

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Tabellenverzeichnis | XI |
| Abkürzungsverzeichnis | XII |
| Notation und physikalische Größen | XIV |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise | 3 |
| 2 Robotereinsatz und -programmierung | 7 |
| 2.1 Robotertypen | 7 |
| 2.1.1 Klassifizierung von Robotern | 7 |
| 2.1.2 Einteilung von Industrierobotern | 8 |
| 2.2 Applikationen und Randbedingungen | 9 |
| 2.2.1 Roboteranwendungen | 9 |
| 2.2.2 Einsatzumfeld | 10 |
| 2.3 Programmierung von Industrierobotern | 12 |
| 2.3.1 Online-Programmierung | 14 |
| 2.3.1.1 Teach-In-Programmierung | 15 |
| 2.3.1.2 Playback-Programmierung | 16 |
| 2.3.1.3 Sensorunterstützte Programmierung | 17 |
| 2.3.2 Offline-Programmierung | 18 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.2.1 | Simulationsgestützte Programmierung..... | 18 |
| 2.3.2.2 | Textuelle Programmierung..... | 21 |
| 2.3.2.3 | Grafische Programmierung | 22 |
| 2.3.3 | Verfahren mit künstlicher Intelligenz | 23 |
| 2.3.3.1 | Programmierung durch Vormachen (PbD) | 23 |
| 2.3.3.2 | Implizite, aufgabenorientierte Programmierung | 24 |
| 2.3.3.3 | Instruktiv-dialogorientierte Programmierung..... | 25 |
| 2.4 | Situationsanalyse und Fazit..... | 26 |
| 3 | Stand der Forschung und Technik | 29 |
| 3.1 | Augmented Reality | 29 |
| 3.1.1 | Begriffsklärung | 29 |
| 3.1.2 | Funktionsprinzip von AR-Systemen..... | 30 |
| 3.2 | Visualisierungsverfahren | 32 |
| 3.2.1 | Monitorbasierte Systeme (MAR)..... | 35 |
| 3.2.2 | Head-Mounted Displays (HMD) | 36 |
| 3.2.3 | Räumlich erweiterte Realität (Spatial AR) | 37 |
| 3.2.3.1 | Projektion auf beliebige Umgebungsoberflächen | 38 |
| 3.2.3.2 | Projektionsgeräte | 40 |
| 3.2.3.3 | Anwendungen von Projektions-AR..... | 41 |
| 3.3 | Positionserfassung..... | 43 |
| 3.3.1 | Definition | 43 |
| 3.3.2 | Einteilung und Charakterisierung | 43 |
| 3.4 | Interaktionstechniken..... | 45 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4.1 | Definition | 45 |
| 3.4.2 | Interaktion in räumlichen Benutzerschnittstellen | 45 |
| 3.5 | AR-Anwendungen in der Mensch-Roboter-Interaktion | 47 |
| 3.5.1 | Grundprinzip und Überblick | 47 |
| 3.5.2 | Telepräsenz und Telemanipulation | 48 |
| 3.5.3 | Servicerobotik | 50 |
| 3.5.4 | Industrierobotik | 51 |
| 3.5.4.1 | Montage- und Anlagenplanung | 52 |
| 3.5.4.2 | Bedienung und Schulung | 53 |
| 3.5.4.3 | Zusammenarbeit von Workern und Robotern | 53 |
| 3.5.4.4 | Programmierung und Inbetriebnahme | 54 |
| 3.5.5 | Übersicht und Bewertung bestehender Ansätze | 56 |
| 3.6 | Fazit und Handlungsbedarf | 59 |
| 4 | Anforderungsanalyse | 61 |
| 4.1 | Zieldimensionen | 61 |
| 4.2 | Anforderungsstruktur | 61 |
| 4.3 | Konzeptionelle Anforderungen | 63 |
| 4.4 | Technische Anforderungen | 64 |
| 4.4.1 | Leistungsmerkmale | 64 |
| 4.4.2 | Konfigurierbarkeit und Flexibilität | 65 |
| 4.4.3 | Integration mit Robotersteuerung und Simulation | 66 |
| 4.4.4 | Sicherheit | 67 |
| 4.5 | Benutzerorientierte Anforderungen | 68 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Konzeption und Systementwurf..... | 71 |
| 5.1 | Überblick..... | 71 |
| 5.2 | AR-basierte Roboterprogrammierung und Simulation..... | 71 |
| 5.2.1 | Funktionsprinzip | 71 |
| 5.2.2 | Einsatzvorgehen | 74 |
| 5.2.2.1 | Konfiguration des AR-Systems..... | 75 |
| 5.2.2.2 | Modellierung | 75 |
