

Eine Chirurgenkonsole für MiroSurge

Andreas Tobergte¹, Patrick Helmer², Ulrich Hagn¹,
Sophie Thielmann¹, and Gerd Hirzinger¹

¹ Institut für Robotik und Mechatronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Weßling, Deutschland

² Force Dimension, Nyon, Schweiz

Kontakt: Andreas.Tobergte@dlr.de

Abstract:

In dieser Arbeit wird die neue Eingabekonsolle des Chirurgesystems DLR MiroSurge vorgestellt. Die haptischen Eingabegeräte, Sigma.7, wurden von Force Dimension für diese Konsole, in Kooperation mit dem DLR, entwickelt. Das Sigma.7 verfügt über 7 Motoren, um alle Raumberechtigungsgrade und einen Greifer anzutreiben. Es bietet damit die Möglichkeit zur Rückkopplung von Kräften und Momenten. Die maximalen Kräfte betragen dabei 20 N und die Momente 0.4 Nm im Arbeitsbereich. Durch eine steife Auslegung der Struktur, eine geringe Verkopplung der Trägheiten und eine unterstützende Regelung mit einem integrierten Kraft-/Momentensensor wird eine hohe Transparenz für den Bediener erreicht. Es soll damit ermöglicht werden auch geringe Variationen der Umgebungssteifigkeit zu ertasten, um z.B. einen Tumor zu lokalisieren. Zwei Eingabegeräte, für die linke und rechte Hand, sind ergonomisch günstig angeordnet. Die gesamte Konsole mit haptischen Eingabegeräten und 3D-Bildschirm ist elektrisch höhenverstellbar und kann sitzend oder stehend bedient werden. Die neue Chirurgenkonsole ist voll in das MiroSurge-System am DLR integriert.

Schlüsselworte: Mensch-Maschine-Schnittstelle, Haptik, Telerobotik

1 Einleitung

MiroSurge ist ein prototypisches Robotersystem für die minimal-invasive Chirurgie, welches am DLR entwickelt wurde [1]. Es basiert auf dem universellen Leichtbauroboter MIRO [2] als Instrumententräger. Die Instrumente MICA [3] verfügen über ein Kardangelenke um die volle Bewegungsfreiheit im Patienten herzustellen und einen integrierten Kraft-/Momentensensor an der Instrumentenspitze. Der Sensor misst sechs Kräfte bzw. Drehmomente im Raum und die Greifkraft [4]. Diese können an haptische Eingabegeräte rückgekoppelt und dem Bediener dargestellt werden [5].

Eine wesentliche Komponente in einem Telechirurgiesystem mit Krafrückkopplung sind die haptischen Eingabegeräte. Die Hauptanforderung an ein neues haptisches Eingabegerät ist die vollständige Aktuierung in allen sechs Raumberechtigungsgraden und einem Greifer. Damit ist die Rückkopplung von Manipulationskräften und -momenten möglich. Außerdem können dem Chirurgen mechanisch bedingte Arbeitsraumgrenzen des Instrumentenroboters oder patientenspezifische Sicherheitsgrenzen intuitiv dargestellt werden. Ein haptisches Eingabegerät für MiroSurge sollte zudem einen hohen Grad an Transparenz aufweisen. Transparenz wird als Gütekriterium in der Telerobotik verwendet, um zu beschreiben wie gut man die Umgebung auf der Patientenseite wahrnehmen kann. Der Begriff ist eine Analogie zur Transparenz einer Glasscheibe. Diese wird z.B. beeinträchtigt von Materialeinschlüssen, Schmutz auf der Oberfläche oder Spiegeleffekten. In Analogie zur perfekten Glasscheibe, welche man nicht sieht, spürt man ein ideales haptisches Eingabegerät theoretisch nicht. Praktisch bedeutet das, dass die Eigendynamik des haptischen Geräts möglichst gering sein sollte. Es sollte eine geringe Massenträgheit und gleichzeitig eine hohe Steifigkeit aufweisen. Das Gerät sollte wenig Reibung haben und kein Spiel in der Mechanik aufweisen. Idealerweise sollte es in der Hand des Bedieners statisch und dynamisch ausbalanciert sein, d.h. Kräfte/Momente und Masseträgheiten sollten entkoppelt sein. Diese Entkopplung ist wichtig, weil sonst eine vom Chirurgen eingebrachte Kraft nicht nur zu einer translatorischen, sondern auch zu einer rotatorischen Bewegung des Geräts führt, welche der Chirurg wieder als Moment wahrnimmt. Es ist in diesem Fall nicht möglich, zwischen dem Drehmoment der Eigenbewegung des Geräts und einem Manipulationsmoment im Patienten, welches über die Motoren rückgekoppelt wird, zu unterscheiden. Da die Anforderungen an Aktuierung und Steifigkeit zu relativ hohen Massen und Widerständen der Motoren und der Struktur führen, soll ein Kraft-/Momentensensor integriert werden um die Trägheit und Reibung des Geräts mit einer Regelung zu verringern.

