

Uporaba vodilnih šablon, izdelanih s tehnologijo hitre izdelave prototipov pri vstavitvi pedikularnih vijakov

Use of rapid prototyping drill guide template for pedicle screw placement

Matjaž Merc,¹ Igor Drstvenšek,² Matjaž Vogrin,¹ Tomaž Brajljeh,² Gregor Rečnik¹

¹Oddelek za ortopedijo, UKC Maribor, Ljubljanska ulica 5, 2000 Maribor

²Inštitut za proizvodno strojništvo, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

Korespondenca/ Correspondence:

Matjaž Merc, dr. med., Oddelek za ortopedijo, UKC Maribor, Ljubljanska ulica 5, 2000 Maribor, e-mail: matjaz.merc@gmail.com

Ključne besede:

model, pedikel, vretence, navigacija, prostoročna tehnika

Key words:

model, pedicle, vertebra, navigation, free-hand technique

Citirajte kot/Cite as:

Zdrav Vestn 2013; 82: 395–401

Prispelo: 11. maj 2012,
Sprejeto: 4. maj 2013

Izvelek

Izhodišča: Postavitev pedikularnih vijakov s prostoročno tehniko je povezana z znatnim odstotkom predrtja pedikla. To tveganje lahko zmanjšamo z uporabo medoperativne diaskopije ali z navigacijo, ki imata določene pomembne pomanjkljivosti. Obetaven princip, s katerim bi lahko odpravili večino težav, je metoda hitre izdelave prototipov, s katero lahko izdelamo bolniku prilagojene vodilne šablone, ki omogočajo optimalno pozicioniranje vijakov. V zadnjem desetletju je bilo izvedenih nekaj študij, v katerih so predvsem na kadavrih z uporabo šablon relativno uspešno vsadili pedikularne vijake. Pri nas smo izvedli klinično študijo in izdelali šablone, ki omogočajo hkratno vsaditev vijakov na več ravneh. V raziskavo smo prvič vključili tudi križnično hrbtnico.

Metode: V prospektivno klinično raziskavo primerov s kontrolami je bilo vključenih 15 oseb. V ledveno in križnično hrbtnico smo vstavili 30 pedikularnih vijakov z uporabo vodilnih šablon, 36 vijakov pa smo vstavili prostoročno pod nadzorom RTG. Na podlagi preoperativnih CT-posnetkov smo s postopkom selektivnega laserskega sintranja izdelali vodilne šablone. V obeh skupinah smo opravili analizo predrtja pediklov glede na pooperativni izvid CT.

Rezultati: Incidenca predrtja pedikla je pri uporabi vodilne šablone statistično značilno manjša kot pri kontroli.

Zaključki: Uporaba večnivojskih vodilnih šablon se je izkazala kot zanesljiva metoda, ki pomembno zmanjša verjetnost za poškodbo pedikla in s tem povezane zaplete. Kljub temu ima določene pomanjkljivosti, ki so povezane z relativno dolgim časom izdelave vodilnih šablon, z napakami pri izdelavi ali s pozicioniranjem med operacijo. Zaradi omenjenih lastnosti metoda ni nadomestila prostoročne tehnike ali navigacije, vendar je pomembna alternativa v izbranih primerih.

Abstract

Background: Pedicle screw placement using free hand technique has high incidence of pedicle perforation. The said risk can be reduced with intra-operative fluoroscopy or navigation, which have some disadvantages. A promising principle for solving most of the issues is the rapid prototyping technology. By this technique it is possible to manufacture patient specific drill guide templates that enable optimal pedicle screw placement. In the last decade, many studies have featured relatively successful implantations of pedicle screws through the use of drill guide templates, though mostly on cadavers. We performed a similar clinical study involving the manufacture of templates for the lumbar and sacral regions that enable simultaneous multi-level screw implanting.

Methods: A randomized clinical trial was performed in 15 patients. In the lumbar and sacral spine 30 screws were implanted using drill guide template and 36 screws using free hand technique under fluoroscopy supervision. Preoperative CT-scans were taken for drill guide template design and manufacture using selective laser sintering method. According to postoperative CT-scan analysis, pedicle perforation incidence was estimated.

