

MÖGLICHKEITEN ZUR LEISTUNGSSTEIGERUNG DURCH DEN EINSATZ VON TELEPRÄSENZTECHNOLOGIE BEI DER ROBOTERSTEUERUNG

T. Kopfstedt
Diehl BGT Defence GmbH & Co. KG
Alte Nußdorfer Straße 13, D-88662 Überlingen

1. EINLEITUNG

Derzeitig werden mobile Roboter vor allem für die Probenentnahme, die Entschärfung von Sprengsätzen, Aufklärungsmissionen, Erkundungseinsätze und in Katastrophenzenarien zur Suche von Verschütteten verwendet. Die dabei bisher eingesetzten Systeme arbeiten mit Monovision und einer Fernsteuerung. Im Rahmen dieser Publikation wird die erreichbare Leistungssteigerung durch den Einsatz von Telepräsenztechnologie, sowie deren technische Umsetzung beschrieben. Die beschriebenen Algorithmen und Verfahren sind alle in Praxistests am modularen Robotersystem Asendro EOD verifiziert und konnten dort bereits die Leistungsfähigkeit beweisen.

Bei der Entwicklung dieses Roboters ging es darum die Fortschritte aus dem universitären Bereich [1], [2] und [3] in ein Serienprodukt zu überführen. Da es sich beim Asendro EOD um ein Serienprodukt handelt, ist es nicht möglich, beliebige komplexe und wartungsintensive Hardware zu verbauen, sondern stattdessen musste ein alternativer Ansatz gewählt werden, welcher einerseits Zuverlässigkeit und einen normalen Marktpreis ermöglicht und außerdem eine vollkommen neue Generation von Robotersteuerungen repräsentiert.

Der erste signifikante Unterschied gegenüber bestehenden Produkten am Markt ist der Einsatz von Stereovision anstatt Monovision. Dies wurde realisiert durch zwei Kameras am Manipulatorarm des Roboters, welche in einem Abstand zueinander, der dem menschlichen Augenabstand entspricht, angebracht wurden. Die Bilder dieser Kameras werden dem Bediener auf einem Head-Mounted-Display angezeigt, so dass der Bediener aus Sicht des Roboters in 3D sieht, anstatt wie bei herkömmlichen Robotersystemen nur über 2D-Sicht auf einem Monitor zu verfügen. Dies erleichtert signifikant die Entfernungseinschätzung und ermöglicht somit schnelleres und akkurate Arbeiten.

Die wesentlichste technologische Neuerung zu herkömmlichen kommerziell erhältlichen mobilen Robotern ist allerdings der Einsatz eines Trackingssystems zur Detektion der Bewegung des Menschen und der Abbildung dieser Bewegung auf den Manipulatorarm des mobilen Roboters. Hierdurch wird erstmalig bei einem Serienprodukt für den Entschärfungsmarkt eine intuitive Bedienung eines mobilen Roboters ermöglicht. Bei dem modularen Robotersystem Asendro EOD gibt es hierfür zwei Betriebsmodi. Im Head-Tracking Modus wird die Bewegung des Kopfes des Bedieners detektiert und durch den Manipulatorarm nachgebildet, wodurch der Bediener eine Umgebung erkunden kann, wie wenn er sich selbst vor Ort umsehen würde. Im zweiten Modus, dem Hand-

Tracking Modus, wird die Bewegung der Hand des Bedieners detektiert und dann durch den Roboterarm nachgebildet. Aus der Forschung sind zahlreiche Systeme bekannt, welche teilweise auch über Kraftrückkopplung [3] verfügen. Da dies allerdings sehr hohe Anforderungen an die Funkübertragung stellt und außerdem deutlich komplexere Eingabesysteme erfordert, wurde hierauf bewusst verzichtet, und es wird stattdessen mittels eines berührungslosen Absolutwertmessverfahrens gearbeitet.

Nachfolgend werden zunächst die wichtigen Systemkomponenten und der Regelkreis beschrieben. Anschließend werden die Betriebsmodi Hand-Tracking und Head-Tracking mit den jeweils signifikanten Merkmalen beschrieben, sowie die Kinematik des Manipulatorarms angegeben. Da der Manipulatorarm nicht mehr wie bei bisherigen Systemen in jedem Gelenk einzeln durch den Bediener gesteuert wird muss der Roboter außerdem Kollisionstests zwischen dem Manipulatorarm und dem Rest des Roboters durchführen, das hierfür verwendete Verfahren wird im Kapitel 3 beschrieben. Im Kapitel 4 werden dann einige experimentelle Ergebnisse und Erfahrungen mit den Betriebsmodi Head-Tracking und Hand-Tracking den bisherigen Verfahren gegenübergestellt und verglichen. Abschließend wird dann in Kapitel 5 noch eine Zusammenfassung gegeben.

2. BESCHREIBUNG DES ROBOTERSYSTEMS

2.1. Allgemeine Systembeschreibung

Beim modularen Robotersystem Asendro handelt es sich um eine Produktfamilie von Kleinrobotern. Allen Mitgliedern dieser Produktfamilie ist gemeinsam, dass sie über eine Kettenplattform mit 2 Fahrketten und 4 Schwingen verfügen, wodurch die Roboter in der Lage sind Treppen zu bewältigen und Hindernisse zu erklimmen. Außerdem können alle Varianten über das in BILD 1 dargestellte Bediensystem gesteuert werden. Bei den Nutzlastmodulen gibt es dann verschiedene Varianten je nach Einsatzszenario. Die Telepräsenztechnologie wird derzeit nur für den in BILD 2 dargestellten Roboter Asendro EOD verwendet. Hierbei handelt es sich um den Entschärfungsroboter aus der Produktfamilie Asendro. Diese Variante verfügt als Hauptgerät über einen Manipulatorarm mit fünf Gelenken und einem Zweibackengreifer.

Um die Telepräsenz mit diesem Arm realisieren zu können, befindet sich oberhalb des vierten Gelenks ein Stereokamerakopf, bei dem die Kameras exakt so ausgerichtet sind, dass im Sichtbereich 0,30 bis ca. 1,50 m ein guter 3D-Eindruck entsteht.

