

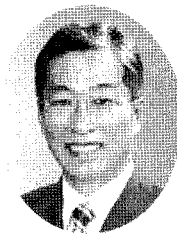
치과 임플란트 수술 보조 로봇(ARDIS) 시술 방법



김 광 호
(재)광주테크노파크
가전로봇센터
ghkim@gjtp.or.kr



조 연 술
(재)광주테크노파크
가전로봇센터
cho@gjtp.or.kr



강 동 완
조선대학교
치의학과
dwkang@chosun.ac.kr



정 상 화*
조선대학교
기계공학과
shjeong@chosun.ac.kr

1. 서 론

치과 임플란트 수술은 세계적으로 매년 약 2백만 건 이상 시행되고 있다. 하지만, 복잡하고 정밀한 수술과정으로 인해 치과 의사 중 16%만이 임플란트 수술을 수행할 수 있다. 임플란트와 관련된 연구는 주로 임플란트 제작, 사전 시술 계획, 그리고 3차원 영상화 분야에 초점이 맞추어져 있다⁽¹⁾. 치과용 임플란트 시술의 성공여부는 정확한 사전시술 계획(perception, decision) 뿐만 아니라 수술단계(action)에서 치과 의사의 시술 수행능력도 영향을 미친다. 임플란트 시술시 발생할 수 있는 드릴의 진동에 의한 의사의 손떨림(tremor), 환자의 움직임, 의사의 피로도 및 비숙련도 등은 임플란트 시술의 정확도를 떨어뜨려 환자의 치유 기간을 늘린다. 독일의 하이델버그(Heidelberg)대학에서는 치과용 임플란트 시술에 로봇을 도입하였다⁽²⁾. 네비게이션 시스템과 산업용 로봇을 이용하여 의사의 수술 과정을 보조한다. 로봇이 의사의 역할을 완벽하게 수행할 수는 없지만, 시술을 보조함으로써 보다 안정적이고 신속한 시술이 가능하다는 일례를 보여준다. 하지만 제어가 어렵고, 구조가 복잡하기 때문에 치과 임플란트 수술에 적용하기 위해서는 좀 더 많은 연구가 이루어져야 한다.

본 리뷰에서는 치과 임플란트 연구 개발 동향을 분석하고,

수술 보조 로봇을 이용한 치과 임플란트 수술 방법을 제안하였다.

2. 치과 임플란트 개요

임플란트란 인체의 조직이 상실되었을 때 이를 회복시켜 주는 대체물을 의미한다. 치과에서는 인공치아 이식을 말한다. 상실된 치아의 치근을 대신할 수 있도록, 인체에 거부반응이 없는 티타늄으로 만든 인공치근을 이가 빠져나간 치조골에 심어서 유착시킨 뒤 인공치아를 고정시켜 치아의 원래 기능을 회복하도록 하는 시술이다⁽³⁻⁹⁾. 임플란트 수술 과정을 Fig. 1에 나타내었다. CT촬영을 통해 환자의 악안면 데이터를 수집하고 영상 처리 작업을 거쳐 3차원 영상으로 변환한다. 의사는 3차원 영상을 통해 환자의 상태를 진단하고 수술 전략을 수립한다. 또한 변환된 3차원 영상 데이터를 이용해 RP 제작 기술로 템플릿을 가공할 수도 있다. 네비게이션 장비나 수술 보조 로봇을 이용하여 임플란트 수술을 실행한다. 임플란트의 부정확한 위치는 해부학적 구조에 치명적인 손상을 주고, 드릴링 작업의 정교함에 따라 치유기간이 달라지기 때문에 임플란트 수술은 의사의 풍부한 경험과 지식을 필요로 한다.

