

로봇을 이용한 두개골 천공 시스템의 공구 경로 생성

정연찬[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Tool-path Generation for a Robotic Skull Drilling System

YunChan Chung[†]

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Received 2 March, 2013; received in revised form 1 April, 2013; accepted 3 April, 2013

ABSTRACT

This paper presents a tool-path generation methods for an automated robotic system for skull drilling, which is performed to access to some neurosurgical interventions. The path controls of the robotic system are classified as *move*, *probe*, *cut*, and *poke* motions. The four motions are the basic motion elements of the tool-paths to make a hole on a skull. *Probing*, *rough cutting* and *fine cutting* paths are generated for skull drilling. For the rough cutting path circular paths are projected on the offset surfaces of the outer top and the inner bottom surfaces of the skull. The projected paths become the paths on the top and bottom layers of the rough cutting paths. The two projected paths are blended for the paths on the other layers. Syntax of the motion commands for a file format is also suggested for the tool-paths. Implementation and simulation results show that the possibility of the proposed methods.

Key Words: Neurosurgical operation, Robotic surgery, Skull drilling, Tool-path generation

1. 서 론

뇌 속의 종양 제거 등과 같은 뇌 수술을 위해 인체의 두개골에 구멍을 뚫는 일이 필요하다. 이 논문은 로봇을 이용해 자동으로 두개골을 절삭 가공해서 천공하기 위한 공구 경로 생성 방법을 제안한다.

두개골에 구멍을 뚫는 일은 매우 조심스러운 작업이다. 두개골이 감싸고 있는 뇌 조직은 인체의 조직 중에 가장 예민하고 중요한 조직이기 때문이다. 두개골 천공에는 주로 자동 천공기를 사용하

는데 기계적인 오작동과 사용상의 실수 등으로 인한 의료 사고의 위험이 상존한다. 최근 로봇, 이미징 처리 등의 기술을 응용한 새로운 천공 기술의 개발이 시도되고 있다^[1].

이 연구에서 개발하려는 두개골 천공 로봇 시스템은 로봇이 자동으로 두개골에 구멍을 뚫는 것이 목표다. 수술 전에 CT(Computed Tomography) 등의 정보를 이용해서 미리 공구 경로를 준비하고, 수술 중에는 로봇이 미리 준비된 공구 경로를 따라 자동으로 두개골에 구멍을 뚫는 것이다.

이 논문에서는 두개골 천공에 필요한 로봇의 경로 제어 유형을 이동, 탐침, 절삭, 포크 등으로 분류하고 두개골 천공 작업에 필요한 탐침, 황삭, 정

[†]Corresponding Author, ychung@seoultech.ac.kr
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

삭 등의 공구 경로 계산 방법을 제시하였다. 파일에 저장된 공구 경로를 제어 시스템이 읽어서 처리할 수 있도록 경로 제어 명령어의 문법과 파일 형식을 고안하였다.

2. 기존 연구

자유곡면 가공을 위한 공구 경로 생성은 다면체 모델의 오프셋 방식이 많이 사용된다. 매개변수형 곡면 모델을 다면체 모델로 변환하고 변환된 다면체 모델을 오프셋 하는 방법이다. 저자의 기존 연구^[2]와 김수진^[3], 박상철^[4] 등의 연구가 다면체 모델로 공구 경로를 생성하는 방법을 기술하고 있다. 이 연구에서도 곡면의 오프셋과 공구 중심점 계산에는 기존 연구의 결과를 활용하였다.

로봇 시스템을 이용한 수술에서 인공관절치환술(orthopedic surgery)이 가장 활발한 연구가 진행되고 있다. Sugita 등^[5]은 인공관절치환술에서 절개를 최소화하기 위한 공구경로 생성방법을 제안하였다. 연구에서 절개 영역을 3차원 볼록 껍질(convex hull)로 모델링하였다. 피부 등의 연조직(soft tissue)과 간섭을 최소화하는 방법도 제시하였는데 간섭을 피하는 공구 자세를 계산하였다. 두개골 천공은 인공관절치환술과 달리 두피의 절개 크기와 간섭 등은 중요한 문제가 아니다.