Die Konsole soll so gestaltet sein, dass der Chirurg mit den Händen ergonomisch nah beieinander und unterstützt von einer Armauflage arbeiten kann. Der Arbeitsraum sollte dabei groß genug sein, um einen Knoten mit einer flüssigen Be-

wegung machen zu können, ohne mit dem Fußpedal aus- und einkoppeln zu müssen. Die Konsole sollte sich an die ergonomischen Bedürfnisse des Chirurgen, wie z.B. Körpergröße oder bevorzugte Arbeitshaltung anpassen können, um gesundheitliche Probleme zu vermeiden [6].

In dem MiroSurge-System wurden bis 2009 die kommerziell erhältlichen Omega.7 von Force Dimension verwendet, welche nur 4 von 7 Freiheitsgraden mit Motoren antreiben. Die Konsole war nicht höhenverstellbar. Da keines der kommerziell erhältlichen haptischen Eingabegeräte die Spezifikation des DLR in vollem Umfang erfüllt, wurde eine Kooperation des DLR mit Force Dimension vereinbart. Auf der Automatica 2010 wurde die neue Konsole für MiroSurge mit zwei Sigma.7 nach einjähriger Entwicklungszeit vorgestellt. Die Konsole, mit der Aufhängung der Geräte, wurde am DLR entwickelt. Die haptischen Eingabegeräte Sigma.7 wurden von Force Dimension nach Spezifikation des DLR entwickelt (Abb. 1). Seit 2011 bietet Force Dimension eine modifizierte kommerzielle Version des Sigma.7 an. Diese ist weitgehend baugleich mit der DLR Version, verfügt aber nicht über einen Kraft-/Momentensensor.

Im Folgenden werden das Design, dynamische Eigenschaften und Regelung der MiroSurge-Konsole mit den Sigma.7 vorgestellt.

2 Design der haptischen Eingabegeräte und der Konsole

Die mechatronische Struktur des Sigma.7 besteht aus drei Hauptkomponenten: translatorische Basis, rotatorisches Handgelenk und Greifereinheit. Die translatorische Basis ist als Parallelkinematik mit drei Freiheitsgraden ausgeführt, um mit hoher Steifigkeit Kräfte übertragen zu können [7]. Bei Bewegungen der translatorischen Basis bleibt die Orientierung der Aufhängung des Handgelenks fix. Das Handgelenk ist als serielle Kinematik ausgeführt mit drei sich schneidenden Achsen. Der Achsenschnittpunkt befindet sich dabei immer im zwischen dem Zeigefinger und dem Daumen den Bedieners. Diese Konfiguration führt zu einem Vorteilhaften Verhalten, weil Translationen und Rotationen kinematisch und statisch entkoppelt sind. Der Rotatorische Arbeitsbereich des Handgelenks ist unabhängig von der tanslatischen Basis und bleibt in allen Positionen voll erhalten. Der effektive translatorische Arbeitsraum kann als Kugel mit 120 mm Durchmesser angenähert werden und entspricht etwa dem Arbeitsraum des aufgelegten menschlichen Unterarms. Der Bediener wird an der Arbeitsraumgrenze von den Motoren zurückgestoßen, so dass sich das haptische Eingabegerät immer in der spezifizierten Kugel befindet. Werden die spezifizierten Kräfte nicht im ganzen Arbeitsraum benötigt, so kann dieser vergrößert werden (maximal: 130 mm, 190 mm, 190 mm in x, y, z). Der rotatorische Arbeitsraum ist praktisch nicht begrenzt, da er den Arbeitsraum des menschlichen Handgelenks vollständig abdeckt.

