

Sichere Mensch/Roboter-Koexistenz und Kooperation

Prof. Dr. **Dominik Henrich**, Universität Bayreuth;
Dipl.-Inf. **Markus Fischer**, Universität Bayreuth;
Dipl.-TechnoInf. **Thorsten Gecks**, Universität Bayreuth;
Dipl.-Inf. **Stefan Kuhn**, Universität Bayreuth;

Kurzfassung

Industrieroboter sind schnell, stark, ausdauernd und positionsgenau. Der Mensch dagegen ist in komplizierten Handhabungsarbeiten unerreicht geschickt und kann sehr flexibel auf ungeplante Situationen reagieren. Die Kombination beider Stärken verspricht eine große Produktivitätssteigerung. Im Rahmen des Projektes *SIMERO* (Sichere Mensch/Roboter-Koexistenz und -Kooperation) wird ein Überwachungssystem zur sicheren Koexistenz und Kooperation von Mensch und Roboter entwickelt. Sichere *Koexistenz* ermöglicht Mensch und Roboter gleichzeitig im gleichen Arbeitsraum zu agieren. Sicherheitseinrichtungen wie Zäune oder Lichtgitter werden überflüssig. Sichere *Kooperation* erlaubt Mensch und Roboter zudem eine gemeinsame Durchführung von Aufgaben.

Das System zur Überwachung des gemeinsamen Arbeitsraumes von Mensch und Roboter basiert auf der Analyse und Bewertung von Bildern resultierend aus Farbkameras bzw. Tiefenbildsensoren, die am Rand der Roboterzelle montiert sind. Ein Ziel ist der ausschließliche Einsatz kostengünstiger Standardhardware. Das System lässt sich neben der Robotik auch in anderen Überwachungsanwendungen einsetzen. Die Überwachung eines leeren Raumes ist ebenso wie die Überwachung von Exponaten in Museen möglich.

Abstract

Industrial robots are fast, powerful, enduring and precise. Humans on the other hand can handle complex manipulation task with superior quality and adapt flexibly to new and unknown situations. The combination of those strengths promises a huge potential for productivity increase in common industrial environments. The researchers of the project *SIMERO* focus on the safety of human-robot coexistence and cooperation by providing a surveillance system for obstacle detection. Safe *coexistence* allows robot and human to share a common workspace at the same time. Safety equipment like fences or light curtains become obsolete. Safe *cooperation* allows human and robot to cooperatively solve tasks.

The introduced system is aimed at surveillance of a shared workspace of robot and human. It is based on the analysis and evaluation of images acquired from color cameras or depth sensors affixed around the robot work cell. A main design objective is the usage of low-cost

standard hardware. The surveillance system is applicable to a variety of other safety applications like surveillance of empty space or art in museums.

1. Einleitung

In gegenwärtigen roboterunterstützten Industrieprozessen muss eine strikte physikalische Trennung der Arbeitsräume von Mensch und Roboter eingehalten werden. Da der Arbeitsbereich des Roboters selbst nicht überwacht wird, kann ein Mensch, der die Roboterzelle betreten hat, in die Nähe des Roboters gelangen und dessen Trajektorie kreuzen, was eine Kollision zwischen Roboter und Mensch zur Folge haben kann. Industriell eingesetzte Sicherheitssysteme überwachen daher sicher das Eindringen des Menschen in die Roboterzelle, was einen Stillstand des Industrieprozesses zur Folge hat. Aktuell entwickelte Sicherheitssysteme zielen auf eine Lockerung der physikalischen Trennung von Mensch und Maschine zur Erhöhung der Produktivität und Effizienz industrieller Prozesse ab.

Das in [1, 2, 3] vorgestellte System verwendet zur Detektion des Menschen einen einzelnen Laserscanner, der über dem Fußboden angebracht ist. Jedes dynamische Objekt wird als stehender Mensch angenommen und durch einen umschließenden aufrecht stehenden Zylinder approximiert. Der kleinste Abstand zwischen diesem Zylinder und dem Roboter begrenzt die maximale Geschwindigkeit des Roboters. Allerdings werden andere Objekte oder sich beugende Menschen nicht korrekt approximiert.

SafetyEye [4] ermöglicht die simultane Überwachung von bis zu 50 statischen, im dreidimensionalen Raum festlegbaren Schutzzonen, die aus Sicht einer Perspektive mittels drei eng beieinander liegenden Kameras unter Verwendung von Stereoalgorithmen überwacht werden. Die Erkennung einer Schutzzonenverletzung sowie die Reaktion darauf ist innerhalb einer Grenze von 350 ms gewährleistet. Quadcam [5] ist ein weiteres Sicherheitssystem, welches ähnlich wie SafetyEye aus einer Perspektive pro Überwachungsmodul eine statische Schutzzone überwachen kann.

In [6, 7] überwachen drei oberhalb befestigte Farbkameras einen gemeinsamen Arbeitsraum. Dadurch wird es dem Mensch und einem SCARA-Roboter ermöglicht, gemeinsam kleine Werkstücke zusammenzubauen. Hände und Nacken werden aufgrund der charakteristischen Farbe und Textur erkannt. Der Abstand zwischen detektierten menschlichen Körperteilen und dem Roboter wird zur Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit des Roboters verwendet. Allerdings werden Kollisionen mit anderen Teilen des Menschen oder anderen Objekten wie Werkstücke nicht detektiert. Das System wurde erweitert um einen Stereoalgorithmus zur Berechnung von 2½D Informationen. Es ist aber unklar, ob diese Methode mit großen Werkstücken oder bekleideten Körperteilen umgehen kann.