인공관절치환술 전문인 RoboDoc^[6]은 인공관절 유형에 적합한 각각의 공구 경로를 모두 미리 준비해 둔다. 수술에 사용할 인공관절이 정해지면 그 인공관절에 상응하는 공구 경로를 수술에 사용한다. 따라서 RoboDoc에서는 환자 개개인의 상태를 고려한 뼈의 절삭이 불가능하다. 두개골 천공의 경우 환자의 두개골 형상과 천공 위치에 따라 다른 공구 경로가 필요하다.

Mitsubishi 등의 연구^[7]에서는 뼈의 가공 특성을 분석하였다. Wang 등^[8]은 척추 수술을 위한 자동 밀링 로봇 시스템 개발했다. 척추 뼈를 밀링 절삭하면서 힘 센서로 절삭력을 관찰하면서 로봇을 제어했다. 뼈의 외피층(cortical layer)이 내부 해면층(cancellous layer)보다 더 강한 특성을 이용했다. 절삭 공구가 내부 외피층에 도달해서 절삭력이 증가하면 절삭을 멈추도록 고안했다. 이 연구에서도 절삭력 변화를 공구 경로 제어에 사용하였다.

저자의 기존 연구^[1]에서 개발하려는 두개골 천공 로봇 시스템을 전체적으로 소개하였다. Fig. 1

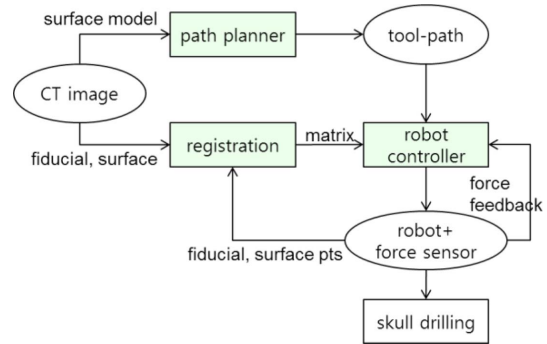


Fig. 1 Overview of the skull drilling system

은 기존 연구에서 소개한 로봇 시스템의 개략적 구조다. 개발하려는 두개골 천공 로봇 시스템은 로봇이 자동으로 두개골에 구멍을 뚫는 것을 목표로 한다. 로봇의 공구 경로는 수술 전 계획에서 미리 준비한다. 공구 경로는 공구가 움직여 갈 각 지점의 위치와 공구의 자세로 정의된다. 수술 중에는 사람의 개입을 최소화하여 로봇이 자동으로 미리 계획된 경로를 움직여 두개골을 절삭 가공한다. 저자의 또 다른 연구^[9]에서는 시스템에 사용된 로봇의 역기구학과 선형 경로 제어 방법을 제시하였다.

이 연구에서는 Fig. 1에 보여진 공구 경로의 유형과 경로 생성기(path planner)의 알고리즘을 소개한다. 로봇을 이용해 자동으로 뼈를 밀링 절삭하는 연구가 일부에서 시도되고 있으나 두개골 천공을 로봇으로 자동화하는 연구는 없었다. 두개골 천공을 위한 로봇의 동작 유형 분류와 공구 경로 생성은 이 논문의 연구에서 처음 시도되었다.

3. 로봇 동작의 유형

3.1 위치 제어 방식에 따른 동작 유형

이 절에서는 개발하려는 시스템에 구현된 로봇의 동작 유형을 분류하고 정의하고자 한다. 두개골 천공 로봇 시스템은 세가지 방식으로 로봇의 위치를 제어할 수 있도록 구현되었다. 추종 제어, 관절각 제어, 경로 제어가 그 세가지 방식이다. 추종 제어는 로봇을 잡고 끄는 방식이며, 관절각 제어와 경로 제어는 제어 프로그램을 통해 위치를 지령하는 방식이다.