Results: The incidence of cortex perforation was significantly reduced in the drill guide template group.

Conclusions: Drill guide templates have turned out to be a reliable solution that importantly reduces pedicle perforation incidence and complications related to it. However, there are shortcomings: a relatively lengthy manufacturing process, possible manufacturing faults and incorrect positioning during the operation. Owing to mentioned disadvantages, templates have not replaced free hand and navigation technique yet, but could represent a useful tool in some selected cases.

Uvod

Pedikularne vijake uporabljamo pri vsaditvah v travmatološko, degenerativno, onkogeno ali pooperativno spremenjena vretenca.¹ Kljub prednostim pa se srečujemo z določenimi tveganji, povezanimi predvsem s poškodbo spinalnega kanala in hrbtenjače, z zlomom pedikla, s kompresijsko poškodbo živčne korenine ali predrtjem žile. Velik delež zapletov opisujejo pri klasičnem načinu postavitve pedikularnih vijakov s prostoročno tehniko in tudi ob dodatnem nadzoru s pomočjo rentgenskega (RTG) ojačevalca, pri čemer je delež zapletov nekoliko nižji.²

Zaradi zgoraj opisanih zapletov se je pojavila težnja po idealni postavitvi in optimalnem premeru pedikularnih vijakov. V ta namen so razvili navigacijske sisteme, ki so zagotovili želeno natančnost, kar so potrdile številne raziskave. Sistemi temeljijo na preoperativni računalniški analizi CT-posnetkov, ki po ustreznem kalibriranju med operacijo vodijo operaterja glede na analizirani CT-posnetek.³⁻⁵ Pomanjkljivost tega sistema je predvsem dolgotrajno kalibriranje, ki je potrebno za vsako vretenca posebej. Ob tem potrebujemo v operacijski dvorani med posegom prisotnost dodatnega osebja, kar skupaj s podaljšanim časom operacije zvišuje tveganje za pojav oboperativne okužbe.⁶ Nenazadnje je nakup navigacijske opreme velik finančni zalogaj, oprema pa praviloma velika in zato nerodna za upravljanje v omejenem operacijskem prostoru.^{7,8}

Ob pomanjkljivostih prostoročne tehnike in sodobnih navigacijskih sistemov je nastala zamisel o izdelavi individualiziranih vodilnih šablon s pomočjo tehnologije hitre izdelave prototipov. Metoda temelji na predoperativni računalniški analizi CT-posnetkov in izdelavi šablone, ki se natančno prilega anatomski strukturi hrbtenice. Šablono sestavlja kanal, ki določa optimalno smer vsaditve vijaka. Takšne raziskave so do sedaj že nekajkrat uspešno izvedli na človeških kadavrih in tudi klinično.⁹⁻¹⁷

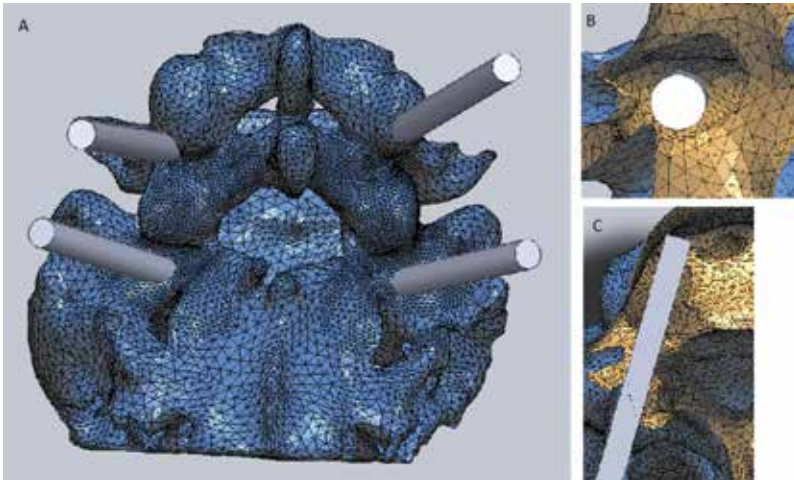
Preverjanje položaja pedikularnih vijakov in nepravilno pozicioniranje