In [8] wird ein Ansatz zur Überwachung des Arbeitsbereichs eines Roboters mit einer einzelnen Tiefenbildkamera (PMD) vorgestellt. Durch ein integriertes Robotermodell kann der Roboter im aufgenommenen Tiefenbild unterdrückt werden. Für jedes Robotersegment ist ein Quader als Schutzzone definiert, dessen Größe von der aktuellen Geschwindigkeit des Roboters abhängt. Die gemessenen dreidimensionalen Punkte des Tiefenbildes können nun auf eine Verletzung der definierten Schutzzonen überprüft werden.

Das hier beschriebene Überwachungssystem arbeitet aus mehreren Perspektiven mit beliebig vielen dynamischen Überwachungszonen, die an bewegte Objekte wie beispielsweise dem Roboter gebunden werden können. Diese Überwachungszonen können neben dem Test auf Belegung durch detektierte unbekannte Objekte ebenso zur Bestimmung von kleinsten Abständen zu detektierten unbekanntem Objekten verwendet werden. Sicherheitsstrategien für die Koexistenz zwischen Mensch und Roboter wie die distanzbasierte Geschwindigkeitsregulierung des Roboters sowie eine Online-Bahnplanung sind dadurch möglich. Unter Zuhilfenahme von weiterer Sensorik ist eine echte Kooperation bspw. in Form einer sicheren Führung durch den Mensch durchführbar.

2. Übersicht

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über das System zur sicheren Mensch/Roboter-Koexistenz und -Kooperation gegeben. Es lässt sich grob in drei Teile gliedern:

Kamerabasiertes Überwachungssystem

Das kamerabasierte Überwachungssystem detektiert unbekannte Objekte (z.B. Menschen, oder sonstige nichtmodellierbare Objekte). Bezogen auf Überwachungszonen, welche an bekannte Objekte (z.B. Roboter) geknüpft werden können, lassen sich Aussagen über Distanzen oder mögliche zukünftige Kollisionen machen.

Als Kamerasensorik werden eine bis mehrere Standard-Farbkameras (FireWire-Interface, 640x480 Pixel Bayer-Pattern, 30 Bilder pro Sekunde, Öffnungswinkel 120°) oder Tiefenbildsensoren (3D-Kamera nach Lichtlaufzeitverfahren, 160x120 Pixel, Tiefenmessbereich 0-7.5 m bei 20 MHz, 15 Bilder pro Sekunde, Öffnungswinkel 40°, PMD vision 19K) verwendet. Beim Einsatz mehrerer Kamerasensoren wird der Raum aus mehreren Perspektiven überwacht.

Die fest positionierten Kameras werden mithilfe bekannter Kalibrierungsverfahren, wie z.B. die Multi-Camera Self-Calibration von [9] oder herkömmlichen Verfahren wie [10] kalibriert.

Damit lassen sich Kameramodelle parametrisieren, die eine Datenfusion der aufgenommenen segmentierten Bilder im dreidimensionalen Raum zulassen. Zur Segmentierung der Ka-

merabilder in *Freiraum* bzw. *unbekannte Objekte* kommen Background-Modeling-/Change-Detection-Verfahren zum Einsatz.

Mensch/Roboter-Koexistenz

Die Information über Distanzen und zukünftige Kollisionen ermöglicht den Einsatz von Sicherheitsstrategien zur Mensch/Roboter-Koexistenz:

Bei der distanzbasierten Geschwindigkeitsregulierung wird die Robotergeschwindigkeit verringert, je näher der Mensch kommt. Mit der Bedingung, dass der Roboter innerhalb der Hälfte des berechneten kürzesten Abstandes anhalten können muss, erhält man eine für den Menschen sichere (und intuitive) Verhaltensweise.

Bei der Online-Bahnplanung kann der Roboter mithilfe des Überwachungssystem dem Mensch ausweichen und online eine neue Bahn zum Ziel planen. Der Vorteil besteht darin, dass ein Industrieprozess nicht zum Erliegen kommt, wenn sich der Mensch in der Bahn des Roboters für eine längere Zeit aufhält.

Mensch/Roboter-Kooperation

Bei der Mensch/Roboter-Kooperation geht es darum, dass der Mensch gemeinsam mit dem Roboter eine Aufgabe sicher erledigen kann. Hierzu kommt in dem vorgestellten System ein Kraft/Moment-Sensor in der Roboterhandwurzel als zusätzlicher Sensor zum Einsatz. Dadurch wird eine Führung des Roboters mit der zuvor beschriebenen Sicherheit der Mensch/Roboter-Koexistenz ermöglicht. Wird der Roboter beispielsweise versehentlich in die Richtung eines anderen Menschen geführt, so verringert sich die maximale Roboter-Führungsgeschwindigkeit, sodass keine Kollision auftreten kann. Ein Umschalten zwischen *automatischer* und *geführter* Bewegung des Roboters lässt sich mit dem Konzept eines virtuellen Schalters realisieren.

3. Hardware Tiefenbildsensor

Neben den verwendeten Farbkameras wird auch der Einsatz von Tiefenbildsensoren untersucht. Dabei werden insbesondere Laufzeit-Kameras [11, 12] betrachtet. Diese messen direkt für jeden Pixel entlang dessen Sichtstrahl den Abstand zwischen der Laufzeit-Kamera und dem nächsten Hindernis. Durch Beleuchtung des Sichtbereichs dieser Laufzeit-Kameras mit moduliertem infrarotem Licht kann die Phasenverschiebung zwischen dem ausgesendeten und empfangenen Signal für jedes Pixel bestimmt werden und so die gesamte 2½D Information über die beobachteten Oberflächen im Sichtbereich der Laufzeit-Kamera von einem einzelnen Bild bereitgestellt werden. Wegen diesem Messprinzip sind Laufzeit-Kameras