Table 1에 임플란트 식립 방법들을 나열하였다⁽¹⁰⁾. 기술적

진보에도 불구하고 임플란트 수술의 대부분이 프리핸드(fre-hand) 드릴링에 의해 이루어진다. 임플란트 홀의 프리핸드 드릴링은 의사의 경험에 의존하기 때문에 시술계획과의 일치 여부를 확인하기 어렵지만, 수술 준비 시간이나 기술적 소비가 적어 가장 흔히 사용되는 수술 방법이다.

드릴링 작업을 가이드하기 위한 간단한 수술 도구로 템플릿(template)을 활용하기도 한다. 템플릿은 치과 기공사에 의해 제작되고 드릴링 작업을 쉽게 할 수 있도록 한다. Table 2에 상용화되고 있는 대표적인 가이드 제작 기술을 나타내었다. 수작업에 의한 가이드 제작방식은 정확도가 가장 떨어지는 방법

이지만 국내 치과에서 많이 사용하는 방법이다. 기존의 가이드 제작 방법은 수작업에 의한 레진이나 기타 보조물을 사용하는 방법을 주로 이용하였고 많은 시간과 인력을 필요로 한다. 정확한 가이드 제작을 위하여 CT자료를 이용한 컴퓨터 유도 드릴링 머신(computer-driven drilling machine)을 이용한 방법이 도입되었으며⁽¹¹⁾, 현재는 3D 형상화 기술의 발전에 힘입어 3차원 적층 기술로 보다 손쉽고 빠르게 제작할 수 있게 되었다.

이스라엘의 Tactile Technologies Ltd.에서 Fig. 2와 같이 탐침을 이용해 환자의 악안면 정보를 획득하는 방법이 개발되었다⁽¹²⁾. ILS(implant location system)는 탐침을 통해 환자의 턱뼈 구조를 파악할 수 있는 탐침 측정 모듈, 획득한 데이터를 변환하여 의사가 적절한 수술 전략을 수립할 수 있도록 도와주는 네비게이션 시스템, 드릴 구속 장비(drill-restraining sheath)를 장착할 수 있는 드릴 안내(drill guidance) 시스템으로 구성되어 있다. 수술용 템플릿의 역할을 하는 드릴 구속 장비는 기존의 템플릿과 달리 수술중에도 드릴의 위치와 방향을 수정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 탐침에 의한 악안면 측정 방식은 환자에게 상처를 남길 수 있다.

현재 상업적으로 가장 두드러진 분야는 환자로부터 획득한 영상 정보를 바탕으로 악안면 구조를 3차원 영상으로 표현함

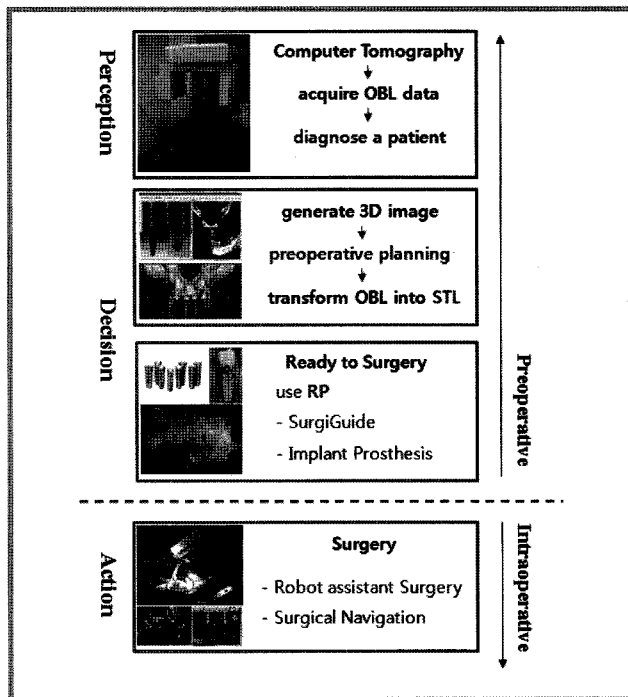


Fig. 1 Dental implant surgery process

Table 1 Dental implantology⁽¹⁰⁾

Method	Technology
Conventional insertion of implant	- Freehand - Using a template
Computer assisted preoperative planning, surgery supported by template	- ImplantKiss - Med3D - NobelGuide
Intraoperative navigation	- Medtronic - Artma - Robodent ...
New approach for registration, intraoperative modification of template-like device	- Tactile technologies Ltd.
Robotics	- Research & development