Za preverjanje pooperativne lege pedikularnih vijakov in njihovega odnosa do sosednjih struktur je zlati standard analiza CT-posnetkov ali anatomska disekcija vretenca.¹⁸ Kljub prepričanju mnogih spinalnih kirurgov, da zadošča analiza položaja vijakov s pomočjo RTG-posnetka, se je ta zaradi številnih lažno pozitivnih in lažno negativnih rezultatov izkazal kot nezanesljiv. Podobno velja tudi za oceno predrtja oziroma poškodbe pedikla ali sosednjih struktur.^{19,20} Ocene napačno postavljenih pedikularnih vijakov se v literaturi razlikujejo; v obsežni klasični raziskavi, ki je zajemala prsno in ledveno hrbtenico, je ta vrednost znašala 21 %. Raziskavo so izvedli na kadavrih brez RTG-nadzora.^{18,20} Z ustreznim RTG-nadzorom sicer lahko zmerno zmanjšamo stopnjo nepravilnega položaja vijakov.²¹

Metoda hitre izdelave prototipov

Metoda hitre izdelave prototipov je tehnologija, s katero s postopkom selektivnega laserskega sintranja izdelamo poljubni model, ki ga lahko uporabimo v različne namene. Prednost metode hitre izdelave prototipov je velika natančnost in predvsem možnost naročnika, da ves čas sodeluje pri oblikovanju modela. Ta postopek praviloma zmanjša čas in stroške, ki so potrebni za operativni poseg.

Izdelava modela s pomočjo hitre izdelave prototipov temelji na pretvorbi dvodimenzionalnih slik CT ali magnetnoresonančnih posnetkov v 3D-sliko. Sliko (npr. skelet hrbtenice) v naslednji fazi računalniško obdelamo s programsko opremo 3D CAD, kar nam omogoči, da lahko vstavljamo različne elemente, kot so vodila in vsadki. Sledi oblikovanje navideznih šablon ali odlitkov. Ko sta navidezna šablona ali odlitek dokončno oblikovana, ju moramo pretvoriti v računalniški format STL. Tega odčita naprava za hitro izdelavo prototipov (3D-printer), s čimer omogočimo izdelavo dejanskega končnega produkta s postopkom selektivnega laserskega sintranja. Omenjeni postopek temelji na uporabi materiala v prahu (npr. poliamid), ki ga 3D-printer s sintranjem v plasteh



Slika 1: Pozicioniranje pedikularnih vijakov na navideznem modelu hrbtenice za ravni L 5 in S 1 (A). Vijaki potekajo skozi sredino pedikla (B, C).

nanaša v obliko želenega modela; s takšnim postopkom zlahka dobimo različne zapletene geometrijske oblike.²²⁻²⁴

Uporabo vodilnih šablon, ki se unikatno prilegajo dorzalnim elementom hrbtenice in služijo kot vodilo za vsaditev pedikularnih vijakov, so na kadavrih prvič opisali leta 1998.⁹ Šablono so izdelali po načelu rezkanja iz polikarbonata in jo uspešno preizkusili na trinajstih kadavrih na ravni ledvene hrbtenice.¹⁰ Zaradi boljše dostopnosti in možnosti izdelave natančnejših modelov sta metodo rezkanja kmalu zamenjali metodi stereolitografije in selektivnega laserskega sintranja – slednjo uporabljamo tudi pri nas.^{11,23} Za izdelavo vodilnih šablon so selektivno lasersko sintranje prvič uporabili v Leedsu leta 2003, in sicer na kadavrih za vstavev vijakov v vratno, prsno in ledveno hrbtenico. Poliamidni prah, ki ga praviloma uporabljamo, se je takrat izkazal kot odlični material za steriliziranje, ki praktično ne spremeni svoje oblike in mase.¹² Glavna težava pri izdelavi vodilnih šablon je izdelava optimalne oblike šablone. Oblikovati moramo namreč obliko, ki se trdno in natančno prilega površini dorzalnih struktur hrbtenice, s čimer zagotovimo zadostno stabilnost in natančnost. Hkrati mora model nasedati na dorzalne elemente hrbtenice čim bolj diskretno, tako da med operacijo zadošča čim manjše odmikanje in odstranitev obhrbteničnega mišičja. Zaradi teh lastnosti šablone v nekaterih raziskavah niso dosegle zadostne natančnosti.^{11,13,14} Posebej pri oblikovanju večnivojskih šablon, ki omogočajo hkratno vsaditev več vijakov.¹²