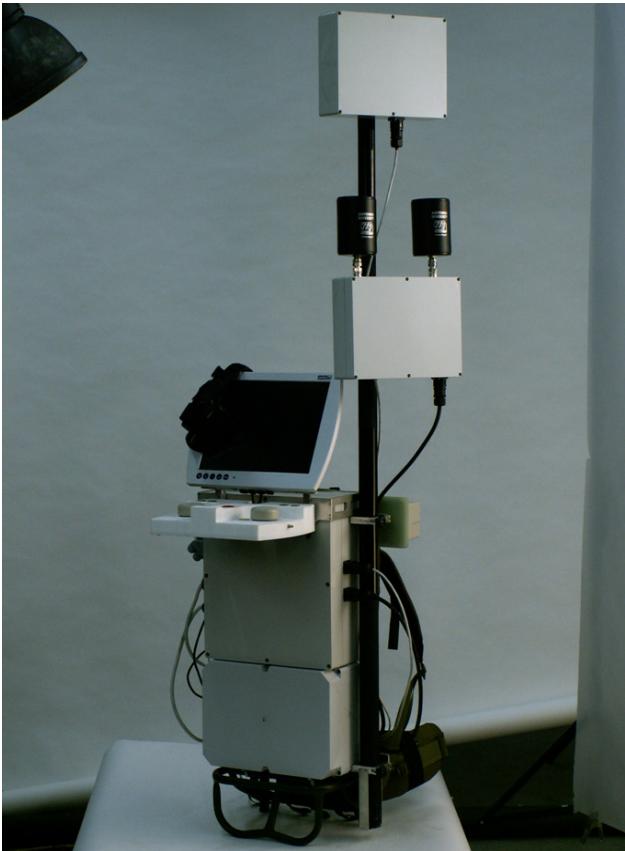


BILD 1. Bedienpult des Asendro



BILD 2. Asendro EOD

Da der Manipulatorarm, anders als bei den bisherigen Robotersystemen am Markt, nicht über einen Joystick gesteuert wird, sondern direkt die Bewegungssignale vom menschlichen Bediener gesteuert wird, muss der Manipulatorarm in der Lage sein, deutlich schnellere Bewegungen durchzuführen. Aus diesem Grund ist der Manipulatorarm des Asendro EOD deutlich massiver als die Manipulatorarme der Konkurrenzsysteme, da er ca. um den Faktor zehn schnellere Gelenkgeschwindigkeiten realisieren muss. Dadurch verfügt der Roboter allein aufgrund der Zielsetzung, die Telepräsenztechnologie zu implementieren, über deutlich leistungsfähigere Hardware und Rechentechnologie als andere Systeme. Außerdem wurde der Roboter konsequent auf minimale Signalaufzeiten ausgelegt. Dies ist notwendig, um dem Bediener auch wirklich einen Telepräsenzindruck zu vermitteln. Wenn die Latenzen zu groß werden, geht dieser Eindruck verloren, da dann der Bediener das vom Roboter zurück gelieferte Bild nicht mehr mit seiner eigenen Bewegung in Zusammenhang bringen kann. Bei dem Asendro EOD sind die Latenzen im System so ausgelegt, dass selbst bei teilweise gestörter Funkstrecke dennoch das System mit so geringer Latenz arbeitet, so dass der Bediener sich telepräsent fühlt.

2.2. Trackingsystem

Die Vorteile des berührungslosen absoluten Messverfahren zur Bestimmung der Position und Orientierung der Hand / des Kopfes des Bedieners gegenüber dem Bedienpult sind, dass dieses System vollkommen driftfrei ist, aufgrund der Bestimmung der absoluten relativen Position, wohingegen z.B. Kreiselsysteme driftieren, was dann dem Bediener eine akkurate Arbeit über längere Arbeitszeiten erschwert. Außerdem entfällt durch das berührungslose Messverfahren eine aufwendige Eingabemechanik, welche häufig im universitären Umfeld zur Telepräsenzsteuerung verwendet wird. Um ohne aufwendige externe Gerätschaften und mit einem robusten System arbeiten zu können, welches auch bei Outdoor-Einsätzen verwendbar ist und auch witterungsunabhängig ist, wird beim modularen Robotersystem Asendro EOD ein magnetisches Messverfahren zur Bestimmung von Position und Orientierung verwendet. Dabei wird von einem Magneten im Bedienpult ein gepulstes Magnetfeld erzeugt, welches von einem Sensor im Helm des Bedieners und dem Sensor an der Hand detektiert wird. Durch Analyse der gemessenen Signale und dem abwechselnden erzeugen von Magnetfeldern in x, y und z Richtung lässt sich die Position und Orientierung gegenüber dem Bedienpult bestimmen.

2.3. Regelkreis

Für diese Art der Manipulatorarmsteuerung wird ein mehrstufiger Regelkreis verwendet, bei dem der Bediener, wie auch in BILD 3 zu sehen, Teil des äußeren Regelkreises ist. Zunächst wird die kartesische Position und Orientierung des Sensors am Bediener relativ zum Magneten im Bediengerät detektiert, anschließend wird dieser Wert mit einem Offset versehen, welcher dem Positionsunterschied, Bediener zum Bediengerät gegenüber der Ausgangsstellung des Manipulatorarms entspricht. Die so erhaltene kartesische Position wird dann an den Roboter übertragen. Dort werden dann mittels inverser Kinematik die möglichen Gelenkwinkelkombinationen errechnet. Diese werden dann auf mögliche Kollisi-

onen mit dem Roboter getestet und unter den kollisionsfreien Gelenkwinkelkombinationen wird dann die Gelenkwinkelkombination ausgewählt, welche gegenüber der aktuellen Gelenkwinkelkombination die geringsten Gelenkwinkeländerungen hervorruft. Diese neuen Gelenkwinkel werden an den Manipulatorarm gesendet, dort von den einzelnen Gelenken eingeregelt und dann wird von den Kameras auf dem Manipulatorarm ein Bild via Funk zurück zum Bediensystem übertragen. Dort wird das Bild dann mit zusätzlichen Informationen und Menüs versorgt und dann auf dem Head-Mounted Display dargestellt.

