S. Tauscher, A. Fuchs, L. A. Kahrs, T. Ortmaier

Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Kontakt: Sebastian.Tauscher@imes.uni-hannover.de

Abstract:

In dieser Arbeit wird ein Versuchsstand mit einem Leichtbauroboter und einem hochfrequenten Lokalisationssystem vorgestellt, der zur Untersuchung des Regelverhaltens für potentielle Anwendungen im Bereich der roboterassistierten Chirurgie verwendet werden kann. Roboter mit einem hohen Regeltakt sollten für eine geeignete und schnelle Lageregelung ein Lokalisationssystem mit ebenfalls hoher Aktualisierungsfrequenz verwenden. Dies gilt besonders für ein automatisches Nachführen von chirurgischen Werkzeugen (Visual-Servoing), wenn der Patient sich während der Operation bewegt oder bewegt wird. Unsere Untersuchungen zeigen eine vielversprechende Reduzierung der Totzeit des Robotersystems gegenüber voran gegangener Experimente sowie die Möglichkeit zur Beeinflussung und Reduzierung der Zeit, bis das System die Soll-Position erreicht hat (Einschwinzzeit).

Schlüsselworte: Visual-Servoing, Regelung, Tracking, Leichtbauroboter

1 Problemstellung

Trotz einer großen Anzahl von laufenden und abgeschlossenen Forschungsprojekten im Bereich der roboterassistierten Chirurgie, konnten bisher nur wenige Systeme einen kommerziellen Erfolg erzielen. Für (teil-)autonome Systeme kann als ein Grund die unzureichende Genauigkeit postuliert werden. Eine potentielle klinische Anwendung ist das roboterassistierte Anlegen eines minimal invasiven Bohrkanals zur Cochleaimplantation [1,2]. Zur Optimierung eines solchen Systems werden oft externe Messysteme zur Positionsbestimmung verwendet, um einen geschlossenen Regelkreis aufzubauen [3]. Insbesondere in der Medizin bzw. navigierten Chirurgie zählen optische Lokalisationssysteme zu den weitverbreitetsten Messgeräten [4].

Bei der Verwendung eines optischen Lokalisationssystems zur sensorbasierten Lageregelung stellt die geringere Taktzeit der Kamerasysteme im Vergleich zum Regeltakt eines Roboters ein zusätzliches Problem dar [5,6]. Die Aktualisierungsrate der meisten in der Medizin eingesetzten Lokalisationssysteme wie Polaris (NDI) liegen bei max. 60 Hz. Die Taktzeit einer Roboterregelung liegt hingegen im Bereich von bis zu 1 kHz. Durch moderne, hochfrequente optische Messysteme zur Bewegungs- und Ganganalyse wird eine Datenakquise im Bereich von mehreren hundert Hertz ermöglicht. Weiterhin kann durch die Verwendung von einer größeren Anzahl von Kameras die Verdeckung von Markern vermieden und somit das Line-of-Sight-Problem verringert werden. In dieser Arbeit werden unsere Erfahrungen mit einem hochfrequenten Lokalisationssystem für die Lageregelung in der roboterassistierten Chirurgie vorgestellt und im Speziellen das Regelverhalten einer Visual-Servoing-Anwendung unter Verwendung eines solchen Systems untersucht.

2 Material und Methoden

2.1 Hardware

Als optisches Lokalisationssystem stehen sechs Kameras (Oqus 4, Qualisys, Göteborg, Schweden) zur Verfügung, die zur Vermeidung von Markerverdeckungen und zur Maximierung des nutzbaren Arbeitsraumes deckenseitig im Halbkreis montiert sind. Je nach Anordnung und Arbeitsraum bietet das System bei maximaler Auflösung eine Wiederholrate von bis 480 Hz bei einer Genauigkeit von bis zu 0,1 mm. Des Weiteren kommt ein redundanter Leichtbauroboter (LBR 4, KUKA GmbH, Augsburg) zum Einsatz, der eine Momentensensorik in jedem Gelenk und die Möglichkeit zur Nullraumbewegung durch eine siebte Achse, vergleichbar zum menschlichen Ellenbogengelenk, hat. Der Roboterendeffektor (ausgestattet mit einem Pointer) und ein Testkörper, der den Patient repräsentiert, sind mit Markersternen versehen, sodass jeweils Lagemesswerte des Kamerasystems zur Verfügung stehen. Für diese Untersuchungen wurde eine Wiederholrate des Kamerasystems von 250 Hz (4 ms-Takt) gewählt. Zunächst erfolgt eine punktbasierte Registrierung der Komponenten zueinander durch Antasten künstlicher Landmarken am Patienten mit dem Pointer-Tool. Hierbei wird die Möglichkeit zur manuellen Führung des LBR ausgenutzt. Die Steuerung des LBR bietet über das Fast Research Interface (FRI) die Möglichkeit zur Kommandierung von Gelenkwinkel-Sollwerten bzw. zur Messwertaufnahme mit bis zu 1 kHz über eine UDP-Ethernet-Schnittstelle. Als Prozess-PC wird ein Standardrechner mit Linux-Betriebssystem eingesetzt. Dieser ist mittels RealTime Application Interface (RTAI, www.rtai.org) erweitert und erlaubt somit den Ablauf der Regelung in Echtzeit. Zur Entwicklung der Reglerstruktur wird zusätzlich das OpenSource Softwarepaket EtherLab[®] (IgH, Essen) installiert, wodurch die Erstellung echtzeitfähiger Anwendungen aus Simulink-Modellen ermöglicht wird. Diese laufen auf Kernel-Ebene, erfüllen harte Echtzeitanforderungen und werden von einem weiteren Steuer-PC auf den Prozess-PC übertragen. Separate Netzwerkkarten des Prozess-PCs empfangen die Lokalisations- sowie die Robertdaten und führen diese dem Kernelmodul der Regelung zu. Die generierten Sollwerte werden ebenso zurück an den Roboter übermittelt. Es wird ein Regeltakt von 2 ms (500 Hz) gewählt. In Abb.1 ist der aktuelle Versuchsstand dargestellt.