nicht auf eine externe Beleuchtung des beobachteten Raumes angewiesen wie vergleichsweise Farbkameras. Außerdem stören starke Veränderungen der Lichtverhältnisse im sichtbaren Spektrum die Messungen nur sehr geringfügig. Wegen der Abhängigkeit von der Wellenlänge des emittierten Signals ist der Messbereich allerdings bei 20 MHz auf einen Eindeutigkeitsbereich von 7,5 m beschränkt. Die Entfernung von weiter entfernten detektierten Objekten wird auf diesen Eindeutigkeitsbereich abgebildet und führt so zu falschen gemessenen Distanzwerten. Durch den Einsatz verschiedener Modulationsfrequenzen ist der parallele Betrieb mehrerer Laufzeit-Kameras ohne gegenseitige Störung möglich. Bei gleicher Modulationsfrequenz überlagern sich die emittierten Signale unterschiedlicher Laufzeit-Kameras bei der Messung und führen so zu fehlerhaften Distanzwerten. Die Einstellung der Integrationszeit beeinflusst direkt das Signal/Rauschverhältnis des erhaltenen Messwertes und ist ein wichtiger Parameter bei der Justierung des Sensors. Die Anbindung an das Gesamtsystem findet über eine Firewire- oder Ethernetschnittstelle statt. In [13] wurden messtechnische Eigenschaften der PMD-Kameras bereits eingehend untersucht.

4. Kameramodell

Das Kameramodell liefert den geometrischen Zusammenhang zwischen der zweidimensionalen Abbildung des dreidimensionalen Raums und dem dreidimensionalen Raum selbst. Das Kameramodell lässt sich mittels Kamerakalibrierungsmethoden parametrisieren (siehe Kapitel 2).

Drei Varianten eines geeigneten Kameramodelles werden im Folgenden vorgestellt. In allen drei Varianten wird der Fokus der Kamera mittels eines Vektors f im globalen Koordinatensystem festgelegt. Zudem werden weitere Vektoren und Werte benötigt die das durch einen Pixel betrachtete Volumen beschreiben. Bei dem Modell in Bild 1 links wird das tatsächliche Volumen vernachlässigt und lediglich ein mittlerer Richtungsvektor für jeden Pixel angegeben. Anwendungsabhängig müssen je nach Distanz zur Raumbegrenzung angepasste Sicherheitsoffsets hinzu addiert werden. Im Modell in Bild 1 mitte wird jedes Pixelvolumen mittels vier aufspannenden Vektoren definiert. Die daraus erzeugten pyramidenförmigen Volumina dürfen sich überschneiden. Das Modell in Bild 1 rechts definiert ein Pixelvolumen mittels eines Pixelkegels angegeben durch mittleren Richtungsvektor und einem Öffnungswinkel. Diese Kegel dürfen sich ebenfalls überlappen.

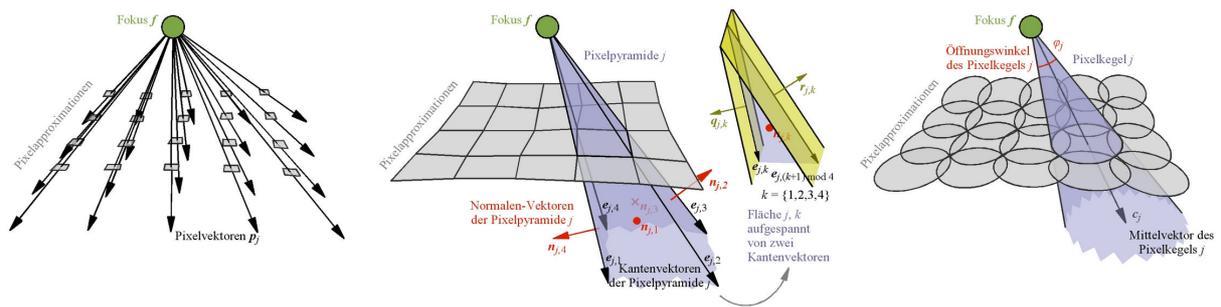


Bild 1: Illustration verschiedener Kameramodelle

5. Modellierung des Hintergrundes

Unter dem Begriff „Background-Modeling“ versteht man die Segmentierung eines Bildes in Hintergrund und Vordergrund. Der Hintergrund repräsentiert in der Anwendung der Mensch/Roboter-Koexistenz und Kooperation die hindernisfreie Roboterarbeitszelle, der Vordergrund die unbekannt dynamischen Objekte. Einfache Differenzbildverfahren setzen dabei einen statischen Hintergrund in der Arbeitszelle des Roboters voraus.

In industriellen Arbeitszellen befinden sich jedoch üblicherweise eine Reihe von nicht-statischen Komponenten, die Teil des Prozesses sind, der ausgeführt wird. Dazu gehören beispielsweise Fließbänder, Zuführkomponenten und Bearbeitungsmaschinen. In einer typisch zyklischen Prozessausführung kann für diese Komponenten eine erwartete, sich wiederholende Repräsentation gelernt werden und über ein erweitertes Differenzbildverfahren zur Segmentierung des Vordergrundes verwendet werden. Dies kann vor Beginn der eigentlichen Überwachung geschehen, indem eine Anzahl von ungestörten (hindernisfreien) Prozesszyklen durch das System beobachtet wird.