Prvi večji klinični raziskavi, ki opisujeta vsaditev pedikularnih vijakov v ledveno in prsno hrbtenico, so izvedli leta 2009 in 2011 na Kitajskem. Izdelali so šablono, ki se je po principu ključa in ključavnice prilegala celotni dorzalni površini hrbtenice, s čimer so dosegli zadostno čvrstost in natančnost. Šablona je omogočala vsaditev vijakov le za vsako raven posebej. Metoda se je izkazala kot učinkovita in potencialno uporabna v vsakdanji praksi.^{15,16}

Z našo raziskavo smo želeli razviti večnivojske vodilne šablone, ki bi v primerjavi s prostoročno tehniko pod nadzorom diaskopije omogočale natančnejšo vstavev pedikularnih vijakov v ledveno in križnično hrbtenico.

Metode

Raziskavo smo zasnovali kot prospektivno klinično raziskavo primerov s kontrolami in vključili 15 oseb. V hrbtenico smo vstavili 30 pedikularnih vijakov implantiranih z metodo uporabe vodilnih šablon, izdelanih s tehnologijo hitre izdelave prototipov in 36 vijakov, vstavljenih prostoročno pod RTG-nadzorom (kontrolna skupina). Uporabili smo jih pri bolnikih, pri katerih je bila predvidena fuzija dveh do štirih sosednjih vretenc, od prve ledvene do prve križnične ravni in ki pred tem še niso bili operirani na teh hrbteničnih ravneh.

Vse osebe, ki so bile vključene v raziskavo, so pred pričetkom raziskave podale pisno izjavo o sodelovanju. Izjava je skladna s Helsinško-tokijsko deklaracijo in potrjena pri nacionalnem etičnem odboru (30. 9. 2011, št. 76/09/11) in v skladu s klasifikacijo National Institute of Child and Human Development (NICHD) criteria.

Oblikovanje vodilne šablone

Pred operativnim posegom smo posneli CT ledveno-križnične hrbtenice s prečnimi rezi na 0,5 mm natančno. Bolnik je med snemanjem ležal na trebuhu, v položaju čim bolj podobnem položaju med operacijo. S tem smo zagotovili primerljiva medvretenčna razmerja kot med operacijo. Slike smo shranili v formatu DICOM in jih nato ob-



Slika 2: Vodilna šablona za ravni L 3 in L 4, izdelana s tehnologijo hitre izdelave prototipov.

delali z ustrežno programsko opremo (EBS ver. 2.2.1 (Ekliptik, Slovenija), s čimer smo dobili navidezni 3D-model ledveno-križnične hrbtenice. Nato smo 3D-model pretvorili v računalniški format STL. Iz dorzalnih elementov pretvorjenega navideznega modela hrbtenice smo s programsko opremo SolidWorks 2011 (SolidWorks Corp., USA) računalniško oblikovali vodilno šablono. Šablona se je kot odlitek prilegala dorzalnemu elementu fasetnega sklepa. To je omogočilo namestitvev šablone po načelu natičnega ključa, s čimer smo dosegli zadostno stabilnost. Sledila je zasnova poteka pedikularnih vijakov. Ti so bili usmerjeni natančno skozi center pedikla in se končali med 50 in 80 % premera telesa vretenca. Sredino predikla smo opredelili kot center najmanjšega premera prečnega prereza pedikla (Slika 1). Po pravilnem pozicioniranju vijakov smo jih računalniško odšteli od šablone, tako da je v šabloni nastal kanal, ki je med operacijo določal smer vijakov. Posamezne dele šablone smo med seboj povezali v prečni in vzdolžni smeri, s čimer smo dosegli zadostno stabil-