‘추종 제어(compliance control)’ 방식은 사용자가 공구를 잡고 끌면 로봇이 사용자가 원하는 방향으로 따라서 움직이도록 제어된다^[10]. 로봇 말단

과 공구 사이에 장착된 6자유도 힘 센서로 사용자가 의도하는 동작의 방향을 파악해서 로봇이 움직여 갈 방향을 결정한다. 추종 제어 중에는 힘 센서에 다소 큰 힘이 가해져도 가해진 힘 방향으로 로봇을 이동 시킨다. 그러나 지나치게 큰 값이 가해진 경우는 충돌 등의 비정상적인 상황이 발생한 것으로 판단하고 로봇의 동작을 멈춘다. 비정상적 외력을 판단하기 위한 힘의 한계값은 별도로 지정할 수 있다^[1]. 추종 제어는 별도의 사전 계획 없이 로봇의 위치를 제어할 수 있다. 사용자의 직관과 즉각적인 판단력으로 로봇을 제어할 수 있다는 장점이 있다.

‘관절각 제어(joint angle control)’ 방식은 작업자가 로봇 관절의 자세를 직접 제어한다. Fig. 2에서 보듯이 각 관절의 각도를 입력하면 로봇이 그에 해당하는 자세로 움직인다. 관절각 제어는 작업자가 로봇의 관절과 링크에 대해 익숙한 경우에 사용 가능한 제어 방식이다. 이 방식은 로봇과 공구의 자세를 제어하기 적합하다. 그러나 직교 좌표계에서 공구의 위치와 경로를 정교하게 제어하기에는 적합하지 않다.

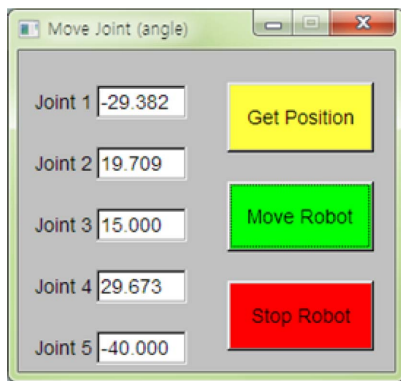


Fig. 2 GUI for joint angle control

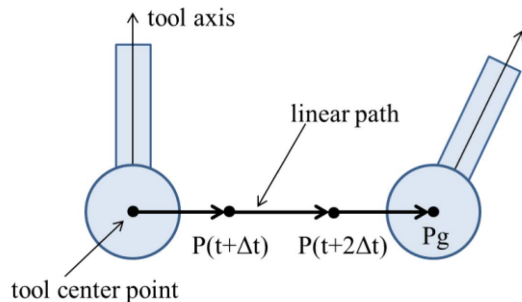


Fig. 3 Schematic view of path control

‘경로 제어(path control)’ 방식은 3차원 직교 좌표계에서 공구의 위치를 연속적으로 제어한다. 개발하려는 제어 프로그램에서는 공구의 자세와 공구 중심점 위치를 제어한다. 경로 제어 방식은 Fig. 3에서 보듯이 목표점이 정해지면 로봇 말단에 장착된 공구의 중심점을 현재점에서 목표점으로 직선으로 이동한다. 공구를 직선 이동하기 위해 로봇의 동작을 연속적으로 제어한다. 연속적인 동작 제어를 위해 제어 사이클 시점에 경유할 지점을 매번 계산한다. 로봇이 경유할 각각의 3차원 직교 좌표점은 관절각으로 변환되어 로봇의 관절을 제어한다^[1]. 이 방식의 제어는 로봇의 전체적인 자세를 제어하지 않는다. 그리고 로봇이 특이점에 놓여있을 때는 역기구학의 문제로 인해 제어가 원활하지 않을 수 있다.

3.2 동작의 목적에 따른 경로 제어 유형

앞 절에서 설명한 ‘경로 제어’ 방식은 동작의 목적에 따라 이동, 탐침, 절삭, 포크의 네 가지로 세분하여 구현하였다. ‘이동(move)’은 공구의 중심점 위치를 단순히 특정 위치로 이동하는 동작이다. 이동 동작은 비교적 빠른 속도로 수행된다. 이동 동작 중에 외력이 감지되면 주변의 다른 물체와 충돌했거나 비정상 상태이므로 동작을 즉각 중단한다.

