



Review Study on Electromechanically Supported Dental Implant Applications

Faruk Karaca^{1,a,*}, Engin Ünal^{2,b}

¹Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Firat University, Elazığ/Turkey

²Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Firat University, Elazığ/Turkey

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 27/05/2024

Accepted: 14/06/2024

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

In recent years, the use of electromechanical systems in dental implant applications has become widespread as an alternative to traditional dental surgery. Electromechanical systems include electronically controlled mechanisms. Such applications include methods developed to minimize important factors that directly affect the quality of the procedure, such as the physician's personal dexterity and sensitivity. Electromechanical systems enable physicians to perform more accurate operations thanks to their advanced sensitivity and accuracy capabilities. In particular, the process of precisely determining and preparing the place where the implant will be installed is extremely important for patient health and operation success. In this regard, the electromechanical system works together with the physician and supports the physician in the control and application of the system. This study presents a review of the scope and nature of recent available studies.

Keywords: Dental implant, electromechanics, robot, artificial intelligence.

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 27/05/2024

Kabul: 14/06/2024

ÖZ

Son yıllarda geleneksel diş cerrahisine alternatif olarak dental implant uygulamalarında elektromekanik sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Elektromekanik sistemler elektronik kontrollü mekanizmaları ihtiva etmektedir. Bu tür uygulamalar, hekimin kişisel el becerisi ve hassasiyeti gibi işlem kalitesini doğrudan etkileyen önemli faktörleri minimize etmek için geliştirilen yöntemleri içermektedir. Elektromekanik sistemler gelişmiş hassasiyet ve doğruluk yetenekleri sayesinde hekime daha doğru operasyon yapma olanağı sağlar. Özellikle implantın monte edileceği yerin hassas bir şekilde belirlenmesi ve hazırlanması süreci, hasta sağlığı ve operasyon başarısı için son derece önemlidir. Bu bakımdan elektromekanik sistem hekimle birlikte çalışarak sistemin kontrolünde ve uygulamasında hekime destek olur. Bu çalışmada, yakın zamandaki mevcut çalışmaların kapsamı ve niteliği hakkında bir derleme sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Diş implantı, elektromekanik, robot, yapay zeka.

^a fkaraca@firat.edu.tr

^{id} 0000-0003-1874-9274

^b enginunal@firat.edu.tr

^{id} 0000-0002-0501-3690

How to Cite: Karaca F, Unal E (2024) Review Study on Electromechanically Supported Dental Implant Applications, Journal of Science and Technology, 3(1): 30-34

Giriş

Diş implantlarıyla tedavi yöntemi çeşitli nedenlerle dişlerini kaybetmiş hastalar için protez uygulamalarına alternatif/destek olması amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlamda gelişen implant teknolojisi sayesinde özellikle tekil diş kayıplarında hızla protez uygulamalarının yerini almıştır. Ancak burada karşılaşılan en büyük sorun implantın çene kemiğine doğru bir şekilde yerleştirilmesidir. İmplantın olması gereken yere yerleştirilmesi hem çene kemiğinin mekaniğini hem de hasta konforunu doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra vücudun diğer iskelet sisteminde olduğu gibi implantın kullanım ömrünü uzatmaktadır. Diğer taraftan bu işlemin doğru yapılmaması durumunda uzun vadeli implantın kullanılmasını engellemekte ve cerrahi işlem yapılan bölgede kanama, nekroz, sinir harabiyeti ve inflamasyona neden olmaktadır (Bahrami et al., 2024).

Geleneksel diş implant uygulamalarında, implantın yer seçimi ve pozisyonunun ayarlanması tamamen hekimin bilgi, beceri ve yeteneğine kalmıştır. Bu durum hastanın kendisini tedavi edebilecek doğru hekim arayıp bulması için ekstra zaman harcayacağı süreci doğurmaktadır. Oysaki gelişen elektromekanik teknoloji hayatın her alanında olduğu gibi diş implant tedavisinde de kullanılabilir.