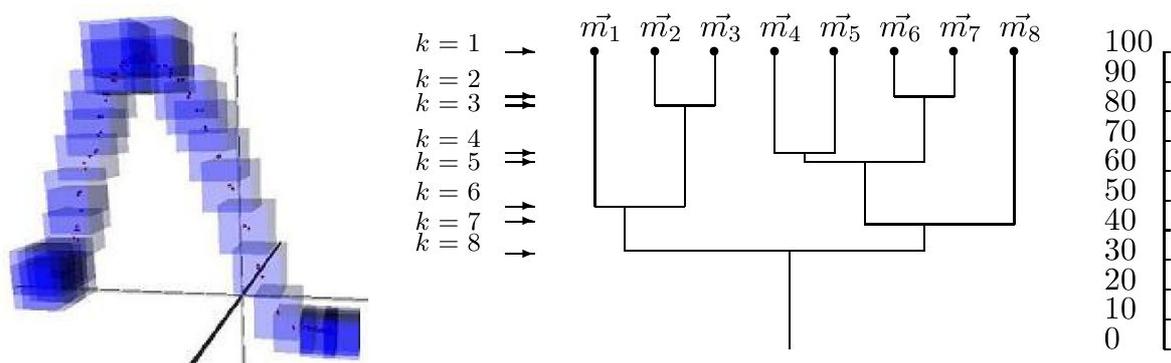


Bild 2: [Links] Clustering von Bildmerkmalen für eine typische Ablage/Aufnahme-einrichtung im Roboterarbeitsraum mit drei identifizierbaren Haupt-Clusterzentren
[Rechts] Schematische Darstellung des hierarchischen Clusteringverfahrens

Aus Gründen der Praktikabilität müssen die dabei eingesetzten Lernverfahren unüberwacht sein, da keine Beispiele für die Klasse Vordergrund in das System eingegeben werden können. Bei dieser Methode werden cluster-bildende Algorithmen als eine Klasse von unüberwachten Lernverfahren eingesetzt. Die dabei erzielten Erkennungsraten lagen für das ausgewählte Beispielszenario nach Optimierung von Parametern bei ca 98 % (validiert durch eine manuelle Klassifikation). Jedes Bild wird zur Informationsreduktion gleichmäßig in Kacheln eingeteilt und für jede der Kacheln eine Anzahl von Merkmalen berechnet, die somit die Dimensionalität des zu clusternden Raumes festlegen. Für jede Kachel wird dabei ein individuelles Clustering und somit eine kachelindividuelle Klassifikation berechnet.

Das Background-Modeling bei Tiefenbildsensoren verwendet ebenfalls als Hintergrund die leere Roboterarbeitszelle und als Vordergrund die unbekannt dynamischen Objekte. Da die Zellengeometrie bekannt ist, kann ein virtuelles Tiefenbild der leeren Roboterzelle generiert werden, welches bei der Segmentierung verwendet wird. Wenn statt der leeren virtuellen Zelle auch die bekannten statischen und dynamischen Objekte innerhalb der Roboterzelle für die Hintergrundmodellierung mit einbezogen werden, können in einem Tiefenbild keine dynamischen unbekannt Objekte erkannt werden, die sich vom Tiefenbildsensor aus hinter einem bekannten Objekt aber dennoch innerhalb der Roboterzelle befinden.

6. Überwachungszonen

Überwachungszonen sind räumliche Bereiche, zu denen bezüglich der detektierten unbekannt Objekte Aussagen gemacht werden können. Zum einen lässt sich das Eindringen von unbekannt Objekten in solche Überwachungszonen ermitteln, zum anderen lässt sich die kürzeste Distanz zwischen unbekannt Objekten und den Überwachungszonen bestimmen.

Die Überwachungszonen werden mit Hilfe eines dreidimensionalen geometrischen Modells definiert. Hierzu dienen sowohl Polyedermodelle als auch Kugelmodelle. Insbesondere letztere eignen sich für schnelle Schnitttests und Abstandsberechnungen. Zur Erstellung von Kugelmodellen aus polyedrischen (CAD-)Modellen gibt es Ansätze, wie bspw. [14, 15].

Eine Besonderheit der Überwachungszonen ist, dass sie nicht notwendigerweise statisch sein müssen, d.h. in jedem Überwachungsschritt können diese Überwachungszonen dynamisch angepasst werden. Dadurch ist es möglich die Überwachungszonen an bekannte Objekte wie bspw. den Roboter zu binden. Folglich können Abstände und mögliche zukünftige Kollisionen mit dem an den Roboter gebundenen geometrischen Modell in Bezug auf die detektierten unbekannt Objekte ermittelt werden. Die Anzahl und Genauigkeit solcher Überwachungszonen ist lediglich von der Rechenleistung des Computers abhängig.

7. Auswertung segmentierter Kamerabilder

In diesem Kapitel wird erläutert, wie basierend auf den segmentierten Kamerabildern eine dreidimensionale Darstellung erzeugt wird. Anschließend wird am Beispiel eines Tiefensensors ein konkreter Ansatz präsentiert.

Eine Kamera

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche geometrischen Auswirkungen detektierte unbekannte Objekte im räumlichen für die beiden Sensortypen (Farbkamera und Tiefenbildsensor) unter Berücksichtigung einer modellierten Umwelt haben.

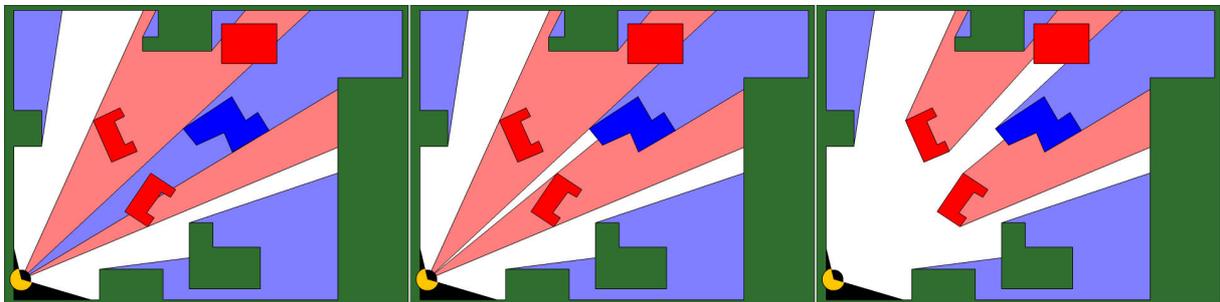


Bild 3: Zweidimensionale Illustration der quasistatischen Sicht einer Kamera (gelb) auf eine Szene, bestehend aus statischer bekannter Umgebung (grün), dynamischen bekannten Objekten (dunkelblau) und dynamischen unbekannten Objekten (rot). Verdeckungen durch bekannte Objekte und Umgebung (hellblau). Mögliche Objektpositionen (hellrot). [Links und Mitte] Verwendung von Farbkameras mit unterschiedlichen Background-Modelling-Verfahren. [Rechts] Verwendung eines Tiefenbildsensors.