| 5.2.2.3 | Programmbearbeitung | 77 |
| 5.2.2.4 | Simulation und Test..... | 80 |
| 5.2.2.5 | Zusammenfassung des Vorgehens | 80 |
| 5.2.3 | Anforderungen an ein Systemkonzept | 81 |
| 5.3 | Konzeption der Visualisierung | 82 |
| 5.4 | Projektionsgestützte AR-Visualisierung..... | 85 |
| 5.4.1 | Videoprojektoren | 85 |
| 5.4.1.1 | Grundlegende Eigenschaften..... | 85 |
| 5.4.1.2 | Mathematisches Modell | 87 |
| 5.4.1.3 | Kalibrierung..... | 88 |
| 5.4.1.4 | Bewertung der Anzeigeeigenschaften | 91 |
| 5.4.2 | Laserprojektoren | 91 |
| 5.4.2.1 | Funktionsweise | 91 |
| 5.4.2.2 | Kalibrierung..... | 93 |
| 5.4.2.3 | Bewertung der Anzeigeeigenschaften | 93 |
| 5.4.3 | Erweiterung des Arbeitsraumes | 94 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.4.3.1 | Mehrprojektorensystem..... | 95 |
| 5.4.3.2 | Ortsveränderliche Anbringung der Projektoren | 97 |
| 5.5 | Automatisierte Geometrieerfassung..... | 98 |
| 5.5.1 | Funktionsprinzip und Verfahren | 98 |
| 5.5.2 | Nutzungsszenarien der automatisierten Vermessung | 100 |
| 5.6 | Räumliche Eingabe und Interaktion | 101 |
| 5.6.1 | Eingabeprinzip | 101 |
| 5.6.2 | Manipulation von Trajektorien | 105 |
| 5.6.3 | Interaktive Modellierung..... | 108 |
| 5.6.4 | Weitere Interaktionsformen | 110 |
| 5.6.4.1 | Anwendungssteuerung und sonstige Eingaben | 110 |
| 5.6.4.2 | Umgebungsmodellierung und Kinematiksimulation..... | 111 |
| 5.7 | Zusammenfassung des Konzepts und der Teilverfahren | 113 |
| 6 | Umsetzung und Erprobung | 117 |
| 6.1 | Übersicht..... | 117 |
| 6.2 | Systemgestaltung und Implementierung..... | 117 |
| 6.2.1 | Systemaufbau..... | 117 |
| 6.2.2 | Basissystem und graphische Benutzerschnittstelle..... | 120 |
| 6.2.3 | Projektionsanzeige | 122 |
| 6.2.4 | Positionserfassung und 3D-Eingabe | 123 |
| 6.2.5 | Bildverarbeitung..... | 125 |
| 6.2.5.1 | Bildaufnahme und Kamerakalibrierung | 125 |
| 6.2.5.2 | Vorgehen zur Erkennung von Laserpunkten..... | 126 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6.2.5.3 | Charakterisierung der Messgenauigkeit | 126 |
| 6.2.6 | Interaktionssteuerung | 127 |
| 6.2.7 | Datenmodell und Simulation | 128 |
| 6.2.7.1 | Roboterschnittstelle | 128 |
| 6.2.7.2 | Programm- und Aufgabenmodell | 129 |
| 6.2.7.3 | Zellenmodell | 131 |
| 6.2.7.4 | Berechnung und Simulation | 132 |
| 6.2.8 | Kalibrierung und Referenzierung des Gesamtsystems | 133 |
| 6.2.8.1 | Interne Kalibrierung der Einzelgeräte | 133 |
| 6.2.8.2 | Lokalisierung und Referenzierung der Geräte | 134 |
| 6.3 | Systemkonfigurationen und realisierter Aufbau | 137 |
| 6.4 | Erprobung und Anwendung des Systems | 139 |
| 6.4.1 | Grundlegende Erprobung im Labor | 139 |
| 6.4.2 | Programmierung einer robotergestützten Laserhärteanlage | 141 |
| 6.4.3 | Programmierung einer Remote-Laserstrahlweißanlage | 144 |
| 7 | Technische und wirtschaftliche Bewertung | 147 |
| 7.1 | Technische Bewertung | 147 |
| 7.2 | Wirtschaftliche Bewertung | 149 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 153 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 157 |
| 10 | Anhang | 197 |
| 10.1 | Entwicklung der AR-Forschung | 197 |
| 10.2 | Head-Mounted Displays (HMD) | 198 |

| | |
|---|-----|
| 10.2.1 Grundlagen und Bauarten | 198 |
| 10.2.2 Bewertung HMD-basierter AR-Ansätze | 200 |
| 10.3 Verfahren der Positionserfassung | 204 |