

Pregledni prispevek/Review article

NAVIGACIJSKI SISTEMI V SKELETNI KIRURGIJI

NAVIGATION SYSTEMS IN SKELETAL SURGERY

Feri Štivan, Matej Cimerman

Klinični oddelek za travmatologijo, Kirurška klinika, Klinični center, Zaloška 2, 1525 Ljubljana

Prispelo 2005-07-18, sprejeto 2005-10-13; ZDRAV VESTN 2005; 74: 721–6

Ključne besede: računalniška podpora; navigacija; travmatologija; kirurgija; kategorije CAOS

Izvleček – Izhodišča. Kirurški navigacijski sistemi se vse pogosteje uporabljajo v travmatologiji in ortopediji. Osnova vseh teh naprav je podobna. Različni avtorji opredeljujejo tri glavne komponente, prisotne pri klinični uporabi kirurške navigacije: kirurški objekt, virtualni objekt in navigator. Te tri elemente povezuje registracija in referenca. Pri uporabi sistema računalniško podprte kostne kirurgije (CAOS) obstaja veliko pasti. Predstavljamo uporabo s prednostmi in slabostmi.

Zaključki. Vse več študij govori o prednostih pristopov CAOS pred klasičnimi pri številnih vrstah uporabe. Treba je poznati osnove in omejitve tehničnih načel. Obstaja velik potencial za napačno uporabo teh naprav. Z ekonomskega stališča bo samo optimalna uporaba navigacijskega sistema opravičila velike stroške.

Uvod

Tako travmatologija kot ortopedija se ukvarjata s kostnimi strukturami ali tkivi, ki običajno leže globoko v človeškem telesu. Posamezne korake operacije, kot so vstavev vsadka, namestitvev kostnih struktur, rezanje ali vrtnanje kosti, je potrebno izvesti čim natančneje. Optimalna natančnost izboljša postoperativno biomehaniko in zmanjšuje med- in pooperativne zaplete (1). Izraz računalniško podprta kostna kirurgija (CAOS – computer aided orthopedic surgery) obsega pristope, ki skušajo izboljšati vidljivost operativnega polja in povečati geometrično natančnost s pomočjo robotskih naprav ali t.i. navigacijskih sistemov (2). Te cilje dosega s povezavo kostne anatomije, na kateri se operira, z navidezno predstavitevjo. Kljub desetletju intenzivnega raziskovanja in razvoja so sistemi CAOS razmeroma slabo razširjeni (3). Glavni razlog za to je majhno število kliničnih študij, ki bi dokazovale prednost teh pristopov pred klasičnimi. Izvedba teh študij je namreč težavna, ker gre za drago in nepreverjeno tehnologijo in so koristi pogosto vidne šele čez več let.

Osnovni koncept

Osnovna ideja kirurških navigacijskih sistemov je podobna (4). Navigacijski sistem je sestavljen iz treh glavnih kompo-

Key words: computer assistance; navigation; traumatology; surgery; categories of CAOS

Abstract – Background. Surgical navigation systems are increasingly being used during trauma and orthopaedic surgery. The conceptual design of each of these devices is similar. The authors define three major components involved in the clinical application of surgical navigation: a surgical object, a virtual object and a navigator. These three elements are connected by registration and referencing. There are many pitfalls in application of CAOS. Many applications will be presented and their advantages and disadvantages will be elucidated.

Conclusions. More and more studies prove the superiority of the CAOS approaches over classic techniques in a number of applications. It is essential to know the basics and the limitations of the underlying technical principles. There is a considerable chance for using these devices incorrectly. From an economical point of view only the optimal performance of a navigation system will probably justify its significant investment costs.

nent, prisotnih pri klinični uporabi kirurške navigacije: kirurški objekt (KO), virtualni ali navidezni objekt (VO) in navigator (NAV) (2). Povezujeata jih registracija in referenca, imenovana tudi dinamična referenca.

Kirurški objekt ali tudi terapevtski objekt je anatomsko območje, na katerem izvajamo operacijski poseg. V ortopedski kirurgiji in travmatologiji so kirurški objekti omejeni na kosti, kostne odlomke ali strukture, ki so pripete na kosti.

Virtualni objekt

Namen virtualnega objekta je zagotoviti stvarno predstavitev kostnih struktur. Slikovni podatki so prikazani na monitorju in predstavljajo ogrodje za medoperativno »ozadje«, v katero se projicira položaj kirurških instrumentov. Navigacijski sistemi te slike uporabljajo tudi za predoperativno načrtovanje in načrtovanje robotsko podprtih posegov.

Virtualni objekt lahko pridobimo pred posegom ali med njim. Prvi sistemi CAOS so temeljili na predoperativnih slikah z računalniško tomografijo (1). Prednost teh je odličen kontrast kost–mehko tkivo. Tako pridobljene slike niso geometrično popačene. Prav tako ni potrebno zapleteno umerjanje. V nasprotju z računalniško tomografijo (CT) ima predoperativno

magnetnoresonančno slikanje (MRI) prednost v manjši izpostavljenosti sevanju. Kljub temu ostaja CT metoda izbire pri predoperativnem slikanju. Ker se lahko anatomija kirurškega objekta do operacije spremeni, so vpeljali različne medoperativne slikovne metode. Med temi je trenutno v travmatologiji in ortopediji največ v uporabi fluoroskop. Tako pridobljene slike so pogosto popačene iz več vzrokov. Pred nekaj leti so vpeljali slikovno napravo, sestavljeno iz motorizirane izocentrične »C-roke« (C-arm), ki iz serij dvodimenzionalnih slik rekonstruira tridimenzionalno sliko. Ta 3-D tehnologija je na trgu od leta 2003 kot t. i. Iso C 3-D arm (Siremobil®, Siemens Inc., Erlangen, Germany).