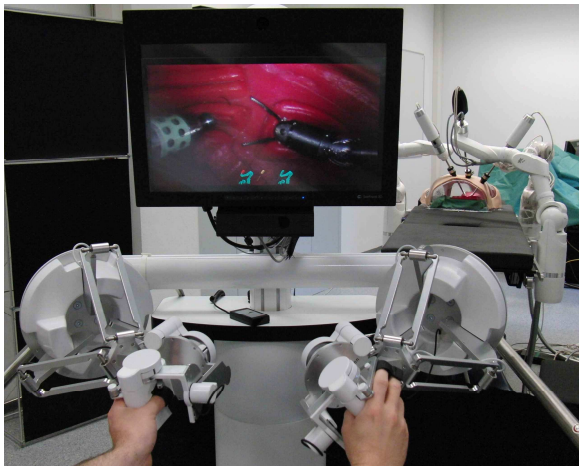


Abb. 1: Bi-manuelle Teleoperation, Roboter mit Instrumenten im Hintergrund

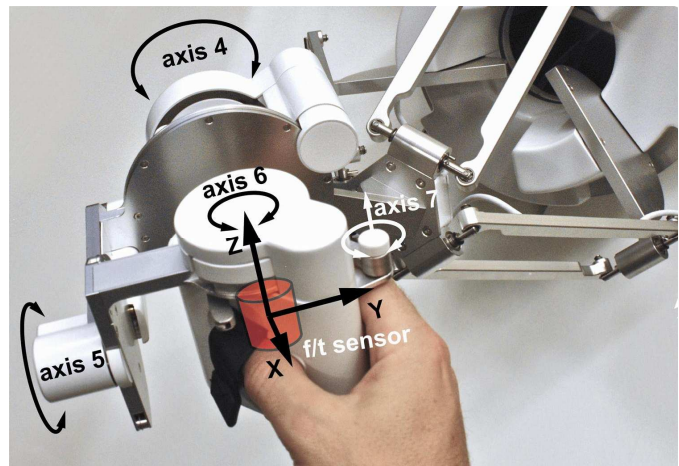


Abb. 2: Achsen 4,5 und 6 des Handgelenks mit Kraft-/Momentensensor im Achsschnittpunkt (HCP)

Die Motoren sind für Kräfte bis 20 N im Arbeitsraum und 0,4 Nm Dauerlast ausgelegt, wie in Tabelle 1 gezeigt.

	Transl. Basis	Handgelenk (Achse 4,5,6)	Handstück mit Greifer
Arbeitsraum	120 mm Durchmesser	235°, 140°, 200°	25mm
Encoderauflösung	0,012 mm	0,013°	0,006mm
Motorkraft/-moment	20 N	400 Nmm	8 N

Tabelle 1: Spezifikation des Sigma.7

Im Schnittpunkt der drei rotatorischen Handgelenksachsen des Sigma.7 (HCP) ist ein Kraft-/Momentensensor (Nano17, ATI Inc., USA) integriert, wie in Abb. 2 gezeigt. Der Sensor bildet die mechanische Schnittstelle zwischen dem Handgelenk und der Greifereinheit. Der Daumen wird an der Greifereinheit fest angelegt, während der Zeigefinger mit dem Greiffreiheitsgrad bewegt wird. Daumen und Zeigefinger werden durch Schlaufen geführt, um den Greifer in beide Richtungen bewegen zu können.

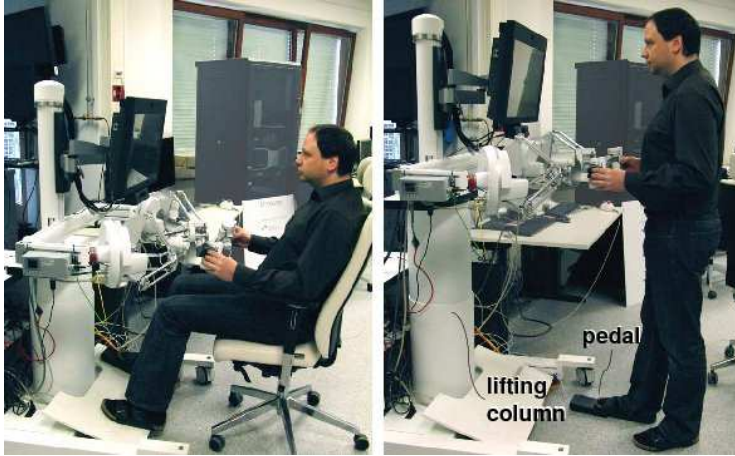


Abb. 3: Sitzender (links) und stehender Betrieb (rechts), Konsole mit zwei Sigma.7, 3D-Monitor, Fußpedal und Hubsäule