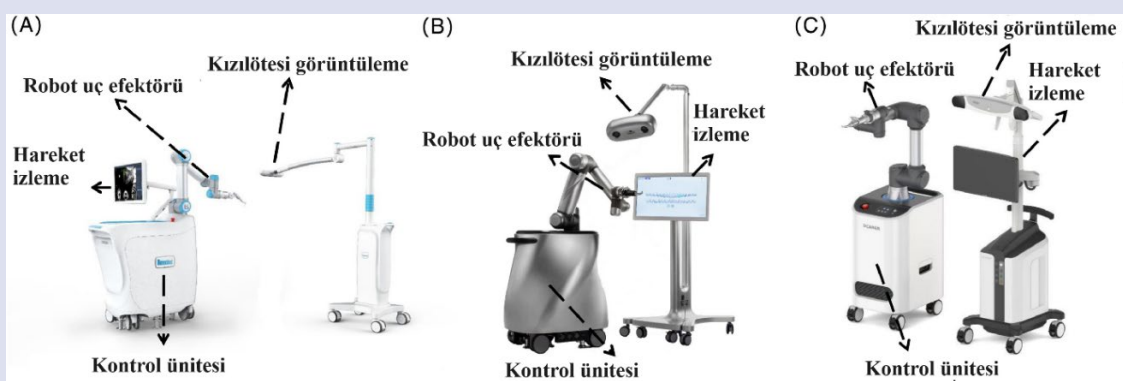
Dental implant işlemleri için tasarlanan elektromekanik sistemler üç ana kısımdan oluşur. Bunlar; elektromekanik bir işletim platformu, bir görsel sistem ve bir merkezi kontrol sistemidir. Bu elemanlar sırasıyla diş hekiminin ellerine, gözlerine ve beyne benzer işlevleri yerine getirir (Wu et al., 2019). Ameliyat yapılırken merkezi kontrol sistemi, dişsiz alanın mevcut konumunu belirlemek için görsel sistemi kullanır. Daha sonra implant alanını hazırlamak ve implantı ameliyat öncesi plana göre yerleştirmek için elektromekanik kola kılavuzluk eder (Tao et al., 2022). Dental implant elektromekanik sistem, manuel prosedürlerle karşılaştırıldığında hassas, etkili ve stabil cerrahi işlem açısından büyük bir kolaylık sağlar. Bu kolaylık, implant yerleştirmede doğruluğun artmasını ve cerrahi risklerin azalmasını sağlar (Liu et al., 2023; Wu et al., 2019). Elektromekanik yardımcı implant yerleştirmenin doğruluğunu ve güvenliğini artırmak için çeşitli ilerlemeler kaydedilmiştir.

İlk olarak robotik kol, implantı konumlandırırken problemler yardımı ile fiziksel kılavuzluğu sağlar. İkinci olarak, hastanın çene hareketini izlemek ve ekranda eş zamanlı geri bildirim sağlamak için robotik sisteme bir hasta izleme cihazı entegre edilmiştir.

Son olarak, bu sistem operatör tarafından kontrol edilir ve çalıştırılır. Bu da tedavi planında esnek değişiklikler yapılmasına ve gerektiğinde cerrahi işlemin durdurulabilmesine olanak tanır (Cheng et al., 2021; Tao et al., 2022).

Son zamanlarda diş hekimi ile robot arasındaki etkileşimin düzeyine bağlı olarak aktif, pasif ve yarı aktif sistemler gibi farklı tipte dental implant robotları kullanıma sunulmuştur (Şekil 1) (Wu et al., 2019; Xu et al., 2023; Yan & Jia, 2022). Ayrıca bir takım çalışmalar, robot destekli implant yerleştirmede robotunun doğruluğunu değerlendirmiştir (Bolding & Reebye, 2022; Cheng et al., 2021; Shi et al., 2024; Tao et al., 2022; Xu et al., 2023). Dental implant robotları, cerrahi riskleri azaltırken implant yerleştirmenin verimliliğini, stabilitesini ve doğruluğunu artırma yetenekleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Ancak şu anda dental implant robotlarının cerrahi verimlilik (hazırlık ve operasyon süresi) ve farklı robotik sistemlerde implant yerleştirme doğruluğu üzerindeki etkilerini değerlendiren kapsamlı bir inceleme bulunmamaktadır.

