

Eine Chirurgenkonsole für MiroSurge

AndreasTobergte¹, 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 Eingabekonzole des Chirurgesystems MiroSurge vorgestellt. Die Konzole integriert zwei haptische Eingabegeräte, Sigma.7, welche von Force Dimension für das DLR entwickelt wurden. Das Sigma.7 verfügt über 7 Motoren um alle Raumberechtigkeitsgrade und einen Greifer aktiv 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 Konzole mit haptischen Eingabegeräten und 3D-Bildschirm ist elektrisch höhenverstellbar und kann sitzend oder stehend bedient werden. Die neue Chirurgenkonzole ist voll in das MiroSurge-System am DLR integriert.

Schlüsselworte: Robotik, Konzole, Haptik, Regelung

1 Einleitung

MiroSurge ist ein prototypisches Robotersystem für die minimal-invasive Chirurgie, welches am DLR aufgebaut wurde [1]. Es verwendet den 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. Momente 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. Ein geeignetes haptisches Eingabegerät für MiroSurge sollte leicht sein, eine geringe Massenträgheit und gleichzeitig eine hohe Steifigkeit aufweisen. Es sollte in allen sechs Raumberechtigkeitsgraden und einem Greifer angetrieben sein. Idealerweise sollte es in der Hand des Bedieners statisch und dynamisch ausbalanciert sein. Ein integrierter Kraft-/Momentensensor ist erforderlich um die Dynamik des Geräts mit einer Regelung zu modifizieren. Die haptischen Eingabegeräte sollten außerdem in eine Konzole integrierbar sein, so 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 Bewegung machen zu können. Die Konzole sollte sich an die ergonomischen Bedürfnisse des Chirurgen, wie z.B. Körpergröße oder bevorzugte Arbeitshaltung anpassen können, um gesundheitliche Probleme zu vermeiden [6].

Da keines der kommerziell erhältlichen haptischen Eingabegeräte die gewünschten Anforderungen erfüllt, wurde von Force Dimension das Sigma.7 nach Spezifikation des DLR 's entwickelt (Abb. 1). Die Konzole mit der Aufhängung der Geräte, der Armablage und der Bildschirmorientierung wurde am DLR entworfen.

2 Design der haptischen Eingabegeräte und der Konzole

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 Bediener.

Diese Konfiguration führt zu einem Vorteilhaften Verhalten, weil Translationen und Rotationen kinematisch und statisch entkoppelt sind. Eine Kraft muss daher nicht mit den Drehmomenten 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. 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 (Abb. 2) und entspricht etwa dem Arbeitsraum des aufgelegten menschlichen Unterarms. Der rotatorische Arbeitsraum ist praktisch nicht begrenzt, da er größer ist als der Arbeitsraum der menschlichen Hand.