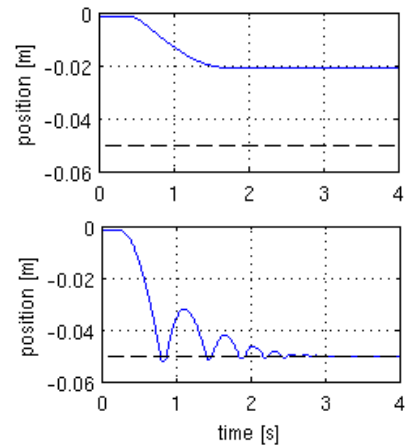


Abb. 4: Reibungsreduktion bei externer Last (0,6 N), oben ohne Regelung, unten mit Regelung

Die Konsole integriert zwei Sigma.7, einen autostereoskopischen 3D-Bildschirm, Fußpedale und eine elektrische Hubsäule (Abb. 3). Der 3D-Bildschirm ermöglicht es dem Bediener seinen Kopf zu bewegen. Anders als bei binokularen Displays ist keine fixierte Kopfposition erforderlich. Dadurch kann der Chirurg besser mit dem OP-Personal kommunizieren und seine Sitzposition variieren. Die Konsole kann an verschiedene Körpergrößen und Arbeitshaltungen angepasst werden. Die elektrische Höhenverstellung erlaubt auch eine Bedienung in stehender Position. Der Monitor ist separat verstellbar. Mit den Fußpedalen kann die Kopplung der Eingabegeräte mit den Instrumenten bzw. dem Endoskop gesteuert werden.

3 Dynamik und Regelung

In der haptischen Interaktion wird der Greifer als separater, funktionaler Freiheitsgrad betrachtet, wobei der Schnittpunkt der rotatorischen Achsen (HCP) zwischen Daumen und Zeigefinger als Referenzpunkt für die Bedienerinteraktion genommen wird. In der Jacobimatrix (Partielle Ableitung der Kartesischen Geschwindigkeit nach den Gelenkgeschwindigkeiten) für diesen Punkt sieht man die kinematische und statische Entkopplung der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade. Die 6x6 Matrix ist mit zwei 3x3 Matrizen, je eine Matrix für die translatorische Basis und eine Matrix für das rotatorische Handgelenk des Geräts vollständig beschrieben. Eine Kraft muss daher nicht mit den Motoren des Handgelenks abgestützt werden, wie dies bei vielen Geräten mit einem stiftartigen Griffstück der Fall ist. Es können damit große Kräfte und kleine Momente gleichzeitig dargestellt werden. Die dynamische Verkopplung sieht man in der Trägheitsmatrix für die Achsen 1 bis 6. Die Trägheitsmatrix ist in der nominalen Position näherungsweise diagonal, wobei die Nicht-Diagonalelemente etwa eine Größenordnung kleiner sind als die Diagonalelemente. Eine vom Bediener eingebrachte Kraft führt daher fast ausschließlich zu einer Bewegung in die Richtung dieser Kraft. Die geringe Verkopplung durch die Nicht-Diagonalelemente ist kaum spürbar.

Eine Reduktion der vom Bediener wahrgenommenen Massenträgheit und Reibung wurde durch eine Regelung mit dem Kraftsensor realisiert. Die Regelung kann physikalisch interpretiert werden, als eine Skalierung der Trägheit und Reibung zwischen den Motoren und dem Sensor. Dadurch wird das haptische Eingabegerät leichtgängiger und der Bediener sensibler für kleine Änderungen in der Umgebungssteifigkeit. Die Krafrückkopplung wird also weniger von der Eigendynamik des Eingabegerätes überlagert und die Transparenz wird erhöht. Es kann theoretisch gezeigt werden, dass die Regelung zu einem passiven Verhalten der verkoppelten nicht-linearen Mechanik im geschlossenen Regelkreis führt.

Es wurden zwei Experimente in der z-Achse (Vertikalen) gemacht. Beide Experimente werden zuerst ohne und dann mit der Kraftregelung durchgeführt, wobei die Schwerkraft immer kompensiert ist. Der Skalierungsfaktor beträgt 0,5, d.h. Massenträgheit und Reibung werden durch die Regelung halbiert. Im ersten Experiment regt der Bediener das Eingabegerät mit einer Sinusförmigen Bewegung an, zunächst ohne die Regelung und dann mit der Regelung. Vergleicht man

das Verhältnis von Geschwindigkeit zu benötigter Kraft der beiden Durchgänge, so halbiert es sich. Man braucht also bei gleicher Geschwindigkeit nur die halbe Kraft. Der experimentell ermittelte Skalierungsfaktor von 0,498 entspricht dem theoretischen Erwartungswert von 0,5.