Çene kemiği rekonstrüksiyonunda robot teknolojisinin uygulanması, yirmi yılı aşkın bir süredir kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Robot destekli diş cerrahisi, diş implantı tedavisinde öne çıkan bir konu olarak ortaya çıkmıştır (Wu et al., 2019). Diş cerrahisinde robotik sistemlerin geliştirilmesi, diş implantı prosedürlerinin hassasiyetini ve etkinliğini artırma ve sonuçta hem hastalara hem de uygulayıcılara fayda sağlama konusunda büyük umut vaat etmektedir. Dental implant robotları, insan-robot etkileşiminin düzeyine bağlı olarak aktif, pasif ve yarı aktif sistemler halinde kategorize edilebilir. Aktif robotlar, bağımsız olarak ağza girip çıkabiliyor, implant yerini hazırlayabiliyor ve implantı yerleştirebiliyor. Operatörün rolü öncelikle delici takımı değiştirmek, komut vermek ve robotun çalışmasını izlemektir. Pasif robotlar, işlem sırasında operatörün robotik kollarını yönlendirmesini gerektirir. Robotun ağza giriş çıkışından, implant yerinin hazırlanmasından ve implantın yerleştirilmesinden operatör sorumludur. Yarı aktif robotlar ise implant alanının hazırlanmasını ve implant yerleştirmesini otonom olarak gerçekleştirebilir. Ancak bu robotlar, ağza giriş ve çıkış sırasında robot kolunun manevrası için operatörün yardımına ihtiyaç duyar (Chen et al., 2023; Haidar, 2017; Li et al., 2023; Qiao et al., 2023; Shi et al., 2024; Tao et al., 2022; van Riet et al., 2021; Wang et al., 2024; Wu et al., 2019; Xu et al., 2023; Yan & Jia, 2022; Yang et al., 2022).



Resim 1. Dental implant robotları (A: Pasif, B: Yarı aktif, C: Aktif) (Xu et al., 2023)

Figure 1. Dental implant robots (A: Passive, B: Semi-active, C: Active)

Elektromekanik Destekli Dış İmplantı Operasyonunun Verimliliği

Elektromekanik destekli implant cerrahisi de dahil olmak üzere implant yerleştirme sürecini iyileştirmek için çeşitli teknolojiler tanıtılmıştır. Bu teknolojinin, implant yerleştirme hassasiyetini önemli ölçüde artırma yeteneği olduğu bildirilmiştir (Pimkhaokham et al., 2022). Elektromekanik destekli implant cerrahisinin amacı, başarısızlıkları, bitişik anatomik dokuya verilen hasar ve cerrahi komplikasyonlar gibi olumsuz etkileri azaltarak daha iyi klinik sonuçlar elde etmektir (Pimkhaokham et al., 2022; Wu et al., 2019). Elektromekanik destekli implant cerrahisi statik ve dinamik olmak üzere iki temel teknolojik yaklaşım içerir. Statik elektromekanik destekli implant cerrahisinde, osteotomi ve implant yerleşimini yönlendirmeyi içerir. Bunun tersine, gerçek zamanlı dinamik olarak da bilinen elektromekanik destekli implant cerrahisi sistemi, işlem sırasında canlı görüntüleme sağlamak için optik izleme cihazlarını kullanarak cerrahlara gerçek zamanlı olarak yardımcı olur. Her iki sistem de yaygın olarak kullanılmakta ve kapsamlı bir şekilde incelenmekte olup, geleneksel cerrahiye kıyasla cerrahların implant yerleştirmede daha yüksek doğruluk elde etmelerine yardımcı olma yeteneklerini göstermektedir (Pimkhaokham et al., 2022; Wu et al., 2019). Elektromekanik destekli teknolojiler ameliyat öncesi planlamayı, cerrahi şablonları ve video navigasyonunu geliştirmiş olsa da, hala bazı zorlukları vardır. Delme ve kesme prosedürleri sırasında gerçek zamanlı doğruluk ve kararlılığın sağlanması temel zorluklardandır (Gargallo-Albiol et al., 2019; Pimkhaokham et al., 2022).

