

Arbeitsraumanalyse als Grundlage der Zugangsplanung

J. Hutzl¹, M. Kunze¹, H. Wörn¹,
¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Karlsruhe, Deutschland

Kontakt: Jessica.Hutzl@kit.edu

Abstract:

Zu Beginn einer laparoskopischen Operation stellt sich die Frage, an welcher Stelle am Patienten die Trokare für den Zugang der Instrumente und des Endoskops gesetzt werden. Die Wahl der Platzierung ist entscheidend für den Verlauf der Operation, beispielsweise um zu verhindern, einen weiteren Trokar platzieren zu müssen, da eine anatomische Struktur nicht erreicht werden kann. Dieser Beitrag beschreibt eine Methode der Arbeitsraumanalyse eines Robotersystems mit einem redundanten Freiheitsgrad bei einer gegebenen Trokarposition. Dabei steht die Erreichbarkeit von Position und Orientierung im Vordergrund. Ein selbst entwickeltes motorisiertes laparoskopisches Instrument sitzt auf dem Endeffektorflansch und wird für Telemanipulationseingriffe experimentell verwendet. Neben der Zielpose des Instruments wird auch die Konfiguration der Startpose des Roboters untersucht, über deren Variation zusätzlich die Bewegungsfreiheit des Roboters bei einem festgelegten Pivotpunkt verändert werden kann. Das entwickelte System dient als Grundlage zur Positionsoptimierung des Trokars im Bereich der erreichbaren Zielregionen.

Schlüsselworte: Laparoskopie, roboter-unterstützte Chirurgie, Medizininformatik, Arbeitsraumanalyse, Zugangsplanung

1 Problemstellung

Bei minimal-invasiven Eingriffen werden mindestens drei Zugänge benötigt um eine Operation durchzuführen. Dabei werden ein Trokar für die Endoskopkamera und mindestens zwei weitere Trokare für die minimal-invasiven Arbeitsinstrumente, wie beispielsweise eine Faszange und eine Schere, verwendet. Weitere Zugänge müssen am Patienten gesetzt werden, wenn ein Assistenzarzt den Chirurgen unterstützen muss oder wenn der gewünschte Bereich mit dem aktuell genutzten Trokar nicht erreichbar ist.

Roboter-unterstützte Operationen sollen Vorteile hinsichtlich der Mortalität und Morbidität bringen, aber auch der Ergonomie nützen. Das kommerziell vertriebene und zugelassene Robotersystem daVinci® von der Firma Intuitive Surgical wird über eine Masterkonsole telemanipuliert. In der Arbeit von Weede et al. [2] wird eine Lösung zur Portplanung präsentiert, welche die Einschränkungen des schweren und sperrigen daVinci® Roboters berücksichtigt. Eine konkrete Arbeitsraumanalyse wird jedoch nicht durchgeführt. Auch Adhami et al. [4] und Feuerstein et al. [6] beschäftigen sich mit der Zugangsoptimierung. Einschränkungen, die sich durch den Roboter (daVinci®) ergeben, werden nicht dargestellt. Das Institut für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte den Roboter MIRO [5] und die dazugehörigen Instrumente MICA [5]. Insgesamt besitzt das System zehn Freiheitsgrade. Für eine Setup-Optimierung werden von Hagn et al. [5] wichtige Merkmale definiert. Die Berechnung des Arbeitsraums für dieses System (MiroSurge) wurde von Lohmann et al. [1] durchgeführt. Dabei wird in einem Schalenmodell der erreichbare Bereich bei einer gegebenen Trokarposition visuell dargestellt. Ein KUKA LWR4 weist ähnliche mechanische Merkmale wie der Roboter MIRO auf. Mit sieben Freiheitsgraden besitzt er einen redundanten Freiheitsgrad und ist damit flexibler als der daVinci®. Für unsere Untersuchungen verwenden wir einen KUKA LWR4. Ein minimal-invasives Arbeitsinstrument für einen KUKA LWR4 ist nicht käuflich erhältlich und musste daher entwickelt werden. Ein laparoskopisches Instrument wurde hierfür motorisiert (Hutzl et al. [3]) und besitzt zwei Freiheitsgrade. Für diese Konstellation von Roboter (7 Freiheitsgrade) und motorisiertem Instrument (1 Rotationsfreiheitsgrad und die Greifbewegung) wurde der Arbeitsraum mit einer gegebenen Trokarposition noch nicht analysiert und so wurden auch keine Rückschlüsse auf eine optimale Portplatzierung gezogen.