In einem zweiten Experiment wird der Vorteil der Reibungsskalierung gezeigt. Bei einer externen Last von 60 Gramm fällt das Griffstück wegen der Schwerkraft zunächst nach unten und wird dann durch Reibung bis zum Stillstand abgebremst (Abb. 4, oben). Mit der Regelung fällt das Gerät mit zunehmender Geschwindigkeit nach unten bis es von einer virtuellen Wand zurückgestoßen wird, um schließlich in einem stabilen Kontakt mit der virtuellen Wand zur Ruhe zu kommen (Abb. 4, unten). Die Experimente zeigen, dass Trägheit und Reibung mit der Regelung effektiv reduziert werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Chirurgenkonsole für das MiroSurge-System am DLR vorgestellt. Für die Konsole wurde ein neues haptisches Eingabegerät, Sigma.7, von Force Dimension, in Kooperation mit dem DLR, entwickelt. Die gesamte Konsole ist höhenverstellbar um sich der Ergonomie des Bedieners anpassen zu können. Die Eingabegeräte verfügen über sieben angetriebene Freiheitsgrade um Kräfte, Momente und die Greifkraft darstellen zu können. Die geringe mechanische Verkopplung, sowie eine regelungstechnische Reduktion von Massenträgheit und Reibung, sorgen für eine sehr hohe Transparenz der haptischen Eingabegeräte.

Die Konsole ist voll in MiroSurge integriert und in Zukunft soll das Robotersystem mit Chirurgen evaluiert werden. Fragenstellungen ergeben sich dabei unter Anderem aus dem Konsolendesign mit dem offenen 3D-Monitor, sowie der Ergonomie mit Höhenverstellung und Unterarmauflage. Eine zentrale Rolle spielt auch die Weiterentwicklung und Erprobung der Kraftrückkopplung in MiroSurge mit den Sigma.7.

5 Referenzen

- [1] Hagn, U. and Konietschke, R. and Tobergte, A. and Nickl, M. and Jörg, S. and Kuebler, B. and Passig, G. and Gröger, M. and Fröhlich, F. and Seibold, U. and Le-Tien, L. and Albu-Schäffer, A. and Nothelfer, A. and Hacker, F. and Grebenstein, M. and Hirzinger, G., DLR MiroSurge - A Versatile System for Research in Endoscopic Telesurgery, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Springer, 2009
- [2] Hagn U. and Nickl M. and Jörg S. and Passig G. and Bahls T. and Nothelfer A. and Hacker F. and Le-Tien L. and Albu-Schäffer A. and Konietschke R. and Grebenstein M. and Warpup R. and Haslinger R. and Frommberger M. and Hirzinger G., The DLR MIRO: A versatile lightweight robot for surgical applications, *Industrial Robot*, 2008
- [3] Thielmann, S. and Seibold, U. and Haslinger, R. and Passig, G. and Bahls, T. and Jörg, S. and Nickl, M. and Nothelfer, A. and Hagn, U. and Hirzinger, G., MICA - A new generation of versatile instruments in robotic surgery, *Proceedings of IROS'10, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010
- [4] Seibold, U. and Kuebler, B. and Hirzinger, G., Prototypic force feedbackinstrument for minimally invasive robotic surgery, *Medical Robotics, I-Tech Education and Publishing*, 2008
- [5] Tobergte, A. and Passig, G. and Kübler, B. and Seibold, U. and Hagn, U. and Fröhlich, F. and Konietschke, R. and Jörg, S. and Nickl, M. and Thielmann, S. and Haslinger, R. and Gröger, M. and Nothelfer, A. and Le-Tien, L. and Gruber, R. and Albu-Schäffer, A. and Hirzinger, G., MiroSurge - Advanced User Interaction Modalities in Minimally Invasive Robotic Surgery, *PRESENCE - Teleoperators and Virtual Environments*, MIT Press, 2010
- [6] Park, A. and Lee, G. and Seagull, F. and Meenaghan, N. and Dexter, D., Patients Benefit While Surgeons Suffer: An Impending Epidemic, *Journal of the American College of Surgeons*, 2010
- [7] Grange, S. and Conti, F. and Rouiller, P. and Helmer, P. and Baur, C., The Delta Haptic Device, *Mechatronics* 2001