

# Inhaltsverzeichnis

|                                                  |              |
|--------------------------------------------------|--------------|
| <b>Zusammenfassung</b>                           | <b>xxiii</b> |
| <b>Abstract</b>                                  | <b>xxv</b>   |
| <b>Vorwort</b>                                   | <b>xxvii</b> |
| <b>1. Einführung und Stand der Technik</b>       | <b>1</b>     |
| 1.1. Einführung . . . . .                        | 1            |
| 1.2. Stand der Technik . . . . .                 | 3            |
| 1.3. Gliederung der Arbeit . . . . .             | 6            |
| <b>2. Grundlagen</b>                             | <b>7</b>     |
| 2.1. Systemdarstellung im Zustandsraum . . . . . | 7            |
| 2.1.1. Lineare Systeme . . . . .                 | 8            |
| 2.1.2. Nichtlineare Systeme . . . . .            | 9            |
| 2.1.3. Zeitdiskrete Darstellung . . . . .        | 9            |
| 2.1.4. Stochastische Störungen . . . . .         | 10           |
| 2.2. Definitionen . . . . .                      | 11           |
| 2.2.1. Zustände . . . . .                        | 12           |
| 2.2.2. Parameter . . . . .                       | 12           |
| 2.2.3. Störungen . . . . .                       | 12           |
| 2.2.4. Zustandsschätzung . . . . .               | 13           |
| 2.3. Kalman-Filter . . . . .                     | 13           |
| 2.3.1. Herleitung . . . . .                      | 14           |
| 2.3.2. Anschauliche Interpretation . . . . .     | 21           |
| 2.3.3. Algorithmus . . . . .                     | 24           |
| 2.3.4. Eigenschaften . . . . .                   | 25           |
| 2.4. Das Erweiterte Kalman-Filter . . . . .      | 25           |

## Inhaltsverzeichnis

|           |                                                              |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.      | Nichtlineare Transformationen . . . . .                      | 27        |
| 2.5.1.    | Erwartungswert . . . . .                                     | 28        |
| 2.5.2.    | Kovarianz . . . . .                                          | 29        |
| 2.6.      | Die Unscented Transformation . . . . .                       | 31        |
| 2.7.      | Unscented Kalman-Filter . . . . .                            | 36        |
| 2.7.1.    | Algorithmus . . . . .                                        | 36        |
| 2.7.2.    | Eigenschaften . . . . .                                      | 39        |
| <b>3.</b> | <b>Verteilte und Dezentrale Zustandsschätzer</b>             | <b>41</b> |
| 3.1.      | Motivation . . . . .                                         | 41        |
| 3.2.      | Dezentrales Kalman-Filter . . . . .                          | 42        |
| 3.2.1.    | Dezentralisierung der Messungen . . . . .                    | 43        |
| 3.2.2.    | Dezentralisierung des Zustands . . . . .                     | 46        |
| 3.3.      | Verteiltes Und Dezentrales Kalman-Filter . . . . .           | 48        |
| 3.3.1.    | Transformationsmatrizen . . . . .                            | 48        |
| 3.3.2.    | Wahl der Transformationsmatrizen . . . . .                   | 49        |
| 3.3.3.    | Verteilung von Schätzwerten und Kovarianzmatrizen . . . . .  | 51        |
| 3.3.4.    | Algorithmus . . . . .                                        | 54        |
| 3.3.5.    | Eigenschaften . . . . .                                      | 56        |
| 3.4.      | Verteiltes Und Dezentrales Unscented Kalman-Filter . . . . . | 56        |
| 3.4.1.    | Verteilung der Modelle . . . . .                             | 57        |
| 3.4.2.    | Verteilung und Fusion im UKF . . . . .                       | 60        |
| 3.4.3.    | Algorithmus . . . . .                                        | 60        |
| 3.5.      | Beobachtbarkeit . . . . .                                    | 63        |
| 3.5.1.    | Beobachtbarkeit linearer Systeme . . . . .                   | 63        |
| 3.5.2.    | Beobachtbarkeit nichtlinearer Systeme . . . . .              | 64        |
| 3.5.3.    | Beobachtbarkeit verteilter und dezentraler Systeme . . . . . | 67        |
| <b>4.</b> | <b>Anwendung auf unterschiedliche Systeme</b>                | <b>69</b> |
| 4.1.      | Dreitanksystem . . . . .                                     | 69        |
| 4.1.1.    | Modellierung . . . . .                                       | 70        |
| 4.1.2.    | Lokale Modelle und lokale Zustände . . . . .                 | 72        |
| 4.1.3.    | Simulation . . . . .                                         | 77        |

|           |                                                                |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.4.    | Zentrale Schätzung . . . . .                                   | 78         |
| 4.1.5.    | Verteilte Schätzung . . . . .                                  | 79         |
| 4.2.      | Multilasertrackersystem I – Verfolgung . . . . .               | 83         |
| 4.2.1.    | Beschreibung eines Lasertracker . . . . .                      | 83         |
| 4.2.2.    | Multilasertracker . . . . .                                    | 84         |
| 4.2.3.    | Modellierung . . . . .                                         | 85         |
| 4.2.4.    | Zentrale Schätzung . . . . .                                   | 87         |
| 4.2.5.    | Referenzbewegungen . . . . .                                   | 90         |
| 4.2.6.    | Dezentrales Filter . . . . .                                   | 93         |
| 4.2.7.    | Dezentrale Schätzung . . . . .                                 | 95         |
| 4.2.8.    | Ausfall von Messeinrichtungen . . . . .                        | 95         |
| 4.2.9.    | Umkonfiguration des Messsystems . . . . .                      | 101        |
| 4.3.      | Multilasertrackersystem II – Beobachtung . . . . .             | 106        |
| 4.3.1.    | Modellierung mehrerer gekoppelter Pendel . . . . .             | 106        |
| 4.3.2.    | Parameter des Testsystems . . . . .                            | 114        |
| 4.3.3.    | Verteilung des Modells . . . . .                               | 118        |
| 4.3.4.    | Beobachtbarkeit . . . . .                                      | 123        |
| 4.3.5.    | Zentrales Filter . . . . .                                     | 124        |
| 4.3.6.    | Verteiltes Filter . . . . .                                    | 125        |
| 4.3.7.    | Testbewegungen . . . . .                                       | 127        |
| 4.3.8.    | Verteilte Schätzung . . . . .                                  | 127        |
| 4.3.9.    | Ausfall einer Messeinrichtung . . . . .                        | 132        |
| 4.3.10.   | Betrachtung der Berechnungszeiten . . . . .                    | 147        |
| 4.4.      | Bewertung . . . . .                                            | 154        |
| <b>5.</b> | <b>Die Estimation Toolbox für Matlab</b>                       | <b>157</b> |
| 5.1.      | Beschreibung . . . . .                                         | 157        |
| 5.1.1.    | Die model-Klasse . . . . .                                     | 157        |
| 5.1.2.    | Die estimator-Klasse . . . . .                                 | 160        |
| 5.2.      | Erweiterung für verteilte und dezentrale Schätzungen . . . . . | 162        |
| 5.2.1.    | Die ddestimator-Klasse . . . . .                               | 162        |
| 5.2.2.    | Benutzung der ddestimator-Klasse . . . . .                     | 163        |
| <b>6.</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                            | <b>165</b> |

## *Inhaltsverzeichnis*

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>A. Trajektorien der Verfolgung eines zufällig bewegten Objektes</b> | <b>171</b> |
| <b>B. Bewegung der Reflektoren im Trackerkoordinatensystem</b>         | <b>189</b> |