‘탐침(probe)’은 정합 등을 위해 특정한 위치의 좌표값을 측정하는 동작이다. 이 동작은 로봇 말단에 장착된 공구를 측정 프로브처럼 사용하며 CMM으로 좌표값을 측정하는 동작과 같다. 공구의 중심점을 특정한 방향으로 움직이다가 측정하려는 물체에 닿았다고 판단되면 동작을 멈춘다. Fig. 4에서 보듯이 목표점 Pg로 이동하다가 Pe에서 탐침 동작을 종료하고 접촉점 Pc를 계산한다. 접촉 순간에 힘 센서에 가해지는 힘의 방향과 공

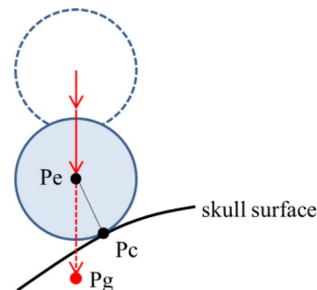


Fig. 4 Probe motion of path control

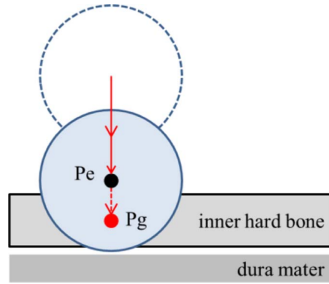


Fig. 5 Punch motion of path control

구의 반경을 이용해서 접촉점을 계산한다^[1].

‘절삭(cut)’은 공구로 두개골을 절삭하면서 특정한 위치로 이동하는 동작이다. 절삭 중에는 절삭 부하가 공구에 가해지기 때문에 힘 센서에 외력이 감지되어도 동작을 멈추지 않는다. 그러나 안전을 위해 정해진 한계값을 초과하는 외력이 감지되면 동작을 멈춘다. 한계값은 절삭시험 등을 통해 정해지며 공구, 절삭부위 등에 따라 달라질 것으로 예상된다.

‘포크(poke)’는 절삭력이 감지되는 동안만 절삭 이동하는 특별한 절삭이다. 이 동작은 두개골 천공의 특성을 고려해서 고안되었다. Fig. 5에서 보듯이 두개골이 완전히 절삭되어 절삭날이 두개골 안쪽의 뇌막(dura mater)에 이르렀을 때 절삭 이동을 멈춘다. 제조업의 절삭가공에서는 공작물의 위치가 명확하기 때문에 이러한 유형의 제어는 필요하지 않다. 두개골 천공에서는 절삭하는 두개골의 형상 모델에도 오차가 있고 셋업의 오차, 제어의 오차 등 다양한 오차가 있어서 위치 정보만으로는 충분히 안전한 제어를 보장할 수 없다. 위치 정보 오차를 보완하기 위해 이 동작 유형이 고안되었다. 뼈 층을 통과하는 순간 급격한 절삭력의 변화를 얻을 수 있도록 플런지(plunge) 형태로 절삭하다가 절삭력이 일정값 이하로 감지되면 동작을 종료한다.

3.3 수동 제어와 자동 제어

앞 절에서 설명한 경로 제어 방식은 수동 과 자동 두 가지로 제어할 수 있다. ‘수동 제어(manual control)’는 작업자가 매번 동작을 명령하여 로봇의 동작을 제어한다. 작업자는 제어 프로그램의 GUI를 통해 동작을 명령하며, 한번의 명령으로 한번의 동작이 수행된다. 동작 수행 중에 긴급 중지 명령을 통해 동작을 멈출 수 있다.

‘자동 제어(automatic control)’는 일련의 동작 명령을 제어 시스템이 자동으로 순차적으로 처리한다. 수동 제어를 반복적으로 수행하는 것과 같다. 일련의 동작 명령은 파일로 준비된다. 제어 시스템은 파일의 동작 명령을 한 줄씩 처리한다.

