomendowana synergia: aktywna korekcja gimbalem + SYAC + model probabilistyczny GP.

---

10. Wnioski końcowe

Precyzja sub-decymetrowa nie wynika wyłącznie z wyboru typu znacznika, lecz z:

- świadomego zarządzania błędem osi yaw,
- integracji korekcji programowych i sprzętowych,
- modelowania probabilistycznego,
- fuzji danych sensorycznych.

Zastosowanie wielowarstwowej optymalizacji przekształca system znaczników wizyjnych z narzędzia nawigacyjnego w rozwiązanie klasy metrologicznej.

Typ znacznika	Geometria i kształt	Zasada detekcji	Metody poprawy precyzji	Odporność na okluzje	Zastosowania i wydajność	Główny parametr błędu (Inferred)
AprilTag	Kwadratowy, czarna ramka z matrycą bar kodową 2D wewnątrz (np. klasa 36H10).	Wykrywanie czterech narożników poprzez analizę gradientów pikseli, grupowanie komponentów i dopasowywanie linii metodą najmniejszych kwadratów; estymacja pozy przez homografię.	Korekcja SYAC (matematyczna), aktywny gimbal ACYG (sprzętowa), fuzja danych (Filtr Kalmana), modele procesów Gaussowskich (GP).	Odporny na niewielkie przesłonięcia dzięki cyfrowemu kodowaniu (odległość Hamminga) .	Robotyka, AR, lądowanie dronów; wysoka niezawodność; częstotliwość ok. 10–11 Hz.	Zmienność kąta odchylenia (yaw) kamery względem znacznika oraz dystans.
Znaczniki kołowe (Circular Markers)	Czarne koło składające się z trzech pierścieni o równej szerokości; zewnętrzny do lokalizacji, wewnętrzne do kodowania (16-bit).	Wykrywanie konturu elipsy (rzutu koła), dopasowanie elipsy (SVD), ekstrakcja kodu 16-bitowego z podziałów kątowych (angular bins).	Wykorzystanie całego konturu elipsy zamiast punktów narożnych, piramidalny optymalizator korelacji wzajemnej (cross-correlation).	Wysoka; dopasowanie elipsy nie wymaga widoczności całego konturu.	Rozszerzona rzeczywistość (AR); bardzo szybkie: 100 kl./s (PC), 30 kl./s (UMPC).	Zniekształcenia perspektywiczne przy dużych kątach patrzenia wpływające na dopasowanie elipsy.
SYAC (Soft Yaw Axis Correction)	Pasywna technika programowa (nie dotyczy kształtu fizycznego).	Matematyczna transformacja współrzędnych oparta na trygonometrii, wyrównująca oś Z kamery na środek znacznika.	Eliminacja niespójności ramek odniesienia poprzez przeliczenie surowych danych (x , z) na skorygowane ($\bar{x}$, $\bar{y}$).	Zależna od bazowego systemu znaczników (np. AprilTag).	Redukcja błędu na osi X z 40 cm do 5 cm przy kącie 110 $^\circ$; zwiększa czas wykonania o ok. 40 ms.	Błędy pomiaru kąta yaw przekazywane przez bazowy algorytm wizyjny.
ACYG (Gimbal Aktywny)	Rozwiązanie sprzętowe (kamera na jednoosiowym gimbalu z silnikiem krokowym/serwo).	Śledzenie środka znacznika w czasie rzeczywistym przy użyciu algorytmu PID w celu utrzymania kąta yaw blisko 0 $^\circ$.	Fizyczna korekcja orientacji kamery; redukcja błędów RMSE do poziomu poniżej 1 cm w połączeniu z SYAC.	Zależna od ciągłości detekcji znacznika dla pętli sprzężenia zwrotnego.	Precyzyjna lokalizacja; błąd pozycji zredukowany z 4,4 cm do 0,8 cm; częstotliwość ok. 8–10 Hz.	Opóźnienia mechaniczne serwomechanizmu i błędy regulacji PID.