Ein Chirurg, welcher eine minimal-invasive Operation bei einem Patienten plant, kann intuitiv abschätzen, welche Bewegungen notwendig sind, um das Operationsgebiet zu erreichen. Sein eigener Bewegungsraum ist ihm bekannt, der des Roboters ist selbst für erfahrene Nutzer nicht vollständig ersichtlich. Wenn der Operateur oder sein Assistenzarzt den Bewegungsbereich eines Roboters abschätzen muss, ist ein Assistenzsystem wünschenswert, welches ihn bei der Positionierung der Trokare unterstützt.

2 Material und Methoden

Der KUKA LWR4 besitzt vier Torsions- und drei Knickgelenke. Mit seinen sieben Freiheitsgraden hat er die Möglichkeit, seine Endeffektorlage konstant zu halten und dabei den Ellbogen zu bewegen, soweit dies die Einschränkungen durch die Gelenkgrenzen zulassen. Diese Eigenschaft ist besonders hilfreich, wenn sich eine Person Freiraum am Patiententisch schaffen möchte und den Roboterarm bewegen kann ohne dass im Inneren des Patienten die Lage des Endeffektors (Instrument) verändert wird. Da sich die Gelenke nicht um 360° drehen lassen, gibt es Einschränkungen im Bewegungsbereich. Das minimal-invasive Instrument besitzt zwei Freiheitsgrade. Neben der Greifbewegung ist auch die Rotation um die Achse des Schafts möglich. Die Freiheitsgrade des Instruments sind nicht in die inverse Kinematik des Roboters einbezogen.

Als Entwicklungsumgebung wird MATLAB verwendet. Die inverse Kinematik wird analytisch berechnet. Die Durchführung der Berechnung erfolgt als C++ Plug-In, welches unter Visual Studio erstellt wurde und in MATLAB eingebunden werden kann.

Um das Zielgebiet im Körperinneren des Patienten abdecken zu können, muss neben der Erreichbarkeit der Zielposition auch die Orientierung betrachtet werden. Der Trokar reduziert die Orientierung von drei Freiheitsgraden auf einen Freiheitsgrad, welcher der Rotation um den Instrumentenschaft entspricht. Durch die eigenständige Rotation des Instrumentenschafts ist lediglich eine erreichbare Orientierung notwendig, jedoch ist für die Bewertung der Roboterflexibilität die Prüfung verschiedener Orientierungen sinnvoll. Hierzu werden zwölf verschiedene Roboterposen (30° Abstufung) getestet. Es wurden zwei Verfahren betrachtet, welche eine Beschreibung des Arbeitsraums ermöglichen. Beim ersten wird der Rand des Arbeitsraums abgetastet, für das zweite der komplette Arbeitsraum.

Es wurde ein Algorithmus implementiert, der ähnlich dem Rechte-Hand-Algorithmus (Lösungsalgorithmus für Irrgärten), am äußeren Rand der Erreichbarkeitsgrenze entlangläuft. Der von Lohmann et al. [1] beschriebene Algorithmus wurde an die Randbedingungen des verwendeten Systems angepasst und modifiziert. Bei der Prüfung einer Zielpose auf Erreichbarkeit wird analytisch der gesamte Nullraum des Roboters betrachtet.