Unter Verwendung von Farbkameras sind je nach Mächtigkeit des verwendeten Background-Modelling-Verfahrens die Rückprojektionen der detektierten Objekte in den Raum wie in Bild 3(links) und 3(mitte) dargestellt möglich. Das in Bild 3(links) angewendete Background-Modelling-Verfahren erlaubt es nicht unbekannte Objekte vor dynamischen bekannten Objekten zu detektieren. Daher hat man auch eine Verdeckung zwischen Kamera und bekanntem Objekt. In Bild 3(mitte) erlaubt das Verfahren auch eine Detektion von unbekanntem Objekten vor dynamischen bekannten Objekten.

Der in Bild 3(rechts) verwendete Tiefenbildsensor hat keine möglichen unbekanntem Objekte zwischen Kamera und detektiertem unbekanntem Objekt.

Mehrere Kameras

Bei einem Mehr-Kamerasystem hat man eine Kombination von Ein-Kamera-Sichten aus unterschiedlichen Perspektiven.

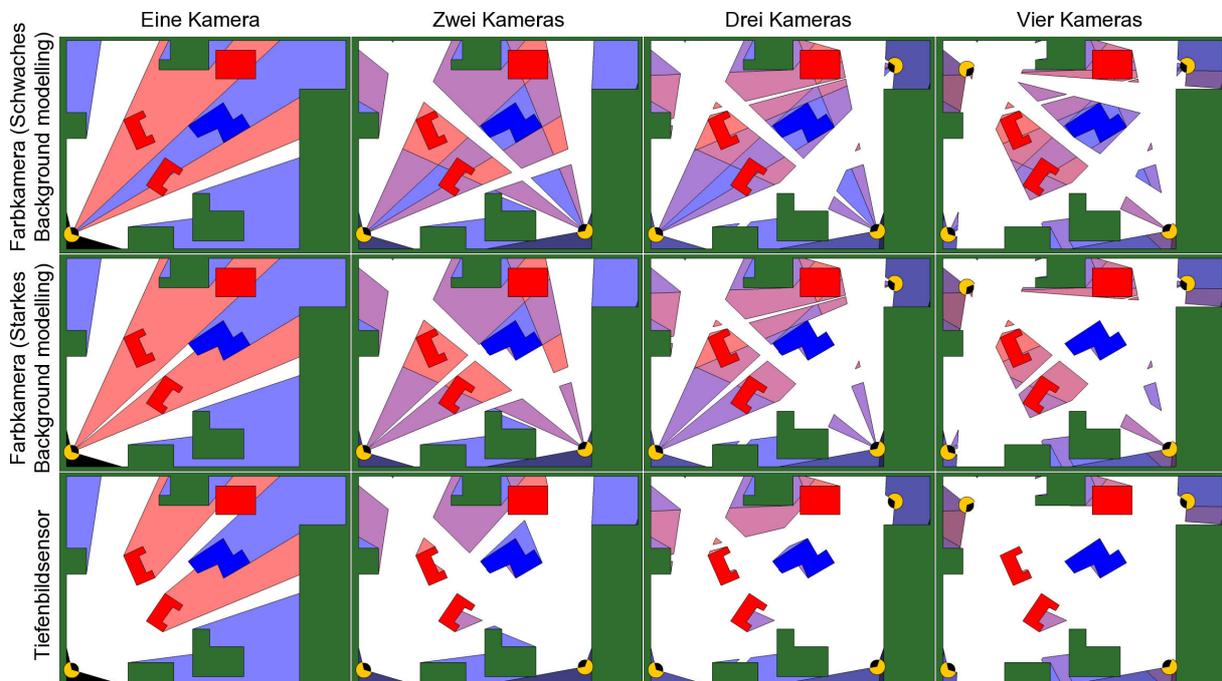


Bild 4: Zweidimensionale Illustration der Sichtbarkeit einer Szene in Abhängigkeit des Sensortyps mit verwendetem Backgroundmodellierung-Verfahren und in Abhängigkeit der Anzahl der verwendeten Kameras mit bekannte statische Umgebung (grün), bekannte dynamische Umgebung (blau), unbekannte dynamische Umgebung (rot), Freiraum (weiß) und Unbekannt-Bekannt-Kombinationen aus Sicht aller Kameras (Farbabstufungen hellrot nach hellblau).

Je nach Sensortyp und verwendetem Backgroundmodellierung-Verfahren entsteht mehr oder weniger Freiraum. Die Farbabstufungen zwischen *rot* und *blau* entstehen durch die Kombination unterschiedlicher Perspektiven. Je mehr Kameras ein unbekanntes Objekt detektieren, desto roter ist der Bereich in Bild 4 dargestellt. Je mehr Kameras eine Verdeckung detektieren, desto blauer ist der Bereich dargestellt.

Über eine implizite Größenannahme der unbekannt Objekte, die in den überwachten Raum eintreten können, lassen sich verschieden eingefärbte Bereiche eliminieren. Dieser Verdeckungsauf Lösungsschritt wird in [16] beschrieben. Andere Vorgehensweisen sind ebenso möglich.