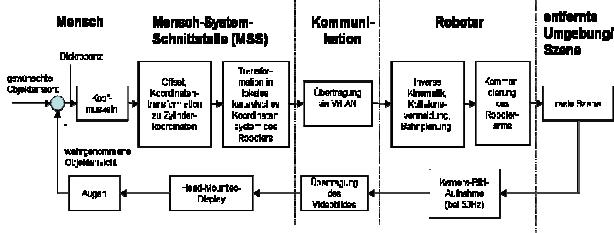


BILD 3. Regelkreis des Roboters

Unterlagert gibt es noch einen separaten Regelkreis für die direkte Ansteuerung des Manipulatorarms, um die Bewegungen der einzelnen Gelenke des Manipulatorarms zu synchronisieren und in jedem Gelenk noch Regler um das Gelenk sauber in die gewünschte Position einzuregeln.

3. MANIPULATORARMSTEUERUNG

3.1. Head-Tracking Modus

Beim Head-Tracking werden mittels eines Sensors im Helm des Bedieners die Nick- und Drehbewegung des Kopfes detektiert. Nach experimentellen Tests mit diversen Bedienern wurde bewusst darauf verzichtet durch Änderungen der Höhe des Kopfes des Bedieners auch entsprechend die Höhe des Kamerakopfes des Manipulatorarms auf dem Roboter zu verändern, da dies für den Bediener zu unkomfortablen Kopfpositionen geführt hat. Stattdessen wird jetzt die Höhe des Kamerakopfes über Grund mittels einer SpaceMouse, einem 3D Eingabegerät mit 6 Freiheitsgraden, vom Bediener bei Bedarf gesteuert.

Um dem Bediener außerdem auch in der Nick- und Drehachse stets die Möglichkeit zu einer für ihn komfortablen Kopfhaltung zu geben wurde eine Pausefunktionallität eingebaut, welche stets beim Drücken der Pause-Taste die Bewegungsposition des Manipulatorarms einfriert und es dann dem Bediener erlaubt seinen Kopf wieder in eine angenehme Stellung zu bringen. Nach dem Lösen der Pause werden dann Offsets bestimmt, welche die neue Kopfstellung mit der aktuellen Manipulatorarmstellung in Einklang bringen, sodass ohne einen Sollwertsprung direkt weitergearbeitet werden kann. Zur Verdeutlichung dieses Verfahrens ist dies für eine Drehbewegung des Kopfes nach rechts, anschließendem drücken der Pause, Zurückführung des Kopfes in die Ausgangsstellung und dann erneutes drehen nach rechts in BILD 4 dargestellt. Wie in dieser Abbildung zu sehen ist der Bediener dadurch in der Lage eine Drehung des Kamerakopfes um 180° zu vollziehen ohne selber seinen Kopf um mehr als 90° auslenken zu müssen.

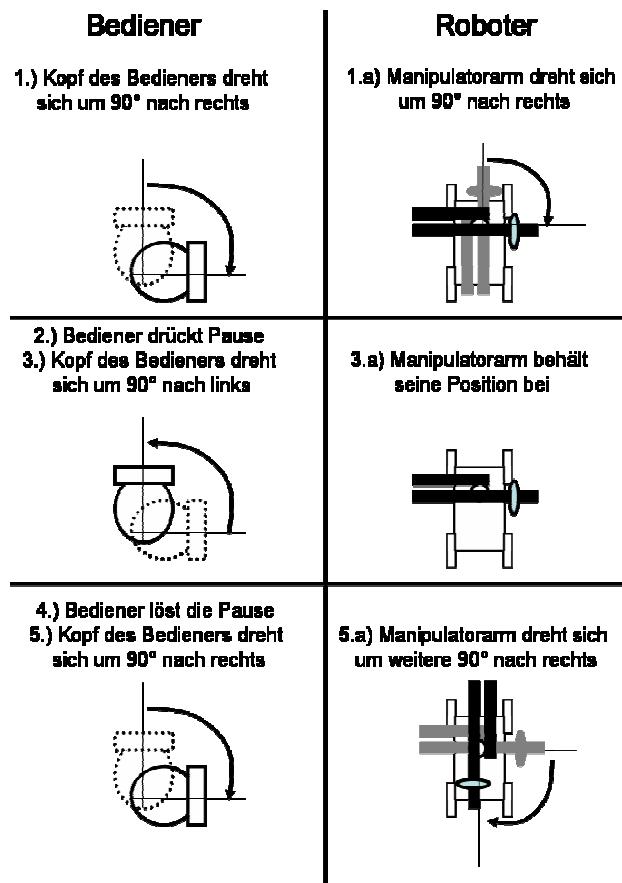


BILD 4. Offsets beim Head-Tracking

3.2. Hand-Tracking Modus

Das Hand-Tracking funktioniert analog zum Head-Tracking. Hierbei wird allerdings die Position und Orientierung der menschlichen Hand gegenüber dem Bedienpult gemessen. Da der Bediener bei der Steuerung des Roboterarms allerdings nicht Position und Orientierung gegenüber dem Bedienpult vorgeben möchte, sondern stets von sich selbst als Referenzpunkt ausgeht, muss zunächst mittels einer Annahme abgeschätzt werden, in welcher Richtung der Bediener relativ zum Bedienpult steht, um dann im richtigen Koordinatensystem zu arbeiten. Da das Bediensystem stets nur entweder den Head-Tracking oder den Hand-Tracking Sensor auswerten kann, aber nicht beide gleichzeitig, gibt es keine Möglichkeit die Position des Bedieners relativ zu seiner Hand festzustellen. Um dennoch diese Position abschätzen zu können, wird nach dem Lösen von der Pause jedes Mal basierend auf den Winkel vom Sensor an der Hand des Bedieners angenommen, dass dieser Sensor stets auf einer geraden Linie vom Bediener wegzeigt wie auch in BILD 5 dargestellt. Danach wird dann die aktuelle Stellung des Manipulatorarms des Roboters der aktuellen Position der Hand des Bedieners zugeordnet, und die notwendigen Offsets bestimmt. Dadurch kann dann mit dem Manipulatorarm gearbeitet werden, ohne dass dieser plötzliche Sollwertsprünge erhält, welche zu einer nicht beabsichtigten Bewegung des Manipulatorarms führen würden. Dies wird durch die stets nach jedem Lösen der Pause neu bestimmten Offsets vermieden. Sobald der Bediener dann seine Hand bewegt, wird die neue Position, mit den Offsets belegt und die so ermittelte kartesi-

sche Position dann mittels inverser Kinematik in die notwendige Gelenkwinkelkombination für den Manipulatorarm des Roboters umgerechnet. Da die inverse Kinematik mehrere Lösungen liefert muss dann mittels Kollisionstest zunächst überprüft werden, welche der Lösungen denn überhaupt realisierbar ist und anschließend dann zwischen den möglichen Lösungen die Variante ausgesucht werden, welche die geringsten notwendigen Gelenkwinkeländerungen hervorruft.

