

Alexander Olk · Wolfgang Maria Franck · Friedrich Frank Hennig
Abteilung für Unfallchirurgie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Stand und Perspektiven der Robotronik in der Unfall- und Wiederherstellungschirurgie

Zusammenfassung

Robotik und Elektronik bestimmen die Arbeitsabläufe unseres heutigen Lebens. Es stellt sich sowohl für unsere Patienten, die überwiegend in diesen Arbeitsabläufen tätig sind, als auch im besonderen Maß für die Mediziner die Frage, inwieweit diese hoch spezialisierten Technologien zum Nutzen des Patienten eingesetzt werden können. Die Entscheidung hierüber darf weder von der Angst des Operateurs durch Maschinen in Frage gestellt noch durch ein nostalgisches Festhalten am vermeintlich hochwertigen Ideal handwerklicher Arbeit bestimmt werden. Ganz sicher sollten Marketing und Werbeaspekte bei dieser Entscheidung keinen Platz finden. Unabdingbare Forderungen, die bei der Einführung neuer Technologien immer gestellt werden müssen, sind, ob der bisherig erreichte Goldstandard gewährleistet ist, ob sich die Methode sinnvoll in bewährten Praktiken integriert und ob die wissenschaftlich fundierten Kenntnisse weiterentwickelt und nicht umgestoßen werden.

Schlüsselwörter

Alloarthroplastischer Gelenkersatz · Robotik · Navigation · Robodoc · Virtuelle Operationsplanung · Qualitätsmanagement

Das Idiom, dass jede Operation so gut ist wie ihre präoperative Planung, bedarf keiner weiteren Interpretation. Ein grundsätzliches Problem der modernen Medizin ist, dass Analyse- und Diagnostikmethoden heutzutage in einer Form präzisiert und intensiviert wurden, die in ihrer therapeutischen Umsetzung bei Weitem nicht die adäquate Antwort findet.

Dies gilt auch für die bildgebenden Verfahren. Diese ermöglichen heute eine dreidimensionale Darstellung des aktiven und passiven Bewegungsapparats, die es uns erlaubt, jede Körper- und Gelenkregion in sich und in relativer Position zum üblichen Skelett genau zu analysieren.

Planung bei Hüftgelenkoperationen

Der Robotik des Hüftgelenks gebührt der Verdienst, dass sie als erste konsequent die dreidimensionale Darstellung des Hüftgelenks in Relation zu den Femurachsen zur Planung nutzte. Sowohl die theoretischen Überlegungen als auch die zahlreichen Erfahrungen der Anwender dieser Technologie zeigen, welchen hohen Informationswert der Operateur hieraus zieht.

Neben der sehr wichtigen Achsenbeurteilung erlaubt die metrische Ausmessung des Markraums eine optimale Auswahl und Positionierung eines geeigneten Implantats im Rahmen der dreidimensionalen, virtuellen, präoperativen „Operation“.

Nicht nur der Sitz des Implantats als Ganzes, sondern auch die differenzierte

Stellung von Implantat und Kortikalis zueinander ist in allen Schnittebenen beurteilbar und planbar. Die Pressfitverankerung im proximalen Abschnitt sowie der kompressionsfreie Kontakt im distalen Abschnitt des Implantats können je nach Implantatauswahl und Dimensionierung gesteuert werden (Abb. 1).

Notwendigkeit des Einsatzes der Computertomographie

Die für diese differenzierte Planung erforderliche computertomographische Untersuchung stellt eine Strahlenbelastung für den Patienten dar, die jedoch in etwa in der Größenordnung der natürlichen Jahresstrahlenbelastung eines jeden Menschen liegt. Dessen ungeachtet muss jedes diagnostische Verfahren auf seine effiziente therapeutische Umsetzung hin überprüft werden.

Vor dem Hintergrund von gut 100.000 überwiegend erfolgreich durchgeführten Primärimplantationen von künstlichen Hüftgelenken geht häufig der Blick dafür verloren, welchen entscheidenden Eingriff diese Operation bedeutet.