Obstaja še ena kategorija navigacijskih sistemov, ki med posegom s pomočjo sledenja inštrumenta posnamejo prostorsko umeščenost anatomskih področij. S pomočjo pridobljenih točk sistem ustvari geometrični model. Ta tehnika je posebno koristna v primeru mehkih tkiv, kot so vezi in hrustanec, ko sta CT in fluoroskopija precej nemočni. S to tehniko lahko pridobimo tudi nekatere točke brez neposrednega dostopa inštrumenta. Tako je možno iz posnete pasivne rotacije noge v kolku rekonstruirati center glavnice stegenice. Za pridobitev celotne tridimenzionalne slike KO se po navadi uporablja t. i. »kostno oblikovanje« (bone morphing) (5, 6). Pri tem procesu računalnik iz baze podatkov izbere in prilagodi statistični model kosti, ki se najbolj ujema z morfologijo kosti bolnika, pridobljeno med posegom s sledenjem inštrumenta.

Registracija

Cilj registracije je zagotavljanje vzajemnosti med KO in VO, kar omogoča prikaz trenutnega položaja inštrumenta na monitorju v koordinatnem sistemu VO (1). V splošnem se koordinatna sistema VO in OP (operativnega polja) razlikujeta. Zato je potrebna interaktivna registracija, ki jo imenujemo »matching« (ujemanje oz. prilagajanje). Obstaja veliko različnih konceptov registracije. Tehnično najenostavnejša metoda je medoperativna registracija predoperativno natančno določenih točk. Ta metoda je zelo odvisna od optimalne izbire in natančne identifikacije točk, kar jo dela ranljivo zaradi številnih možnih napak. Zato so razvili različne alternativne in komplementarne tehnike, med katerimi se največ uporabljata medoperativni CT in fluoroskopija. V primeru medoperativnih metod pridobivanja VO pa je registracija neločljivo povezana z generacijo VO. V tem primeru gre za t. i. navigacijo na osnovi modalnosti, ki je opisana pozneje.

Navigator

Registracija premosti vrzel med VO in KO (1). Navigator omogoča to povezavo z zagotavljanjem skupnega koordinatnega sistema. Prav tako omogoča povezavo med uporabljenimi kirurškimi inštrumenti in KO.

Navigator kirurških navigacijskih sistemov je t. i. sledilec (»tracker«). Ta naprava na daljavo določa položaj in orientacijo objektov in zagotavlja te podatke kot tridimenzionalne koordinate. Obstaja veliko metod za zaznavo položaja objektov. Večina današnjih izdelkov pri optičnem sledenju predmetov uporablja svetlobo, ki jo oddajajo opazovani predmeti, ali pa se ta od njih pasivno odbija. Za sledenje kirurških inštrumentov se v tem primeru uporabljajo diode, ki oddajajo svetlobo, ali kroglice in ploščice, ki svetlobo odbijajo. Poleg optičnega pa je možno tudi akustično sledenje, ki se manj uporablja. Oba načina zahtevata prosto pot med sledilcem in opazovanimi predmeti.

V primeru kirurških robotskih sistemov je navigator robot sam. V travmatologiji se uporaba robotov zaenkrat omejuje na laboratorij (7). Predstavljen je bil robotski sistem za uravnavo zlomov dolgih kosti. Gre za neke vrste motorizirane Ilizarove

zunanje fiksatorje, zaradi česar je z načrtovanjem možno avtomatsko naravnavanje (8). V tem primeru gre za aktivnega robota. Obstaja še nekaj primerov polaktivnih robotov, ki ne izvedejo sami celotnega posega, ampak potrebujejo pomoč kirurga. Poleg več prototipov (9, 10) obstajajo tudi komercialni izdelki (11). Pri večini gre za pomoč pri natančnosti reza med vstavitvijo umetnih sklepov, predvsem kolka in kolena.

Referenca

Relativne premike med KO in navigatorjem je treba odkriti in kompenzirati. Premik kosti se določi s pritrditvijo t. i. dinamične referenčne baze (DRB) (1). Ta je označena s pasivnimi ali aktivnimi označevalci, ki so že bili opisani. Uporablja se za sledenje operiranih kostnih struktur. Zelo pomembno je, da je stabilno fiksirana na kost in da ostane v začetnem položaju ves čas navigacije. Vsak dvom v spremembo položaja je treba takoj preveriti. Slaba skladnost med položajem DRB in stvarno umeščenostjo kostnih struktur je lahko posledica nestabilne anatomije, na kateri se operira. DRB se lahko uporabi za sledenje le ene kosti ali kostnega odlomka. V primeru robotske kirurgije je povezava med KO in navigatorjem fizična.