Bu alandaki yapılan çalışmalardan anlaşılan odur ki, elektromekanik sistemlerle yerleştirilen implantların, bilgisayar destekli implant cerrahisi sistemleriyle yerleştirilenlerden daha doğru olduğunu göstermiştir. (Gargallo-Albiol et al., 2019; Pimkhaokham et al., 2022).

Elektromekanik Sistemlerin Hassasiyeti

Bu tür çalışmalarda Talmazov ve arkadaşlarının ortaya koyduğu implant konumlandırma doğruluğu metodolojisi

kullanılarak değerlendirilmiştir (Talmazov et al., 2020). Cerrahi operasyon sonrası implant yerleştirilen bölgenin hassas ölçümleri konik ışınli bilgisayarlı tomografi (CBCT) ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi implantın yerleştirilmesinin üç boyutlu sapmasının ölçümü için düzlemsel sapma, tepe sapması ve açıl sapma kullanılmıştır. Burada;

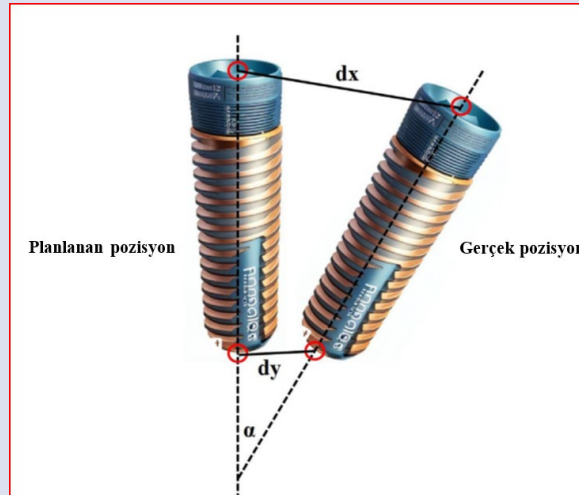
Düzlemsel sapma: Yerleştirilen implantın boyun platformunun merkezi ile planlanan implant arasında milimetre (mm) cinsinden ölçülen doğrusal yer değiştirmeyi ifade eder.

Tepe sapması: Yerleştirilen implantın apikal kısmının merkezi ile planlanan implant arasında milimetre (mm) cinsinden ölçülen doğrusal yer değiştirmeyi ifade eder.

Eksenel sapma: Yerleştirilen implantın varsayılan merkezi eksenini ile planlanan implant arasındaki derece ($^{\circ}$) cinsinden açıyı temsil eder.

Serbest elle yerleştirme ile karşılaştırıldığında robot yardımcı implant yerleştirme, önemli ölçüde daha yüksek konumsal doğruluk sergiledi (Shi et al., 2024). Serbest elle yerleştirme için düzlem sapması, tepe sapması ve açıl sapmanın sırasıyla 1,88 - 1,12 mm, 2,89 - 1,64 mm ve 8,23° - 7,14° arasında olduğu bildirilmiştir. Buna karşılık, elektromekanik destekli yerleştirmenin düzlem sapmasının 1,17 - 0,36 mm, tepe sapmasının 1,41 - 0,62 mm ve açıl sapmasının 3,46° - 3,11° olduğu görülmüştür (Shi et al., 2024).

Benzer çalışmalar değerlendirildiğinde, robotik sistemin dinamik navigasyon sistemine kıyasla implant konumlandırma daha az sapma olduğunu göstermiştir. Bu yöntemin dış implant cerrahisi için hala değerli bir araç olma potansiyelini sürdürmektedir. Robotik sistemin başarıları gelişmiş konum doğruluğu, delme eksenini stabilize etme ve insan titremelerini ortadan kaldırma becerisine bağlanabilir. Öte yandan, bilgisayar destekli dinamik navigasyon büyük ölçüde cerrahın becerisine ve deneyimine bağlıdır ve bu da implant yerleştirme doğruluğunda değişkenlik yaratabilir (Chen et al., 2023; T. Sun et al., 2018; Tao et al., 2022; Wu et al., 2019; Zhou et al., 2021).



