



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0122895
(43) 공개일자 2015년11월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
E02F 9/20 (2006.01) E02F 3/43 (2006.01)
E02F 9/26 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0048903
(22) 출원일자 2014년04월23일
심사청구일자 2014년04월23일

(71) 출원인

울산대학교 산학협력단
울산광역시 남구 대학로 93

(72) 발명자

박홍석

울산 중구 운곡3길 24, 101동 1305호 (다운동, 삼성아파트)

래옥찬

울산광역시 남구 대학로 93 울산대학교 기린학사

(74) 대리인

특허법인태백

전체 청구항 수 : 총 12 항

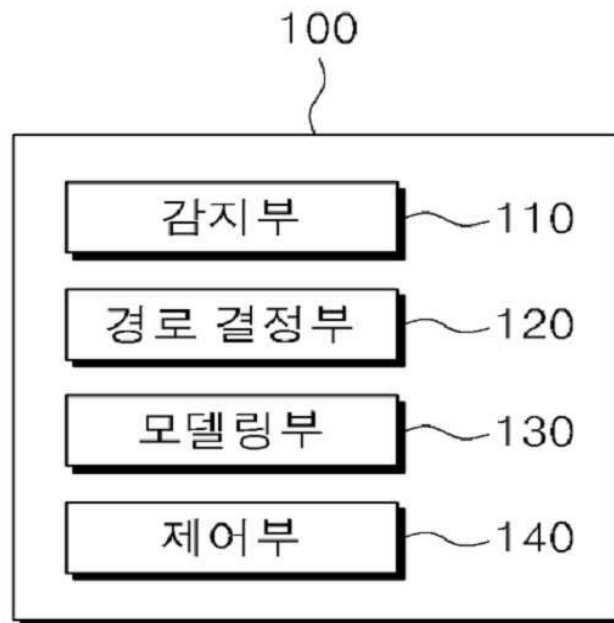
(54) 발명의 명칭 자율 최적화 굴삭기 시스템 및 그것을 이용한 제어 방법

(57) 요약

본 발명은 자율 최적화 굴삭기 시스템 및 그것을 이용한 제어 방법에 관한 것이다. 본 발명에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템은, 버킷의 틈에 설치되어 굴착 대상이 되는 토양의 저항력을 측정하는 감지부, 상기 측정된 저항력으로부터 상기 토양의 강도 및 장애물의 위치를 추출하고, 상기 토양의 강도에 대응하여 굴착 동작을 결정하는

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1



경로 결정부, 상기 버킷이 최대로 적재할 수 있도록 상기 버킷의 경로를 퍼지 논리에 의하여 모델링하는 모델링부, 그리고 설정된 상기 버킷의 경로에 대응하여 붐(boom) 조인트, 암(arm) 조인트 및 버킷 조인트의 동작을 제어하는 제어부를 포함한다.

이와 같이 본 발명에 따르면, 자율 최적 로봇 굴삭기의 지식 기반 자율 최적화 기능은 다양한 현장 환경에서 매장되어 있는 장애물들을 피할 수 있는 능력뿐만 아니라 채굴 환경에서의 안정성을 향상시키며, 채굴 생산성을 증가시킨다. 그리고 버킷 및 채굴 환경 사이의 상호 작용하는 힘의 측정을 통해 토양의 유형과 매장되어 있는 장애물을 예측할 수 있으며, 3D 레이저 센서 기술을 이용해 채굴 지형의 형태를 파악할 수 있다. 또한 측정된 데이터로부터 최대한의 버킷 용량의 흙을 얻을 수 있는 최적의 버킷 경로를 설정하며, 이를 위한 적절한 채굴 힘을 생성시킬 수 있다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	10033468
부처명	산업통상자원부
연구관리전문기관	한국산업기술평가관리원
연구사업명	산업원천기술개발사업
연구과제명	무인화 가공공정 최적화 및 자율대응 기술개발(5)
기 여 율	1/1
주관기관	한국기계연구원
연구기간	2013.06.01 ~ 2014.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

