

# Relative Pose Estimation Using Event-Based Measurements of LED Signals

Thesis Defense

---

Jakub Pelc

10.6.2025

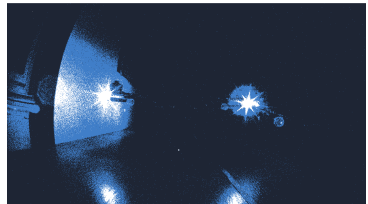
Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague  
Multi-robot Systems Group

# Assignment

1. Research the working principles of event-based cameras. Research the existing Visible Light Positioning (VLP) methods such as Received Signal Strength Ratio (RSSR).
2. Analyze the response of a static event-based camera to UV LEDs used by the UVDAR localization system in UAV swarms. Modulate the signals with varying frequency, relative distance, and angle.
3. Design an approach for relative pose estimation of UAV swarm members, utilizing the analysis results and a proper fisheye lens calibration method.
4. Implement the proposed solution for a Robot Operating System (ROS). Test the implementation on the data used for the response analysis and discuss the results.
5. Conduct a real-world UAV swarming experiment. Compare the estimation results with a GNSS ground truth.

# Event-based cameras

- The event-cameras function by asynchronously generating events (positive or negative), based on pixel-level illumination changes.
- They offer a higher dynamic range than traditional cameras but generally require a different approach to data processing.

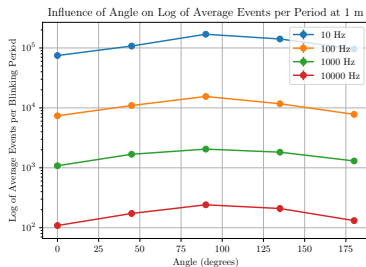
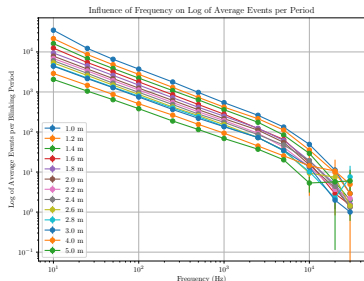
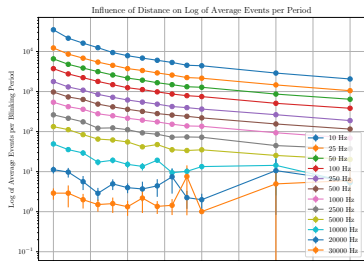


# UVDAR

- We use a UAV equipped with the UVDAR system, which controls a set of UV LEDs and allows their modulation.
- The camera is equipped with a narrowband UV filter to help with the light filtering.



# Influence Factors

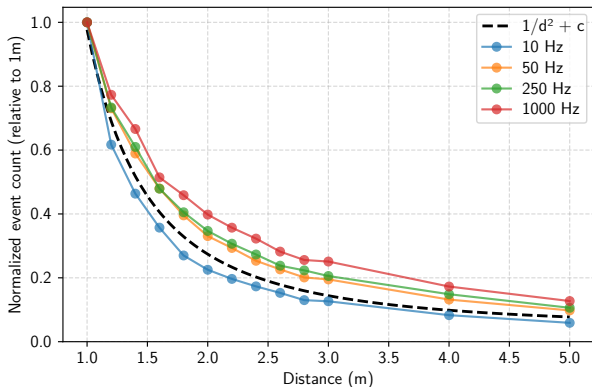


**Figure 1:** Distance, frequency and rotation angle influence

This is an experimental validation of the

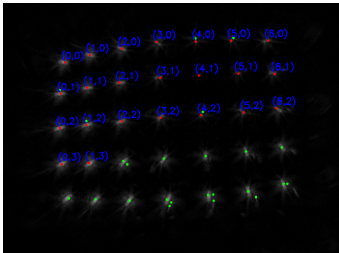
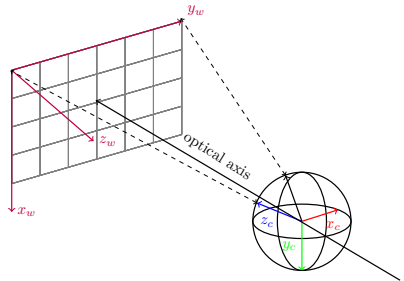
- Inverse square law:  $\text{intensity} \propto \frac{1}{\text{distance}^2}$
- Emission characteristics of the LEDs used:  
 $I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$

# Experimental validation of the inverse square law



**Figure 2:** Experimental validation of the inverse square law:  $\text{intensity} \propto \frac{1}{\text{distance}^2}$ .