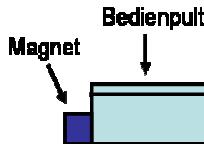


BILD 5. Angenommene Position des Bedieners relativ zum Bediensystem

3.3. Kinematik

Da die Gelenke des Manipulatorarms nicht mehr einzeln durch den Bediener gesteuert werden, sondern dieser nur eine Sollposition und Orientierung vorgibt, muss der Roboter in der Lage sein für jedes Gelenk die notwendige Gelenkwinkelstellung selber zu bestimmen. Dies geschieht mittels der Rückwärtslösung der Kinematik, welche für einen Manipulatorarm gemäß BILD 6 mehrere Lösungen liefert. Der in BILD 6 gezeigte schematische Aufbau des Manipulatorarms ist nach Denavit-Hartenberg entwickelt, und die Gleichungen zur Berechnung der direkten und inversen Kinematik basieren auf [4], [5] und [6]. Für die Kollisionstests wird dann zusätzlich noch die direkte Kinematik benötigt, damit auch die einzelnen Segmente des Manipulatorarms und nicht nur die Endeffektorposition auf mögliche Kollisionen gegenüber dem restlichen Roboter überprüft werden kann.

Die Rückwärtslösung für den 5 DoF-Manipulatorarm des Asendro EOD lautet für das Gelenk 1

$$(1) \Theta_{1,1} = \beta$$

oder

$$(2) \Theta_{1,2} = \beta + \pi$$

sofern, wie hier geschehen der Koordinatenursprung für das Koordinatensystem des Manipulatorarms in das Gelenk 1 gelegt wird. Dies wurde gemacht um nicht durch Offsets in den nachfolgenden Gleichungen eine zusätzliche Komplexität zu erhalten. Die Rückwärtslösung für das Gelenk 5 ist eindeutig und lautet

$$(3) \Theta_5 = \gamma.$$

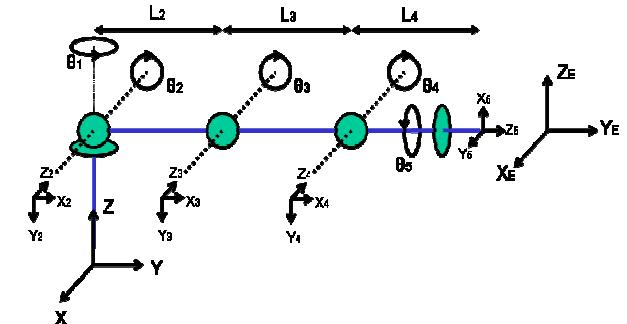


BILD 6. Schematischer Aufbau des Manipulatorarms

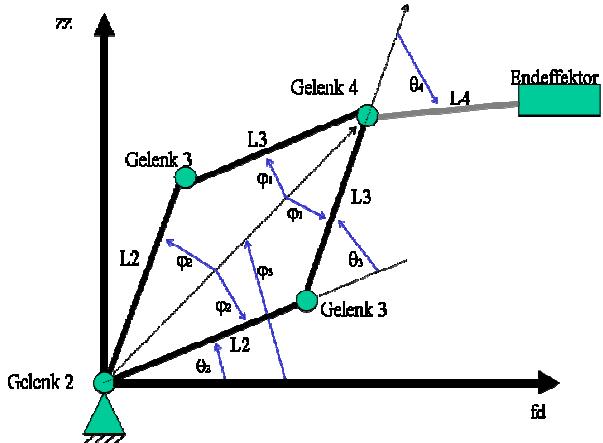


BILD 7. obere und untere Gelenkwinkelkombination für die Gelenke 2, 3 und 4

Die Gelenke 2, 3 und 4 liegen alle in einer Ebene wodurch sich die Winkelstellungen der einzelnen Gelenke jeweils auf die anderen Gelenke auswirken. Da allerdings die Kombination der Winkelstellungen, eine bestimmte Position und resultierende Winkelstellung für den Endeffektor ergeben muss, existiert stets wie aus BILD 7 ersichtlich eine obere und eine untere Variante. Für die Berechnung der Gelenkwinkel wird zunächst die Entfernung x,y,z zwischen den Gelenken 2 und 4 benötigt. Diese Entfernung lassen sich über die Gleichungen

$$(4) xx = x + \sin(\Theta_{1,1}) \cdot \cos(\alpha) \cdot L_4$$

$$(5) yy = y - \cos(\Theta_{1,1}) \cdot \cos(\alpha) \cdot L_4$$

$$(6) zz = z + \sin(\alpha) \cdot L_4$$

bestimmen. Mittels Gleichung (X4) und (X6) lässt sich die Flächendiagonale

$$(7) fd = \sqrt{xx^2 + yy^2}$$

berechnen. Zusätzlich werden noch folgende Hilfsgleichungen

$$(8) u = \frac{1}{2} (L_2 + L_3 + \sqrt{fd^2 + zz^2})$$

$$(9) h1 = \sqrt{\frac{(u - L_2) \cdot (u - L_3) \cdot (u - \sqrt{fd^2 + zz^2})}{u}}$$

$$(10) \varphi_1 = 2 \cdot \arctan2(h1, (u - L_2))$$

$$(11) \varphi_2 = 2 \cdot \arctan 2(hl, (u - L_3))$$

$$(12) \varphi_3 = \arctan 2(zz, fd)$$

benötigt um dann für die Gelenke 2, 3 und 4 als obere Gelenkwinkelkombination

$$(13) \Theta_{2,1} = -(\varphi_3 + \varphi_2)$$

$$(14) \Theta_{3,1} = -(\varphi_3 + \varphi_1) - \Theta_{2,1}$$

$$(15) \Theta_{4,1} = \text{mod}((\alpha - \Theta_{2,1} - \Theta_{3,1}), (2\pi))$$

zu erhalten und als untere Gelenkwinkelkombination

$$(16) \Theta_{2,2} = -(\varphi_3 + \varphi_2)$$

$$(17) \Theta_{3,2} = -(\varphi_3 + \varphi_1) - \Theta_{2,2}$$

$$(18) \Theta_{4,2} = \text{mod}((\alpha - \Theta_{2,2} - \Theta_{3,2}), (2\pi))$$