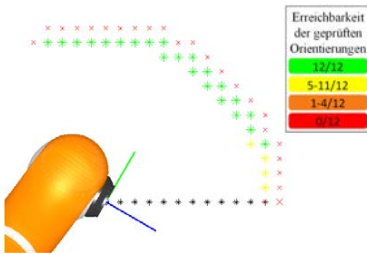


Abbildung 1: Ausschnitt des implementierten Algorithmus

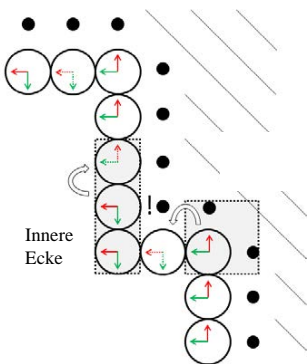


Abbildung 2: Visualisierung des Algorithmus

```

for Iterationsschritte der z-Position
  Phase = 1
  while Weggelänge nicht geschlossen
    Berechne Zielposition
    if Instrumentenlänge ausreichend
      for 12 Orientierungen
        if kein Gelenkansschlag
          Reduziere Erreichbarkeitswert für
            aktuelle Position
        end
      end
    end
  end
  if Phase == 1
    Suche Rand
    -> KS wird entlang der x-Achse verschoben
    Wenn Rand gefunden -> Phase = 2
  end
  if Phase == 2
    //Rechte-Hand-Algorithmus
    if Zielposition erreichbar
      if innere Ecke
        Rotation um die z-Achse
          im Uhrzeigersinn
        end
        KS wird entlang der neg. y-Achse
          verschoben
      else
        Gehe zur letzten Position zurück
        if Äußere Ecke
          KS wird entlang der pos. y-Achse
            verschoben
          schoben
          Rotation um die z-Achse
            gegen den Uhrzeigersinn
          else
            KS wird entlang der pos. x-Achse
              verschoben
            schoben
          end
        end
      end
    end
    z-Position - zInkrement
  end
end

```

Abbildung 3: Pseudocode des verfassten Algorithmus

Für die Berechnung des Arbeitsraums muss die Position des Trokars im Roboter-Basis-Koordinatensystem angegeben werden. Die Größe des Abtastrasters liegt bei 2,5 cm, kann jedoch beliebig verkleinert werden. Der Algorithmus wird zweidimensional auf die x-y-Ebene angewendet. In einer äußeren Schleife werden in z-Richtung die Schichten iteriert. Die allgemeine Startlage befindet sich 5 cm unterhalb der definierten Trokarposition. Das Koordinatensystem wird an die allgemeine Startlage verschoben und wandert in jedem Iterationsschritt mit. Von dort aus wird in Richtung der x-Achse eine Randposition in der x-y-Ebene gesucht (vgl. Abb. 1). Der Algorithmus merkt sich die Startposition. Die x-Achse zeigt die Laufrichtung an. Die negative y-Achse richtet sich gegen die Grenzregion. Als Abfragerihenfolge gilt: Prüfe solange in Richtung der negativen y-Achse bis der Rand erreicht wurde, gehe dann einen Schritt in Richtung der x-Achse. Wenn dies nicht möglich ist, rotiere das Koordinatensystem gegen den Uhrzeigersinn und gehe jetzt einen Schritt auf der x-Achse. Äußere Ecken werden erkannt, wenn ein Schritt in Richtung der positiven x-Achse nicht möglich ist. Eine innere Ecke wird dann detektiert, wenn es möglich ist, zwei Mal in negativer y-Richtung zu gehen. Erst dann wird das Koordinatensystem im Uhrzeigersinn gedreht, wodurch eine doppelte Abtastung des nicht erreichbaren Eckpunktes vermieden wird (vgl. Abb. 2). Der Pseudocode soll den Ablauf veranschaulichen (vgl. Abb. 3). Mit Hilfe des Schalenmodells können die Randpunkte des Arbeitsraums visuell dargestellt werden. Die Farbgebung zeigt von grün bis rot wie viele Orientierungen (diskret) bei einer Position möglich sind. Neben der Erreichbarkeit von Position und Orientierung zeigen sich auch die Auswirkungen der Roboterkonfiguration (vgl. Abb. 4 u. 5). Die Konfigurationen unterscheiden sich bei der Berechnung der analytischen inversen Kinematik in der Vorgabe der Gelenkstellung der Knickgelenke. Es gibt acht verschiedene Konfigurationen. Damit ist eine Einschätzung zur Startkonfiguration möglich. Jedoch sind auch die Bereiche innerhalb des Arbeitsraums interessant, welche aufgrund der Gelenkgrenzen nicht in allen Orientierungen angefahren werden können. Für eine intuitive Umsetzung der Telemanipulation für die Bewegung des Roboterarms müssen alle möglichen Lagen erreichbar sein und nicht durch Gelenkeinschränkungen behindert werden. Dazu wird zusätzlich zur Randregion auch das komplette innere Volumen abgetastet. Zur Berechnung des inneren Arbeitsraums ergeben sich aus der Instrumentenlänge die Grenzen einer äußeren Bounding Box. Mit der Größe des Rasters ergibt sich die geforderte Anzahl an Abfragen. Eine Verbesserung erhält man durch die Anpassung der Bounding Box in jedem Iterationsschritt auf der z-Achse. Die Minimal- und Maximalwerte jeder Ebene werden genutzt um die Bounding Box der nächsten Ebene zu optimieren (vgl. Abb. 7).