Resim 2. Ölçüm doğruluğunun şematik diyagramı (dx, Düzlemsel sapma; dy, Tepe sapması; α , Eksenel sapma) (Shi et al., 2024)
Figure 2. Schematic diagram of measurement accuracy (dx, Plane deviation; dy, Peak deviation; α , Axial deviation)

Cerrahi Operasyon Süresi

Elektromekanik destekli implant operasyonlarında her ne kadar manuel operasyonlara göre daha hassas işlemler gerçekleştirilebilse de işlem süresi için bu avantajdan bahsetmek mümkün değildir. Çünkü elektromekanik sistemin hazırlanması ve implant bölgesinin analizi uzun sürmektedir. Özellikle birden fazla implant yerleştirilmesi gündeme geldiğinde bu süre oldukça yüksektir. Literatürdeki sınırlı sayıda yapılan çalışmalar göstermiştir ki tek diş implant uygulamasında bu süre 20 – 25 dakika iken iki diş implant uygulamasında 40 – 50 dakika arasında olmaktadır. Öte yandan aktif ve pasif elektromekanik destekli implant yerleştirme sistemleri karşılaştırıldığında aktif sistemlerin pasif sistemlere göre daha uzun süre aldıkları gözlemlenmiştir. Pasif sistemlerde sistemin delme hızı ve konumlandırma aşamaları kontrol ediliyor olması işlemin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Aktif sistemlerde ise operasyonun bütün aşamalarının bilgisayar kontrolü ile gerçekleşmesi süreyi uzatmaktadır (Bai et al., 2021; Bolding & Reebye, 2022; Qiao et al., 2023; X. Sun et al., 2011; Xu et al., 2023).

Elektromekanik Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları

Elektromekanik sistemler konumlandırma ve hassas delme işlemlerinde el ile yapılan operasyonlara göre daha üstündür. Özellikle hekimin yorgunluk, dikkat eksikliği ve titreme gibi insan kaynaklı hataları bertaraf edebilmektedir (Bolding & Reebye, 2022; Cheng et al., 2021; Qiao et al., 2023; Shi et al., 2024; Tao et al., 2022; Xu et al., 2023).

Salt elektromekanik sistemler yerine yapay zekâ kullanan sistemlerin kullanılması bu alanda daha büyük ilerlemelere yol açması düşünülmektedir. Yapay zekâyâ sahip elektromekanik sistemler eğitilebilir olduklarından işlem öncesi hazırlık aşamaları ve implant yerleştirme işlemlerini optimize ederek daha hızlı ve kişiye özel operasyonları gerçekleştirebilir (Kurt Bayrakdar et al., 2021; Mureşanu et al., 2023; Revilla-León et al., 2023).

Elektromekanik sistemler yukarıda bahsedilen avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar özellikle maliyetinin yüksek olması, kalifiye ekip ihtiyacı ve ağız açıklığının sınırlı olduğu hastalarda uygulamanın yapılabilirliğinin zorlaştırması olarak sıralanmaktadır (Chiapasco et al., 2009; Wallace & Froum, 2003).

Ayrıca implant uygulanan hastanın çene kemiği kalitesi, yaşı ve cinsiyeti gibi kişiye bağlı değişim gösteren faktörler de elektromekanik sistemin karar vermesini zorlaştırmaktadır (Clementini et al., 2012).

Sonuçlar

Sonuç olarak, elektromekanik diş implantı uygulamalarında maliyet, ulaşılması zor alanlara erişim zorluğu ve karmaşık vakaları yönetememe gibi sınırlamaları vardır. Bu cerrahi işlemler hâlâ insan uzmanlığı gerektirmektedir. Bununla birlikte, diş implantı

robotları, implant konumlandırmasında iyi bir doğruluk sergilemektedir. Mevcut çalışmalar laboratuvar ortamları veya basit vakalarla sınırlı olduğundan, diş implantı robotlarının belirli durumlara uygunluğu konusunda özel bir öneride bulunması zordur. Ayrıca mevcut diş implantı robotlarına göre daha fazla seçenek ve işlevselliğe sahip yeni robotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yeni robotlar daha küçük boyutlara sahip olmalıdır ve yapay zekâyı içermelidir. Yapay zekanın diş implantı robotlarına entegrasyonu, gerçek zamanlı rehberlik, dinamik karar verme ve otonom cerrahi yetenekler sağlayarak bu alanda devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda yapılan bu derleme çalışması gelişen teknolojiye paralel olarak diş implantı tedavisinde elektromekanik sistemlerin kullanılabilirliğini göstermektedir. Ele alınan çalışmalar değerlendirildiğinde, araştırmaların henüz başlangıç aşamasında olduğu sonucuna varılmıştır. Tam otonom bir sistemin kullanılabilmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç olduğu açıkça görülmektedir.