Die Gleichungen (13) bis (18) sind gültig für den Fall das Gelenk 1 gemäß (1) definiert ist. Bei den Gelenkwinkelindizes gibt jeweils der erste Index die Nummer des Gelenks an und die zweite Nummer die mögliche Realisierungsvariante an. Für den Fall, dass Gelenk 1 gemäß (2) berechnet wurde resultiert die obere Gelenkwinkelkombination für die Gelenke 2 bis 4 in

$$(19) \Theta_{2,3} = -(\pi + (-\varphi_3 + \varphi_2))$$

$$(20) \Theta_{3,3} = \Theta_{3,2}$$

$$(21) \Theta_{4,3} = \text{mod}((\pi + \alpha - \Theta_{2,3} - \Theta_{3,3}), (2\pi))$$

und die untere Gelenkwinkelkombination in

$$(22) \Theta_{2,4} = -(\pi + (-\varphi_3 + \varphi_2))$$

$$(23) \Theta_{3,4} = \Theta_{3,1}$$

$$(24) \Theta_{4,4} = \text{mod}((\pi + \alpha - \Theta_{2,4} - \Theta_{3,4}), (2\pi))$$

Somit gibt es insgesamt vier mögliche Gelenkwinkelkombinationen, welche nachfolgend als vier Zeilenvektoren

$$(25) \text{winkelmatrix} = \begin{pmatrix} \Theta_{1,1} & \Theta_{2,1} & \Theta_{3,1} & \Theta_{4,1} & \Theta_5 \\ \Theta_{1,1} & \Theta_{2,2} & \Theta_{3,2} & \Theta_{4,2} & \Theta_5 \\ \Theta_{1,2} & \Theta_{2,3} & \Theta_{3,3} & \Theta_{4,3} & \Theta_5 \\ \Theta_{1,2} & \Theta_{2,4} & \Theta_{3,4} & \Theta_{4,4} & \Theta_5 \end{pmatrix}$$

in der Matrix eingetragen wurden um einen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Winkeln an den verschiedenen Gelenken zu bekommen.

Die direkte Kinematik für den Manipulatorarm ist stets eindeutig lösbar. Die Position des Endeffektors setzt sich zusammen aus der Position des Gelenks 3 gegenüber dem Koordinatenursprung, der Positions differenz zwischen Gelenk 3 und 4 sowie dem Endeffektor gegenüber dem Gelenk 4. Dies führt zu den Gleichungen

$$(26) x = -\sin(\Theta_1) \cdot (\cos(\Theta_2)L_2 + \cos(\Theta_3)L_3 + \cos(\Theta_{234})L_4)$$

$$(27) y = \cos(\Theta_1) \cdot (\cos(\Theta_2)L_2 + \cos(\Theta_3)L_3 + \cos(\Theta_{234})L_4)$$

$$(28) z = -\sin(\Theta_2)L_2 - \sin(\Theta_3)L_3 - \sin(\Theta_{234})L_4$$

für die Position des Endeffektors gegenüber dem in das Gelenk 1 gesetzten Koordinatenursprung, wobei $\Theta_{23} = \Theta_2 + \Theta_3$ und $\Theta_{234} = \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4$ ist. Die Ausrichtung des Endeffektors lässt sich über die Gleichungen

$$(29) \alpha = \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4$$

$$(30) \beta = \Theta_1$$

$$(31) y = \Theta_5$$

bestimmen.

3.4. Kollisionstest

Mittels der Kinematik für den Roboterarm wird zunächst der Manipulatorarm des Asendro EOD durch Punkte nachgebildet. Für jeden dieser Punkte wird dann überprüft, ob er innerhalb oder außerhalb des Roboters liegt. Wobei hierfür mit einem Robotermodell gearbeitet wird, welches die reale Ausdehnung des Manipulatorarms berücksichtigt und deshalb in diesem Abstand plus einen minimalen Sicherheitsabstand um das Modell des realen Roboters herumgelegt wurde.

Die Funktionalität dieses Verfahrens wird in BILD 8 und BILD 9 dargestellt, wobei in BILD 8 der Fall betrachtet wird das keine Kollision zwischen Manipulatorarm und Roboter vorliegt, während im Fall von BILD 9 eine Kollision zwischen Manipulatorarm und der vorderen Schwinge des Roboters besteht.

