Percepcja, optyka i ergonomia w systemach XR

WiRR · Wykład 02 · Automatyka i Robotyka · 3 ECTS · 2026/2027 · v1.2.6

dr inż. Mateusz Pomianek

Katedra Informatyki i Automatyki, Politechnika Rzeszowska

16.10.2026

Od geometrii obrazu do decyzji projektowej

Cel: ocenić, czy stanowisko XR zapewnia czytelny, stabilny i komfortowy obraz w konkretnym zadaniu.

- Geometria i optyka: IPD, FOV, eyebox, PPD.
- Percepcja i czas: VAC, stabilność klatek, motion-to-photon.
- Techniki korekcji: predykcja, ATW, ASW, Application SpaceWarp.
- Weryfikacja: SSQ, wykonanie zadania i pilotaż stanowiska.

Dwa różne konflikty percepcyjne

Konflikt ruchu

Wzrok: jadę przez magazyn.

Układ przedsionkowy: pozostaję nieruchomo.

Konflikt ostrości

Wergencja: oczy zbiegają się na bliskim obiekcie.

Akomodacja: optyka wymaga ogniskowania na innej odległości.

Wniosek: różne mechanizmy wymagają różnych testów.

Model organizacji szkolenia operatorów

40 operatorów

10 stanowisk XR

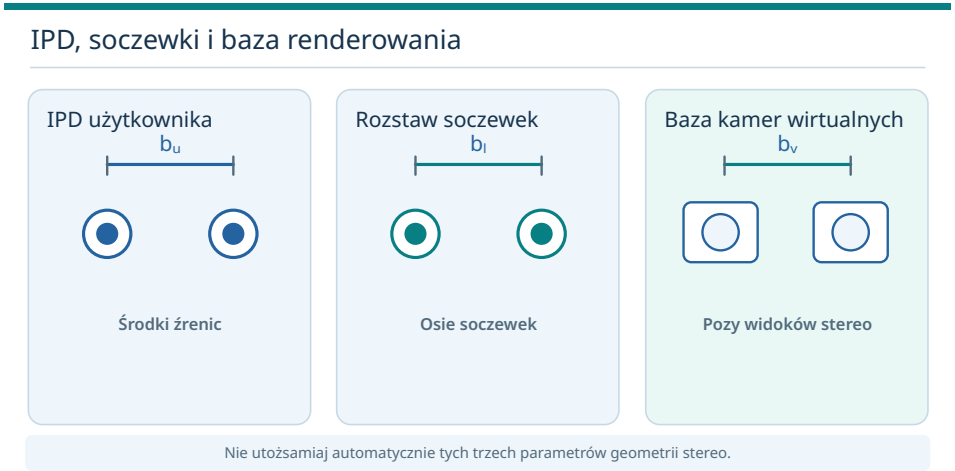
Założenia modelowe

- Trzy sesje po 25 minut na osobę dziennie: **założenie organizacyjne**, nie zalecenie ekspozycji.
- Współdzielone urządzenia, indywidualne IPD i okulary.
- Wirtualna jazda bez odpowiadającego ruchu kabiny.

Pytanie projektowe: co należy zmierzyć przed zakupem?

Geometria i optyka

IPD nie jest bazą renderera



Dopasowanie: sprawdź osobno geometrię widoków stereo i ułożenie obu oczu względem soczewek.

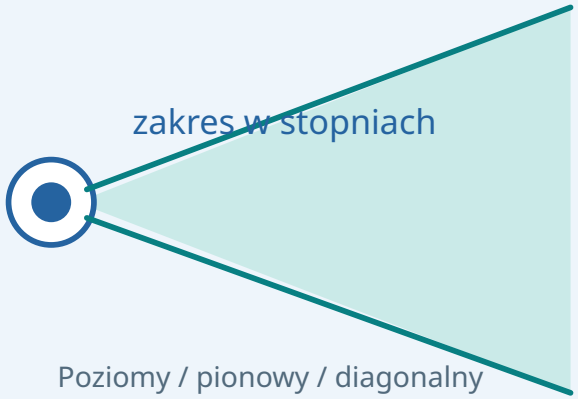
Dopasowanie optyki i położenie oka

- Dopasowanie IPD to nie tylko wpisanie wartości w ustawieniach.
- Sprawdź pozycję oczu w obszarze prawidłowej obserwacji soczewek.
- Powtórz test czytelności po ponownym założeniu urządzenia.