Abbildung 1: Komponenten und Kommunikation des aktuellen Versuchsstandes.

2.2 Reglerstruktur

Die aus der Registrierung ermittelten Transformationsmatrizen ^{Rob}T_{CAD} und ^{Kam}T_{CAD} erlauben die Darstellung der Roboter-Lage $x_{CAD} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^{T}$ im Koordinatensystem des CAD-Modells des Testkörpers (KS)_{CAD}. Dies geschieht in Anlehnung an eine medizinische Anwendung, bei der medizinische Bilddaten als Planungsgrundlage zu Verfügung stehen. Die Bestimmung der Positionsabweichung $\Delta x_{CAD} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^{T}$ erfolgt im (KS)_{CAD}, während die Rotationsabweichung $\Delta \varphi_{Rob} = (\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)^{T}$ im (KS)_{Rob} erfasst wird. Zur Vermeidung von Problemen wie dem Gimbal Lock bei der Orientierungsberechnung werden die Vorteile der Quaternionendarstellung genutzt. Über die Verkettung der bekannten Koordinatentransformationen berechnet sich

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\chi}_{rob} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{Rob} \boldsymbol{T}_{CAD} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\chi}_{CAD} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Zur Regelung werden zwei getrennte integrierende Glieder mit den Vorfaktoren $K_{i,trans}$ und $K_{i,tot}$ verwendet. Die Umrechnung der kartesischen Reglerausgaben $\Delta \mathbf{x}_{Rob}$ und $\Delta \boldsymbol{\varphi}_{Rob}$ in eine Vorgabe der Gelenkwinkeländerung $\Delta \boldsymbol{q} = (\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_4, \Delta q_5, \Delta q_6, \Delta q_7)^T$ erfolgt mittels pseudoinverser Jacobi-Matrix nach J^+ Moore-Penrose

$$J^{+}(q) = J(q)^{T}[J(q)J(q)^{T}]^{-1},$$

woraus minimale Änderungen der Gelenkstellungen

$$\Delta \boldsymbol{q}_{\min} = , \boldsymbol{J}^{+}(\boldsymbol{q}) \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\chi}_{rob} \\ \Delta \boldsymbol{\varphi}_{rob} \end{bmatrix}$$

resultieren. Diese werden zum aktuellen Sollwert addiert und anschließend an den Roboter kommandiert. Abb. 2 stellt den Regleraufbau vereinfacht schematisch dar. Die Umsetzung der Gelenkwinkel in Sollströme der Motoren erfolgt über eine interne Regelung der Robotersteuerung, welche nicht manipuliert werden kann. Dies geschieht analog zur Mehrzahl der robotischen Systeme.



Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Regelung

2.3 Experimente zur Sprungantwort

Zur Untersuchung des Regelverhaltens wird ein Sollwertsprung _{CAD} Δx_{soll} auf die Sollposition des Roboters _{CAD} x_{soll} im CAD-Koordinatensystem (KS)_{CAD} aufgeschaltet und die Systemantwort _{CAD} x_{soll} für verschiedene Vorfaktoren $K_{i,trans}$ und $K_{i,rot}$ aufgenommen. Da die beiden Vorfaktoren für Rotation und Translation bei allen Messungen jeweils gleich gewählt wurden, wird im Folgenden der Vorfaktore $K_{i,trans}=K_{i,trot}=\{5, 8, 10, 12, 15\}$ verwendet. Anhand dieser Messdaten können charakteristische Kenngrößen des dynamischen Regelverhaltens für das System bestimmt werden, wie die Totzeit T_{tot} , die Einschwingzeit T_{95} , die Ausschwingzeit T_5 und die bleibende Regelabwichung e_{ac} .