3.4 동작 제어 명령어

자동 제어를 위한 동작 명령 파일을 위해 별도의 파일 형식과 명령어 문법을 고안하였다. 파일 형식은 일반적인 NC 프로그램의 형식과 유사하다. 텍스트 형식의 파일을 사용하며 줄(line) 단위로 명령을 처리하도록 했다. 각각의 명령은 명령어와 필요한 인수로 구성되는데 몇 가지 중요한 명령 문법은 아래와 같다. 명령어에서 x, y, z는 공구 중심점의 위치를 지정하며 i, j, k는 공구 축 벡터를 지정한다.

MOV $x y z i j k$: 단순 이동

CUT $x y z i j k$: 절삭 이동

POK $x y z i j k$: 포크 절삭 이동

PRB $x y z i j k$: 탐침 이동

FRC $f1 f2 f3 f4$: 동작 유형별 힘의 한계값

SPD $s1 s2 s3 s4$: 동작 유형별 최고 속도

ACC a : 최대 가속도 지정

4. 공구 경로 생성

네 가지 경로 제어 동작을 조합해서 두개골 자동 천공에 사용되는 공구 경로를 생성한다. 두개골 천공 시스템에는 3가지 종류의 공구 경로가 사용된다. 탐침 경로는 로봇과 환자의 좌표계 정합에 사용되는 측정점을 얻기 위해 사용된다. 두개골 절삭을 통해 실제 구멍을 내는 경로는 황삭과 정삭 경로다. 두개골 곡면 모델에서 천공하려는 구멍의 위치와 구멍의 방향 등이 주어지면 공구 경로를 계산할 수 있다. 두개골 곡면 모델은 CT 이미지를 삼각망 모델로 변환한 것이다.

4.1 탐침 경로 생성

환자의 두개골 곡면 모델에서 탐침할 위치가 지정되면 탐침 경로를 계산한다. 먼저 ‘이동’ 동작으로 탐침할 점 부근으로 이동한 후 ‘탐침’ 동작으로 탐침을 시작한다. 탐침이 종료되면 다시 ‘이동’ 동작으로 다음 탐침 점으로 이동한다.

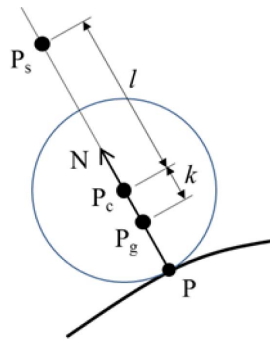


Fig. 6 Computing the probing paths

탐침 경로 계산에 탐침할 점의 위치와 그 점의 곡면 법선 정보가 사용된다. Fig. 6에서 보듯이 곡면 위의 한 점 P가 탐침할 점이고 그 점에 해당되는 곡면의 단위 법선 N이 주어진 경우를 가정하자. 공구 혹은 탐침 프로브의 반경이 r인 경우 점 P에 접촉한 공구의 중심점 위치는 다음과 같이 계산된다.

$$P_c = P + rN \quad (1)$$

그리고 탐침 시작점 P_s와 탐침 목표점 P_g는 다음과 같이 계산된다.

$$P_s = P_c + lN \quad (2)$$

$$P_g = P_c - kN \quad (3)$$

이때 l은 탐침 거리이고 k는 확실한 탐침을 위한 오버 슈팅(over shooting) 거리다. 실제 탐침 동작 중에는 탐침 공구의 중심점이 P_c에 도달해도 접촉이 감지되지 않는 경우가 있기 때문에 조금 더 나아간 점 P_g를 탐침 목표점으로 생성한다. 두개골 표면의 위치가 정합 오류 등으로 인해 조금 빗나간 위치에 있을 수 있기 때문이다. k는 두개골 곡면 모델의 정밀도, 정합 정확도 등을 토대로 결정된다.

4.2 황삭 경로 생성

황삭은 다소 안전한 영역에서 빠르게 많은 양을 절삭하는 것이 그 목적이다. 두개골 천공 시스템에서는 내부 바닥면에 일정한 절삭 여유를 남기고 절삭 가공하는 것을 황삭이라 한다. 황삭 가공을 통해 Fig. 7에 보여진 외피층(outer hard bone)과 내부 해면층(soft bone)이 주로 가공된다.

