

# Kombinierte Misalignment-Kalibrierung visuell-inertialer Multisensorsysteme in allgemeinem Leverarmdesign

Im Rahmen des MiteSens-Projekts der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung entsteht ein UAV-basiertes Monitoringsystem (engl. Unmanned Aerial System) (UAS) zur Detektion und 3D-Georeferenzierung von Spinnmilben bei Pflanzen im Gewächshaus. Um die präzise Navigation des UAV sicherstellen zu können ist es wichtig, die individuellen Sensor-Kalibrierungsparameter der einzelnen Sensoren zu kennen. Mit der Kalibrierung einher geht auch die genaue 3D-Positions- und Orientierungsbestimmung der einzelnen Sensoren  $s(i,j)$  auf der Plattform  $p(j)$  und der Hebelarme der Plattform  $p(j)$  in Bezug auf den Körper (b).

## IMU-Kalibrierung

Eine IMU besteht üblicherweise aus 3 Beschleunigungsmessern und 3 Gyroskopen, welche sich auf einer starr befestigten Plattform befinden. Die IMU kann damit alle sechs Freiheitsgrade (6DoF) im Raum (3D) erfassen, welche für die vollständige Bewegungs- und Orientierungsbestimmung eines Körpers (b) in der Sensorfusion notwendig sind. Im Idealfall sind die Orthogonalitäten der Sensorrichtungen bezogen auf die Plattform eingehalten, ferner die Offsets der Sensorbeobachtungen Null und die Skalierungsparameter Eins. Abweichungen davon sind bei einer Triade die 3 Misalignmentparameter der Orthogonalität, der jeweilige Offset und die jeweilige Skalierung. Das Kalibrierungsverfahren hat zum Ziel, diese Abweichungen vom Idealzustand (kurz, aber unvollständig „Misalignment“) parametrisch zu bestimmen. Das mathematische Modell dieser Parametrisierung umfasst die Misalignmentmatrix ( $M$ ) der Achsen, die Skalierung ( $S$ ) sowie den Bias ( $b$ ). Es ergeben sich die Sensorfehlermodelle für Beschleunigungssensor (Gleichung 1) und Gyroskop (Gleichung 2).

$$\alpha^O = S_\alpha M_\alpha (a^S + b_a + \nu_a) \quad (1)$$

$$\omega^O = S_\omega M_\omega (\omega^S + b_\omega + \nu_\omega) \quad (2)$$

Das Sensorrauschen ( $\nu$ ) wird in beiden Gleichungen vernachlässigt, da dieses im Kalibrierungsprozess, durch die Mittelbildung der Signale, eliminiert wird. Für die Kalibrierung wird die in C++ geschriebene *imu-tk*<sup>1</sup> verwendet, welche das manuelle Sammeln von Daten mit vorübergehend stabilen Rotationen erfordert. Zu Beginn der Rohdatenerfassung wird eine Initialisierungsphase von  $T_{init} = 50$  Sekunden empfohlen. Als Ergebnis werden die Misalignmentmatrizen, die Skalierungen und die Bias der jeweiligen Sensoren erzeugt. Diese werden mit den Kalibrierungsmatrizen des Datenblatts, die als Grundwahrheit betrachtet werden, verglichen und bewertet.

## Kalibrierung der Sensorkombination aus IMU und Kamera

Die Kombination aus Kamera und Inertialmessungen weist einerseits komplementären Charakter auf, andererseits verbessern sie die Genauigkeit der Schätzergebnisse und die Robustheit erheblich. Das Sensorsystem, welches in Abbildung 1 zu sehen ist, besteht aus einer FLIR Blackfly Kamera und der XSens IMU Mit-100. Diese sind physisch miteinander verbunden, um Daten von identischen Bewegungsabläufen zu erhalten. Die Sensoren werden vor einem Target, wobei hier ein Aprilgrid (vergleiche Abbildung 2) verwendet wird, so bewegt, dass mit den Drehwinkel Roll, Pitch, Yaw und allen drei Achsen des Sensorkoordinatensystems die 6 Freiheitsgrade abgedeckt sind.