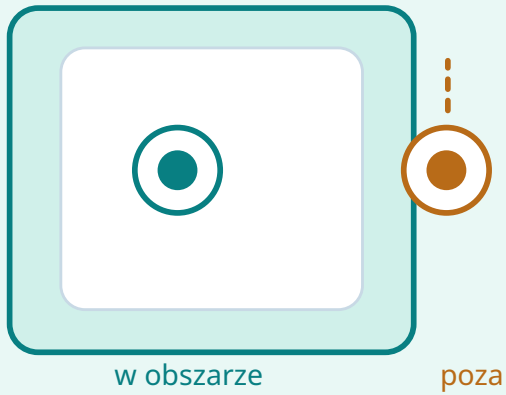
FOV i eyebox

FOV i eyebox: różne parametry optyki

FOV: zakres kątowy



Eyebox: pozycja oka



Duży FOV nie gwarantuje jakości obrazu przy nieprawidłowym ułożeniu oka.

Implikacja: regulacja gogli wpływa na użyteczny zakres widzenia i czytelność.

PPD: średnia nie jest ostrością w każdym punkcie

Średnie PPD a jakość lokalna

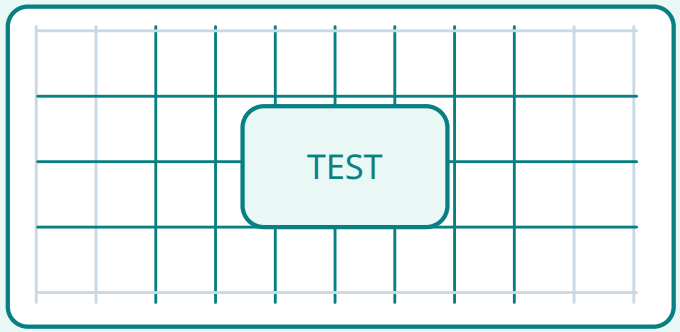
Średnia PPD

$$PPD = N / \Phi$$

2160 / 90° = 24 PPD

Iloraz dla całego zakresu

Ocena lokalna obrazu



Kontrast · optyka · pozycja oka

Układ lokalny jest schematem, nie mapą pomiarową konkretnych gogli.

Definicja: $\overline{\mathrm{PPD}} = N/\Phi$. Dla 2160 px i 90° średnia wynosi 24 PPD.

PPD można przeliczać, nie trzeba przepisywać wyniku

$$\overline{\mathrm{PPD}} = 2160/90 = 24\,\mathrm{px}/^\circ$$

Pełny przykład Python: ppd.py.

```python
def average_ppd(pixels: int, fov_deg: float) -> float:
    if pixels <= 0 or not 0 < fov_deg < 180:
        raise ValueError("Invalid image size or FOV")
    return pixels / fov_deg

print(average_ppd(2160, 90))  # 24.0
```

Rozdzielczość kątowa w zadaniu operatora

- Średnia PPD nie oznacza jednakowej ostrości w całym polu widzenia.
- Małe etykiety ocenia się z uwzględnieniem kontrastu i położenia.
- Parametry katalogowe porównuj z wynikami rzeczywistego odczytu.

Czas i percepcja

Okres klatki nie jest opóźnieniem końcowym

$$T = \frac{1000}{f}\ \mathrm{ms}$$

Częstotliwość	Okres
72 Hz	13,89 ms
90 Hz	11,11 ms
120 Hz	8,33 ms

Motion-to-photon obejmuje tor od ruchu głowy do zmiany światła wyświetlacza.