nost. Na koncu oblikovanja modela smo za vsak kanal izdelali še pušo z notranjim premerom svetline 2 mm, ki je omogočila začasno pričvrstitev šablone s Kirschnerjevo žico. Izdelava vodilne šablone je potekala po načelu hitre izdelave prototipov z metodo selektivnega laserskega sintranja. S to metodo smo iz poliamidnega prahu s 3D-printerjem izdelali plastično šablono. Šablono smo izdelali na 0,1 mm natančno in je zagotavljala zadostno trdnost. Plastični model smo na koncu še mehansko očistili in predoperativno sterilizirali (Slika 2).

Klinični potek in pooperativna analiza

Operacija je pri vseh preiskovancih potekala v splošni anesteziji, na trebuhu in v poudarjeni ledveni lordozi. Uporabili smo klasični dorzalni pristop za zatrditev ledvenih vretenc. Pri obeh operativnih tehnikah smo natančno prikazali dorzalno površino fasetnih sklepov vretenc. Vodilno šablono smo natančno namestili na fasete, skozi vodilne kanale ter pušo pa uvedli Kirschnerjeve žice, s čimer smo zagotovili stabilnost. Sledila je zaporedna odstranitev žic, ki smo jih zamenjali s pedikularnimi vijaki (Slika 3). Uporabili smo standardne pedikularne vijake premera 6,25 mm, ustrezne dolžine, tipa Click'X (Synthes, Swiss). Končni položaj vijakov smo nadzorovali s pomočjo RTG-ojačevalca. V primeru prostoročne tehnike, smo glede na položaj fasetnih sklepov in procesus transversusov določili vstopno mesto za pedikularni vijak.¹ Na mestu vstopa smo v skladu z operativno tehniko s šilom najprej utrli vodilni kanal, nato pa je sledila vsaditev pedikularnih vijakov, katerih položaj smo sproti preverjali z diaskopijo.

V zaključni fazi smo analizirali predrtje pediklov. Na podlagi pooperativnega CT

Tabela 1: Analiza predrtja pedikla pri uporabi vodilne šablone in pri kontrolni skupini.

	Šablona	Kontrolna skupina	p-vrednost
Število preiskovancev	7	8	
Število vijakov	30	36	
Poškodba oz. predrtje pedikla*	4	15	0,015

* – v številni minimalno invazivni korteksa pedikla in artefakt odseva kovine na CT-posnetku



Slika 3: Vstavitev pedikularnih vijakov z uporabo vodilne šablone.

ledvene in križnične hrbtenice smo ocenili morebitne poškodbe oziroma predrtje pedikla v obeh skupinah. Če se je navoj vijaka jasno dotikal kortikale pedikla, je pri analizi šlo za poškodbo pedikla. Prav tako smo v primeru artefakta, ko zaradi odseva kovine na CT-posnetku ni bilo mogoče jasno opredeliti predrtja pedikla, to upoštevali kot poškodbo oziroma predrtje pedikla.

Tabela 2: Analiza predrtja pedikla pri uporabi vodilne šablone in pri kontrolni skupini za prvo križnično raven.

	Šablona	Kontrolna skupina	p-vrednost
Število preiskovancev	3	6	
Število vijakov	6	12	
Poškodba oz. predrtje pedikla*	0	6	0,05

* – v številski minimalno invazijo korteksa pedikla in artefakt odseva kovine na CT-posnetku

Statistična analiza

Za statistično analizo smo uporabili opisne statistike, in sicer test Hi-kvadrat, s katerim smo analizirali binominalne vrednosti za predrtje pedikla. Statistično pomembna razlika je bila določena pri vrednosti 0,05. Vse izračune smo opravili s programsko opremo SPSS ver. 17.0.

Rezultati

V raziskavi smo obravnavali 15 preiskovancev, ki smo jih naključno izbrali glede na redno čakalno listo. Iz raziskave nismo izključili nobenega od preiskovancev.