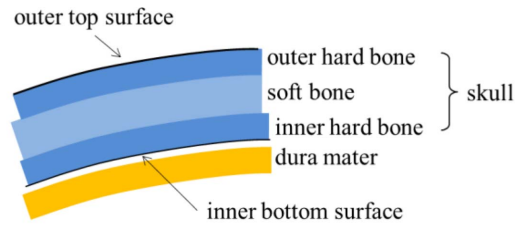


Fig. 7 Cross section of a skull

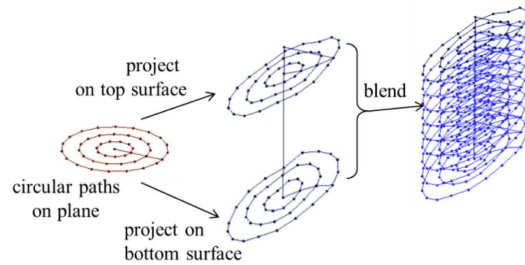


Fig. 8 Computing the rough cutting paths

두개골 천공 시스템에서는 Fig. 8과 같은 방법으로 황삭 경로 생성한다. 먼저 천공할 구멍의 축과 수직인 평면에 원형 경로를 생성한다. 둘째 단계에서 원형 경로를 두개골 최외곽 곡면(Fig. 7의 outer top surface)과 내부 바닥 곡면(Fig. 7의 inner bottom surface)에 공구 축 방향으로 투영하여 두개의 투영 경로를 얻는다. 두 개의 투영 경로를 선형 보간해서 필요한 층의 내부 경로를 얻는다. 얻어진 모든 층의 경로를 서로 연결하고 진입 경로와 퇴각 경로 등을 추가해서 전체 경로를 완성한다.

원형 경로를 두개골 외곽 곡면과 내부 바닥 곡면에 투영할 때 공구 오프셋면을 사용한다. 계산하려는 경로가 공구의 중심점이기 때문이다. 공구 오프셋면은 곡면을 공구 반경만큼 오프셋해서 얻어진다. 개발하는 시스템에서 사용한 두개골 곡면은 CT 데이터를 삼각망 모델로 변환한 것이다. 삼각망 곡면의 오프셋 방법은 저자의 논문 등¹²⁻¹⁴에서 찾아볼 수 있다.

두개골 곡면 바닥을 절삭해서 관통하면 뇌막과 같은 두뇌의 중요 부위에 도달하기 때문에 황삭에서는 곡면 바닥에 일정한 두께의 절삭 여유를 두었다. 절삭 여유는 바닥 곡면을 오프셋할 때 절삭 여유를 고려해서 오프셋하면 얻을 수 있다. 원형 경로의 경로 간격과 원형 보간하는 경로의 층간 간격은 가공 조건에 의해 결정된다.

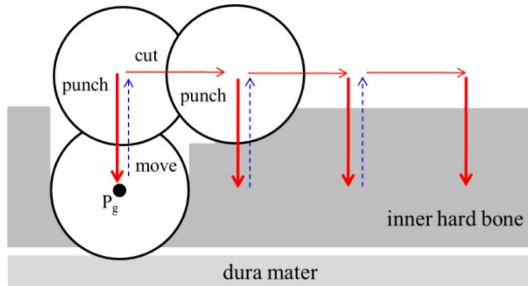


Fig. 9 Path topology of the fine cutting

4.3 정삭 경로 생성

두개골 천공 시스템에서 정삭은 안전하게 내피층을 절삭하고 내부 피층을 관통하는 순간에 절삭을 멈추도록 고안되었다. 정삭 경로는 Fig. 9에서 보듯이 ‘포크’와 ‘이동’, ‘절삭’ 동작으로 구성된다. 포크의 목표점 P_g 은 내부 바닥 곡면을 오프셋한 면에 투영해서 얻을 수 있다. 탐침 동작과 유사하게 포크의 목표점도 오버슈팅할 수 있다. 따라서 바닥 곡면의 오프셋 거리는 목표점의 오버슈팅 거리에 따라 달라진다. 오버슈팅 값이 0이면 오프셋 거리는 정확히 공구의 반경만큼이다. 탐침 경로와 달리 안전이 더 중요한 인자이기 때문에 오버슈팅 값은 탐침 동작에 비해 더 작거나 음수일 수도 있다. Fig. 9에서는 목표점을 조금 오버슈팅해서 공구가 두개골 바닥면을 뚫고 나와 뇌막에 조금 닿은 상태를 보였다.