Table 2 Fabrication methods of implant surgical template

Fabrication method	Company
Conventional template	Inovate Implant Technology, EZ stent
Computer driven drilling machine	Danube University Kren Georg Schick Dental
Rapid Prototype	Materialise, I-Dent, Media Lab.
Other methods	Tactile Ltd(Custom-Template), University of Heidelberg (Robot Guide)

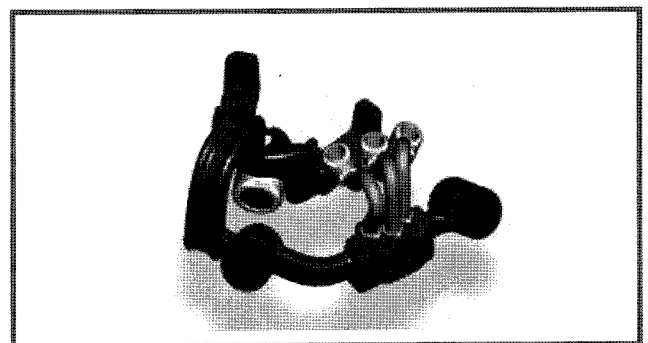


Fig. 2 Implant location system(Tactile Technologies Ltd.)⁽¹²⁾

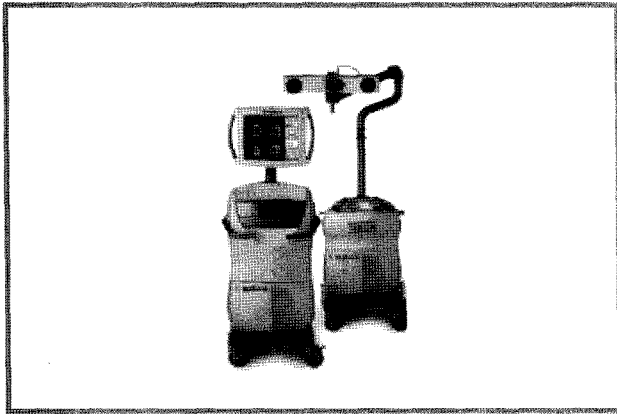


Fig. 3 Medtronic StealthStation®(TREONTM)⁽⁴¹⁾

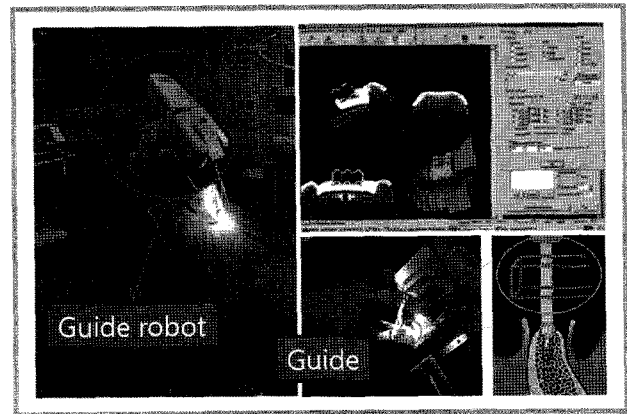


Fig. 4 Robot for implant dentistry⁽²⁾

으로써 의사가 수술 계획을 수립할 수 있도록 하고, 수립된 수술 전략을 바탕으로 템플릿을 가공하는 수술전 플래닝 시스템이다. 대표적인 시스템으로는 ImplantKiss⁽¹³⁾, NobelGuide⁽¹⁴⁾, Simplant "SurgiGuide"⁽¹⁵⁾ 등이 있다.