Jeder Operateur, der ein künstliches Hüftgelenk einsetzt, muss sich bewusst

Dr. Alexander Olk
Abteilung für Unfallchirurgie,
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg,
Krankenhausstraße 12, 91054 Erlangen
(E-Mail: AlexOlk@aol.com,
Tel.: 09131-8533272, Fax: 09131-8533300)

A. Olk · W. M. Franck · F. F. Hennig

Robotics in trauma and reconstructive surgery – current status and prospects

Abstract

The sequences of operations in our daily life are determined by robotics and electronics. We are now confronted with the questions of how these modern and useful technologies can be used to improve the medical care of our patients and, in particular, how we can use robotics to get a better outcome. There is no room for fear of the new machines; nor is it justifiable to hold on to the old ideals of traditional craftsmanship from fear of new processes that are accomplished robotically. Marketing and publicity should most certainly not affect decisions on buying and developing new high-tech equipment. Absolute requirements that should always be demanded of all technologies before they are introduced into research work are that they are equal to the current „gold standard“ in the results they yield and that they can be conveniently integrated into daily clinical practice.

Keywords

Alloarthroplastic joint replacement ·
Robotics · Navigation · Robodoc · Joint
replacement · Virtual surgery

sein, dass er eine natürliche Struktur entfernt („amputiert“) und sie durch ein zeitlich limitiertes Kunstgelenk ersetzt. In jedem Fall wird das Kunstgelenk vom 1. Tag seiner Inanspruch-

nahme einem irreparablen Verschleiß unterliegen, der letztlich zu seinem Versagen führt. Lediglich die limitierte Lebenserwartung des Implantatträgers kann hier zu einem lebenslangen „erfolg-



Abb. 1 ▲ Präoperative Planung der Schaftkomponente mit der Planungsstation Orthodoc, Integrated Surgical Systems

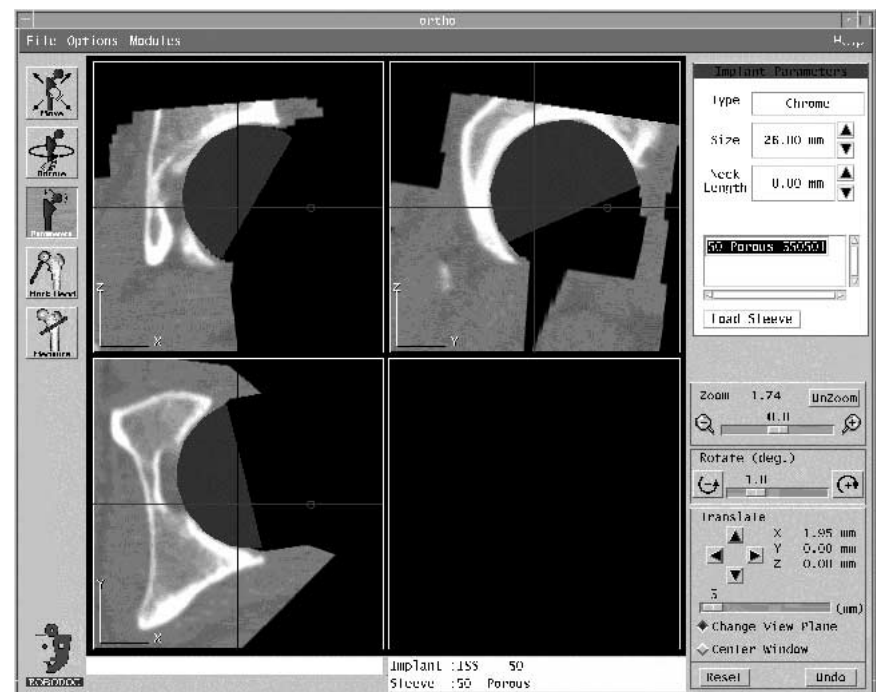


Abb. 2 ▲ Präoperative Planung der Pfanne mit der Planungsstation Orthodoc, Integrated Surgical Systems

reichen“ Funktionieren des Kunstgelenks führen.