Raumrekonstruktion mit Tiefenbildersensoren

Für die Tiefenbildsensoren wird beim Background-Modeling eine virtuelle, leere Zelle als Hintergrund verwendet. In einem Tiefenbild zusammenhängende als Vordergrund segmentierte Pixel stellen einzelne detektierte Objekte dar. Um den Echtzeitanforderungen des Überwachungssystems gerecht zu werden, werden diese Objekte durch ihre konvexe Hülle approximiert. Für konvexe Polyeder gibt es zeiteffiziente Algorithmen im Bereich der Computergrafik. Diese berechneten Polyeder bilden eine konservative Abschätzung der Volumina im Tiefenbild gesehener Objekte.

Zur Fusion der Information für das gesamte Kamerasystem sind die Polyeder, die in den einzelnen Tiefenbildern segmentiert wurden, miteinander zu verschneiden. Dadurch erhält man eine konservative Abschätzung aller Objekte, die von jedem Tiefenbildsensor gesehen werden können. Nur die Bereiche des von allen Tiefenbildsensoren überwachten Raums sind in der Schnittmenge enthalten, welche von keinem Tiefenbildsensor eingesehen werden können. Daher sind im Sinne einer konservativen Abschätzung auch Bereiche des überwachten Raumes als detektiertes Objekt klassifiziert, die zwar leer sein können, aber in jedem Tiefenbild von einem realen Objekt verdeckt werden. Solche detektierten Objekte werden als *Pseudoobjekte* bezeichnet.

8. Abstandsberechnung und Geschwindigkeitsregelung

Wird ein System mit einer Kamera zugrunde gelegt, fällt der Rekonstruktionsschritt weg und die detektierten unbekannt Objekte können direkt in Form der geometrischen Information durch das Kameramodell verwendet werden um eine Abstandsberechnung durchzuführen. Ein ähnliches Ein-Kamera-System wurde bereits in [17] präsentiert. Dort wurde ein expandiertes Robotermodell in das segmentierte Bild projiziert, um so durch eine binäre Suche den Abstand im dreidimensionalen zu bestimmen. Umgekehrt wird hier das detektierte unbekannte Objekt in den dreidimensionalen Raum rückprojiziert. Auf diese Weise lässt sich der kürzeste Abstand schneller ermitteln. Dies wird anhand des ersten Kameramodells am Beispiel einer Farbkamera unter Verwendung eines schwachen Background-Modeling-Verfahrens beschrieben.

Sei der Roboter mittels einer dynamischen Überwachungszone in Form eines Kugelmodells modelliert und die Kugeln über eine Indexmenge S referenziert. Desweiteren seien alle Pixelvektoren der als unbekanntes Objekt detektierten Pixel über die Indexmenge V' referenziert. Dann ist es folgendermaßen möglich zu allen Kugeln und Pixeln eine konservativ abgeschätzte Distanz zu bestimmen:

$$\forall i \in S \forall j \in V':$$

$$d_{i,j} := \begin{cases} \| (s_i' - f) \times p_j \| - r_i & \text{falls } (s_i' - f) \cdot p_j > 0 \\ \| s_i' - f \| - r_i & \text{ansonsten} \end{cases}$$

Da keine unbekanntes Objekte vor dem Roboter erkannt werden können, werden nur solche Pixelvektoren in einer Indexmenge D referenziert, für die bei keiner Kugel eine Distanz kleiner als 0 existiert:

$$D := \{j \in V' : d_{i,j} \geq 0, \forall i \in S\}$$

Letztendlich erhält man den kleinsten Abstand d zum Modell indem man den minimalen Abstand zwischen den verbleibenden Pixelvektoren und den Kugeln ermittelt:

$$d := \min\{d_{i,j} : \forall j \in D, \forall i \in S\}$$

Wird ein Mehr-Kamerasystem verwendet, so muss zunächst eine Rekonstruktion durchgeführt werden. Anschließend kann, je nach Repräsentation der detektierten Objekte und der Überwachungszone ein Schnitttest oder eine Abstandsberechnung mit einem geeigneten Algorithmus, wie bspw. dem GJK-Algorithmus, der den minimalen Abstand von konvexen Hüllen zueinander berechnet, angewendet werden.

Der berechnete Abstand kann genutzt werden um die Robotergerwindigkeit zu regeln.

9. Online-Bahnplanung

Im Rahmen der Mensch/Roboter-Koexistenz kann es zu Situationen kommen, in denen der Roboter durch Hindernisse blockiert wird und somit der Stillstand des Prozesses die Folge wäre. Um dies zu vermeiden, ist eine echtzeitfähige Bahnplanung nötig, die mit der Dynamik der Hindernisse umgehen kann und gleichzeitig für jede Situation eine Lösung findet, wenn diese existiert.

Die Bahnplanung soll fähig sein, einen großen Arbeitsraum mit der gleichzeitig notwendigen feingranularen Konfigurationsraumauflösung abzudecken. Sie muss in einfachen Hindernissituationen möglichst sofort reagieren und in komplizierteren nach einer nicht allzu langen Zeitspanne. Eine Vermeidung von Kollisionstests steht im Vordergrund, da diese rechenintensiv sind (ca. 5 ms pro Roboterkonfiguration). Wegen der Laufzeit- und Speicherbegrenzung kann der Konfigurationsraum nicht explizit für alle Hindernisse in hoher Auflösung berechnet werden. Daher wird als Basistechnik für den Bahnplaner ein sample-basierter randomisierter Planer mit impliziter Konfigurationsraumdarstellung verwendet („Probabilistic Roadmap“-Planer). Diese skalieren gut mit zunehmender Konfigurationsraumdimension und -auflösung und sind probabilistisch vollständig.