치과 수술에 사용하는 네비게이션은 지속적인 연구 개발로 신뢰성과 정확성이 상당히 높은 컴퓨터 보조 장비 중에 하나이다⁽¹⁶⁻²⁰⁾. Fig. 3에 대표적인 네비게이션 시스템을 나타내었다. 이러한 시스템의 목적은 짧은 시간 내에 환자에게 인공 보철물을 제공하는데 있다⁽²¹⁻²⁶⁾. 수술용 네비게이션 시스템은 위치 선정을 용이하게 할 수 있지만, 각도 조절에 대한 영상 정보를 수집하기 어렵고, 프리핸드 드릴링으로 인한 의사의 손 떨림과 같은 랜덤 요소에 대한 문제를 해결할 수 없다. 템플릿의 경우에는 수술중에 미리 계획된 임플란트 식립 위치와 방향의 수정이 어렵다. 또한 재사용이 불가능하고, 드릴 직경에 따라 여러 개의 템플릿이 필요하다. 이러한 문제들을 해결할 수 있는 대안이 로봇이다. 치과 임플란트 수술에서 턱의 움직임을 보상할 수 없기 때문에 완전 자동화된 실시간 로봇을 도입하기는 어렵다. 따라서 임플란트 수술은 의사와 로봇의 상호 협력을 통해서 서로의 단점을 보완할 수 있는 반능동 시스템인 보조 로봇이 적합하다⁽¹⁰⁾.

수술 로봇은 일반적으로 직선 운동 보다는 각 운동이 중요시된다. 따라서 시스템의 제어를 용이하게 하고 안정성을 높이기 위해 직선운동과 각 운동이 분리된 로봇(decoupled robot)이 사용된다. 임플란트 수술 보조 로봇은 치과 드릴을 수술 위치로 이동한 후에 말단 장치를 통해 임플란트 식립을 위한 드릴 구멍을 뚫는다. 드릴 구멍의 방향을 설정하기 위해서는 2 자유도 각 운동이 가능한 말단 장치가 필요하다. 또한, 드릴링 경로를 유지할 수 있는 추가적인 자유도가 필요하다. 의료용 로봇은 안전이 가장 중요한 요소이기 때문에 높은 가속도와 복잡한

기구학적 구조는 피해야 한다⁽²⁸⁾.

Fig. 4는 독일의 하이델버그 대학에서 연구한 임플란트 시술 가이드 로봇을 나타내었다⁽²⁾. 기존의 CT 영상을 바탕으로 3D 구강 영상을 생성하고, 환자 좌표를 인식하고, 생성된 좌표를 로봇 좌표로 전송한다. 로봇은 시술자에 의해 입력된 드릴링의 초기 위치, 방향, 깊이를 설정하고 가이드를 시술 위치에 배치한다. TaMed사에서 개발한 PC 기반 프로그램인 TomoRob을 이용하여 제어 가능한 700mm의 상용 로봇암을 이용하였고, 시뮬레이션 및 기구부의 시각화가 가능하다. 시술자에 의해서 시술 계획을 입력하면, 로봇은 TomoRob에 의해서 구동된다. 아직은 임상단계로 기존의 일회성 가이드 제작의 번거러움을 개선했지만, 각도 조절에 대한 정보는 제공하지 않는다. 임플란트 시술에 로봇 암을 도입한 예로 치과용 임플란트 시술에서 로봇암의 도입의 가능성을 시사하였다.

3. 치과 임플란트 수술 보조 로봇(ARDIS)

많은 수술들이 제한된 수술 영역내에서 한 개의 점에 대해 상대적으로 넓고 정밀한 각 운동을 필요로 한다. 예를 들면 복강경 수술에서 내시경 또는 기타 수술도구는 투관침(trocar)을 통해 환자피부의 작은 절개구에 삽입하여 수술 위치에 도달하는데 절개구의 제한으로 인해 투관침은 삽입점(entry point)을 기준으로 선회운동한다.