Kaynaklar

- Bahrami, R., Pourhajbagher, M., Nikparto, N., & Bahador, A. (2024). Robot-assisted dental implant surgery procedure: A literature review. *Journal of Dental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2024.03.011>
- Bai, S. Z., Ren, N., Feng, Z. H., Xie, R., Dong, Y., Li, Z. W., & Zhao, Y. M. (2021). Animal experiment on the accuracy of the Autonomous Dental Implant Robotic System. *Chinese Journal of Stomatology*, 56(2), 170–174. <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112144-20210107-00008>
- Bolding, S. L., & Reebye, U. N. (2022). Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 128(4), 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.12.048>
- Chen, J., Bai, X., Ding, Y., Shen, L., Sun, X., Cao, R., Yang, F., & Wang, L. (2023). Comparison the accuracy of a novel implant robot surgery and dynamic navigation system in dental implant surgery: an in vitro pilot study. *BMC Oral Health*, 23(1), 179. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02873-8>
- Cheng, K., Kan, T., Liu, Y., Zhu, W., Zhu, F., Wang, W., Jiang, X., & Dong, X. (2021). Accuracy of dental implant surgery with robotic position feedback and registration algorithm: An in-vitro study. *Computers in Biology and Medicine*, 129, 104153. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.104153>
- Chiapasco, M., Casentini, P., & Zaniboni, M. (2009). Bone augmentation procedures in implant dentistry. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 24 Suppl, 237–259. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19885448>
- Clementini, M., Morlupi, A., Canullo, L., Agrestini, C., & Barlattani, A. (2012). Success rate of dental implants inserted in horizontal and vertical guided bone regenerated areas: a systematic review. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 41(7), 847–852. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2012.03.016>