Die über 11.000 Revisionsoperationen, die jährlich in Deutschland durchgeführt werden, nicht wenige als Wiederholungseingriffe mit oft desolat zerstörten anatomischen Strukturen, führen uns diese Tragik vor Augen. Nicht selten kann keine adäquate Mobilität mehr erzielt werden, die Revisionseingriffe im hohen Alter der Patienten stellen ein nicht geringes Infektions- und Lebensrisiko dar.

Vor diesem Hintergrund erscheint es zwingend notwendig, alle erforderlichen technischen Entscheidungs- und Planungshilfen heranzuziehen, im vorliegenden Fall auch die moderne Computertomographie mit ihrer relativ geringen Strahlenbelastung.

Bei in ihrer Konsequenz vergleichsweise weniger folgenschweren medizinischen Indikationen wird der Einsatz der Computertomographie nicht in Frage gestellt, ganz im Gegenteil, er wird als Standard gefordert.

Selbstverständlich gilt die Forderung nach dreidimensionaler Planung des Hüftgelenks nicht nur für den Schaft, sondern in besonderem Maß auch für die Pfanne, deren Platzierung bei angeborener Beckenfehlbildung häufig ein erhebliches chirurgisches Problem darstellt (Abb. 2).

Planungsumsetzung

Der volle Gewinn einer optimierten präoperativen Planung für den Patienten ist nur dann gewährleistet, wenn die Pla-

nungsdaten möglichst deckungsgleich intraoperativ umgesetzt werden. Den handwerklichen Möglichkeiten sind hier zweifelsfrei Grenzen gesetzt.

Das von Hand geführte Instrument kann keine präzise Umsetzung gewährleisten:

- im Bereich der Pfanne bezüglich Position und Eindringtiefe,
- im Bereich des Schafts bezüglich Markraumtiefe und Anterotation.

Persönliche Überschätzung und zweifelsohne täglicher Erfolg mögen hier traditionellen Operateuren die Einsicht erschweren, dass elektronische Operationshilfen erheblich zur Präzision beitragen (Abb. 3).

Bereich des Schaftes

Im Bereich der Schaftbearbeitung nimmt die Robotik inzwischen breiten Raum ein. Sie beinhaltet den Vorteil, dass sie neben der Positionsgenauigkeit auch die Formgenauigkeit gewährleistet. Darüber hinaus ermöglicht die robotergeführte Fräsung eine optimale, nicht traumatisierende Bearbeitung des Knochens. Die Schnittfläche an der Spongiosa führt zu einem glatten Schnitt, ohne zusätzliche Frakturierung oder Traumatisierung des verbleibenden Spongiosabälkchengewebes. Die Bewertung dieses Phänomens ist noch offen (Abb. 4). Es stehen sich hier 2 Argumentationen gegenüber:

1. Eine intakte, durchblutete, nicht traumatisierte und nicht frakturierte Fein-

struktur des Knochens gewährleistet den optimalen, möglichst direkten und vitalen Kontakt primär zum Implantat.

2. Eine traumatisierte, frakturierte Struktur entwickelt reparative Potenzen, die zu einer festen Verankerung des Implantats führen. Zweifelsohne kann diese Reparatur nur über ein sekundäres Gewebe im Sinn der sekundären Knochenheilung erfolgen.

Beide Argumente müssen ernst genommen werden und bedürfen in Langzeitbeobachtungen einer kritischen, vorurteilsfreien Bewertung.

Pfannenbereich

Im Bereich der Planungsumsetzung der Pfanne dominiert die Navigation. Sie bietet die Möglichkeit der elektronisch gesteuerten, interaktiven Positionierung der Werkzeuge und letztendlich der Pfanne.