Fig. 5는 치과 임플란트 수술에서 각도조절시 고려해야 할 사항을 보여준다. 각도조절시 고려해야 할 사항으로는 임플란트 축과 드릴팁과의 거리(d_1), 임플란트 축과 드릴 축과의 각도(α), 그리고 드릴 깊이(d_2)이다. Table 3에 임플란트 핸드피스와 드릴 직경에 따른 드릴의 회전속도를 나타내었다. 임플란트 홀의 드릴링 작업은 마찰열로 인한 턱뼈의 손상을 막기 위해

한 번에 시술을 하지 않고 드릴직경에 따라 순차적으로 시술한다. 따라서 드릴의 위치가 항상 동일해야 한다. 또한, 초기 각 편차(initial angle deviation, α)는 수술이 진행됨에 따라 드릴 축과 임플란트 축의 거리를 더욱 크게 만드는 원인이 된다. 초기 각 편차는 또한 드릴의 도달 깊이(d_2)에도 영향을 주기 때문에 정밀한 위치제어와 초기 각 편차가 없도록 각도 조절하여야 한다.

Fig. 6에 각도 조절 방법을 나타내었다. 일반적인 로봇 기구부를 사용할 경우 Fig. 6(a)와 같이 회전각(θ)만큼 각도 조절을 하면 목표점으로부터 $\sin\theta$ 만큼 틀어지게 되어 별도의 보상을 위한 운동을 필요로 한다. 따라서, 이러한 수술 임무를 수행하기 위해서 수술 도구의 회전 운동과 병진 운동이 분리되어야 한다. 이러한 운동을 구현할 수 있는 메커니즘이 RCM (remote center of motion) 메커니즘이다. Fig. 6(b)와 같이 가상 중심 기구부를 이용한 경우에는 각도조절을 하더라도 수술도구가 항상 목표점을 향하고 있기 때문에 추가적인 위치제어가 용이하다. 이와 같은 이유로 의료용 로봇에 사용되는 로봇은 수술 도구를 수술 위치로 안내하는 직선 포지셔닝 기구부와 각도조절을 하더라도 항상 목표를 지향할 수 있는 각도조절 기구부를 분리하는 형태(decoupled robot)가 적합하다. 회전 운동은 원적 운동 중심 메커니즘으로 이중평행사변형 링크를 이용하여 제어가 용이하고 구조가 간단하도록 설계하여야 하였다.

가상 운동 중심(remote center of motion) 메커니즘을 이용한 치과 임플란트 수술 보조 로봇(assistant robot for dental implant surgery, ARDIS)의 개략도를 Fig. 7에 나타내었다. ARDIS는 의사의 인지능력과 판단능력을 이용하고, 로봇의 정밀성과 정확성을 접목한 인간-로봇 협업 매니플레이터(human-robot cooperative manipulator)이다. ARDIS는 의사에게 영상 정보를 제공하는 네비게이션 시스템과 의사의