Kategorije sistema CAOS

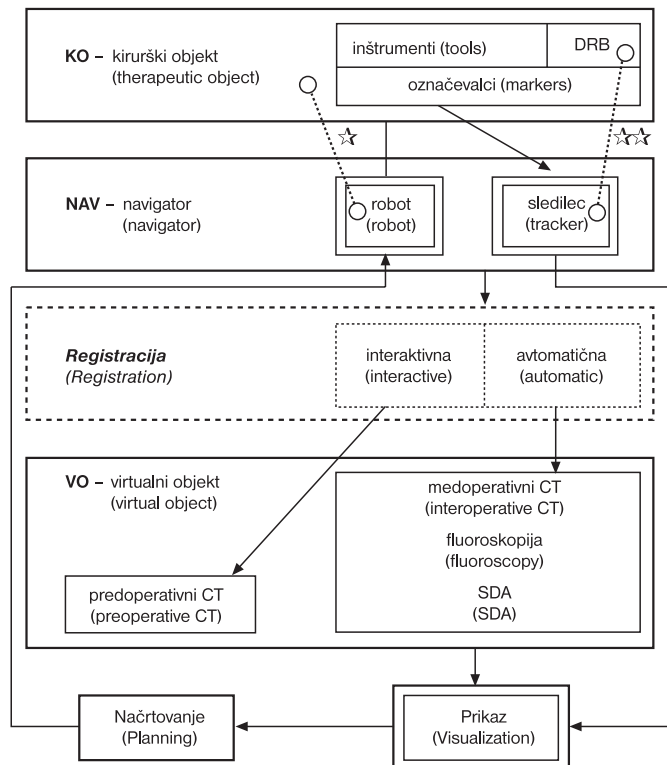
Kirurška navigacija lahko temelji na osnovi različnih slikovnih tehnik, kot so CT, dvo- in tridimenzionalna fluoroskopija. Posebna kategorija pa je t. i. brez slikovna navigacija (image-free navigation) (2). Ta koncept imenujemo tudi računalniška asistenca na osnovi kirurško opredeljene anatomije (SDA - surgeon defined anatomy). V fazi razvoja so tudi hibridni navigacijski sistemi, ki omogočajo kakršno koli kombinacijo prej naštetih konceptov.

Navigacija na osnovi slikovne tehnike

Gre za t. i. »navigacijo na osnovi modalnosti« (MBN - modality based navigation). Pomeni interaktivno spremljanje inštrumentov v koordinatnem sistemu, ki se opredeli s slikovno modalnostjo (12). MBN se zanaša na registracijo sledilnega sistema, npr. optičnega digitalizatorja s slikovno modalnostjo, kot je CT, MRI ali fluoroskop. Po registraciji sistem »ve«, kje bodo nastale slike. Navigacija markiranih inštrumentov se lahko prične takoj, torej brez registracije (13). Ta postopek deluje, ker gre za neločljivo povezano ujemanje med objektom in sliko. Nadaljnja prednost je možnost navigacije mobilnih in nerigidnih objektov, kot so možgani in jetra. V nasprotju z MBN konvencionalna ali t. i. navigacija na osnovi bolnika (PBN - patient based navigation) »ne ve«, kje nastanejo slike, pač pa uporablja že omenjeno interaktivno registracijo, ki jo imenujemo ujemanje (14).

Težave pri uporabi sistema CAOS

Pri uporabi navigacijskih sistemov obstaja veliko možnosti za napako (15). Najprej je treba v operacijski dvorani primerno razvrstiti vso opremo navigacijskega sistema. Ker je najpogostejša tehnika sledenja inštrumentov optično sledenje, mora biti zagotovljena prosta pot med kamero in označevalci. Prav tako je potrebna pravilna umestitev kamere v operacijsko dvorano. Na idealni položaj vpliva več dejavnikov, kot so: razpoložljiv prostor, postavitve osebja okrog operacijske mize, preference operaterja (npr. položaj bolnika), dolžina kablov med komponentami sistema itd. Treba je tudi paziti na druge vire svetlobe, kot so operacijske luči ali luč operacijskega mikroskopa, ki lahko vplivajo na optično sledenje.

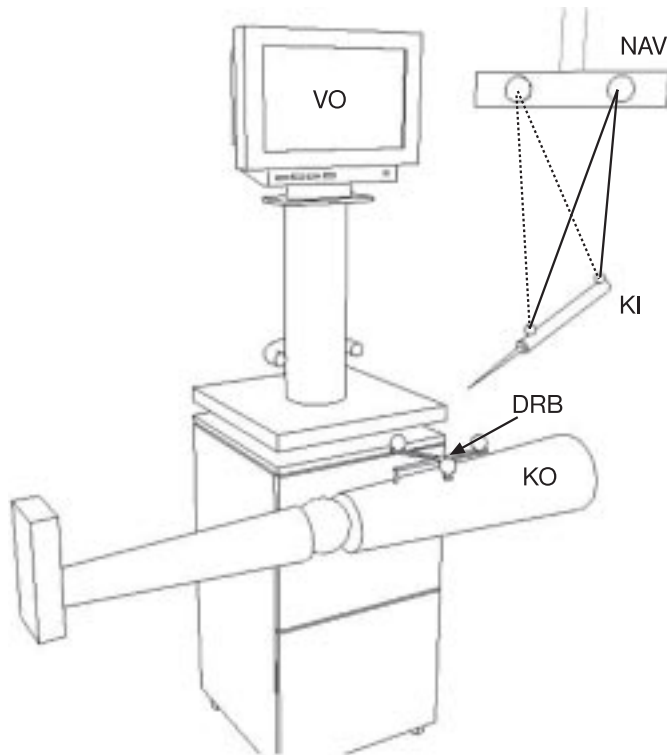


Sl. 1. Tri glavne elemente vsakega sistema CAOS – virtualni objekt, navigator in kirurški objekt – povezujejo registracija in referenca. Virtualne objekte lahko pridobimo predoperativno, kar zahteva interaktivno registracijo, ali medoperativno, česar posledica je po navadi avtomatska, neločljivo povezana registracija. V primeru robotske kirurgije se referenca zagotavlja preko fizične povezave (ena zvezdica). Drugače pa se referenca zagotavlja preko pritrjene t.i. DRB (dinamične referenčne baze) (dve zvezdici).