5. 적용 및 결과

공구 경로 계산은 두개골 천공 로봇 시스템의 제어 시스템과 별도로 개발되었으며 윈도우 기반의 PC에서 C++로 구현되었다. 생성된 경로 파일을 읽어서 로봇의 동작을 제어하는 부분은 로봇 제어 시스템 내부에 구현되었다. 로봇 제어 시스템은 리눅스 운영체제에서 실시간 제어로 실행된다.

외곽 곡면과 내부 곡면으로 구성된 두개골 삼각망 모델을 형상 정보로 사용한다. 두개골 CT 이미지를 3D Slicer를 이용해 삼각망 모델로 변환한 후 사용했다. 천공하려는 구멍의 위치는 두개골 곡면 위의 한 점으로 입력하고 구멍의 방향은 벡터로 입력한다. Fig. 10은 예제로 사용한 두개골의 삼각망 곡면이며 천공할 구멍의 위치 및 방향을 그림에 표시된 공구로 알 수 있다.

Fig. 11은 구현된 프로그램에서 생성한 정삭공

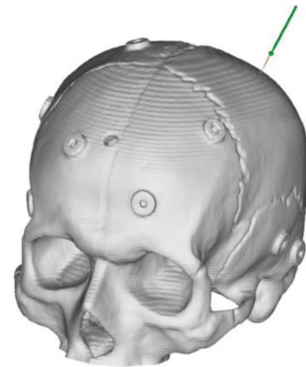


Fig. 10 Example of skull drilling

POK	-38.759	-33.812	-435.163	-0.088	0.463	0.882
MOV	-39.197	-31.499	-430.756	-0.088	0.463	0.882
CUT	-38.267	-31.105	-430.487	-0.196	0.433	0.880
POK	-37.435	-32.945	-434.227	-0.196	0.433	0.880
MOV	-38.267	-31.105	-430.487	-0.196	0.433	0.880
CUT	-37.464	-30.442	-430.176	-0.298	0.373	0.879
POK	-36.418	-31.751	-433.262	-0.298	0.373	0.879
MOV	-37.464	-30.442	-430.176	-0.298	0.373	0.879
CUT	-36.856	-29.550	-430.054	-0.378	0.274	0.884
POK	-35.774	-30.335	-432.584	-0.378	0.274	0.884
MOV	-36.856	-29.550	-430.054	-0.378	0.274	0.884
MOV	-44.414	-24.068	-412.367	-0.378	0.274	0.884

Fig. 11 Part of a tool-path file

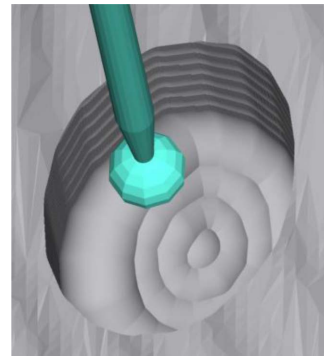


Fig. 12 Cutting simulation of the rough cutting

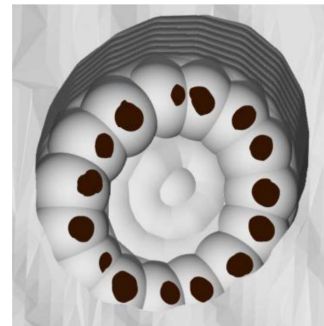


Fig. 13 Result of the fine cutting

구 경로 파일의 일부다. 제안한 방법으로 공구 경로를 생성할 수 있었으며 공구 경로 파일을 읽어서 로봇의 동작을 자동으로 제어할 수 있었다. Fig. 12는 황삭 경로를 모의 절삭 가공한 것이며, Fig. 13은 정삭 결과를 보여준다. 정삭에서 두개골의 바닥을 뚫어서 뇌막이 보이는 상태임을 알 수 있다.