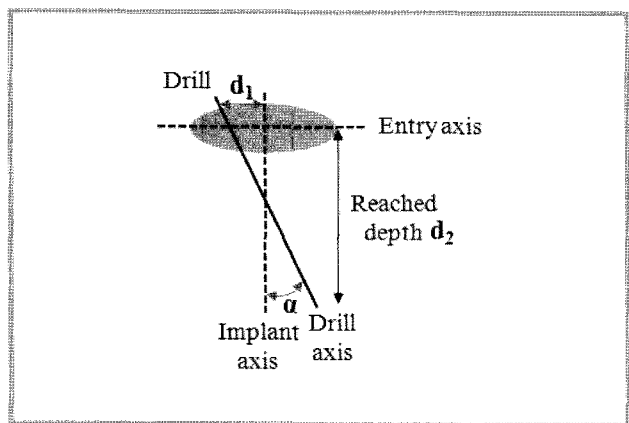


Fig. 5 Components considered in dental implant drilling⁽²⁹⁾

손 떨림을 방지하기 위해 수술 도구를 가이드 하는 반능동 안내 시스템(semi-active guidance system)으로 구성된다. 네비게이션 시스템은 CT를 통해 획득한 환자 데이터를 모델링하고 수술 전략을 세우는데 도움을 주는 수술전 플래닝(preoperative planing) 기능을 갖는다. 또한, 수술 중에는 환자와 수술 도구의 위치를 인식하여 수술 전략에 따라 수술이 진행되는지 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 도와주는 네비게이션 기능을 포함한다. ARDIS는 가상 중심점을 기준으로 각운동을 하는 가상 운동 중심 기구부와 가상 중심 기구부를 수술 영역내로 위치시켜주는 포지셔닝(gross positioning) 기구부로 구성된다. 반능동 안내 시스템은 6축 F/T 센서를 사용해 로봇의 자세와 위치를 제어한다.

4. 결론

치과 임플란트 수술에서 매식체(이식재료)의 방향과 각도의 오류는 환자의 치유기간을 늘리고, 임플란트 수술의 실패 원인이 된다. 또한 깊이 조절의 실패는 신경손상으로 인한 감각이상, 시술부위 감염 등의 문제를 유발할 수 있다. 본 리뷰에서는 프리핸드에 의한 의사의 손떨림과 수술 진행 중 수정이 힘든

Table 3 Drilling velocity according to drill diameter of handpiece⁽³⁰⁻³³⁾

Diameter(mm)	2.0	2.7	3.0	3.3
Velocity(RPM)	800 → 20			

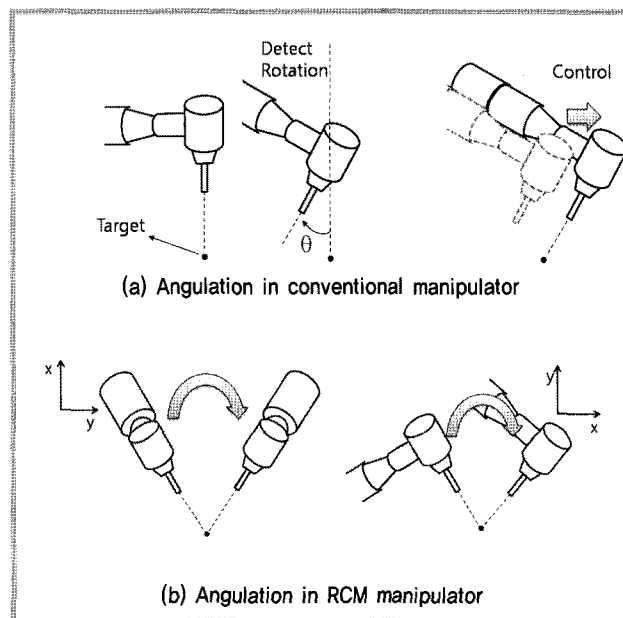


Fig. 6 Angulation methods of manipulator

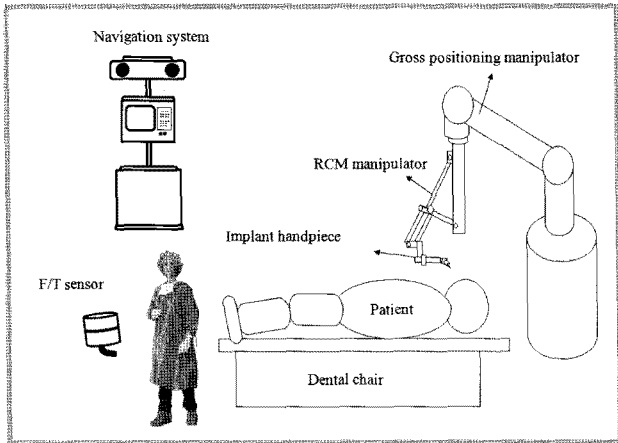


Fig. 7 Introduction of assistant robot for dental implant surgery(ARDIS)