Figure 1. The three main elements of each CAOS system – virtual object, navigator, and therapeutic object – are connected by registration and referencing. Virtual objects can be acquired preoperatively, which requires interactive registration, or intraoperatively, usually resulting in an automated, inherent registration. For robotic surgery, referencing is established as a physical linkage (one star). In other cases referencing is established through attachment of so-called DRB (dynamic reference base) (two stars).

Razen kamere je pomembna tudi postavitev monitorja, ki ga mora operater brez težav videti, kar zahteva včasih ustrezno premestitev asistenta. Proizvajalci nudijo nasvete o postavitvi posameznih komponent sistema le za najpogostejše kirurške posege, ki pa žal v vseh operacijskih sobah niso izvedljivi in potrebujejo določene modifikacije zaradi različnih omejitev, kot so že prej postavljena oprema in dimenzije, ki so na razpolago. Kirurg mora biti seznanjen z delovanjem in uporabo sistema CAOS ter zapleti, ki lahko nastopijo ob nepravilni uporabi.

Koncept sledenja inštrumentov temelji na predpostavki, da se inštrumenti ne deformirajo, kar je pri finih inštrumentih težko zagotoviti. Če je operater s tem seznanjen, se zanaša na navigacijski zaslon le, ko uporabljen inštrument ni deformiran. Pri pasivnem sledenju inštrumentov, kjer se uporabljajo označevalci v obliki kroglic, ki svetlobo reflektirajo, lahko pride do zmanjšanja natančnosti po več sterilizacijah ali v primeru delne umazanosti. Ne nazadnje je težava v ceni, ki ni zanemarljiva. Vedno je treba dobro pretehtati, kakšen način (tip) kirurgije je najbolj ustrezen za določen kirurški poseg. Kaj



Sl. 2. Osnovna postavitev in komponente sistema CAOS. VO – virtualni objekt; NAV – navigator; KI – kirurški inštrument; DRB – dinamična referenčna baza; KO – kirurški objekt.

Figure 2. Basic setup and components of the CAOS system. VO – virtual object, NAV – navigator, KI – surgical instrument, DRB – dynamic reference base, KO – surgical object.

hitro se namreč zgodi, da rezultati ne opravičijo izdatkov in je zato konvencionalno zdravljenje boljša izbira.

V splošnem lahko povemo, da obstajajo tri glavne kategorije sistemov CAOS. Prvi dve sta od slik odvisni kategoriji, kjer dobimo slikovne podatke s pomočjo CT ali fluoroskopije, pri tretji pa gre za brez slikovno kirurško navigacijo. Vsaka temelji na določenih predpostavkah. Če niso vse izpolnjene, pride do napačne predstavitve informacije. Operater mora sam odločiti, ali lahko zaupa prikazanim podatkom navigacijskega sistema. Zato mora dobro poznati vse pasti in omejitve sistema, ki ga uporablja.

Odločitev za primerno navigacijo

Pri izbiri navigacijskega sistema je treba upoštevati več dejavnikov, med katerimi so najpomembnejši načrtovani posegi, že obstoječa oprema in specifično znanje kirurga (16). V travmatologiji je priporočena uporaba fluoroskopije, pri kateri je treba vzeti v zakup slabšo kakovost slike, ki je odvisna od anatomskega področja in indeksa telesne mase (BMI). Vsaka izmed kategorij navigacijskih sistemov ima svoje prednosti in slabosti, indikacije in omejitve. Tako obstaja pri predoperativni CT predvsem problem registracije, ki je lahko precej zamudna in lahko privede do napak, ki jih zlahka spregledamo. Zato je priporočljiva dodatna medoperativna fluoroskopija, ki ogroža natančnost in povzroča večjo izpostavljenost sevanju. Kljub temu je navigacija s CT nepogrešljiva pri korekciji slabo zazdravljenih zlomov medenice in resekciji tumorjev v medenici. V teh primerih namreč 3D fluoroskopija ni preveč uporabna zaradi zelo omejene prostornine.

Razpr. 1. *Prednosti in slabosti najpogosteje uporabljenih navigacijskih sistemov v skeletni kirurgiji.*
 Table 1. *Advantages and disadvantages of the most common used navigation systems in skeletal surgery.*

	Prednosti Advantages	Slabosti Disadvantages
CT	- 3-D rekonstrukcija - v primerjavi z Iso C 3-D boljša kakovost slike in večja prostornina	- Veliki stroški nabave in vzdrževanja.
(Predoperativni)	- Predoperativno načrtovanje	- Registracija je lahko pogosto zamudna. - Predoperativno pridobljen CT ne odraža aktualne situacije po redukciji zlomov.
(Medoperativni)	- Registracija ni potrebna	- Težavna namestitvev CT skenerja v obstoječo operacijsko sobo zaradi omejitve prostora in statike. - Omejeni operativni pogoji v CT skenerju
CT	- 3-D reconstruction - Improved image quality and the increased scan volume compared to the Iso C 3-D	- High expenses for the purchase and maintenance.
(Preoperative)	- Preoperative planning	- Registration can frequently be lengthy. - Preoperatively acquired CT data do not represent actual situation after reduction of fractures.
(Intraoperative)	- No need for registration	- Difficult installation of CT scanner in existing operating theaters for reasons of space and statics. - Limited operation conditions in the CT scanner.
Fluoroskopija (2-D)	- Registracija se doseže s kalibriranjem C-roke - Vseskozi je mogoča osvežitev podatkov	- Omejena kakovost slike. - Navigacijski sistem ne posreduje informacije o položaju inštrumenta pravokotno na ravnino slike.
(Iso C 3-D roka)	- Medoperativna generacija 3-D slikovnih podatkov	- Prostornina skenerja je omejena na 12 cm ³ . - Medoperativna pridobitev podatkov traja približno dve minuti. Med skeniranjem se je treba izogniti kakršnim koli premikom bolnika.
Fluoroscopy (2-D)	- Registration is achieved by the calibration of the C-arm - All time update possible	- Limited image quality. - The navigation system does not provide any information about the instrument's location perpendicular to the image plane.
(Iso C 3-D arm)	- Intraoperative generation of 3-D datasets	- The scan volume is limited to 12 cm ³ . - The intraoperative acquisition of the dataset takes approximately two minutes. Any patient motion during the scanning process must be avoided.