6. 결 론

이 논문에서는 두개골 천공 로봇 시스템을 위한 로봇의 공구 경로 생성 방법을 제안하였다. 공구 경로 생성을 위해 로봇의 제어 방식과 경로 제어 유형을 분류하고 정의하였다. 또 동작 제어를 위한 명령어 문법을 제안하였다.

제안된 방법을 구현하여 제안된 방법으로 공구 경로를 계산할 수 있음을 확인하였다. 그리고 계산된 공구 경로를 읽어서 로봇의 동작을 연속적으로 자동으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 그러나 제안된 방법으로 생성된 공구 경로가 실제 두개골 천공에 적합한지는 확인하지 못했다. 실제 두개골 천공 시험을 위해서는 뼈의 절삭 시험과 로봇 제어 시스템의 완성도를 높이는 것이 필요하다.

이 논문에서 소개하고 제안한 방법은 이미 제조 산업에서 잘 정립된 기술이므로 이 연구가 가공 경로 생성에 이론적으로 기여한 바는 없다. 제조 산업에서 개발된 기술들을 두개골 천공이라는 새로운 영역에 적용하면서 필요한 문제를 해결했다는 점에서 이 논문의 의의가 있다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교의 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Chung, Y.C., 2012, Prototype Development of a Robotic System for Skull Drilling. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 17(3), pp.198-207.
2. Chung, Y.C., 2005, Tool-path Computing by Slicing Offset Triangles and Tracing Intersections. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 10(6), pp.455-464.
3. Kim, S.J. and Yang, M.Y., 2005, Triangular Mesh

Offset for Generalized Cutter. *Computer-Aided Design*, 37, pp.999-1014.

4. Park, S.C., 2004, Sculptured Surface Machining Using Triangular Mesh Slicing. *Computer-Aided Design*, 36, pp.279-288.
5. Sugita, N., Osa, T., Nakajima, Y. and Mitsuishi, M., 2008, Optimization of Toolpath Generation in Medical CAM for a Machine Tool for Orthopedic Surgery. *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, Part 11*, pp.405-408.
6. Taylor, R.H., Lavalley, S., Burdea, G.C. and Mosges, R., 1996, *Computer-Integrated Surgery*, The MIT Press, Cambridge, pp.371-463.
7. Mitsuishi, M., Warisawa, S., Sugita, N., Suzuki, M., Moriya, H., Hashizume, H., Fujiwara, K., Abe, N., Inoue, H., Kuramoto, K., Inoue, T., Nakashima, Y. and Tanimoto, K., 2005, A Study of Bone Micro-Cutting Characteristics Using a Newly Developed Advanced Bone Cutting Machine Tool for Total Knee Arthroplasty, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1), pp.41-46.
8. Wang, T., Luan, S., Hu, L., Liu, Z., Li, W. and Jiang, L., 2010, Force-based Control of a Compact Spinal Milling Robot. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 6(2), pp.178-185.
9. Chung, Y.C., 2013, Path Control for NeuroMate Robot in a Skull Drilling System. *Transactions of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 22(2), pp.256-262.
10. Brady, M., Hollerbach, J.M., Johnson, T.L., Lozano-Perez, T. and Mason, M.T., 1983, *Robot Motion: Planning and Control*, The MIT Press.
11. 3D Slicer, <http://www.slicer.org>.



정 연 찬

1989년 한양대학교 산업공학과 학사
 1991년 KAIST 산업공학과 석사
 1996년 KAIST 산업공학과 박사
 1998년~1999년 다이플러크라이슬러 연구원
 1991년~2002년 큐빅테크 수석 연구원
 2010년~2011년 Johns Hopkins University Visiting Professor
 2004년~현재 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 부교수
 관심분야: CAD/CAM, 5축 가공, Design for Manufacturing, Software Engineering