Gerade in der schlecht exponierbaren Struktur der Pfanne erscheint diese Technologie der reinen Robotik überlegen. Durch die Interaktion mit der elektronisch unterstützten Steuerung hat der Operateur optimale Möglichkeiten der Weichteilprotektion.

Bedeutung der Navigation und Robotik in der Hüftgelenkchirurgie

Aus heutiger Sicht stellen Navigation und Robotik keine Konkurrenzverfahren im Bereich der Hüftgelenkimplantation dar. Es sind einander ergänzende

Abb. 3 ▼ Intraoperative Umsetzung und Kontrolle des Fräsvorgangs



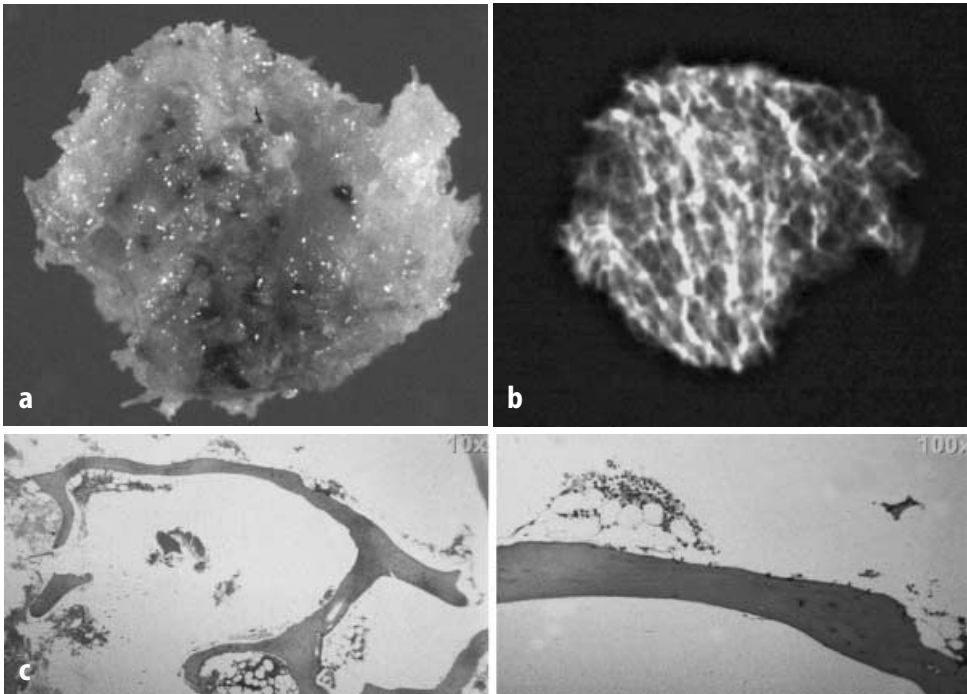


Abb. 4 a–c ▲ Spongiosa, a makroskopische Aufsicht, b tangenciales Röntgenbild, c Vergrößerung

Tabelle 1
Vergleich Roboter – Navigation

	Roboter	Navigation
Lage des Implantats	++	+
Passgenauigkeit	++	+
Operationstrauma	0	0
Operationszeit	0	0
Flexibilität	–	++
Kosten	–	–

Technologien, im Bereich der Bone-motion-Detektion sogar einander unterstützende Verfahren (Tabelle 1).

Sicher stellt der Einsatz beider Verfahren bei der Implantation eines Hüftgelenks einen hohen Investitionsaufwand dar, der jedoch durch optimale Implantatpositionierung belohnt wird. Bei entsprechend hoher Implantationsfrequenz einer Abteilung rechnen sich selbst Investitionen dieser Größe betriebswirtschaftlich. Der volkswirtschaftliche und damit für den Patienten ganz individuelle Vorteil zeichnet sich in der jetzt gut 4-jährigen Beobachtung ab und muss konsequent in jahrzehntelangen Studien kontrolliert werden.