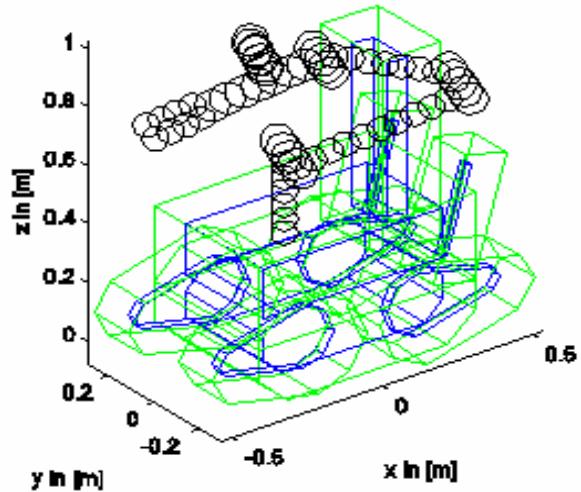


BILD 8. Kollisionsfreie Position des Manipulatorarms

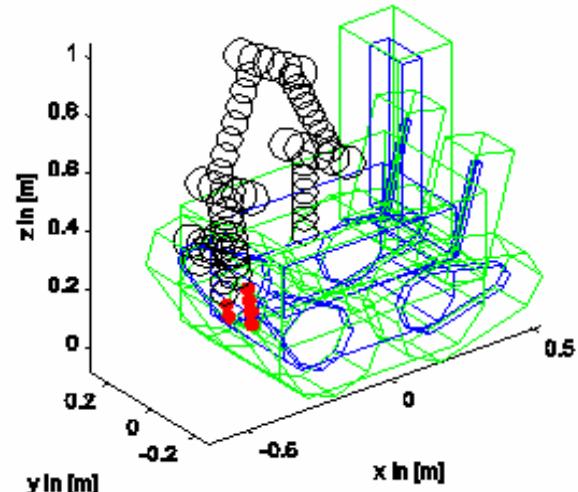


BILD 9. Kollision zwischen Roboterarm und Roboter

Wie den Abbildungen BILD 8 und BILD 9 zu entnehmen ist basiert das Modell des Roboters auf diversen konvexen Polygonen. Das Verfahren zum Testen, ob einzelne Punkte sich innerhalb oder außerhalb eines Objekts befinden, wird unter anderem bei der gemischt ganzzahligen Programmierung verwendet. Der hier vorgestellte Algorithmus basiert auf [7] und [8]. Bei der Verwendung für den Roboter werden die einzelnen Polygone aus denen der Roboter für den Kollisionstest zusammengesetzt ist jeweils als Vektoren der Form

$$(32) \quad Obs_i = [x_{start}, y_{start}, z_{start}, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}, l_1, l_2, \dots, l_{n-1}, y_{width}]$$

beschrieben. Wobei P_{start} den Aufhängungspunkt der Fläche angibt und die Winkel $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}$ die Winkelunterschiede zwischen den Strecken l_1, l_2, \dots, l_{n-1} welche das Polygon bilden, angeben, wie auch aus BILD 10 zu ersehen ist.

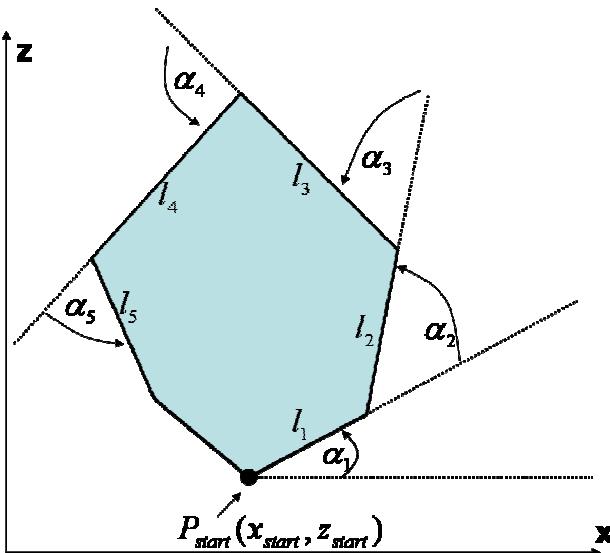


BILD 10. konvexes Polygon für den Kollisionstest

Da über den Vektor (32) nur die relativen Entfernung zwischen den einzelnen Eckpunkten des Polygons angegeben werden, und für die Berechnung aber die absoluten Positionen $[x, y, z]$ im Raum benötigt werden ist es notwendig diese Informationen in ein globales kartesisches Koordinatensystem, welches für den gesamten Roboter incl. Manipulatorarm gilt, zu überführen. Dort lautet der Aufhängungspunkt für das ausgewählte Polygon

$$(33) \quad P_i(x_i, z_i) = \begin{bmatrix} x_{start} \\ z_{start} \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{obs_i} = 0$$

Alle weiteren Eckpunkte mit den zugehörigen Winkeln der Strecken zwischen dem jeweils neu bestimmten Eckpunkt und dem vorangehenden Eckpunkt lassen sich über die Gleichungen

$$(34) \quad P_i(x_i, y_i) = \begin{bmatrix} x_{i-1} + l_{i-1} \cdot \cos(\alpha_{obs_i-1}) \\ y_{i-1} + l_{i-1} \cdot \sin(\alpha_{obs_i-1}) \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{obs_i} = \alpha_{obs_i-1} + \alpha_{i-1}$$

beschreiben. Die Länge der Strecke zwischen dem letzten Eckpunkt und dem ersten Eckpunkt des Polygons lässt sich über den Kosinussatz bestimmen und mit dessen

Hilfe kann dann auch der Winkel zwischen dem letzten Eckpunkt und dem ersten Eckpunkt bestimmt werden.

Der Kollisionstest läuft so ab, dass jeweils zwischen zwei aufeinander folgende Eckpunkte des Polygons eine Gerade gelegt wird und dann geprüft wird, ob der zu testende Punkt des Manipulatorarms links oder rechts der Geraden liegt. In den Fällen, wo die Gerade im Winkel $\pi/2$ oder $3/2 \cdot \pi$ zum Koordinatensystem ausgerichtet ist, oder mit weniger als der Rechengenauigkeit e des verwendeten Rechners davon abweicht muss für diese Gerade die Ungleichung

$$(35) -x_{ARM,j} \cdot \text{sgn}(z_{i+1} - z_i) - \varepsilon_i \cdot S \leq -(x_i + e) \cdot \text{sgn}(z_{i+1} - z_i)$$

verwendet werden und in allen anderen Fällen muss die Ungleichung

$$(36) z_{ARM,j} \cdot f_i - x_{ARM,j} \cdot f_i \cdot g_i - \varepsilon_i \cdot S \leq -f_i \cdot (e + h_i)$$

unter zu Hilfenahme der Hilfsgleichungen

$$(37) f_i = \text{sgn}(\cos(\alpha_{obs_i+1}))$$

$$(38) g_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i}$$

$$(39) h_i = g_i \cdot x_i - z_i$$

verwendet werden. Bei diesen Gleichungen repräsentiert S eine große positive Zahl vom Typ $S \in N$, ε_i sind Variablen vom Typ Boolean und $x_{ARM,j}$, $z_{ARM,j}$ ist der zu prüfende Punkt des Manipulatorarms.