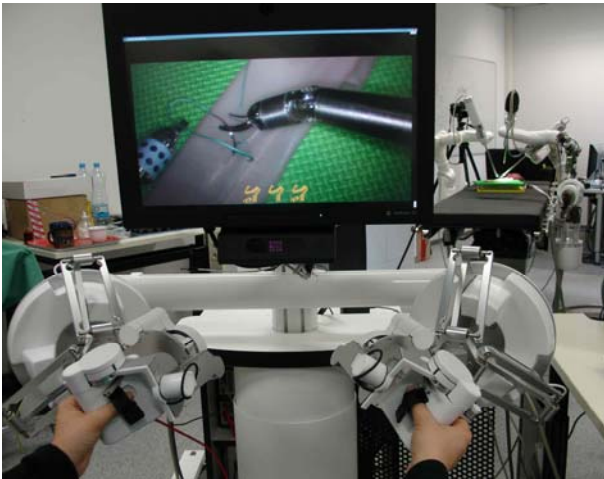


Abb. 1: Bi-manuelle Teleoperation, Roboter mit Instrumenten im Hintergrund

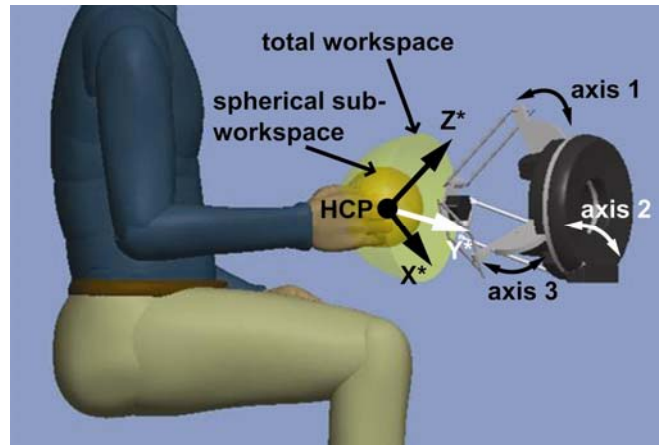


Abb. 2: Translatorischer Arbeitsraum (Achse 1,2,3) des Sigma.7

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

	Transl. Basis (x,y,z)	Handgelenk (Achse 4,5,6)	Handstück mit Greifer
Arbeitsraum	130 mm, 190mm, 190mm	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 Handgelenksachsen (HCP) ist ein Kraft-/Momentensensor (Nano17, ATI Inc., USA) integriert, wie in Abb. 3 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.

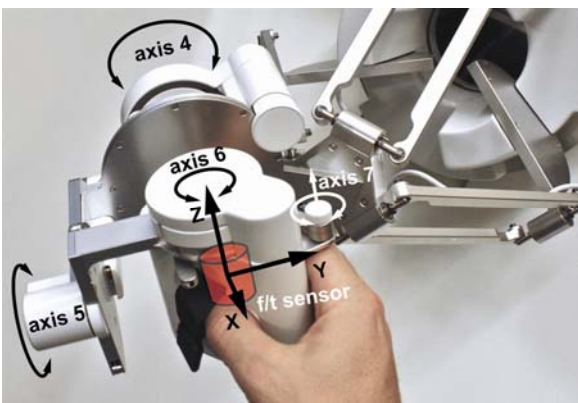


Abb. 3: Achsen 4 bis 6 des Handgelenks mit Kraft-/Momentensensor in Achsschnittpunkt

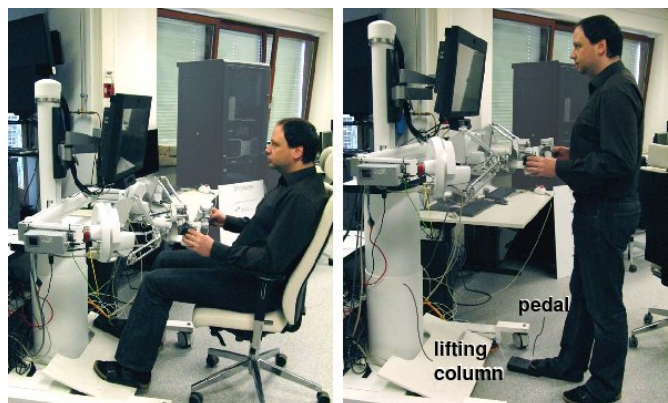


Abb. 4: Sitzender und Stehender Betrieb

Die Konsole integriert zwei Sigma.7, einen autostereoskopischen 3D-Bildschirm und Fußpedale. 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. Die Verstellung mittels Knopfdruck dauert maximal 4 Sekunden. 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 der Gelenkgeschwindigkeit) für diesen Punkt sieht man die kinematische Entkopplung der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade. Betrachtet man die Massenmatrix in der nominalen Position (der Arbeitsraummitte), so sieht man eine schwache dynamische Verkopplung aller sechs translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade (Abb. 5). Die Massenmatrix, im Gelenkraum ausgedrückt, ist näherungsweise diagonal, wobei die Nicht-Diagonalelemente etwa eine Größenordnung kleiner sind als die Diagonalelemente.

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

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_l(\boldsymbol{\theta}) &= \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{l,tt}(\boldsymbol{\theta}) & \mathbf{M}_{l,tr}(\boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{M}_{l,tr}(\boldsymbol{\theta})^T & \mathbf{M}_{l,rr}(\boldsymbol{\theta}_r) \end{pmatrix} \\
 \mathbf{M}_{l,tt,0} &= \begin{pmatrix} 8.6989 & -1.2139 & -1.2139 \\ -1.2139 & 8.6989 & -1.2138 \\ -1.2139 & -1.2138 & 8.6989 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{M}_{l,rr,0} &= \begin{pmatrix} 1.4278 & -0.0240 & 0.0194 \\ -0.0240 & 0.5019 & 0.0000 \\ 0.0194 & 0.0000 & 0.2333 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{M}_{l,tr,0} &= \begin{pmatrix} 0.9161 & 0.3561 & -0.1242 \\ -0.4496 & -0.0370 & 0.08168 \\ -0.6282 & -0.1851 & -0.3302 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