Es wurden je n = 10 Sprünge in einem Zeitintervall *t*=60s um { $_{CAD}\Delta x_{Sprung}, _{CAD}\Delta y_{Sprung}, _{CAD}\Delta z_{Sprung}}$ = 5 mm bzw. ${_{CAD}\Delta a_{Sprung,CAD}\Delta \beta_{Sprung,CAD}\Delta \gamma_{Sprung}}$ =3 durchgeführt. Bei der Bestimmung der Totzeit T_{tot} wurde als Schwellwert für eine signifikante Reaktion auf die Sprunganregung ein Verlassen des Toleranzbandes $b=6\sigma(_{CAD}\mathbf{x}_{Ruhe})$ festgelegt, welches bei einer angenommenen Normalverteilung einem Vertrauensintervall von 99,9997% entspricht. Hierbei ist $_{CAD}\mathbf{x}_{Ruhe}$ die von dem Kamerasystem gemessene Lage des Roboters im CAD- Koordinatensystems in Ruhe.

Zur Bewertung der Vorteile der erhöhten Taktrate des Oqus-Systems wird die Wiederholrate der Kameras in einer zusätzlichen Versuchsreihe auf 50 Hz herabgesetzt. Anschließend werden die gleichen Vorfaktoren und Sollwertsprünge analysiert und verglichen.

3 Ergebnisse

Wir haben einen Visual-Servoing-Aufbau mittels hochfrequenter Lokalisationskameras und einem Leichtbauroboter realisiert. Bei allen Messungen war das Systemverhalten stabil. Aus den resultierenden hochfrequenten Messungen wurde die mittlere Totzeit T_{tot} =18,42±4,07 ms des vorgestellten Versuchstandes bestimmt. Die Standardabweichung $\sigma_{T,tot}$ liegt bei $\sigma_{T,tot}$ =4,07 ms, welches einem Taktzyklus der Kameras entspricht. Des Weiteren wurde über alle Messungen die Einschwingzeit T_{95} für die unterschiedlichen Vorfaktoren K_i berechnet, bei der die Istlage $_{CAD}x_{ist}$ 95% der Sprunghöhe h erreicht hat. Bei den durchgeführten hochfrequenten Messungen trat Überschwingen lediglich bei K_i =15 auf, so dass die Ausschwingzeit T_5 ansonsten der Einschwingzeit T_{95} entspricht. Bei erhöhter Taktzeit von 20 ms der Kameras ergibt sich schon bei geringerem K_i = 8 ein deutliches Überschwingen und bei einem K_i = 10 zeigt sich erst nach etwa einer Sekunde ein eingeschwungenes Verhalten. Nur bei einem K_i = 5 tritt kein Überschwingen auf (siehe Tabelle1).

	$K_i = 5$	$K_i = 8$	$K_i = 10$	$K_i = 12$	$K_i = 15$
$T_5 [{ m ms}] (250 { m Hz})$	483,20 ± 23,91	$293,\!09\pm9,\!31$	$244,\!80\pm20,\!72$	$138{,}58\pm9{,}48$	$258,55 \pm 169,7$
$T_5 [{ m ms}] (50 \ { m Hz})$	$420,\!36\pm18,\!28$	$597,\!82\pm235,\!3$	$1082,2 \pm 28,19$	-	-

Tabelle 1: Ausschwingzeit T_5 für $K_i = \{5, 8, 10, 12, 15\}$ bei einem Kamerabetrieb mit 250 Hz und 50 Hz.

Bei dem hochfrequenten Betrieb mit 250 Hz des Kamerasystem kann eine Einschwingzeit $T_{95} = T_5 = 138,58 \pm 9,48$ ms ohne Überschwingen bei einem $K_i = 12$ erreicht werden. Hingegen ist ein bei einer Taktrate von 50 Hz, welches der Taktrate von handelsüblichen Navigationssystemen entspricht, eine Einschwingzeit $T_{95} = T_5 = 420,36 \pm 18,28$ ms erzielt werden. In Abbildung 3 sind exemplarisch die Sprungantwort bei einem $K_i = 10$ für die hoch- und niederfrequente Kamerataktrate dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das Überschwingen und das langsame Einschwingen auf den Sollwert.