Predoperativna CT se zaradi omenjene zamudne registracije vse manj uporablja. Kot kaže, bo ostala omejena na individualne posege, kot so resekcija tumorjev in specifične korekcijske operacije.

V primeru medoperativne CT registracija ni potrebna. Prednosti metode so večja kakovost slike in večja prostornina v primerjavi s fluoroskopijo. Slabosti pa so: omejeni operativni pogoji kot tudi veliki stroški nabave in vzdrževanja (približno trikrat več kot pri 3D fluoroskopiji). Težavna je tudi umestitev CT v prostor zaradi že obstoječe opreme. Ravno zaradi teh slabosti se ta tehnologija zaenkrat še ni razširila.

Predoperativna dvodimenzionalna fluoroskopija je bila predstavljena leta 1999 in se komercialno uporablja že od leta 2000. Najprej se je uporabljala za distalno zaklepanje, v zadnjem času so se indikacije precej razširile in zajemajo vstavitve sakroiliakalnih in pedikularnih vijakov ter naravnave zlomov cevastih kosti.

Od leta 2003 je na trgu tudi tridimenzionalna fluoroskopska tehnologija. Da bi jo lahko popolnoma izkoristili, je potrebna miza iz karbonskih vlaken, ki povsem prepušča rentgenske žarke. Trenutno so glavne indikacije vse zahtevne vstavitve vijakov pri osteosintezi. Ima pa predvsem dve omejitvi. To sta zmanjšana kakovost slike v primerjavi s CT in omejena prostornina na približno 12 cm³. Kljub temu je idealna za kontrolo redukcije in navigirano vstavitve vsadkov v udih in hrbtenici.

Najpogostejša uporaba posameznih sistemov po anatomskih področjih

Hrbtenica

Trenutno se v glavnem uporabljata dve različni metodi (16): CT in tridimenzionalna (3D) fluoroskopija (ISO C 3-D arm).

Prednost CT je natančnost, ki je posebej pomembna pri (težkih) anatomskih strukturah, kot sta vratna in zgornja prsna hrbtenica. Prednost C-roke pa je široka medoperativna dostopnost.

Klinična priporočila so:

- CT navigacija za cervikalno in zgornjo torakalno hrbtenico,
- 3D fluoroskopska navigacija za spodnjo torakalno in lumbarno območje.

Medoperativna navigacija v kirurgiji hrbtenice vsekakor poveča natančnost (17), žal pa zaenkrat ni bila ugotovljena nobena klinična prednost, se pravi klinično izboljšanje in rezultat (18).

Medenica

Navigacija na osnovi CT omogoča veliko natančnost, predvsem v primeru minimalno dislociranih zlomov (19, 20). Težava je že prej omenjena registracija, ki zna biti precej težavna zaradi obilnega mehkega tkiva, ki obdaja medenico (21). Pri manevrih redukcije je po vsaki manipulaciji potreben nov CT podatkovni set. V tem primeru mora biti CT v sami operacijski sobi, kar vodi do že omenjenih logističnih težav.

S pomočjo fluoroskopije lahko sorazmerno zanesljivo in natančno vstavljamo medenične vijake, predvsem sakroiliakalne (22, 23). V primeru obeh postopkov, tako CT kot fluoroskopsko osnovani navigaciji, ostaja fluoroskop v operacijski sobi ves čas. Tako zagotovimo kontrolo korakov operacije v vsaj eni projekciji.

3D fluoroskopija združuje prednosti obeh prej omenjenih postopkov (21). Čeprav je kakovost slike občutno slabša v primerjavi s CT, zadošča za namestitvev zlomov v zadnjem delu medeničnega obroča.

Zlomi dolgih kosti

Medoperativna fluoroskopija je orodje za medoperativno kontrolo redukcije in osteosinteze zlomov dolgih kosti (24) in širi indikacije minimalno invazivnim posegom.

Anatomska repozicija pri zlomih dolgih kosti ni nujna. Zmanjšanje kožnih rezov in poškodbe kožnega tkiva ima številne pomembne prednosti za bolnika. Od teh so najpomembnejše izboljšanje funkcije, čas celjenja in kozmetični rezultat. Minimalno invazivna kirurgija onemogoča neposreden pogled na vsadek v kosti, zato je še bolj pomembna uporaba fluoroskopa. Posledica tega je velika izpostavljenost bolnika in osebja sevanju (25). Medaktivna fluoroskopija ne potrebuje medoperativne registracije in omogoča obnovitev navigacijskih slikovnih podatkov ob vsakem času, kar je posebej pomembno pri redukciji zlomov in osteotomijah. Navigirana osteosinteza lahko s prikazom redukcije, postavitve vsadka in fiksacije premosti težave ob minimalno invazivni kirurgiji.