Nachdem diese Gleichungen für das Polygon aufgestellt sind findet dann der eigentliche Kollisionstest dadurch statt, wobei geprüft wird, ob der zu prüfende Punkt des Manipulatorarms entlang der y-Achse im Bereich Y_{start} bis $Y_{start} + Y_{width}$ des Polygons liegt. Sofern dies nicht der Fall ist, wird eine mögliche Kollision sofort ausgeschlossen. Andernfalls werden die Gleichungen (35) bzw. (36) für jedes Segment des Polygons berechnet und für die Variablen ε_i jeweils überprüft, ob diese „0“ annehmen können oder „1“ als Wert annehmen müssen, damit die Ungleichungen erfüllt sind. Sofern dann die Ungleichung

$$(40) \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \leq n-1$$

erfüllt ist liegt für den Punkt des Manipulatorarms mit dem ausgewählten Polygon keine Kollision vor, andernfalls besteht eine Kollision. Dieses Verfahren muss für einen vollständigen Kollisionstest für alle Testpunkte des Manipulatorarms gegenüber allen Polygone aus denen der Roboter zusammengesetzt ist durchgeführt werden.

4. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

4.1. Head-Tracking

Die bisherigen Systeme am Markt besitzen keine Funktionalität, die gleichzusetzen wäre mit dem Head-Tracking, so dass ein Leistungsvergleich zwischen verschiedenen Verfahren nicht möglich ist. Aus diesem Grunde wird hier nur gezeigt, wie gut der Manipulatorarm den Bewegungen des Kopfes des Bedieners folgen kann.

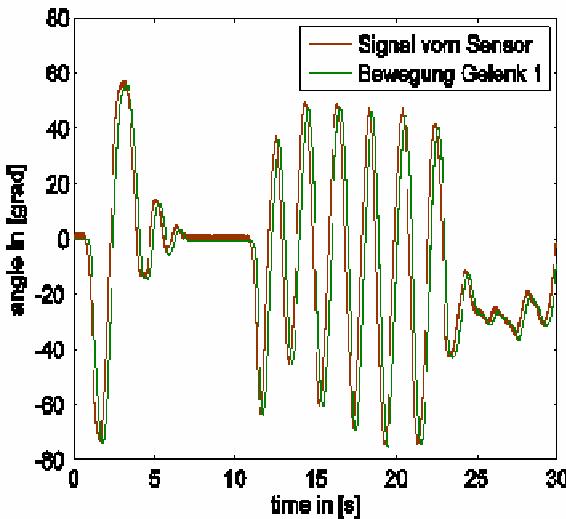


BILD 11. Bewegungsmuster von Gelenk 1

Um möglichst aussagekräftige Testdatensätze zu erhalten, hatte der Bediener die Aufgabe, zunächst nur horizontal und danach nur vertikal den Kopf zu bewegen. Dies entspricht beim Manipulatorarm im Head-Tracking Modus Bewegungen in den Gelenken 1 und 4. Wie in BILD 11 und BILD 12 ersichtlich ist, hat einerseits der Bediener bei der horizontalen Bewegung seinen Kopf nicht perfekt entlang des Horizonts bewegen können, was zu leichten Bewegungen auch entlang der vertikalen Achse führt.

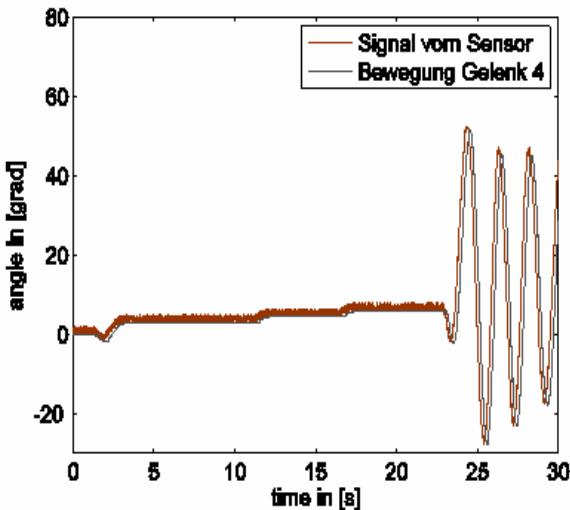


BILD 12. Bewegungsmuster von Gelenk 4

Außerdem ist das verwendete Trackingsystem nicht komplett frei von Verkopplungen, da beim aktuellen Verfahren zeitliche Verkipplungen des menschlichen Kopfes zwar registriert werden aber nicht dazu verwendet werden, das Signal robuster zu hinterlegen. Dadurch kommt es zwangsläufig durch die Umrechnungen bei vertikalen Bewegungen auch zu leichten horizontalen Bewegungen. Dies liegt vor allem daran, dass der Sensor oberhalb des menschlichen Kopfes montiert ist, und somit auch immer Positionsänderungen im Raum ausgeführt werden, welche nur bedingt aus dem Signal herausgefiltert werden können, so dass leichte Verkopplungen sich

nicht vollkommen vermeiden lassen. Ferner ist in BILD 11 und BILD 12 ersichtlich, dass der Manipulatorarm schnell genug ist um auch schnellen Kopfbewegungen von mehr als 60°/s zu folgen.

4.2. Hand-Tracking

Bei den bisherigen Konkurrenzsystemen gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten den Manipulatorarm auf dem Roboter zu bedienen. Die klassische Variante ist die Einzelgelenkansteuerung, bei der vom Bediener abwechselnd die Gelenke des Roboters jeweils nacheinander solange angesteuert werden, bis der Manipulatorarm in der gewünschten Position ist. Dies führt dazu dass der Bediener zunächst sich ein sinnvolles Bewegungsmuster überlegen muss und dann die einzelnen Gelenke oft wechseln muss, um auch in beengten Räumen zum Zielpunkt zu gelangen. Die modernere Alternative ist die Tool-Center-Point Steuerung, dabei wird mittels eines oder mehrerer Eingabegeräte die Position und Orientierung der Greiferspitze kommandiert und analog zum Hand-Tracking berechnet der Roboter daraus dann die notwendigen Gelenkwinkeländerungen.

