



Markus Schlotterer (Autor)

# **Robuste Schätzung und Sensorfusion zur Navigation von wieder verwendbaren Raumtransportern**

Markus Schlotterer

**Robuste Schätzung und Sensorfusion  
zur Navigation von  
wiederverwendbaren Raumtransportern**



 Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1525>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Verschiedene RLV-Konzepte . . . . .	1
1.2	Der PHOENIX Technologiedemonstrator . . . . .	3
1.3	Das PHOENIX Navigationssystem . . . . .	4
1.4	Problemstellung und Motivation . . . . .	5
1.5	Forschungsbeiträge . . . . .	6
1.6	Gliederung der Dissertation . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Methoden zur Zustands- und Parameterschätzung</b>	<b>9</b>
2.1	Kalman-Filter . . . . .	9
2.1.1	Lineares Kalman-Filter . . . . .	9
2.1.2	<i>Extended Kalman-Filter</i> für nichtlineare Systeme . . . . .	13
2.2	Betrachtung des Kalman-Filters im Frequenzbereich . . . . .	17
2.3	Numerische Verbesserungen für Kalman-Filter . . . . .	20
2.3.1	Skalierung . . . . .	21
2.3.2	Sequentielle Korrektur . . . . .	22
2.3.3	Die UD Zerlegung . . . . .	22
2.4	<i>Closed-Loop/Open-Loop</i> Kalman-Filter . . . . .	26
2.4.1	Zustandspropagation beim <i>Open-Loop</i> Kalman-Filter . . . . .	28
2.5	Diskretisierung der Zustandsgleichungen . . . . .	29
2.5.1	Diskretisierung der Kovarianzmatrizen . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Gestützte Inertialnavigation</b>	<b>31</b>
3.1	Konzept des Navigationssystems . . . . .	31
3.1.1	Struktur des Navigationssystems . . . . .	31
3.1.2	Anforderungen an das Navigationssystem . . . . .	32
3.1.3	Verwendete Sensorik . . . . .	33
3.1.4	Konzept des Navigationsfilters . . . . .	39
3.2	Umgebungsmodelle . . . . .	43
3.2.1	Terrainmodell . . . . .	43
3.2.2	Gravitationsmodell . . . . .	44
3.3	Herleitung der Navigationsgleichung . . . . .	45
3.3.1	Zustände des Kalman-Filters . . . . .	45
3.3.2	Navigationsgleichung . . . . .	46
3.3.3	Systemmatrix . . . . .	49
3.3.4	Integration der Navigationsgleichungen . . . . .	51

3.4	Messgleichungen . . . . .	52
3.4.1	DGPS Messgleichung . . . . .	52
3.4.2	Messgleichung des Radarhöhenmessers . . . . .	53
3.4.3	Messgleichung des Laserdistanzmessers . . . . .	53
3.4.4	Zeitkorrektur der DGPS Messung . . . . .	55
3.4.5	Messmatrix . . . . .	55
3.5	Ein- und Ausgangswerte und Transformationen . . . . .	57
3.5.1	Eingangswerte und Transformationen . . . . .	57
3.5.2	Ausgangswerte und Transformationen . . . . .	59
3.6	System- und Messkovarianzen . . . . .	60
3.6.1	Kovarianz der Anfangswerte . . . . .	61
3.6.2	Kovarianz des Systemrauschens . . . . .	61
3.6.3	Kovarianz des Messrauschens . . . . .	62
3.7	Fehlererkennung und -behandlung . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Auswertung der Flugdaten</b>	<b>67</b>
4.1	Beschreibung der Mission . . . . .	67
4.1.1	Anregung der Lageschätzung . . . . .	74
4.2	Vergleich der Messdaten der Höhenmesser . . . . .	75
4.3	Analyse der Kovarianzen und Residuen . . . . .	81
4.3.1	Vergleich der Kovarianzen mit den Residuen . . . . .	81
4.3.2	Simulation mit angepassten Kovarianzen . . . . .	88
4.3.3	Frequenzanalyse der Residuen . . . . .	97
4.4	Ausfallszenarien . . . . .	102
4.4.1	Ausfall des DGPS . . . . .	104
4.4.2	Ausfall des Radarhöhenmessers . . . . .	106
4.4.3	Ausfall des Laserdistanzmessers . . . . .	107
4.4.4	Ausfall der terrainbasierten Messungen . . . . .	108
4.4.5	Ausfall sämtlicher Positionssensoren . . . . .	109
4.5	Schätzung der Sensorfehler . . . . .	110
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>115</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	115
5.2	Ausblick . . . . .	117
<b>A</b>	<b>Koordinatensysteme und Transformationen</b>	<b>119</b>
A.1	Definitionen . . . . .	119
A.1.1	<i>Earth-Centered Inertial</i> . . . . .	119
A.1.2	<i>Earth-Centered Earth-Fixed</i> . . . . .	120
A.1.3	Navigationssystem <i>North-East-Down</i> . . . . .	120
A.1.4	EGI Navigationssystem ( <i>Wander Angle System</i> ) . . . . .	121
A.1.5	Körperkoordinatensystem . . . . .	121
A.1.6	Landbahnsystem . . . . .	122
A.2	Koordinatentransformationen . . . . .	122

---

A.2.1	Von ECI nach ECEF . . . . .	122
A.2.2	Von ECEF zu geodätischer Länge, Breite und Höhe . . . . .	122
A.2.3	Von ECEF nach NED . . . . .	123
A.2.4	Von NED nach Körperkoordinaten . . . . .	124
A.2.5	Von EGI Navigationskoordinaten nach NED . . . . .	124
A.2.6	Von ECEF nach Landebahnkoordinaten . . . . .	125
A.3	WGS84 Konstanten . . . . .	126
<b>B</b>	<b>Herleitung der Navigationsgleichung der Geschwindigkeit</b>	<b>127</b>
B.1	Indizierung . . . . .	127
B.2	Ableitungen . . . . .	127
B.3	Eulersche Gleichung . . . . .	128
B.4	Herleitung der Differentialgleichung . . . . .	128
<b>C</b>	<b>Abschätzung der Linearisierungsfehler</b>	<b>129</b>
C.1	Geschwindigkeit . . . . .	129
C.2	Position . . . . .	131
C.3	Lage . . . . .	132
<b>D</b>	<b>Genauigkeit der <i>Pure Inertial</i> und <i>Blended Solution</i></b>	<b>133</b>
<b>E</b>	<b>Diskretisierung der Propagation von Zustand und Kovarianzmatrix</b>	<b>135</b>
E.1	Euler-Approximation der Navigationsgleichungen . . . . .	135
E.2	Diskretisierung der Kovarianzmatrix des Systemrauschens . . . . .	136