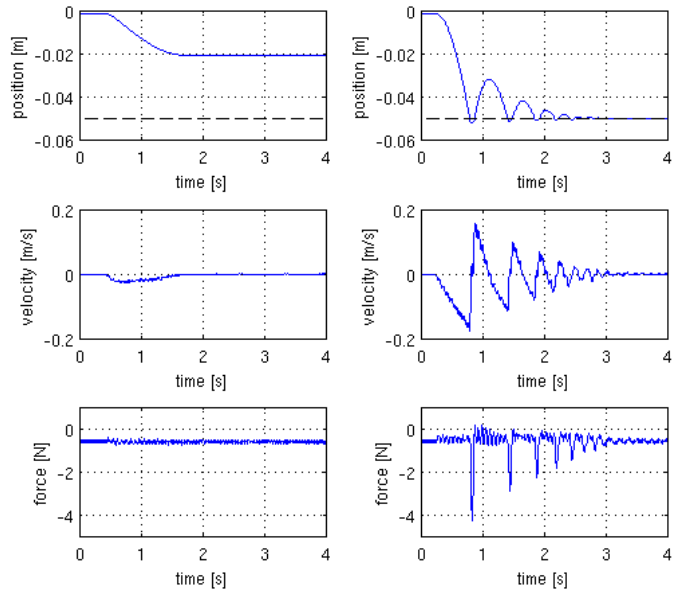


Abb. 5: Trägheitsmatrix des Sigma.7 in Gelenkkoordinaten (Einheit: $g \cdot m^2$) in der Arbeitsraummitte

Abb. 6: Reibung mit geringer externer Last (60 Gramm), links ohne Regelung, rechts mit Regelung

Es wurden zwei Experimente in der z-Achse (Vertikalen) gemacht. Beide Experimente werden zuerst ohne und dann mit der Kraftregelung durchgeführt, wobei das Eigengewicht durch die Schwerkraft der Sigma.7 immer mit den Motoren 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 ohne die Regelung und wiederholt die Bewegung mit der Regelung möglichst genau in Frequenz und Amplitude. 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 kommt dann durch Reibung bis zum Stillstand abgebremst. 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. 6, rechts). Die Reibung wird also effektiv reduziert.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Chirurgenkonsole für das MiroSurge-System am DLR vorgestellt. Diese basiert auf dem neuen haptischen Eingabegerät Sigma.7, welches von Force Dimension im Auftrag und nach Spezifikation des DLR entwickelt wurde. Die gesamte Konsole ist höhenverstellbar um sich der Ergonomie des Bedieners anpassen zu können. Die Eingabegeräte verfügen über sieben angetriebenen Freiheitsgrade um Kräfte, Momente und die Greifkraft darstellen zu können. Eine geringe mechanische Verkopplung der Freiheitsgrade sorgt dafür, dass sich Bewegungen kaum von einem Freiheitsgrad auf einen Anderen übertragen. Eine Regelungstechnische Reduktion von Massenträgheit und Reibung mit einem integrierten Kraft-/Momentensensor sorgt zusätzlich für eine besondere Leichtgängigkeit der haptischen Eingabegeräte.

Die Chirurgenkonsole ist voll in MiroSurge integriert. In Zukunft soll das Chirurgierobotersystem mit der Konsole evaluiert werden. Fragenstellungen ergeben sich dabei unter anderem aus dem Konsolendesign mit dem offenen 3D-Monitor, sowie der Ergonomie mit Höhenverstellung, Unterarmauflage und Auswahl eines Stuhls. 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 Nothhelfer 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] Sophie Thielmann and Ulrich Seibold and Robert Haslinger and Georg Passig and Thomas Bahls and Stefan Jörg and Mathias Nickl and Alexander Nothhelfer and Ulrich Hagn and Gerd Hirzinger, MICA - A new generation of versatile instruments in robotic surgery, *Proceedings of IROS'10, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010
- [4] U. Seibold and B. Kuebler and G. Hirzinger, Prototypic force feedbackinstrument for minimally invasive robotic surgery, *Medical Robotics*, I-Tech Education and Publishing, 2008
- [5] Andreas Tobergte and Georg Passig and Bernhard Kübler and Ulrich Seibold and Ulrich Hagn and Florian Fröhlich and Rainer Konietschke and Stefan Jörg and Mathias Nickl and Sophie Thielmann and Robert Haslinger and Martin Gröger and Alexander Nothhelfer and Luc Le-Tien and Robin Gruber and Alin Albu-Schäffer and Gerd Hirzinger, MiroSurge - Advanced User Interaction Modalities in Minimally Invasive Robotic Surgery, *PRESENCE - Teleoperators and Virtual Environments*, MIT Press, 2010
- [6] Adrian Park and Gysung Lee and F. Jacob Seagull and Nora Meenaghan and David Dexter, 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