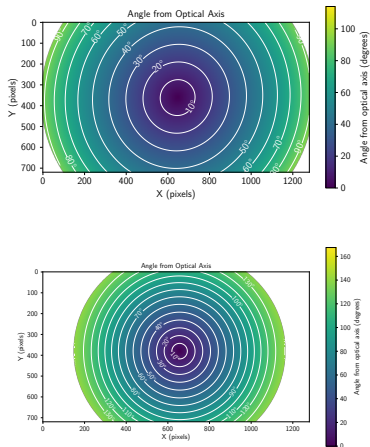
# Camera calibration



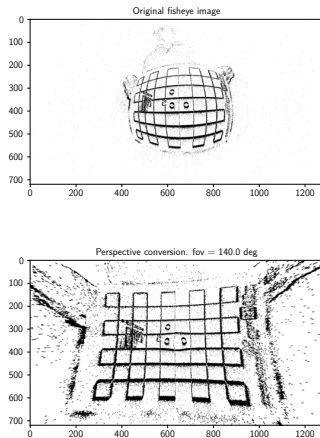
**Figure 3:** Camera calibration grid of  $5 \times 7$  UV LEDs

The centers of the LEDs are found as the centers of the detected pixel blobs.

# Camera calibration results

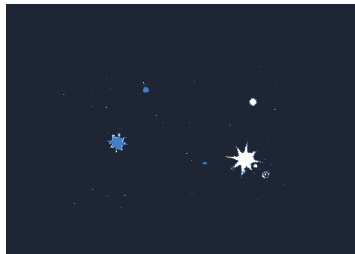
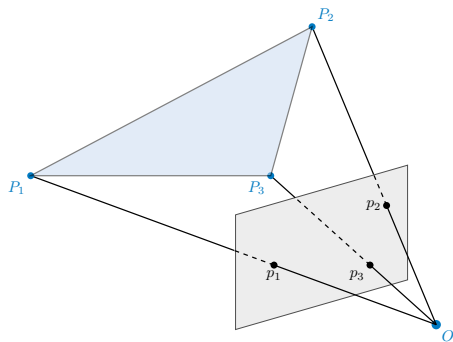


**Figure 4:** Lens visible area reconstruction



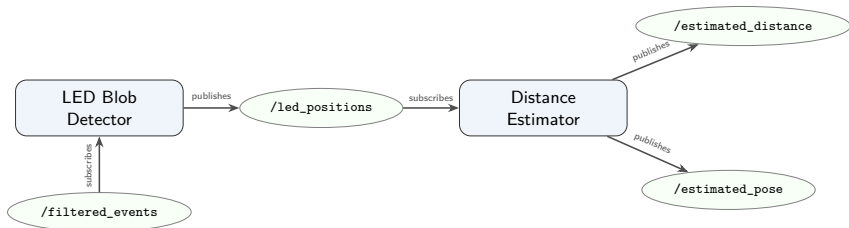
**Figure 5:** Lens before and after calibration

# Perspective-n-Point



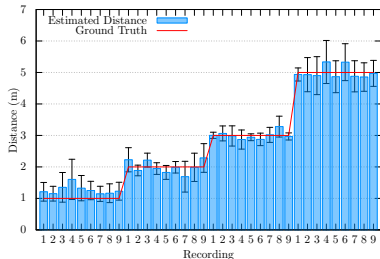
**Figure 6:** Perspective-n-Point visualisation.

A minimum of 3 points is required for a pose estimation using PnP.

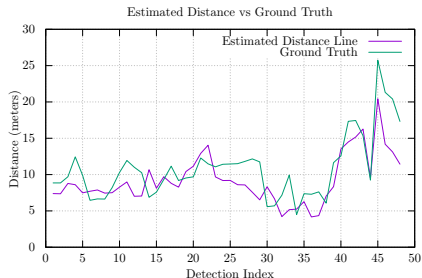


**Figure 7:** ROS position and distance estimation pipeline.

# Experiments



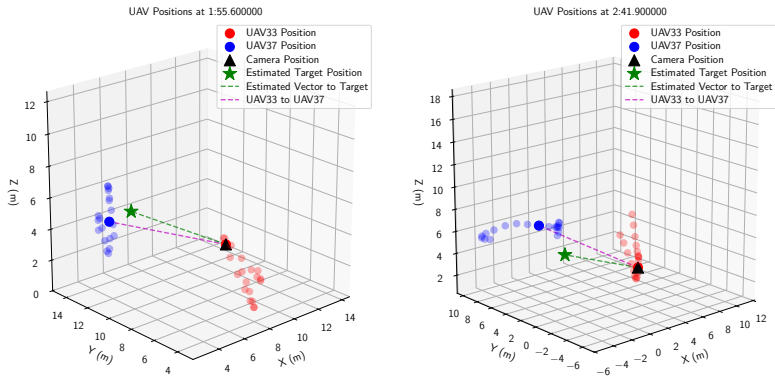
(a) Static experiment



(b) Flying experiment

**Figure 8:** The distance estimation results with a mean error of  $0.34 \pm 0.16$  meters for the static experiment, and  $2.47 \pm 1.75$  meters for the flying experiment.