3 Ergebnisse und Diskussion

Mit Hilfe des Schalenmodells (vgl. Abb. 4 u. 5) und der optimierten Bounding Box (vgl. Abb. 6) ist es möglich, den Arbeitsraum eines redundanten Roboters darzustellen. Da das Erreichen der Zielregionen einer der wichtigsten Aspekte der Portplanung ist, können die hier präsentierten Verfahren einen wesentlichen Einfluss auf die Trokarposition haben. Außerdem können Rückschlüsse auf die optimale Roboterkonfiguration gezogen werden. In Abbildung 4 und 5 sind zwei unterschiedliche Roboterkonfigurationen dargestellt, welche den gleichen Trokarpunkt besitzen.

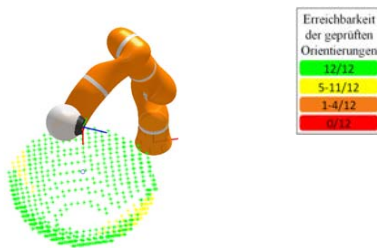


Abbildung 4: Darstellung des Schalenmodells im Pivotpunkt [-350, -350, 250] mm; Alle Gelenkwinkel der Knickgelenke sind positiv.

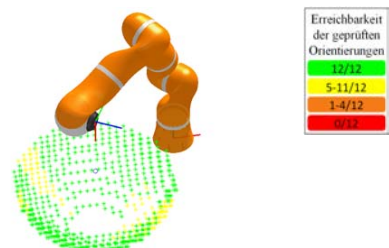


Abbildung 5: Darstellung des Schalenmodells im Pivotpunkt [-350, -350, 250] mm; Gelenkwinkel des Knickgelenks an der Schulter und am Handgelenk sind negativ.

Das Ergebnis der Anpassung der Bounding Box ist in Abbildung 6 und 8 zu sehen. Statt schichtweise den kompletten Raum abzutasten, wird die Information aus der vorherigen Schicht genutzt und damit der abzufragende Bereich verkleinert. Der Erkenntnisgewinn aus der gesamten Arbeitsraumanalyse ist im Gegensatz zum Schalenmodell deutlich höher, da auch die Gebiete im Inneren auf erreichbare Orientierungen geprüft werden. Die Berechnungszeit wächst allerdings enorm. In den Gebieten, wo nur eine geringe Anzahl an Orientierungen möglich ist, darf keine Zielregion liegen. Beim Durchfahren mit einer ungünstigen Orientierung führt dies zum Stehenbleiben des Roboters.