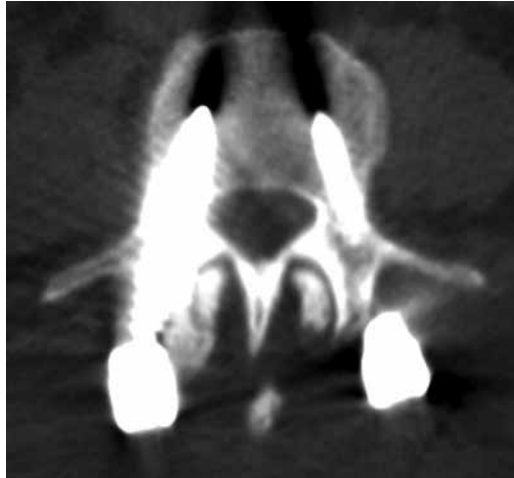
Skupno smo v obeh skupinah vsadili 66 vijakov. Pri skupini, pri kateri smo uporabili vodilno šablono, smo ugotovili predrtje korteksa pedikla v 4 primerih, kar je statistično pomembno manj kot v kontrolni skupini s 15 primeri (Tabela 1). V obeh skupinah so bile perforacije korteksa klinično neme; bolniki niso imeli nevroloških izpadov ali zapletov, povezanih z žilno poškodbo.

Opravili smo tudi analizo uporabnosti šablone za vsaditev vijakov v prvo sakralno raven. Ugotovili smo statistično pomembno razliko v stopnji predrtja pri uporabi vodilne šablone glede na kontrolno skupino, in sicer v prid uporabe šablone (Tabela 2).

Razpravljanje

Izdelava posamezniku prilagojenih vodilnih šablon omogoča optimalno izbiro premera in dolžine pedikularnih vijakov glede na morfološke lastnosti posameznega hrbteničnega vretenca. Omogoča tudi natančno izdelavo preoperativnega načrta, kar je še posebej uporabno pri operativnih posegih na hrbtenici, ki so potrebni zaradi hudih

Slika 4: Artefakt vijaka na CT-posnetku zaradi odseva kovine.



degenerativnih sprememb ali skoliotične deformacije hrbtenice.¹⁷ Med operativnim posegom načeloma ni potrebna uporaba RTG-ojačevalca, s čimer pomembno zmanjšamo izpostavljenost rentgenskemu sevanju. Stroški za izdelavo modela so v primerjavi z navigacijo občutno nižji.^{15,16}

Rezultati naše raziskave so potrdili, da uporaba vodilnih šablon za vsaditev vijakov v ledveno in križnično hrbtenico pomembno zmanjša verjetnost za poškodbo korteksa pedikla in s tem morebitne zaplete, povezane s poškodbo živčnih struktur. Metodo smo prvič uspešno preizkusili tudi na križnični hrbtenici. V obeh primerih smo v primerjavi s prostoročno tehniko zagotovili večjo natančnost pri vsaditvi vijakov. S tem smo dokazali, da so tudi večnivojske šablone dovolj zanesljive in natančne za uporabo. Glede na relativno veliko stopnjo poškodbe korteksa pedikla, ki smo jo ugotovili pri analizi v obeh skupinah, je mogoče povzeti, da je šlo zaradi artefakta pri odsevu kovine na CT-posnetku v znatnem številu primerov za lažno predrtje oziroma poškodbo (Slika 4). To potrjuje tudi klinična slika pri preiskovancih, ki v nobenem primeru niso imeli znakov dodatnih pooperativnih nevroloških okvar.

V primerjavi z uspešnima kliničnima raziskavama, ki so ju opravili na Kitajskem in sta zahtevali obsežno odstranitev mehkih tkiv za natančno namestitev šablone,^{15,16} je bilo v našem primeru potrebno odstraniti mehka tkiva le nad fasetnimi sklepi in v njihov neposredni bližini. S tem se je pomembno zmanjšal obseg poškodbe mehkih

tkiv. V raziskavah, kjer namestitev šablon temelji zgolj na opornih točkah in je potrebna minimalna odstranitev mehkih tkiv, praviloma niso zagotovili zadostne natančnosti vodila.⁹⁻¹⁶ Glede na rezultate naše raziskave lahko povzamemo, da metoda namestitve šablone na faseto po načelu natičnega ključa ter prečna in vzdolžna povezanost posameznih delov šablone nudijo zadostno čvrstost in natančnost. Zaradi manjše potrebe po preparaciji se zmanjša invazivnost posega, ki je bolj enostaven in krajši.