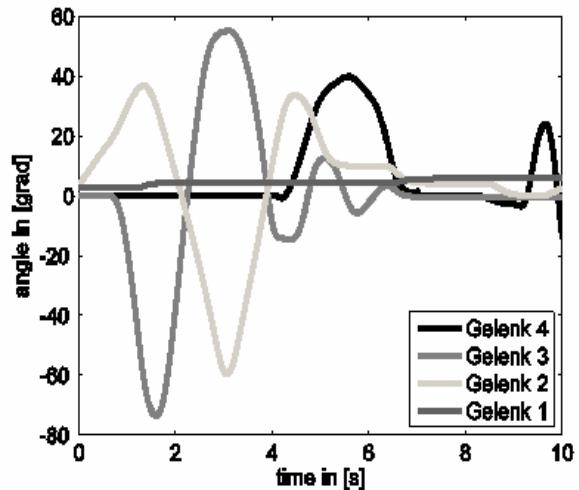


BILD 13. Hand-Tracking

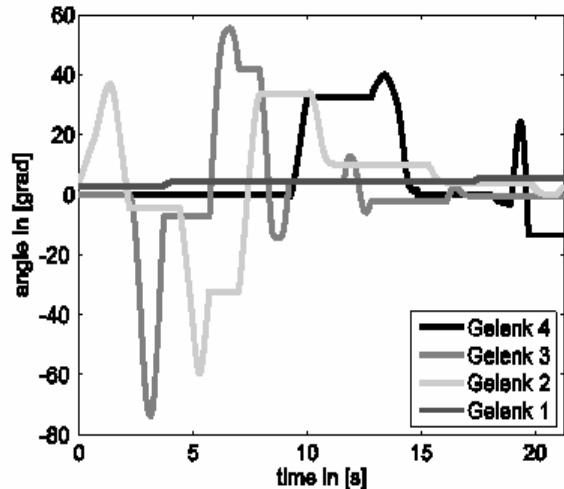


BILD 14. Gelenkeinzelansteuerung

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit von Hand-Tracking gegenüber den bestehenden Verfahren wurde eine Greifaktion von einem Objekt auf einem Tisch mittels Hand-Tracking aufgezeichnet und diese Daten wurden dann vom Rechner noch mal separat im Modus Gelenkeinzelsteuerung an den Manipulatorarm des Asendro EOD gegeben. Die Gelenkbewegungen für ein komplexes Bewegungsmuster in einem beengten Raum zum Greifen eines Objekts auf einem Tisch sind in BILD 13 für den Hand-Tracking Modus dargestellt. Anschließend wurde dieselbe Bewegung noch mal im Modus Gelenkeinzelsteuerung durchgeführt. Wie in BILD 14 ersichtlich, führt dies selbst bei einem schnellen Manipulatorarm wie dem des Asendro EOD zu einer deutlichen Verlangsamung der Arbeit. Dies zeigt, dass mittels Hand-Tracking deutlich schneller gearbeitet werden kann, da die Latenzen, welche normalerweise noch hinzukommen, durch das Wechseln zwischen den Gelenken bei diesem Experiment durch die Ansteuerung durch den Rechner gar nicht berücksichtigt wurden. Außerdem sind die Manipulatorarme der Konkurrenzsysteme deutlich langsamer in ihren Gelenkgeschwindigkeiten, wodurch noch mal die Arbeit verlangsamt wird. Außerdem hilft die Stereosicht auf das zu greifende Objekt enorm bei der Entfernungseinschätzung, sodass innerhalb weniger Minuten selbst komplexe Szenarien bewältigt werden können.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses Beitrags wurde aufgezeigt wie stark die Verwendung von Telepräsenztechnologie bei der Robotersteuerung die Leistung des Roboters steigert. Erstmals ist es bei diesem Roboter gelungen diese Art der Ansteuerung für einen Entschärfungsroboter zu verwenden und dort in Verbindung mit Stereovision dem Bediener eine einfache Steuerung und 3D Sicht auf das Objekt anzubieten.

Mittels Head-Tracking ist erstmals bei Entschärfungsrobotern ein intuitives Aufklären von Räumen und Gebäuden möglich, und durch das Hand-Tracking lassen sich Greifaktionen zum Aufnehmen von Objekten durch den Bediener in einer viel effizienteren Art und Weise realisieren, da der Bediener auf seine eigenen Fähigkeiten zurückgreifen kann und nahezu so greifen kann, als wenn er selber vor Ort mit seiner eigenen Hand das Objekt aufnehmen würde. Somit ist es jetzt gelungen die Telepräsenztechnologie nicht nur bei stationären Systemen, wie in der Medizintechnik, sondern auch bei mobilen Systemen, welche für outdoor Einsatzumgebungen ausgelegt sind, auf diese Art der Steuerung zurückzugreifen und somit die Effektivität solcher Roboter signifikant zu steigern, da der Entschärfungsvorgang deutlich verkürzt werden kann.

6. LITERATUR

- [1] Casavola, A. Mosca, E., Papini, M., "Predictive Teleoperation of Constrained Dynamic Systems Via Internet-Like Channels", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 681-693, Juli 2006
- [2] Sheridan, T. B., "Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 5, pp. 592-606, Okt. 1993
- [3] Lee, D., Spong, M.W., "Passive Bilateral Teleoperation With Constant Time Delay", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 22, No. 2, pp 269-281, Apr. 2006
- [4] Schilling, R. J., "Fundamentals of Robotics – Analysis & Control", Prentice-Hall International (UK) Limited, London, 2002
- [5] Craig, J. J., "Introduction to robotics: mechanics and control", 2. Auflage, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989
- [6] Fink, B., "Einführung in die Robotik I", Fachbereich Maschinenbau/Fachgebiet Mechatronik, Universität Duisburg, http://www.mechatronik.uni-duisburg.de/multimedia/robotik1/robo_1.html
- [7] Kopfstedt, T., Mukai, M., Fujita, M., Sawodny, O., „A Networked Formation Control for Groups of Mobile Robots using Mixed Integer Programming“, IEEE International Conference on Control Applications, München, 4-6 Okt. 2006
- [8] Bellingham, J., Richards, A., How, J., "Receding Horizon Control of Autonomous Aerial Vehicles", American Control Conference, pp. 3741-3746, 8-10 Mai 2002