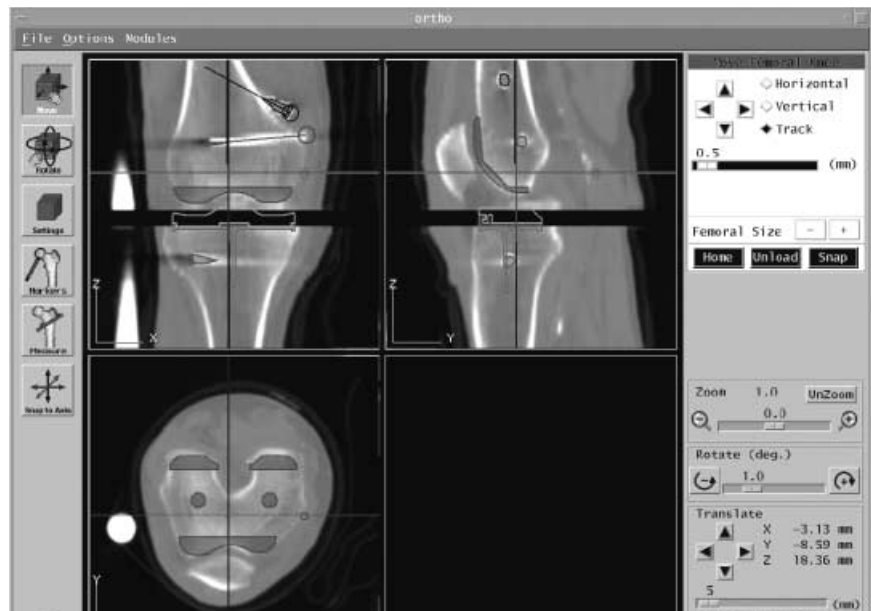


Abb. 5 ▲ Präoperative Planung einer Knieprothese mit der Planungsstation Orthodoc, Integrated Surgical Systems

Kniegelenk

Was für die Planung im Bereich des Hüftgelenks galt, gilt umso mehr für das Kniegelenk. Mit seinen zahlreichen Achsen in der Bewegungskette der unteren Gliedmaßen ist das Kniegelenk einer konventionellen Planung am zweidimensionalen Bild nur unzureichend zu-

gänglich. Hier helfen die 3D-Darstellung und 3D-Visualisierung im Rahmen einer virtuellen, präoperativen Planung und Operation entscheidend, nicht nur in der Positionierung und Dimensionierung des Implantats, sondern auch in der differenzierten Beurteilung der zur Verankerung zur Verfügung stehenden knöchernen Strukturen (Abb. 5).

Bezüglich der intraoperativen Umsetzung ergeben sich bei der konventionellen Technologie im Bereich des Kniegelenks wohl kaum angezweifelte Probleme. Das Fehlen absolut sicherer Orientierungspunkte an den unteren Gliedmaßen mit ihren häufig enormen Weichteilstrukturen lässt eine absolut deckungsgleiche handwerkliche Umsetzung des präoperativen Plans kaum zu. Aber bereits geringfügige Abweichungen führen bei dem Scharniergelenk Knie, das durch Ermangelung kugeliger, artikulierender Fläche kaum Kompensationsmöglichkeiten hat, zu erheblichen Kantenbelastungen und damit zum frühzeitigen Implantatversagen.

Die klinische Einführung der Robotik an diesem Gelenk ist inzwischen erfolgt. Die ersten klinischen Ergebnisse erlauben folgende Aussagen:

1. Die Robotik ist an diesem Gelenk bei guter Weichteilprotektion einsetzbar.
2. Die Umsetzung der präoperativen Planung ist optimal.
3. Der Gewinn aus der differenzierten operativen Planung ist augenscheinlich.

Auch hier sind jedoch Langzeitergebnisse abzuwarten.