버킷의 틱에 설치되어 굴착 대상이 되는 토양의 저항력을 측정하는 감지부,

상기 측정된 저항력으로부터 상기 토양의 강도 및 장애물의 위치를 추출하고, 상기 토양의 강도에 대응하여 굴착 동작을 결정하는 경로 결정부,

상기 버킷이 최대로 적재할 수 있도록 상기 버킷의 경로를 퍼지 논리에 의하여 모델링하는 모델링부, 그리고

설정된 상기 버킷의 경로에 대응하여 붐(boom) 조인트, 암(arm) 조인트 및 버킷 조인트의 동작을 제어하는 제어부를 포함하는 자율 최적화 굴삭기 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 경로 결정부는,

상기 토양의 저항력이 기준값보다 작은 경우,

관통(Penetration) 및 감기(curl) 과정을 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 하는 자율 최적화 굴삭기 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 경로 결정부는,

상기 토양의 저항력이 기준값 이상인 경우,

관통(Penetration), 끌기(drag), 및 감기(curl) 과정을 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 하는 자율 최적화 굴삭기 시스템.

청구항 4

제2항 또는 제3항에 있어서,

상기 제어부는,

관통 영역에서 상기 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 상기 버킷 조인트를 동작하여 감기(curl) 과정을 진행하도록 제어하고,

끌기 또는 감기 영역에서 상기 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 상기 붐 조인트를 회전시켜 상기 버킷을 외부로 들어올리도록 제어하는 자율 최적화 굴삭기 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 모델링부는,

다음의 수학적식을 이용하여 상기 버킷의 경로를 퍼지화하여 모델링하는 자율 최적화 굴삭기 시스템:

$$V_{\max} = f(\alpha, \rho, h, d, \text{토양종류, 매장된 장애물, 기타 제약조건들})$$

여기서, α 는 지형의 기울기, ρ 는 버킷의 끝 부분과 지면 사이의 각도, d 는 채굴 거리, h 는 채굴 깊이를 나타내며, 상기 제약 조건들은 기하학적 특징, 용량, 힘, 작업 시간 중에서 적어도 하나를 포함한다.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 경로 결정부는,

상기 버킷의 진행 과정에서 장애물에 접촉하는 경우, 상기 모델링된 버킷 경로 모델에 의하여 상기 버킷의 진행 경로를 다시 결정하는 자율 최적화 굴삭기 시스템.

청구항 7

버킷의 팁에 설치되어 굴착 대상이 되는 토양의 저항력을 측정하는 단계,

상기 측정된 저항력으로부터 상기 토양의 강도 및 장애물의 위치를 추출하고, 상기 토양의 강도에 대응하여 굴착 동작을 결정하는 단계,

상기 버킷이 최대로 적재할 수 있도록 상기 버킷의 경로를 퍼지 논리에 의하여 모델링하는 단계, 그리고

설정된 상기 버킷의 경로에 대응하여 붐(boom) 조인트, 암(arm) 조인트 및 버킷 조인트의 동작을 제어하는 단계를 포함하는 자율 최적화 굴삭기 시스템을 이용한 제어 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 굴착 동작을 결정하는 단계는,

상기 토양의 저항력이 기준값보다 작은 경우,

관통(Penetration) 및 감기(curl) 과정을 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 하는 자율 최적화 굴삭기 시스템을 이용한 제어 방법.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 굴착 동작을 결정하는 단계는,

상기 토양의 저항력이 기준값 이상인 경우,

관통(Penetration), 끌기(drag), 및 감기(curl) 과정을 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 하는 자율 최적화 굴삭기 시스템을 이용한 제어 방법.

청구항 10

제8항 또는 제9항에 있어서,

상기 제어하는 단계는,

관통 영역에서 상기 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 상기 버킷 조인트를 동작하여 감기(curl) 과정을 진행하도록 제어하고,

끌기 또는 감기 영역에서 상기 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 상기 붐 조인트를 회전시켜 상기 버킷을 외부로 들어올리도록 제어하는 자율 최적화 굴삭기 시스템을 이용한 제어 방법.