템플릿의 단점을 보완할 수 있는 방법으로 치과 임플란트 수술 보조 로봇을 제안하였다. ARDIS는 의사 옆에서 수술 과정을 보조하는데 사용되고, 모의 수술을 도와주는 시뮬레이터로도 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 산업자원부지정 조선대학교 치과용 정밀 장비 및 부품 지역혁신센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Brief, J., Hassfeld, S., Redlich, T. and Ziegler, C., 2000, "Robot assisted insertion of dental implants—a clinical evaluation," *Int. J. of Computer Assisted Radiology and Surgery—CARS*, pp. 932–937.
- (2) Brief, J., Hassfeld, S., Boesecke, R., Voegelé, M., Krempien, R., Treiber, M. and Mähling, J., 2002, "Robot assisted Dental Implantology," *Int. Poster J.*, Vol. 4, No. 1, Poster. 109.
- (3) Albrektsson, T., Zarb, G., Worthington, P. and Eriksson, A. R., 1986, "The long term efficiency of currently used dental implants: A review and proposed criteria of success," *Int. J. Oral Maxillofac. Implants*, Vol. 1, No. 1, pp. 11–25.
- (4) Ekfeldt, A., Carlsson, G. E. and Brånemark, G., 1994, "Clinical evaluation of the single-tooth restorations supported by osseointegrated implant: A retrospective study," *Int. J. Oral Maxillofac. Implants*, Vol. 9, No. 2, pp. 179–183.
- (5) English, C. E., 1993, "Implant-supported versus implant-natural-tooth-supported fixed partial dentures," *J. Dent. Symp.*, Vol. 1, pp. 10–15.
- (6) Jemt, T., 1991, "Osseointegrated implants for single tooth replacement: a 1-year report from a multicenter prospective study," *Int. J. Oral Maxillofac. Implants*, Vol. 6, pp. 29–42.
- (7) Jemt, T., Linden, B. and Lekholm, U., 1990, "Failures and complications in 127 consecutively placed fixed partial prostheses supported by Branemark implants: From prosthetic treatment to first annual checkup," *Int. J. Oral Maxillofac. Implants*, Vol. 7, pp. 185–194.
- (8) Misch, C. E., 1993, *Contemporary implant dentistry*, Mosby-Year Book, Inc, St. Louis.
- (9) Naert, I., Quirynen, M., Steenberghe, D., Darius, P., 1992, "Six-year prosthodontic study of 509 consecutive inserted implants for the treatment of partial edentulism," *J. Prosthet. Dent.*, Vol. 67, pp. 236–245.
- (10) Schicho, K., Kronreif, G. and Ewers, R., 2007, "Theoretical background for the development of a robot in navigated dental implantology," *Int. J. CARS*, Vol. 2, pp. S412–S418.
- (11) Jrg, N., 2004, "Fabrication of Surgical Template for CT-based Implant Planning," *International Poster of Journal Dental Oral Medical*, Vol. 6, No. 04, Poster. 248.
- (12) Tactile Technologies Ltd., Implant location system, Israel, (<http://www.tactile-tech.com>)
- (13) Ewers, R., Schicho, K., Reichwein, A. and Shohat, M., 2007, "Navigated template based implantology—the innovative ImplantKiss™ workflow," *Proc. of 4th Int. Conf. on computer Aided Surgery around the Head*.
- (14) Nobel Biocare, NobleGuide, Switzerland, (<http://www.nobelbiocare.com>)
- (15) Materialise Ental NV., Simplant, (<http://www.materialise.com>)
- (16) Ewers, R., Schicho, K., Seemann, R., Reichwein, A., Figl, M. and Wagner, A., 2004, "Computer aided navigation in dental implantology: 7 years of clinical experience," *J. Oral Maxillofac. Surg.*, Vol. 62, No. 3, pp. 329–334.
- (17) Krüger T., 2006, "Ein modulares Navigationssystem für die dentale Implantologie," PhD-Thesis, Technical University of Berlin.
- (18) Brief, J., Hassfeld, S., Sonnenfeld, U., Persky, N., Krempien, R., Treiber, M. and Mähling, J., 2001, "Computer guided insertion of dental implants—a clinical evaluation," *CARS2001*, pp. 696–701.
- (19) Shapira, L., 2002, "Image guided implantology—real-time guidance of dental implant surgery in the operative field using CT-scan image," *CARS2002*, pp. 959–964.
- (20) Schermeier, O., Lueth, T., Cho, C., Hildebrand, D., Klein, M,