Ausblick

Das größte Entwicklungspotenzial liegt in der weiteren Differenzierung der präoperativen Planung. Wurde in früheren Zeiten vom zweidimensionalen Bild ausgegangen und wurden dann, vor allen Dingen im Bereich korrigierender Eingriffe, die Teil- oder Ganzkörperachsaufnahmen erfolgreich in die Planung integriert, bietet sich heute die Möglichkeit, mit den dreidimensionalen, modernen, bildgebenden Verfahren die individuelle Mechanik des Patienten dreidimensional zu erfassen.

Zurzeit endet dies für die unteren Gliedmaßen noch am Becken. Letztendlich wäre jedoch ein Kräfteflussdiagramm des gesamten Skeletts hilfreich. Beinachse und Beinmechanik enden nicht am Hüftgelenk, sie beeinflussen die Beckenstellung und die Wirbelsäule bis hinauf zur Kopfhaltung. Die Forderung der Zukunft muss es sein, unsere

Implantate unter Berücksichtigung der Gesamtmechanik des Körpers zu integrieren. Das zurzeit lediglich verfügbare statische Bild kann hier nicht Ziel der Entwicklung sein. Letztendlich muss die dynamische Funktionsüberprüfung im Rahmen der präoperativen Visualisierung gefordert werden.

In diese Planungsdaten sollte letztendlich auch eine dynamische Bewegungsanalyse des Patienten mit einfließen.

Ziel ist es, hochwertige Technologien dahingehend zu nutzen, das allogene Implantat möglichst biologisch zu integrieren. Weder der Patient noch der Operateur sollen Opfer oder Knechte der Großtechnologie werden, sondern diese wird in den Dienst der biologischen Implantatintegration gestellt.

Der Operateur wird durch die Großtechnologie nicht ersetzt, sondern in die Lage versetzt, auf intellektuell hohem Niveau korrigierend und ergänzend in den biologischen Ablauf einzugreifen. Künstliche Gelenke werden somit nicht mehr implantiert, sondern in den biologischen Bewegungsablauf integriert. Die Fremdkörperimplantation muss bezüglich ihrer Invasivität minimiert werden.

Was für den Ersatz gilt, gilt gleichermaßen auch für die zu erwartenden Entwicklungen im Bereich von korrigierenden bzw. rekonstruktiven Eingriffen traumatisierter Strukturen.