# Experiments



**Figure 9:** Pose estimation results, with the estimated pose highlighted in green, and the real pose of the UAVs highlighted in red and blue.

# Conclusion

- The response of the event-based camera to the UV LEDs was measured and analyzed with varying distances, frequencies, and angles.
- Calibration of the camera with fisheye lenses was performed.
- A ROS node was implemented to facilitate automatic pose and distance estimation from detected LED centers.
- A flying experiment was performed with two flying UAVs, each equipped with an event-based camera and a fisheye lens.
- The results have shown an estimation accuracy of tens of centimeters in static cases, and in meters range during active motion and large distances.



**Figure 10:** UAV33 and UAV37

# Otázky

---

## Jaké jsou další metody, které by bylo možné využít k lokalizaci namísto PnP a proč bylo PnP použito namísto jich?

Metody pro lokalizaci založené na viditelném světle můžeme rozdělit do následujících kategorií:

- Fingerprinting - odhad polohy na základě předem naměřených referenčních vzdáleností (nutnost nasbírat velký dataset referenčních dat)
- Time/Angle of Arrival - je využit rozdíl času/úhlů doražených signálů
- Received Signal Strength - metoda často využívá fotodiody k získání poměru síly signálů
- Image Sensing - například PnP

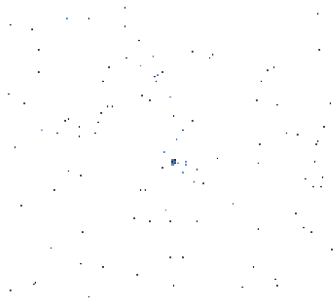
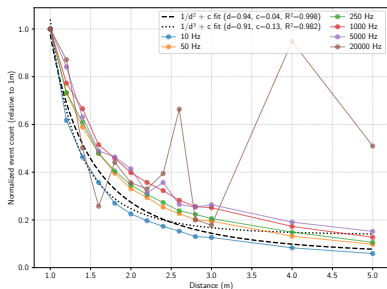
Metoda PnP bylo použita pro její možnost odhadu polohy pomocí výsledného obrazu z eventové kamery, poskytuje silný základ pro odhad polohy z relativně malého množství obdržených dat.

## **Proč se používá "fisheye" čočka jako senzor?**

Kvůli jejímu velkému zornému poli (FOV). Čím větší je její FOV, tím spíše jsme schopni detekovat prolétající dronu v našem zorném poli.

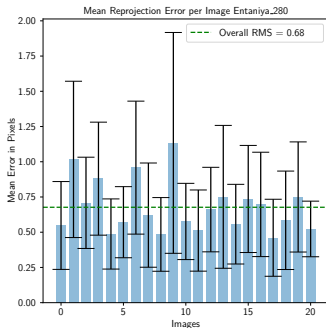
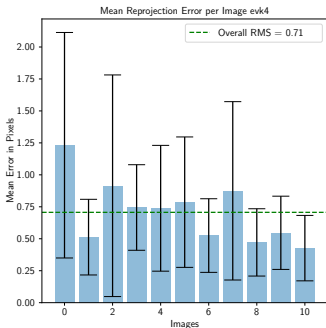
## Z jakého důvodu ve Figure 4.4 dochází k výraznému zvýšení počtu eventů pro 20kHz?

Jedná se o šum kamery, jelikož jsou data pro každou frekvenci normalizována vzhledem k počtu eventů naměřených na jednom metru. Při modulační frekvenci 20kHz byly při nastavených parametrech detekovány spíše eventy způsobené šumem, než reálné eventy vygenerované jako reakce na změnu jasu LED diod. Velikost obrazu LED diody je porovnatelná s velikostí šumových eventů.



## Jak si vysvětlujete velkou varianci chyb při kalibraci "fisheye" čočky? (Kapitola 4.2)

Velká variance chyby byla nejspíše způsobena relativní nepřesností při výběru středů detekovaných shluků pixelů napříč kalibračními snímky. Nutno podotknout, že chyba se pohybuje pouze v řádu nižších jednotek pixelů ( $\sim 1\text{px}$ ).



## **Je průměrná chyba lokalizace (2.45 metru) vzhledem k měřeným vzdálenostem přijatelná pro praktické použití?**

Na vzdálenostech testovaných při experimentu s létajícími UAV (15 - 20 metrů) je chyba přijatelná, jelikož má samotná drona dost času reagovat na možné přiblížení. Navržený algoritmus navíc odhaduje vzdálenost spíše nižší, než je její reálná hodnota.

Na nižších vzdálenostech by chyba odhadu měla být řádově nižší, díky přesnější detekci lokace středů LED identifikátorů (ověřeno ve statickém experimentu).