Mit der Einbindung des Rotationsfreiheitsgrads des Instruments kann die Berechnung verschiedener Orientierungen in einer Position hinsichtlich der grundsätzlichen Erreichbarkeit vernachlässigt werden. Dabei wurde jedoch außer Acht gelassen, dass insbesondere bei den kritischen Lagen der zweidimensionale Nullraum betrachtet werden muss. In der präoperativen Planungsphase können aus der Arbeitsraumbeschreibung Informationen gewonnen werden, wie sich der Roboter und das Instrument verhalten können, sodass alle Orientierungen weiterhin optimal erreicht werden können. Vorteilhaft ist, dass das Instrument keine Grenzen bei der Rotation um den Schaft besitzt. Als Kriterium für den Nullraum könnte eine geringe Gelenkbewegung des Roboters oder eine größtmögliche Distanz zu Gelenkanschlüssen definiert werden. Die Evaluation dazu steht noch aus. Im nächsten Schritt soll eine Wissensbasis mit der Arbeitsraumanalyse verknüpft werden. Die Wissensbasis enthält Tracking-Daten der Instrumente aus mehreren Operationen. So soll die Arbeitsraumanalyse genutzt werden, um neben weiteren Merkmalen eine Trokarposition vorzugeben. Die einzelnen Lagen können außerdem eine Gewichtung erhalten, sodass die Position mit einer Wahrscheinlichkeit verbunden werden kann, um schließlich eine präzise Aussage zur Zugangsgangposition treffen zu können.

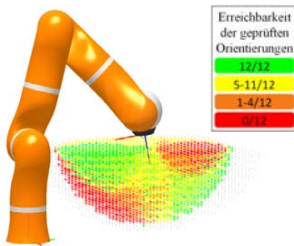


Abbildung 6: Darstellung des gesamten Arbeitsraums

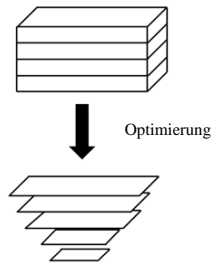


Abbildung 7: Prinzipskizze der Optimierung der Bounding Box

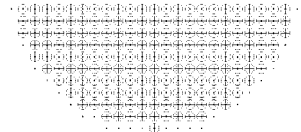


Abbildung 8: Schnittbild der Abb. 5

4 Zusammenfassung

Durch die Visualisierung des Arbeitsraums und die Bewertung der erreichbaren Orientierungen ist ein Werkzeug vorgestellt worden, welches die Basis für weitere Forschung bildet. Sowohl die Roboterkonfiguration, als auch die möglichen Orientierungen, welche vom Roboter ohne Einschränkungen angefahren werden können, werden berücksichtigt. Es wurde vorgeschlagen, wie die Einbindung einer Wissensbasis für die Portplanung und der Regelung des zweiten redundanten Freiheitsgrads zu realisieren ist.

5 Danksagungen

Diese Forschung wurde im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten SFB/TRR 125 „Cognition-Guided Surgery“ (Projekt I05) erstellt.

6 Referenzen

- [1] M. Lohmann, R. Konietschke, A. Hellings, C. Borst, G. Hirzinger, *A workspace analysis method to support intraoperative trocar placement in minimally invasive robotic surgery (MIRS)*, Proc. of CURAC, Düsseldorf, 2012
- [2] O. Weede, M. Mehrwald, H. Wörn, *Knowledge-Based System for Port Placement and Robot Setup Optimization in Minimally Invasive Surgery*, Proc. of IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO), Dubrovnik, 2012
- [3] J. Hutzl, A. Bihlmaier, O. Weede, *An Automated Instrument as Component of a Cognitive Medical Robotic System for Minimal Invasive Surgery*, SMIT, Baden-Baden, 2013
- [4] L. Adhami, É. Coste-Manière, *Optimal Planning for Minimally Invasive Surgical Robots*, IEEE T-MI, 2003
- [5] U. Hagn, R. Konietschke, A. Tobergte, M. Nickl, S. Jörg, B. Kübler, G. Passig, M. Gröger, F. Fröhlich, U. Seibold, L. Le-Tien, A. Albu-Schäffer, A. Nothhelfer, F. Hacker, M. Grebenstein, G. Hirzinger, *DLR MiroSurge: a versatile system for research in endoscopic telesurgery*, Int J CARS, 2010
- [6] M. Feuerstein, T. Mussack, S. M. Heinig, N. Navab, *Intraoperative Laparoscopy Augmentation for Port Placement an Resection Planning in Minimally Invasive Liver Resection*, Proc. of TMI, 2008