Opóźnienie przekłada się na błąd kątowy

Opóźnienie a błąd kątowy ruchu

$$\Delta\theta \approx \omega \cdot \tau$$

Uproszczenie: stałe ω, bez predykcji i korekcji

10 ms opóźnienia

100°/s × 0,010 s

1°

Mniejszy błąd modelowy

20 ms opóźnienia

100°/s × 0,020 s

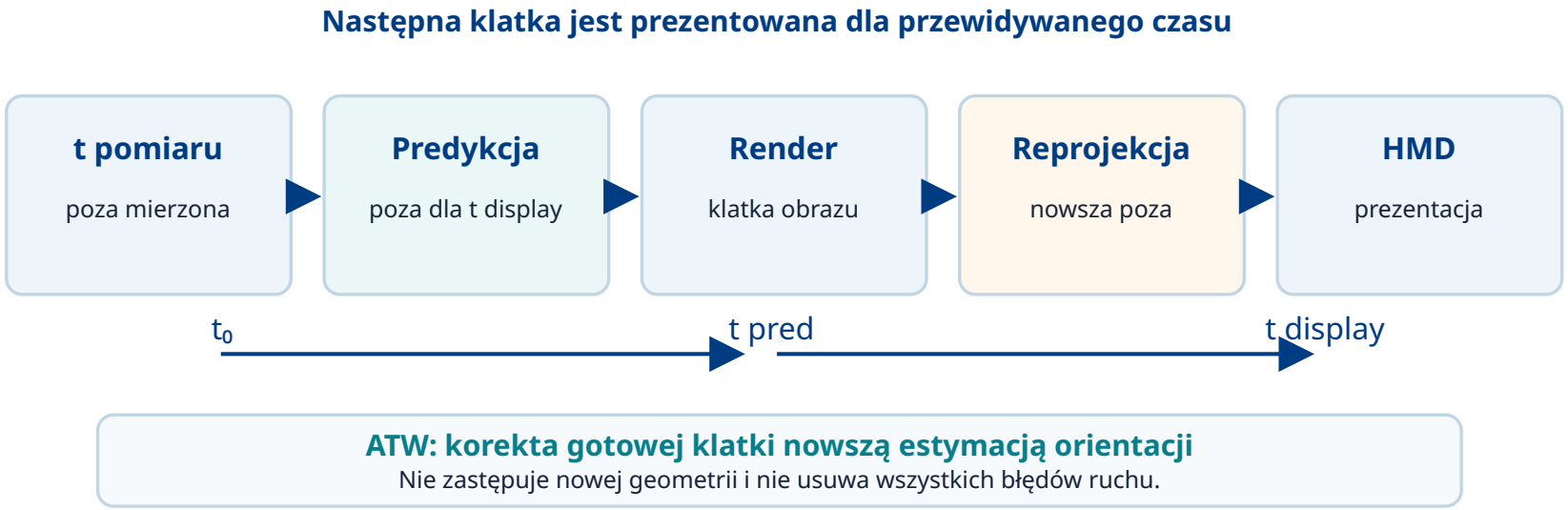
2°

Około 40 px przy 20 PPD

Przykład rachunkowy. Nie jest to pomiar motion-to-photon urządzenia.

Model: $\Delta\theta \approx \omega\tau$. Przy 20 PPD, 2° odpowiada około 40 px, bez predykcji.

Od predykcji do reprojekcji



$$\hat{\theta}(t+\tau) = \theta(t) + \hat{\omega}(t)\tau$$

Predykcja przybliża pozę w chwili prezentacji; **ATW** koryguje gotową klatkę nowszą pozą, ale nie tworzy brakującej geometrii.

ATW, ASW i Application SpaceWarp

Mechanizm	Najważniejsza informacja
ATW	Gotowy obraz i nowsza poza
PC ASW	Historia obrazów i estymacja ruchu
Application SpaceWarp	Kolor, głębia i wektory ruchu aplikacji

Syntetyczna klatka nie jest równoważna pełnemu renderowaniu.

Przerwa 5 minut

5 minut przerwy

Pytania do samodzielnego powtórzenia

1. Dlaczego IPD, baza kamer i rozstaw soczewek są różnymi wielkościami?
2. Jak poprawnie wyznaczyć średnią gęstość PPD i jakie ma ograniczenia?
3. Czym różnią się okres klatki, motion-to-photon i reprojekcja?
4. Dlaczego SSQ nie rozstrzyga samodzielnie przyczyny dyskomfortu?

Ocena stanowiska XR

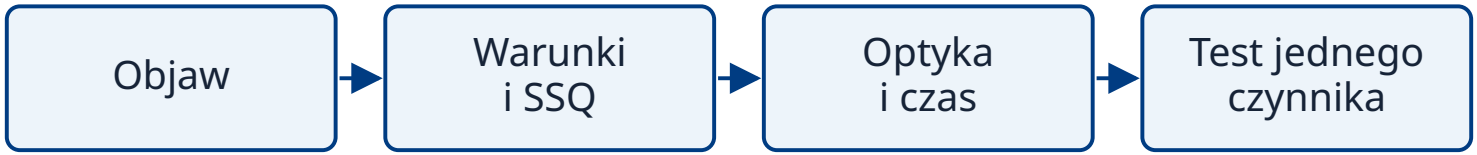
SSQ: mierzymy objawy, nie diagnozujemy mechanizmu

- Kwestionariusz obejmuje **16 objawów** ocenianych od 0 do 3.
- Podskale: nudności (N), okulomotoryczna (O), dezorientacja (D).
- Część pozycji należy do więcej niż jednej podskali.
- Wyniki przed i po ekspozycji interpretujemy razem z warunkami i wynikami zadania.

Objawy przed ekspozycją i po niej

- Zbierz stan wyjściowy przed rozpoczęciem doświadczenia XR.
- Stosuj ten sam kwestionariusz i jawne reguły punktowania po ekspozycji.
- Zapisuj rodzaj ruchu w scenie i czas trwania sesji.