Weiterführende Literatur

1. Bargar WL, Bauer A, Borner M (1998) Primary and revision total hip replacement using the Robodoc system. *Clin Orthop* 354:82–91
2. Berlemann U, Langlotz F, Langlotz U, Nolte LP (1997) Computer-assisted orthopedic surgery. From pedicle screw insertion to further applications. *Orthopäde* 26:463–469
3. Bernsmann K, Langlotz U, Ansari B, Wiese M (2000) Computer-assisted navigated acetabulum placement in hip prosthesis implantation – application study in routine clinical care. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 138:515–521
4. Birke A, Reichel H, Hein W, Schietsch U, Hube R, Bernstein A, Kruger T (2000) ROBODOC – a path into the future of hip endoprosthesis or an investment error? *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 138:395–401
5. Borner M, Bauer A, Lahmer A (1997) Computer-assisted robotics in hip endoprosthesis implantation. *Unfallchirurg* 100:640–645
6. Borner M, Bauer A, Lahmer A (1997) Computer-guided robot-assisted hip endoprosthesis. *Orthopäde* 26:251–257
7. Börner M, Lahmer A, Wiesel U (1999) Computer-assisted surgery for hip endoprosthesis. *Z Arztl Fortbild Qualitätssich* 93:253–258
8. Burghart CR, Neukirch K, Hassfeld S, Rembold U, Woern H (2000) Computer aided planning device for preoperative bending of osteosynthesis plates. *Stud Health Technol Inform* 70:46–52
9. Delp SL, Stulberg SD, Davies B, Picard F, Leitner F (1998) Computer assisted knee replacement. *Clin Orthop* 354:49–56
10. DiGioia AM 3rd (1998) What is computer assisted orthopaedic surgery? *Clin Orthop* 354:2–4
11. DiGioia AM 3rd, Jaramaz B, Colgan BD (1998) Computer assisted orthopaedic surgery. Image guided and robotic assistive technologies. *Clin Orthop* 354:8–16
12. DiGioia AM, Jaramaz B, Blackwell M, Simon DA, Morgan F, Moody JE, Nikou C, Colgan BD, Aston CA, Labarca RS, Kischell E, Kanade T (1998) The Otto Aufranc Award. Image guided navigation system to measure intraoperatively acetabular implant alignment. *Clin Orthop* 355:8–22
13. Fadda M, Marcacci M, Toksvig-Larsen S, Wang T, Meneghello R (1998) Improving accuracy of bone resections using robotics tool holder and a high speed milling cutting tool. *J Med Eng Technol* 22:280–284
14. Gosse F, Brack C, Gotte H, Roth M, Ruhmann O, Schweikard A, Vahldiek M (1997) Robot-assisted knee endoprosthesis. *Orthopäde* 3:258–266
15. Haas NP, Stockle UC, Hoffmann R (1999) Acetabulum surgery. Development, current status and prospects. *Zentralbl Chir* 124:999–1003
16. Jerosch J, Peuker E, Hasselbach C von, Lahmer A, Filler T, Witzel U (1999) Computer assisted implantation of the femoral stem in THA – an experimental study. *Int Orthop* 23:224–226
17. Martelli M, Marcacci M, Nofrini L, LA Palombara F, Malvisi A, Iacono F, Vendruscolo P, Pierantoni M (2000) Computer- and robot-assisted total knee replacement: analysis of a new surgical procedure. *Ann Biomed Eng* 28:1146–1153
18. Muller W, Bockholt U, Voss G, Lahmer A, Börner M (2000) Planning system for computer assisted total knee replacement. *Stud Health Technol Inform* 70:214–219
19. Niethard FU (1999) Computer-assisted orthopedic surgery (CAOS) in hip joint prosthetics. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 137:99–100
20. Okoniewski M, Birke A, Schietsch U, Thoma M, Hein W (2000) Early results of a prospective study in patients with computer-assisted femur shaft preparation in total hip endoprosthesis implantation (Robodoc system) – indications, outcome, complications. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 138:510–514

21. Phillips R, Hafez MA, Mohsen AM, Sherman KP, Hewitt JR, Browbank I, Bouazza-Marouf K (2000) Computer and robotic assisted osteotomy around the knee. *Stud Health Technol Inform* 70: 265–271
22. Schiffers N, Schkommodau E, Portheine F, Radermacher K, Staudte HW (2000) Planning and performance of orthopedic surgery with the help of individual templates. *Orthopäde* 29: 636–640
23. Starker M, Thumler P, Weipert A, Hanusek S (2000) Computer-assisted prosthesis selection and implantation control. *Orthopäde* 29: 627–635
24. Südkamp NP, Haas NP (2000) New methods of cruciate ligament surgery. *Chirurg* 71: 1024–1033
25. Taylor RH, Joskowicz L, Williamson B, Gueziec A, Kalvin A, Kazanzides P, Van Vorhis R, Yao J, Kumar R, Bzostek A, Sahay A, Borner M, Lahmer A (1999) Computer-integrated revision total hip replacement surgery: concept and preliminary results. *Med Image Anal* 3: 301–319
26. Van Ham G, Denis K, Vander Sloten J, Van Audekercke R, Van der Perre G, De Schutter J, Aertbelien E, Demey S, Bellemans J (1998) Machining and accuracy studies for a tibial knee implant using a force-controlled robot. *Comput Aided Surg* 3: 123–133
27. Visarius H, Gong J, Scheer C, Haralamb S, Nolte LP (1997) Man-machine interfaces in computer assisted surgery. *Comput Aided Surg* 2: 102–107