Rekonstrukcija ACL – rekonstrukcija prednjega ligamenta

CAOS naj bi omejil število medoperativnih napak (26). Prepoznal naj bi tudi dodatne anatomske korekcije in tako preprečil nastanek težav 3–4 mesece po uspešni rekonstrukciji in s tem povzročene poškodbe vsadka med drugo operacijo. CAOS omogoča medaktivno intraoperativno anatomsko ocenitveno situacijo za pravilno postavitve vsadka. Pristope lahko razdelimo na pasivne in aktivne, ki lahko sami izvršijo del operacije. Pasivne sisteme naprej razdelimo na tri podskupine: sistemi na osnovi CT ali MRI, fluoroskopski sistemi s sliko v stvarnem času in neslikovne metode, ki pridobijo anatomsko informacijo na osnovi kinetike in vnosa anatomskih točk oziroma področij s pomočjo kazalcev. Študija s fluoroskopsko asistirano pasivno navigacijo z dodatnim vnosom anatomskih točk je pokazala, da se s pomočjo navigacijskega sistema kirurgji z malo izkušenj med operacijo bolje znajdejo (27).

Zamenjava sklepa: totalna endoproteza kolka (TEP)

Pravilna orientacija ponvice optimizira obseg gibanja TEP kolka in zmanjša obrabo, možnost dislokacije, ukleščanja in osteolize medenice (28).

Navigacija na osnovi CT se uporablja za pravilno postavitve acetabularne ponvice s pomočjo predoperativno načrtovane orientacije. Na podlagi predoperativne CT medenice se naredi virtualna vstavitev ponvice pred posegom. Med operacijo označevalci kontrolirajo položaj ponvice in medenice in tako omogočijo natančno reprodukcijo načrtovane vstavitve. Absolutnega priporočila, kako morajo biti komponente postavljene, ni. Najpomembnejše je, da se ujema orientacija ponvice in zagozde, kar pomeni, da je njuna relativna orientacija pomembnejša od absolutne (29). Treba je dodati, da je dobra fiksacija dosti pomembnejša od dosežene orientacije komponent. Učvrstitev ostaja najšibkejši člen v endoprotetiki in mora zato imeti najvišjo prednost. Končni položaj komponent tako vedno predstavlja nek kompromis. Omenjena navigacija s CT poveča odmerek obsevanja bolnika, podaljša čas operacije brez vštetege časa za predoperativno načrtovanje, poveča izgubo krvi in stroške zdravljenja. Še vedno ni odgovora na vprašanje, katere dolgoročne koristi prinaša navigacija TEP kolka. Do sedaj je dokazana korist navigacije na osnovi CT le pri displastičnih kolkah, kjer lahko kirurg predoperativno ugotavlja način najboljše fiksacije ponvice v kost acetabuluma in določi, kako preoblikovati acetabulum (30).

Zaradi negativnih lastnosti navigacije na osnovi CT so bili predstavljeni tudi drugi navigacijski sistemi (31–33), med katerimi sta se izkazali za najbolj uspešni kirurško definirana anatomija (SDA) in navigacijski sistem na osnovi fluoroskopije.

Predlagana je bila tudi uporaba hibridnih sistemov (34). Rezultati študij dajejo prednost omenjenih sistemov pred navigacijo na osnovi CT. Večinoma zagotavljajo veliko natančnost in zmanjšajo porabo časa, ker nista potrebni predoperativno načrtovanje in medoperativna registracija. Zato bo uporaba teh navigacijskih sistemov najverjetneje v kratkem nadomestila navigacijske sisteme na osnovi CT.

Iskanje novih rešitev

Računalniško podprto nameščanje zlomov

Trenutno so v razvoju različna orodja za računalniško podprto redukcijo (35). Tako so razvili tehnologije, ki omogočajo fotorealistični prikaz vsadkov in inštrumentov, kar povečuje uporabnost prihodnjih navigacijskih sistemov.

Prvi klinični rezultati računalniško podprte redukcije na osnovi fluoroskopije so obetajoči, čeprav bodo pred rutinsko uporabo potrebne nadaljnje raziskave.

CT je zlati standard pri slikanju sklepnih zlomov kot tudi zlomov hrbtenice in medenice. Omogoča natančno analizo in klasifikacijo. Do nedavnega komercialno dostopna navigirana redukcija na osnovi CT ni obstajala. Potrebne bodo študije, ki bodo ocenile uporabnost pri različnih tipih zlomov in ugotovile možne slabosti.

Pri nameščanju zlomov ostaja nerešen problem čvrste pritrditve kostnih odlomkov. Težavo povzroča zlasti osteoporotična kost. Pristop do kostnih fragmentov je omejen, še posebej pri minimalno invazivni kirurgiji. Sistemi na osnovi Schanzovih vijakov so trenutno najboljše rešitev na tem področju. Težava nastopi pri velikih silah, ko se omenjeni vijaki upognejo in zato določitev položaja ni več dovolj natančna za računalniško vodene gibe. Drug problem je nezmožnost uporabe rotacijske sile. Zato so razvili novo generacijo redukcijskih naprav. Zahteve so bile:

- minimalno invazivna pritrditev na kost,
- prenos redukcijskih sil na fragmente v vseh šestih stopnjah prostosti,
- brez interference z osteosintezo,
- radiolucenost,
- uporabnost na osteoporotični kosti.

Trenutno noben prototip ni izpolnil vseh zahtev. Tako je treba zagotoviti set, ki bo kirurgu vedno omogočal najboljšo izbiro. Potrebni so kompromisi, ker nekatera merila enostavno niso kompatibilna, kot npr. minimalno invazivna kirurgija in velike sile, ki so potrebne za kirurško nameščanje zlomov.