Pri postavitvi pedikularnih vijakov ima še vedno vodilno vlogo prostoročna tehnika. Ne glede na to, je očitno, da ima ta metoda pomanjkljivosti,² ki so privedle do računalniško vodene postavitve vijakov.³⁻⁵ Tudi navigacija ima določene pomanjkljivosti, ki so: relativno strma učna krivulja, napake, povezane z nehotenim premikom ali motenjem senzorjev, visoka cena navigacijskih naprav in daljši čas operativnega posega.^{15,16} Po drugi strani pa je uporaba posamezniku prilagojenih vodilnih šablon zanesljiva in cenovno ugodna rešitev, ki ponestavi in skrajša čas operativnega posega. Zaradi opisane lastnosti obstaja možnost za rutinsko uporabo te metode v hrbtenični kirurgiji predvsem pri težjih degenerativnih in prirojenih nepravilnostih.¹⁷ Kljub vsemu ima tudi ta metoda pomanjkljivosti, ki so povezane z relativno dolgim časom izdelave vodilnih šablon, dizajniranjem, ki zahteva sodelovanje tako inženirja kot kirurga in ob upoštevanju človeškega faktorja lahko v določenih okoliščinah privede do nepravilnosti pri izdelavi šablone. Za pravilno namestitev šablone je potrebna natančnejša preparacija tkiv v primerjavi s prostoročno tehniko vsaditve vijakov, tudi vsak večji premik hrbteničnih struktur ali šablone lahko privede do napake pri postavitvi vijaka.

Zaključki

Zaradi navedenih lastnosti vodilnih šablon, izdelanih s tehnologijo hitre izdelave prototipov, bi lahko bile le-te v prihodnosti pomemben pripomoček pri vsaditvi pedikularnih vijakov. Posebej v določenih izbranih primerih, ko navigacija ni na voljo in gre za hujše, npr. skoliotične ali posttravmatske

okvare, so lahko šablone še posebej uporabne. Kljub temu še vedno obstajajo nekateri upravičeni zadržki, zaradi katerih metoda še ni izrinila oziroma nadomestila navigacije ali prostoročne tehnike.