Abbildung 3: Sprungantwort (Sollwerte - grau, Istwerte - schwarz) bei einem Regelfaktor $K_l = 10$ bei einem Kameratakt von 50 Hz (links) und 250 Hz (rechts)

4 Diskussion

Ein Vergleich der hier dargestellten Ergebnisse einer Regelung mittels hochfrequenter optischer Navigation mit vorhandenen Systemen wird durch die fehlende Datengrundlage erschwert. Bei bisher in der Literatur beschriebenen Anwendungen ist ein Großteil der auftretenden Verzögerungen komplexen Bildverarbeitungsalgorithmen zur Positionsbestimmung geschuldet (bspw. [7,8]). Die Einschwingzeit der vorliegenden Regelstrecke liegt mit $T_{95} = 138,58 \pm 9,48$ ms deutlich unter den Werten von Vergleichssystemen, die in einem Bereich von bis zu 2Bs liegen. Auch die Versuche mit reduzierter Taktrate bestätigen diese Erkenntnisse. Aufgrund des Überschwingens bei höheren Regelfaktoren K_i konnte hier lediglich eine Einschwingzeit von $T_{95} = 420,36 \pm 18,28$ ms erreicht werden.

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelte Totzeit $T_{tot} = 18,42$ ms liegt deutlich unter der Totzeit von 40 ms eines Vorgängerprojektes [2]. Sie ist im Wesentlichen der Kommunikationsstruktur geschuldet und könnte durch eine direkte Anbindung des Lokalisationssystems an den Roboter weiter verringert werden.

Abschließend ist zu sagen, dass bereits mit einer einfachen PI-Regelung und dem hochfrequenten Kamerasystem ein robustes Systemverhalten erreicht wird. Die durchgeführten Untersuchungen analysieren die funktionalen Abhängigkeiten der Frequenz der Lokalisationskamera, noch nicht die absolute Positioniergenauigkeit des Gesamtsystems. Zur weiteren Optimierung des Regelverhaltens bieten sich aus der Robotik bekannte Verfahren wie eine Geschwindigkeitsvorsteuerung oder die Datenfusionierung mit zusätzlichen Sensorsystemen wie einem Beschleunigungssensor an. Eine weiter Verbesserung des Regelverhaltens wird durch die Kalibrierung des Leichtbauroboters erwartet.

Eine Bewertung der Gesamtgenauigkeit des roboterassistierten Eingriffs steht noch aus. Geplant sind Versuche zur Positioniergenauigkeit beim Setzen von Bohrkanälen. Die hierbei zu gewinnenden Erkenntnisse liefern weitere Hinweise für die Durchführbarkeit beispielsweise einer Chochlear-Operation.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine optisch rückgeführte Regelung eines redundanten Roboters aufgebaut und analysiert. Insbesondere die aus der vergleichsweise hohen Kamerataktrate resultierenden Latenzen wurden untersucht. Im Gegensatz zu vielen etablierten medizinischen Lokalisationssystemen, die mit weniger als 60@Hz arbeiten, wurden deutlich schnellere Reaktionszeiten erreicht. Es wurde gezeigt, dass mit geringem Implementierungsaufwand durch die Verwendung eines hochfrequenten Lokalisationssystems ein gutes Regelverhalten zu erzielen ist.

6 Referenzen

- B. Bell, C. Stieger, N. Gerber, A. Arnold, C. Nauer, V. Hamacher, M. Kompis, L. Nolte, M. Caversaccio, S. Weber, A self-developed and constructed robot for minimally invasive cochlear implantation, Acta Otolaryngol 132:4. pp. 355-360, 2012
- [2] S. Baron, H. Eilers, B. Munske, J.L. Toennies, R. Balachandran, R.F. Labadie, T. Ortmaier, R.J. Webster, *Percutaneous inner-ear access via an image-guided industrial robot system*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, pp. 633-649, 2010
- [3] S. Hutchinson, G.D. Hager, P.I. Corke, A tutorial on visual servo control, IEEE Transactions on Robotics and Automation, pp. 651-670, 1996
- [4] T. Osa, C. Staub, A. Knoll, Framework of automatic robot surgery system using Visual servoing, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1837-1842, 2010
- [5] A. Ranftl, J.V. Sloten, H. Bruyninckx, J. De Schutter, Enhancing Hybrid Force/Velocity Control with Visual Servoing in Robot-Assisted Total Knee Arthroplasty, The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 141-146, 2006

- [6] A. Krupa, C. Doignon, J. Gangloff, M. De Mathelin, Combined image-based and depth visual servoing applied to robotized laparoscopic surgery, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 323-329, 2002
- [7] F. Janabi-Sharifi, L. Deng, W.J. Wilson, Comparison of Basic Visual Servoing Methods, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pp. 967-983, 2011
- [8] I. Siradjuddin, L. Behera, T.M. McGinnity, S. Coleman, A position based visual tracking system for a 7 DOF robot manipulator using a Kinect camera, The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), pp. 1-7, 2012