- Gargallo-Albiol, J., Barootchi, S., Salomó-Coll, O., & Wang, H. (2019). Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 225, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2019.04.005>
- Haidar, Z. S. (2017). Autonomous Robotics: A fresh Era of Implant Dentistry... is a reality! *Journal of Oral Research*, 6(9), 230–231. <https://doi.org/10.17126/joralres.2017.072>
- Kurt Bayrakdar, S., Orhan, K., Bayrakdar, I. S., Bilgir, E., Ezhov, M., Gusarev, M., & Shumilov, E. (2021). A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Medical Imaging*, 21(1), 86. <https://doi.org/10.1186/s12880-021-00618-z>
- Li, C., Wang, M., Deng, H., Li, S., Fang, X., Liang, Y., Ma, X., Zhang, Y., & Li, Y. (2023). Autonomous robotic surgery for zygomatic implant placement and immediately loaded implant-supported full-arch prosthesis: a preliminary research. *International Journal of Implant Dentistry*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00474-2>
- Liu, L., Watanabe, M., & Ichikawa, T. (2023). Robotics in Dentistry: A Narrative Review. *Dentistry Journal*, 11(3), 62. <https://doi.org/10.3390/dj11030062>
- Mureşanu, S., Almăşan, O., Hedeşiu, M., Dioşan, L., Dinu, C., & Jacobs, R. (2023). Artificial intelligence models for clinical usage in dentistry with a focus on dentomaxillofacial CBCT: a systematic review. *Oral Radiology*, 39(1), 18–40. <https://doi.org/10.1007/s11282-022-00660-9>
- Pimkhaokham, A., Jiaranuchart, S., Kaboosaya, B., Arunjaroenasuk, S., Subbalekha, K., & Mattheos, N. (2022). Can computer-assisted implant surgery improve clinical outcomes and reduce the frequency and intensity of complications in implant dentistry? A critical review. *Periodontology 2000*, 90(1), 197–223. <https://doi.org/10.1111/prd.12458>
- Qiao, S., Wu, X., Shi, J., Tonetti, M. S., & Lai, H. (2023). Accuracy and safety of a haptic operated and machine vision controlled collaborative robot for dental implant placement: A translational study. *Clinical Oral Implants Research*, 34(8), 839–849. <https://doi.org/10.1111/clr.14112>
- Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, B. A., Galluci, G. O., Att, W., & Krishnamurthy, V. R. (2023). Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 129(2), 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.008>
- Shi, J., Liu, B., Wu, X., Liu, M., Zhang, Q., Lai, H., & Tonetti, M. S. (2024). Improved positional accuracy of dental implant placement using a haptic and machine-vision-controlled collaborative surgery robot: A pilot randomized controlled trial. *Journal of Clinical Periodontology*, 51(1), 24–32. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13893>
- Sun, T., Lan, T., Pan, C., & Lee, H. (2018). Dental implant navigation system guide the surgery future. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 34(1), 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2017.08.011>
- Sun, X., McKenzie, F. D., Bawab, S., Li, J., Yoon, Y., & Huang, J.-K. (2011). Automated dental implantation using image-guided robotics: registration results. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 6(5), 627–634. <https://doi.org/10.1007/s11548-010-0543-3>
- Talmazov, G., Bencharit, S., Waldrop, T. C., & Ammoun, R. (2020). Accuracy of Implant Placement Position Using Nondental Open-Source Software: An In Vitro Study. *Journal of Prosthodontics*, 29(7), 604–610. <https://doi.org/10.1111/jopr.13208>
- Tao, B., Feng, Y., Fan, X., Zhuang, M., Chen, X., Wang, F., & Wu, Y. (2022). Accuracy of dental implant surgery using dynamic navigation and robotic systems: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 123, 104170. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104170>
- van Riet, T. C. T., Chin Jen Sem, K. T. H., Ho, J.-P. T. F., Spijker, R., Kober, J., & de Lange, J. (2021). Robot technology in dentistry, part two of a systematic review: an overview of initiatives. *Dental Materials*, 37(8), 1227–1236. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.06.002>
- Wallace, S. S., & Froum, S. J. (2003). Effect of Maxillary Sinus Augmentation on the Survival of Endosseous Dental Implants. A Systematic Review. *Annals of Periodontology*, 8(1), 328–343. <https://doi.org/10.1902/annals.2003.8.1.328>
- Wang, W., Xu, H., Mei, D., Zhou, C., Li, X., Han, Z., Zhou, X., Li, X., & Zhao, B. (2024). Accuracy of the Yakebot dental implant robotic system versus fully guided static computer-assisted implant surgery template in edentulous jaw implantation: A preliminary clinical study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 26(2), 309–316. <https://doi.org/10.1111/cid.13278>
- Wu, Y., Wang, F., Fan, S., & Chow, J. K.-F. (2019). Robotics in Dental Implantology. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 31(3), 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.coms.2019.03.013>
- Xu, Z., Xiao, Y., Zhou, L., Lin, Y., Su, E., Chen, J., & Wu, D. (2023). Accuracy and efficiency of robotic dental implant surgery with different human-robot interactions: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 137, 104642. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104642>
- Yan, Y., & Jia, Y. (2022). A Review on Human Comfort Factors, Measurements, and Improvements in Human–Robot Collaboration. *Sensors*, 22(19), 7431. <https://doi.org/10.3390/s22197431>
- Yang, S., Chen, J., Li, A., Li, P., & Xu, S. (2022). Autonomous Robotic Surgery for Immediately Loaded Implant-Supported Maxillary Full-Arch Prosthesis: A Case Report. *Journal of Clinical Medicine*, 11(21), 6594. <https://doi.org/10.3390/jcm11216594>
- Zhou, L.-P., Zhang, R.-J., Sun, Y.-W., Zhang, L., & Shen, C.-L. (2021). Accuracy of Pedicle Screw Placement and Four Other Clinical Outcomes of Robotic Guidance Technique versus Computer-Assisted Navigation in Thoracolumbar Surgery: A Meta-Analysis. *World Neurosurgery*, 146, e139–e150. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.10.055>