Literatura

- Mattei TA, Meneses MS, Milano JB, Ramina R. "Free-hand" technique for thoracolumbar pedicle screw instrumentation: Critical appraisal of current "state-of-art". *Neurol India* 2009; 57 Suppl 6: 715–721.
- Zeiller SC, Lee J, Lim M, Vaccaro AR. Posterior thoracic segmental pedicle screw instrumentation: Evolving methods of safe and effective placement. *Neurol India* 2005; 53: 458–465.
- Holly LT, Foley KT. Intraoperative spinal navigation. *Spine* 2003; 28 Suppl 15: 54–61.
- Mirza SK, Wiggins GC, Kuntz C 4th, York JE, Bel-labarba C, Knonodi MA, et al. Accuracy of thoracic vertebral body screw placement using standard fluoroscopy, fluoroscopic image guidance, and computed tomographic image guidance: A cadaver study. *Spine* 2003; 28 Suppl 4: 402–413.
- Papadopoulos EC, Girardi FP, Sama A, Sandhu HS, Cammisa FP Jr. Accuracy of single-time, multilevel registration in image-guided spinal surgery. *Spine J* 2005; 5 Suppl 3: 263–268.
- Hughes SP, Anderson FM. Infection in the operating room. *J Bone Joint Surg Br* 1999; 81 Suppl 5: 754–755.
- Lim MR, Girardi FP, Yoon SC, Huang RC, Cammisa FP Jr. Accuracy of computerized frameless stereotactic image-guided pedicle screw placement into previously fused lumbar spines. *Spine* 2005; 30 Suppl 15: 1793–1798.
- Sagi HC, Manos R, Benz R, Ordway NR, Connolly PJ. Electromagnetic field-based image-guided spine surgery part one: Results of a cadaveric study evaluating lumbar pedicle screw placement. *Spine* 2003; 28 Suppl 17: 2013–2018.
- Radermacher K, Porthelme F, Anton M, Zimolong A, Kaspers G, Rau G, Staudte HW. Computer assisted orthopaedic surgery with image based individual templates. *Clin Orthop Relat Res* 1998; 354: 28–38.
- Birnbaum K, Schkommodau E, Decker N, Prescher A, Klapper U, Radermacher K. Computer-assisted orthopedic surgery with individual templates and comparison to conventional operation method. *Spine* 2001; 26 Suppl 4: 365–370.
- Van Brussel K, Vander SJ, van Audekercke R, Swaelens B, Vanden Berghe L, Fabry G. A medical image based template for pedicle screw insertion. *Computer Meth. Biomechanics Biomed. Engng* 1998; 2: 347–354.
- Berry E, Cuppone M, Porada S, Millner PA, Rao A, Chiverton N, Seedhom BB. Personalised image-based templates for intra-operative guidance. *Proc Inst Mech Eng H* 2005; 219 Suppl 2: 111–118.
- Goffin J, Van Brussel K, Martens K, Vander Sloten J, Van Audekercke R, Smet MH. Three-dimensional computed tomography-based, personalized drill guide for posterior cervical stabilization at C1–C2. *Spine* 2001; 26 Suppl 12: 1343–1347.
- Owen BD, Christensen GE, Reinhardt JM, Ryken TC. Rapid prototype patient-specific drill template for cervical pedicle screw placement. *Comput Aided Surg* 2007; 12 Suppl 5: 303–308.
- Lu S, Xu YQ, Zhang YZ, Li YB, Xie L, Shi JH et al. A novel computer-assisted drill guide template for lumbar pedicle screw placement: A cadaveric and clinical study. *Int J Med Robot* 2009; 5 Suppl 2: 184–191.
- Ma T, Xu YQ, Cheng YB, Jiang MY, Xu XM, Xie L, Lu S. A novel computer-assisted drill guide template for thoracic pedicle screw placement: a cadaveric study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2012; 132: 65–72.
- Yang JC, Ma XY, Lin J, Wu ZH, Zhang K, Yin QS. Personalised modified osteotomy using computer-aided design-rapid prototyping to correct thoracic deformities. *Int Orthop* 2011; 35 Suppl 12: 1827–1832.
- Weinstein JN, Spratt KE, Spengler D, Brick C, Reid S. Spinal pedicle fixation: Reliability and validity of roentgenogram-based assessment and surgical factors on successful screw placement. *Spine* 1988; 13: 1012–1018.
- Berlemann U, Heine P, Müller U, Stoupis C, Schwarzenbach O. Reliability of pedicle screw assessment utilizing plain radiographs versus CT reconstruction. *Eur Spine J* 1997; 6: 406–410.
- Farber GL, Place HM, Mazur RA, Jones DE, Damiano TR. Accuracy of pedicle screw placement in lumbar fusions by plain radiographs and computed tomography. *Spine* 1995; 20: 1494–1499.
- Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine* 1990; 15: 11–15.
- Truscott M, de Beer D, Vicatos G, Hosking K, Barnard L, Booysen G, Campbell RI. Using RP to promote collaborative design of customised medical implants. *Rapid Prototyping J* 2007; 13 Suppl 2, 107–114.
- Drstvensek I, Ihan Hren N, Strojnik T, Brajliah T, Valentan B, Pogacar V, Zupancic Hartner T. Applications of rapid prototyping in cranio-maxillo-facial surgery procedures. *Intern Jour of Biol and Biomed Eng* 2008; 1: 29–38.
- Gibson I, Cheung LK, Chow SP, Cheung WL, Beh SL, Savalani M, Lee SH. The use of rapid prototyping to assist medical applications. *Rapid Prototyping J* 2006; 12 Suppl 3: 53–58.