<sup>1</sup> vgl. imu tk [https://github.com/Kyle-ak/imu\\_tk.git](https://github.com/Kyle-ak/imu_tk.git)

<sup>2</sup> vgl. ethz-asl/kalibr <https://github.com/ethz-asl/kalibr>

<sup>3</sup> vgl. IMU-utils [https://github.com/gaowenliang/imu\\_utils](https://github.com/gaowenliang/imu_utils)

Der Kalibrierprozess der *ethz-asl/kalibr*<sup>2</sup> erfolgt in 2 Schritten: Aus den, mit ROS (Robot Operating System) aufgezeichneten, rohen Bildern werden zunächst die intrinsischen Parameter der Kamera wie Brennweite ( $f_u, f_v$ ) und Hauptpunkt ( $p_u, p_v$ ) bestimmt. Diese fließen, ebenso wie die mit Hilfe statischer Sensordaten und des Softwarecodes *imu-utils*<sup>3</sup> ermittelten intrinsischen IMU-Parameter, wie Rauschdichte und Random-Walk-Parameter, in die im zweiten Schritt durchzuführenden Kamera-IMU-Kalibrierung mit ein.

Als Kalibrierergebnis wird als erstes der Reprojektionsfehler betrachtet (vergleiche Abbildung 3), welcher die Kamerakalibrierung bewertet. Des weiteren werden die, vom Softwarecode ausgegebenen Transformationsinformationen, welche aus den 3 Translationen ( $t$ )<sub>3x1</sub> und den 3 Rotationen ( $R$ )<sub>3x3</sub> zwischen den beiden Sensoren besteht, analysiert. Daraus ergibt sich die Transformationsgleichung, welche in Gleichung 3 dargestellt ist. Diese beschreibt die Umrechnung der Koordinaten im Sensorsystem der Kamera  $\vec{x}_k$  über die Rotationen ( $R_{k-IMU}$ )<sub>3x3</sub> und die Translation  $\vec{t}_{k-IMU}$  in Koordinaten, dargestellt im System der IMU  $\vec{x}_{IMU}$ .

$$\begin{bmatrix} x_{IMU} \\ y_{IMU} \\ z_{IMU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{X,k-IMU} \\ t_{Y,k-IMU} \\ t_{Z,k-IMU} \end{bmatrix} + R_x(\omega_{k-IMU})R_y(\varphi_{k-IMU})R_z(\kappa_{k-IMU}) \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} \quad (3)$$



Abb. 1: Sensorsystem aus Kamera/IMU



Abb. 2: Aprilgrid

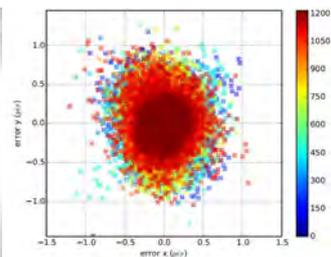


Abb. 3: Reprojektionsfehler nach der Kamera-IMU-Kalibrierung

## Fazit

Das Kalibrierergebnis in Abbildung 3, welches den Reprojektionsfehler der Kamera nach dem Einfließen der IMU-Parameter zeigt, kann als gutes Ergebnis bewertet werden, da die Streuung der Reprojektionsfehler klein und gleichmäßig verteilt ist. Da bei der Kamera-IMU-Kalibrierung für die beiden IMU-Sensoren keine achsbezogenen Fehler berechnet werden, ist die Kamera-IMU-Kalibrierung für eine Anwendung als Navigationskomponente auf einem UAV nur in Verbindung mit der IMU-Kalibrierung sinnvoll. Bei beiden Softwares wird eine Bewegung in allen Freiheitsgraden erfordert, um gute Ergebnisse für alle Sensorachsen zu erhalten. Daraus folgt, dass aus den hier vorgestellten State-of-the-Art-Kalibriersoftwares eine gemeinsame Kalibrierung, die alle Sensoren mit ihren Parametersätzen beschreibt, erstellt werden kann. Im MiteSens-Projekt beschreibt das UAV ein Körpersystem (b), worin die IMU mit einem geeigneten Messinstrument definiert werden muss, um vollständige Transformationsinformationen für die ermittelten Koordinaten zu erhalten.