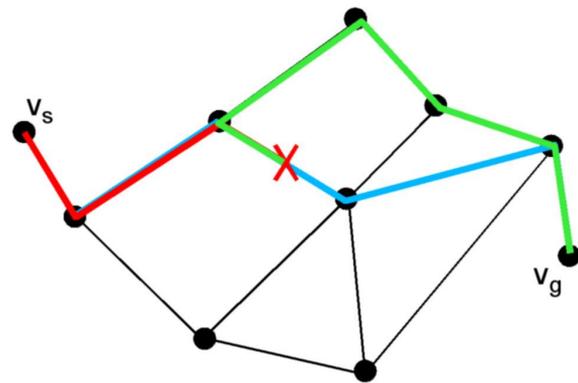
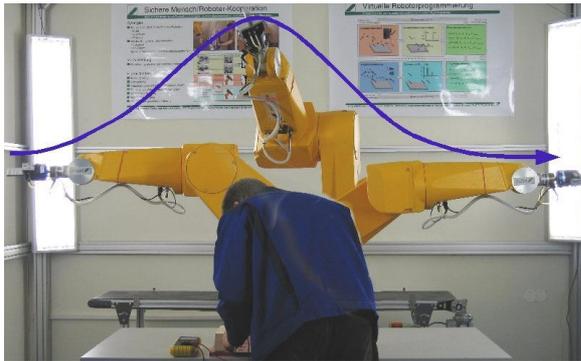


Bild 5: [Links] Beispiel für eine Bahnplanung mit unbekanntem dynamischen Hindernissen; [Rechts] Bahnplanungskonzept schematisch

Der hier verfolgte Planungsansatz [18] soll die Planungszeit echtzeitfähig begrenzen und die in Kapitel 2 eingeführte Unterscheidung von bekannten und unbekanntem Objekten ausnutzen. Der Planer arbeitet daher auf einem statischen Netzwerk, das in einem Offline-Schritt erstellt wird. Dieses Netzwerk ist kollisionsfrei mit den bekannten, modellierten Hindernissen. Dadurch fällt dieser Teil des Kollisionstests zur Laufzeit des Planers weg. In jedem Systemzyklus (Hindernisdetektion, Rekonstruktion, Planung) wird ein Weg durch das aktuelle Netzwerk geplant, zunächst ohne Kollisionstest („Lazy Collision Checking“ [19]). Diese Planung geschieht auf Netzen mit etwa 5000 Knoten und ca. 30 Kanten pro Knoten in vernachlässigbar kurzer Zeitdauer (~ 1 ms). Unmittelbar vor der Ausführung des Pfades werden die direkt vorausliegenden Kanten auf Kollision getestet und der Pfad bei Kollisionsfreiheit vom Roboter weiter ausgeführt. Die getestete Streckenlänge wird dabei durch die verfügbare Rechenleistung bestimmt. Tritt eine Kollision auf, wird die betroffene Kante im Netzwerk als invalide markiert, sodass sie bei der nächsten Planung nicht mehr berücksichtigt wird, wodurch eine dynamische Anpassung an die aktuelle Hindernisumgebung erreicht wird. Im kollisionsfreien Fall wird die Bewegung des Roboters fortgesetzt bzw. begonnen, im kollisionsbehafteten Fall wenn nötig abgebrochen.

Da die durch den Kollisionstest verursachten Kanteninvalidierungen den unbekanntem dynamischen Teil der Umgebung widerspiegeln, ist es sinnvoll, die Kanten nach bestimmten Bedingungen (Zeitdauer, Hindernissituation, etc.) wieder zu revalidieren und damit für die Planung wieder verwendbar zu machen. Für dynamische Arbeitsräume hat sich eine sensororientierte Strategie als gut geeignet erwiesen, bei der die über den Sensor gemessene Dynamik des Arbeitsraumes die Menge der revalidierten Kanten bestimmt. Diese bietet gute Beweglichkeit des Roboters in hochdynamischen Umgebungen durch eine geringe durchschnittliche Anzahl invalider Kanten und eine effiziente Bahn im Falle von unbekanntem

Hindernissen, die weitgehend statisch sind (z.B. vom Menschen zurückgelassene Gegenstände), da invalidierte Kanten für diese Objektklasse beibehalten werden.

10. Sicheres Führen

In vielen Anwendungen der Mensch/Roboter-Kooperation wird die Führung mittels eines Kraft/Moment-Sensors eingesetzt [20], sowie mittels künstlicher Häute [21]. Im SIMERO-System wird diese Führung mittels des Kamerasystems abgesichert, um Kollisionen mit verdeckten Objekten während der Führung zu vermeiden. Hierzu wird nur der führende Arm durch Maskierung aus dem überwachten Bereich ausgenommen und zu den restlichen bekannten und unbekanntem Hindernissen ein Abstand bestimmt. Der minimale Abstand reguliert die Robotergeschwindigkeit und ermöglicht so eine direkte haptische Rückkopplung für die führende Person, die auf diese Weise Hindernisse bemerkt (siehe Bild 6).

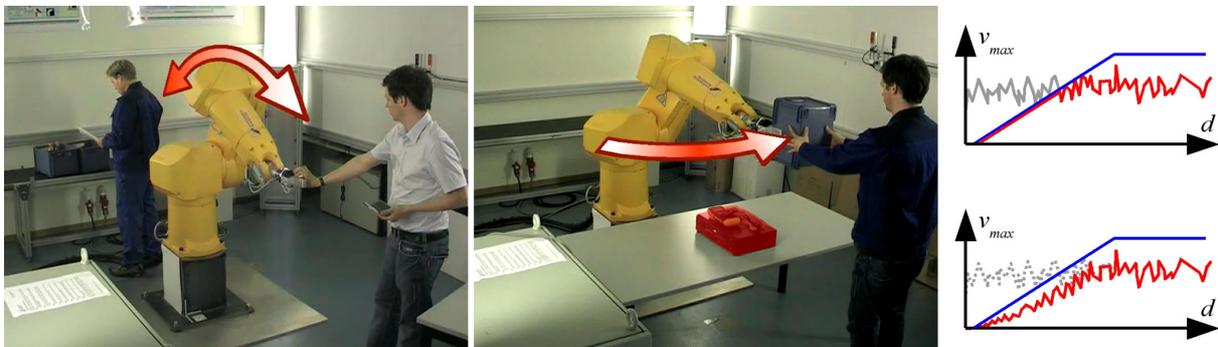


Bild 6: [Links und Mitte] Beispielhafte Situation mit Gefährdung des verdeckten Mitarbeiters durch die mittels führenden Kräften vorgegebene Bahn
[Rechts] Schematische Darstellung der Wirkung von Begrenzung (oben) und Skalierung (unten) auf die durch die Führung vorgegebene Geschwindigkeit