Perkutana registracija

Tehnika ujemanja parov točk PPM (paired point matching) z dodanim površinskim ujemanjem SM (surface matching) je uporabna metoda za registracijo enega ali dveh objektov. V primeru več objektov je potrebno dodatno orodje. PPM in SM tehnike zahtevajo neposredni dostop do površine kosti. Perkutana registracija in sledenje bi bili uporabnejši. UZ je enostavno dostopno orodje, ki se razvija za vedno nove aplikacije. Zmožen je prikazati površino kosti, če mehko tkivo nad kostjo ne preseže določene debeline.

V študijah je bilo prikazano, da UZ lahko prikaže površino kosti vretenc, medenice in proksimalne ter distalne stegnenice. Kirurg bi tako lahko perkutano sledil odlomke in se tako izognil pričrstitvi referenčne baze na vsak odlomek. Priča kuje se, da bo kalibrirana ultrazvočna sonda postala dodatno orodje v navigaciji in registraciji.

Nameščanje zlomov s pomočjo robota

Zaprta repozicija dolgih kosti je povezana z uporabo velikih sil med nameščanjem in učvrstitvijo (36). Trenutno razen ekstenzijske mize ali velikega AO distraktorja ni na voljo nobenih

prilagoditve, ki bi bistveno olajšali redukcijo. Rešitev tega problema se trenutno išče s pomočjo robotskega sistema, ki bi povečal natančnost in zmanjšal napor. Pri zlomih udov je pogosto potrebna velika sila za premik odlomkov proti naravni sili mišic ali kit. Tipični primer je zlomljena stegnenica, kjer oba konca kosti ležita drug ob drugem. Oba dela je treba vleči naražen, natančno namestiti konca in omogočiti interno pričvrstitev. Pri tem obstaja nevarnost poškodbe mehkih tkiv.

Potrebna je slikovna kontrola, kar pomeni večjo izpostavljenost sevanju. Zaradi velikih sil, ki so potrebne, je takojšnja namestitve koncev praktično nemogoča. Koristen bi bil torej avtomatski sistem, ki bi natančno pozicioniral zlomljena konca kosti brez potrebe po več poskusih. Narejena je bila študija robotskega redukcijskega modela, ki lahko s pomočjo zunanega fiksatorja reducira zlome dolgih kosti v vseh šestih stopnjah prostosti. Evalvacija redukcije pa je trenutno le vizualna. Planirana je že integracija koncepta z vmesniki za slikanje in navigacijskim sistemom.

Zaključki

Glavni cilj navigacijskih sistemov v skeletni kirurgiji je izboljšanje vidljivosti operativnega polja in povečanje geometrične natančnosti ter s tem izboljšanje pooperativne biomehanike in zmanjšanje med- in pooperativnih zapletov. Pri izbiri navigacijskega sistema je treba v prvi vrsti upoštevati planirane posege, že obstoječo opremo in specifično znanje kirurga. Ker ima vsaka od kategorij navigacijskih sistemov svoje prednosti in slabosti, indikacije in omejitve, ne more biti noben izmed sistemov univerzalen. Našteta je bila najbolj pogosta uporaba posameznih sistemov po anatomskih področjih, ki lahko služi kot vodilo pri izbiri pravega navigacijskega sistema. Pred odločitvijo za posamezno kategorijo navigacijskega sistema bi kirurg moral nabrati osebne izkušnje, tako s tečaji kot tudi praktično. Poleg izbire navigacijskega sistema je zelo pomembna tudi razvrstitev opreme navigacijskega sistema v operacijski dvorani. Vsak uporabnik navigacijskega sistema mora biti seznanjen z zapleti, ki lahko nastopijo ob nepravilni uporabi. Razširjenost sistemov CAOS je zaradi pomanjkanja študij, katerih izvedba je zaradi visoke cene in nove tehnologije težavna, razmeroma majhna. Kljub temu narašča število študij, katerih rezultati jasno kažejo na prednosti uporabe navigacijskih sistemov pri specifičnih posegih. Na koncu je potrebno poudariti, da uporaba navigacijskih sistemov pri nekaterih posegih ekonomsko ni upravičena kljub njihovi očitni prednosti.