Z objawu do testu technicznego



Objaw jest punktem wyjścia, a nie diagnozą przyczyny.

Rysunek 1: Od objawu do kolejnego porównania jednego czynnika

Kontrola obejmuje także wykonanie zadania, nie tylko samoopis dyskomfortu.

Czytelność podczas ruchu głowy

- Porównaj odczyt komunikatu przy nieruchomej i poruszającej się głowie.
- Rejestruj spóźnione klatki i stabilność położenia elementów.
- Oceń poprawność odpowiedzi i czas zadania, nie tylko FPS.

Ile rzeczywiście zajmuje szkolenie?

$$40 \times 3 \times 25 = 3000\ \text{min} = 50\ \text{h}$$

Założenie cyklu: 3 min dopasowania + 25 min sesji + 2 min higieny.

$$120 \times 30\ \text{min} = 60\ \text{h stanowisk}$$

$$60\ \text{h}/10 = \boxed{6\ \text{h}}$$

Sześć godzin to dolna granica przy pełnym wykorzystaniu stanowisk.

Skuteczność szkolenia a czas stanowiskowy

- Czas zajęcia stanowiska to koszt organizacyjny, nie miara uczenia się.
- Oceniaj ukończenie procedury, błędy i utrzymywanie umiejętności.
- Sprawdź transfer do rzeczywistego zadania, jeśli jest to możliwe.

Pilotaż przed zakupem

1. **Dopasowanie:** IPD, okulary, czas przygotowania i wymiany użytkownika.
2. **Wydajność:** p95/p99 CPU i GPU, spóźnione klatki i reprojekcja w najtrudniejszej scenie.
3. **Skuteczność i komfort:** odczyt wskaźników, wykonanie zadania, SSQ przed/po, przerwane sesje.

Decyzja: porównywać urządzenia w tych samych warunkach zadania i ekspozycji.

Kontrolowane porównanie urządzeń

- Stosuj to samo zadanie, kryteria oceny i porównywalne otoczenie.
- Zapisz wersję aplikacji, odświeżanie, ustawienia i kolejność prób.
- Raportuj błędy oraz rozkład wyników, nie tylko średnią.

Dostępność dopasowania urządzenia

- Uwzględnij osoby noszące okulary korekcyjne.
- Kontroluj zakres regulacji, stabilność ułożenia i dostępność elementów sterowania.
- Odnotuj przypadki, w których urządzenie uniemożliwia wykonanie zadania.

Bezpieczne przerwanie ekspozycji

- Przed rozpoczęciem ustal sposób zgłaszania narastającego dyskomfortu.
- Uczestnik może zakończyć próbę bez presji na ukończenie sesji.
- Dokumentuj przerwania i warunki ekspozycji z poszanowaniem prywatności.

Podsumowanie

- **Geometria:** IPD i prawidłowa projekcja.
- **Optyka:** FOV, eyebox i PPD z jawną definicją.
- **Czas:** pełne motion-to-photon, nie tylko FPS.
- **Percepcja:** oddzielnie VAC i konflikt ruchu.
- **Ocena:** pomiary techniczne + wykonanie zadania + objawy.

Kryterium końcowe: stanowisko trzeba zweryfikować w docelowym zastosowaniu.

Macierz decyzji dla stanowiska XR

- Optyka i czytelność: wynik zadania odczytu etykiety.
- Stabilność czasowa: rozkład czasów klatek i opóźnień.
- Ergonomia: dopasowanie, objawy i przerwania.
- Skuteczność: poprawność i czas wykonania zadania.

Próba odbiorcza: ergonomia stanowiska XR

Scenariusz: operator ma odczytać oznaczenie i wskazać mały element w docelowej scenie.

- Skontroluj **dopasowanie optyki i IPD** dla konkretnego użytkownika.
- Oceń **czytelność w centrum i na obrzeżach**; średnia PPD nie wystarczy.
- Zarejestruj **czas reakcji obrazu, przerwania i objawy dyskomfortu**.
- Raportuj konfigurację i warunki ekspozycji, nie sam wynik SSQ.

Wynik odbioru: skuteczność zadania i komfort w powtarzalnej procedurze.

Bibliografia

- LaValle, *Virtual Reality*, optyka i percepcja.
- Shibata i in. (2011), *The zone of comfort*, doi:10.1167/11.8.11.
- van Waveren (2016), *The Asynchronous Time Warp*, doi:10.1145/2993369.2993375.
- Bimberg i in. (2020), *On the Usage of the SSQ*, doi:10.1109/VRW50115.2020.00098.