Zwei Methoden der Geschwindigkeitsregelung wurden auf ihre Intuitivität getestet: die Skalierung und Begrenzung der Führungsgeschwindigkeit. Die Skalierung erwies sich dabei als harmonischer und eingängiger im Vermitteln eines „Führungs-Widerstandes“, der durch die Hindernisse erzeugt wird, da auch schon bei geringen Kräfteinwirkungen eine Reduktion der resultierenden Geschwindigkeit erfolgt.

11. Virtuelle Schalter: Umschaltung Automatisch vs. Geführt

Das Kamerasystem ermöglicht das Konzept des virtuellen Schalters, indem eine statische Überwachungszone auf Belegung durch ein unbekanntes Objekt getestet wird. Damit ist es möglich zwischen einem automatischen Betrieb des Roboters und einer Führung des Roboters umzuschalten.

In der Implementierung wird zudem ein Übergabebereich definiert wo der Wechsel zwischen *automatisch* und *geführt* vollzogen werden kann. Weitere Möglichkeiten einer intuitiven Umschaltung sind in [22] aufgeführt.

12. Zusammenfassung

Das vorgestellte System realisiert die Koexistenz und Kooperation (Führung) von Mensch und Roboter in gemeinsamen Arbeitsräumen in abgesicherter Form. Basis der Überwachung sind optische Sensoren, die an statischen Positionen den gesamten Arbeitsraum erfassen und in Vorder- bzw. Hintergrund segmentieren. Aus den unterschiedlichen Sichtwinkeln und Positionen der Sensoren wird durch Fusion eine dreidimensionale Darstellung des Arbeitsraumes gewonnen. Dabei werden Informationen zu bekannten Objekten (Zellenaufbauten, Roboter) zur Verdeckungsanalyse verwendet. Die über die visuelle Hülle berechnete Darstellung unbekannter Objekte wird zur Abstandsberechnung verwendet, womit wiederum höherwertige Funktionen wie Geschwindigkeitsregelung, Bahnplanung und sichere Führung realisiert werden können.

13. Referenzen

- [1] F. Som: „Sichere Steuerungstechnik für den OTS-Einsatz von Robotern“, 2. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik, IPA 2003
- [2] F. Som: „Personensichere Robotersteuerung für den OTS-Einsatz von Robotern“, 3. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik, IPA 2004
- [3] F. Som: „Sichere Steuerungstechnik für den OTS-Einsatz von Robotern“, 4. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik, IPA 2005
- [4] <http://safetyeye.de/>
- [5] <http://www.castell.com/>
- [6] S. Thiernemann: „team@work - Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage“, 2. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik, IPA 2003
- [7] S. Thiernemann: „Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilmontage mit einem SCARA-Roboter“, IPA-IAO-Bericht, 2005, ISBN 978-3-936947-50-2
- [8] B. Winkler: „Safe Space Sharing Human-Robot Cooperation Using a 3D Time-of-Flight Camera“, International Robots and Vision Show 2007
- [9] T. Svoboda, D. Martinec, T. Pajdla: „A convenient multi-camera self-calibration for virtual environments“, PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, pp. 407-422, 14(4), 2005

- [10] Z. Zhang: "Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations", iccv, p. 666, 7th International Conference on Computer Vision (ICCV'99) Vol.1 , 1999
- [11] <http://mesa-imaging.ch/>
- [12] <http://pmdtec.com/>
- [13] H.Ingensand, T. Kahlmann: "Systematic investigation of properties of PMD sensors", 1st Range Imaging Research Day 2005
- [14] P. M. Hubbard: "Approximating Polyhedra with Spheres for Time-Critical Collision Detection", ACM Transactions on Graphics, Vol 15, Nr. 3, pp. 179-210, 1996
- [15] Y. H. Liu, S. Arimoto, H. Noborio: "A New Solid Model HSM and Its Application to Interference Detection between Moving Objects", Journal of Robotic Systems, Vol. 8, Nr. 1, pp. 39-54, 1991
- [16] S. Kuhn, T. Gecks, D. Henrich: „Velocity control for safe robot guidance based on fused vision and force/torque data“, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp. 485-492, 2006
- [17] S. Kuhn, D. Henrich: "Fast Vision-Based Minimum Distance Determination Between Known and Unknown Objects", IEEE/RSJ 2007 International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007
- [18] T. Gecks, D. Henrich: "Path Planning and Execution in Fast Changing Environments with Known and Unknown Objects", IEEE/RSJ 2007 International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007
- [19] R. Bohlin, L.E.Kavraki: "Path Planning Using Lazy PRM", Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 521-528 vol.1, April 24-28, 2000, San Francisco, USA
- [20] P. Heiligensetzer: "Sichere Mensch-Roboter Kooperation in der industriellen Fertigung", Robotik 2002, VDI-Berichte Nr. 1679, pp. 197-202, 2002
- [21] D. Göger, K. Weiss, C. Burghart, H. Wörn: „Sensitive Skin for a humanoid robot“, Human Centered Robotic Systems (HCRS'06), 2006
- [22] D. Henrich, S. Kuhn: "Modelling Intuitive Behaviour for Safe Human/Robot Coexistence and Cooperation", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006