Literatura

- Langlotz F, Nolte LP. Technical approaches to computer-assisted orthopedic surgery. *European Journal of Trauma* 2004; 30: 1–11.
- Nolte LP, Beutler T. Basic principles of CAOS. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A6–16.
- Mohsen A, Phillips R. Letter of the reviewers. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A2–5.
- Bowersox JC, Bucholz RD, Delp SL, Gronemeyer D, Jolesz FA. Excerpts from the final report for the Second International Workshop on Robotics and Computer Assisted Medical Interventions. *Comput Aided Surg* 1997; 2: 69–101.
- Fleute M, Lavalley S, Julliard R. Incorporating a statistically based shape model into a system for computer assisted anterior cruciate ligament surgery. *Med Imaging Anal* 1999; 3: 209–22.
- Stindel E, Briard JL, Merloz P, Plaweski S, Dubrana F, Lefevre C, Troccaz J. Bone Morphing: 3D morphological data for total knee arthroplasty. *Comput Aided Surg* 2002; 7: 156–68.
- Kfuri M Jr, Gosling T, Westphal R, Wahl F, Krettek C, Hufner T. Robotic assisted fracture reduction – application on femoral shaft. In: Langlotz F, Davies BL, Bauer A, eds. *Computer assisted orthopedic surgery. Proceedings of the 3rd Annual Meeting of CAOS-International*. Darmstadt: Steinkopff; 2003. p. 182–3.
- Seide K, Wolter D. Computerassistierte Frakturpositionierung mit dem Hexapodfixateur externe. *Trauma Berufskrankh* 1999; 1: 127–30.
- Sautot P, Cinquin P, Lavalley S, Troccaz J. Computer assisted spine surgery: a first step toward clinical application in orthopedics. In: Merucci JP, Plonsey R, Coatrieux JL, Laxminarayan S, eds. *Proceedings of the 14th Annual Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Piscataway: IEEE inc.; 1992. p. 1071–2.
- Shoham M, Burman M, Zehavi E, Joskowicz L, Batkilin E, Kunicher Y. Bone mounted miniatur robot for surgical procedures-concept and applications. In: Langlotz F, Davies BL, Bauer A, eds. *Computer assisted orthopaedic surgery – Proceedings of the 3rd Annual Meeting of CAOS-International*. Darmstadt: Steinkopff; 2003. p. 330–1.
- Ritschl P, Machacek F, Fuiko R. Computer assisted ligament balancing in TKR using the Galileo system. In: Langlotz F, Davies BL, Bauer A, eds. *Computer assisted orthopaedic surgery – Proceedings of the 3rd Annual Meeting of CAOS-International*. Darmstadt: Steinkopff; 2003. p. 304–5.
- Messmer P, Baumann B, Suhm N, Jacob AL. Navigation systems for image-guided therapy: A review. *Rofo Fortschr Geb Ronthenstr Neuen Bildgeb Verfahren* 2001; 173: 777–84.
- Russel Taylor SL, Burdea G, Moesges R. *Computer-integrated surgery*. MIT Press 1996.
- Messmer P, Gross T, Suhm N, Regazzoni P, Jacob AL, Huegli RW. Modality-based navigation. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A24–9.
- Langlotz F. Potential pitfalls of computer aided orthopedic surgery. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A17–23.
- Gebhard F, Andreas W, Liener UC, Stockle U, Arand M. Navigation at the spine. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A35–45.
- Laine T, Lund T, Ylikoski M. Accuracy of pedicle screw insertion with and without computer assistance: a randomised controlled clinical study in 100 consecutive patients. *Eur Spine J* 2000; 9: 235–40.
- Schulze CJ, Munziger E, Weber U. Clinical relevance of accuracy of pedicle screw placement – a computed tomographic-supported analysis. *Spine* 1998; 23: 2215–21.
- Gay SB, Siström C, Wang GJ, Kahler D, Boman T, McHugh N, Goitz H. Percutaneous screw fixation of acetabular fractures with CT-guidance: preliminary results of a new technique. *J Roentgenol [Am]* 1992; 158: 819–22.
- Jacob AL, Messmer P, Stock KW, Suhm N, Baumann B, Regazzoni P, Steinbrich W. Posterior pelvic ring fractures: closed reduction and percutaneous CT-guided sacroiliac screw fixation. *Cardiovasc Intervent Radiol* 1997; 20: 285–94.
- Stockle U, Krettek C, Pohlemann T, Messmer P. Clinical applications-pelvis. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A46–56.
- Roult ML Jr, Kregor PJ, Simonian P, Mayo K. Early results of percutaneous iliosacral screws placed with the patient in the supine position. *J Orthop Trauma* 1995; 9: 207–14.
- Roult ML Jr, Simonian PT. Closed reduction and percutaneous skeletal fixation of sacral fractures. *Clin Orthop* 1996; 329: 121–8.
- Grutzner PA, Suhm N. Computer aided long bone fracture treatment. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A57–64.
- Rampersaud YR, Foley KT, Shen AC, Williams S, Solomito M. Radiation exposure to the spine surgeon during fluoroscopically assisted pedicle screw insertion. *Spine* 2000; 25: 2637–45.
- Muller-Alsbach UW, Staubli AE. Computer aided ACL reconstruction. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A65–7.
- Bukart A, Debski RE, McMahon PJ, Rudy T, Fu FH, Musahl V, et al. Precision of ACL tunnel placement using traditional and robotic technique. *Comput Aided Surg* 2001; 6: 270–8.
- Widmer KH, Grutzner PA. Joint replacement-total hip replacement with CT-based navigation. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A84–9.
- Widmer KH, Zurfluh B. Compliant positioning of hemispheric acetabular sockets for optimal range of motion. *J Orthop Res* 2003.
- Hube R, Birke A, Hein W, Klima S. CT-based and fluoroscopy-based navigation for cup implantation in total hip arthroplasty (THA). *Surg Technol Int* 2003; 11: 273–9.
- Dessenne V, Lavalley S, Julliard R, Cinquin P, Orti R. Computer assisted knee anterior cruciate ligament reconstruction: first clinical tests. *J image Guid Surg* 1995; 1: 59–64.
- Hofstetter R, Slomczykowski M, Sati M, Nolte LP. Fluoroscopy as an imaging means for computer-assisted surgical navigation. *Comput Aided Surg* 1999; 4: 65–76.
- Suhm N, Jacob AL, Nolte LP, Regazzoni P, Messmer P. Surgical navigation based on fluoroscopy-clinical application for computer-assisted distal locking of intramedullary implants. *Comput Aided Surg* 2000; 5: 391–400.
- Grutzner PA, Zheng G, Langlotz U, von Rectum J, Nolte LP, Wentzensen A, et al. C-arm based navigation in total hip arthroplasty-background and clinical experience. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A90–5.
- Schmucki D, Gebhard F, Grutzner PA, Hufner T, Langlotz F, Zheng G. Computer aided reduction and imaging. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A96–104.
- Fuchtmeyer B, Egersdoerfer S, Mai R, Hente R, Dragoi D, Monkman G, Nerlich M. Reduction of femoral shaft fractures in vitro by a new developed reduction robot system »RepoRobo«. *Injury Int J Care Injured* 2004; 35 Suppl 1: A113–9.