- Nelson, K. and Bier, J., 2002, "The precision of the RoboDent System—An in vitro study," CARS2002, pp. 947–952.
- (21) Watzinger, F., Birkfellner, W., Wanschitz, F., Millesi, W., Schopper, C., Sinko, K., Huber, K., Bergmann, H. and Ewers, R., 1999, "Positioning of dental implants using computer-aided navigation and an optical tracking system: case report and presentation of a new method," *J. of Cranio-Maxillofacial Surg.*, Vol. 27, No. 2, pp.77–81.
- (22) Zoppi, M., Zlatanov, D. and Gosselin, C. M., 2005, "Analytical kinematics models and special geometries of a class of 4-DOF parallel mechanisms," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1–10.
- (23) Szymanski, D., Hein, A. and Lueth, T. C., 2003, "Navi-X—a planning and treatment system for dental implantology based on navigated projection images," *International Congress Series*, No. 1256, pp. 1243–1249.
- (24) Kramer, F. J., Baethge, C., Swennen, G. and Rosahl, 2004, "Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement," *Clinical Oral Implant Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 60–68.
- (25) Kim, E. K., 1996, "Image reformation with a personal computer for dental implant planning," *Korea Journal of Oral Medicine*, Vol. 21, No. 2, pp. 255–264.
- (26) Marmulla, R., Brief, J., Heurich, T., Mühling, J. and Hassfeld, S., 2002, "Perspectives of computer aided implantology, *Zahn rztl Implantol*, Vol. 18, pp. 152–158.
- (27) Medtronic Navigation Co., *StealthStation Catalog*, Louisville, USA (<http://www.medtronicnavigation.com>)
- (28) Korb W., Kornfeld M., Birkfellner W., Boesecke R., Figl M., Fuerst M., Kettenbach J., Vogler A., Hassfeld S. and Kronreif G., 2005, Risk analysis and safety assessment in surgical robotics : a case study on a biopsy robot, *Minim. Invasive Ther. Allied Technol*, Vol. 14, No. 1, pp. 23–31.
- (29) Koulechov, K. and Lueth, T., 2004, "A new metric for drill location for Navigated Control in navigated dental implantology," *International congress Series*, Vol. 1268, pp. 1220–1225.
- (30) Brisman, D., 1996, "The effect of speed, pressure, and time on bone temperature during the drilling of implant sites," *Int. J. Oral Maxillofac Implants*, Vol. 11, pp. 35–37.
- (31) Iyer, S., Weiss, C., and Mehta, A., 1997, "Effects of drill speed on heat production and the rate and quality of bone formation in dental osteotomies, Part II: relationship between drill speed and healing," *Int. J. Prosthodont*, Vol. 10, No. 6, pp. 536–540.
- (32) Sharawy, M. and Misch, C., 2002, "Heat generation during implant drilling: The significance of motor speed," *J. Oral Maxillofac Surg.*, Vol. 60, pp. 1160–1169.
- (33) Cordioli, G. and Majzoub, Z., 1997, "Heat generation during implant site preparation: An in vitro study," *Int. J. Oral Maxillofac Implants*, Vol. 12, No. 2, pp. 186–193.