청구항 11

제7항에 있어서,

상기 모델링하는 단계는,

다음의 수학적식을 이용하여 상기 버킷의 경로를 퍼지화하여 모델링하는 자율 최적화 굴삭기 시스템을 이용한 제어 방법:

$$V_{\max} = f(\alpha, \rho, h, d, \text{토양종류, 매장된 장애물, 기타 제약 조건들})$$

여기서, α 는 지형의 기울기, ρ 는 버킷의 끝 부분과 지면 사이의 각도, d 는 채굴 거리, h 는 채굴 깊이를 나타내며, 상기 제약 조건들은 기하학적 특징, 용량, 힘, 작업 시간 중에서 적어도 하나를 포함한다.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 굴착 동작을 결정하는 단계는,

상기 버킷의 진행 과정에서 장애물에 접촉하는 경우, 상기 모델링된 버킷 경로 모델에 의하여 상기 버킷의 진행 경로를 다시 결정하는 자율 최적화 굴삭기 시스템을 이용한 제어 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 자율 최적화 굴삭기 시스템 및 그것을 이용한 제어 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 토양의 상태와 장애물의 위치에 따라 자율적으로 버킷의 경로를 결정할 수 있는 자율 최적화 굴삭기 시스템 및 그것을 이용한 제어 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근에 굴삭기가 건설, 광업, 농업, 임업, 군사 등의 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 기존의 굴삭기는 위험하고 험악한 지형에서의 주된 사용으로 인해 이를 운용하기 위해서는 섬세한 제어 기술 및 고도로 숙련된 작업자의 경험이 요구된다.

[0003] 지금까지의 굴삭기에 관한 연구는 굴삭기 제어에 있어 고도로 숙련된 작업자의 경험 및 지식이 반영되지 않은 순수 굴삭 기술과 관련된 연구가 주로 진행되어졌다. 즉, 토양과 버킷의 상호 관계에 관한 모델링 개발을 위해 토양의 종류와 특성에 대한 추정과 예측, 채굴 시 버킷에 작용하는 저항력을 연구, 최대 버킷 용량을 달성하기 위한 최적의 경로 계획 생성을 위해 지형 형상 프로파일을 추정 및 결정하는 방법론 연구, 버킷과 토양의 상호 관계, 임피던스 제어를 통한 채굴 힘 추적, 운동학 및 동역학적 해석에 의한 자세 제어 성능 향상 연구, 매장되어 있는 바위 같은 장애물들이 힘/토크 센서에 의해 탐지되는 경우 붐, 암, 버킷과 같은 굴삭기의 구성품들을 이용해 채굴 힘을 증가시켜 매장된 장애물을 파괴하거나 뚫어버림으로써 이를 제거하거나 피하기 위한 연구 등이 수행되었다.

[0004] 일반적으로, 숙련된 경험과 지식을 가진 작업자는 굴삭기의 운용 시 다양한 채굴 환경(즉, 지형의 경사, 토양의 강성 및 성질)에 대하여 분석이 가능하며 이러한 환경에서의 버킷용량을 최대로 얻기 위하여 버킷의 경로를 다음과 같은 순서로 결정하였다.

[0005] 첫째, 채굴 현장에서 굴삭기가 도달할 수 있는 기하학적 분석 후 채굴 대상 영역을 결정한다. 둘째, 채굴 대상 영역에서 시각적으로 토양의 유형과 성질을 분석한다. 셋째, 채굴 현장에서 굴삭기의 안정적인 자세를 위해 적절한 힘을 변화시키며 최대 버킷용량을 결정한다. 그러나 작업자는 그들의 지각 능력과 경험을 통한 토양의 유형 및 특성, 지형의 경사 등을 식별하고 예측하는 데 한계가 있으며 매장되어 있는 장애물(나무뿌리, 금속, 돌 등)을 눈으로 인식한다는 것은 거의 불가능에 가깝다.

[0006] 미확인된 장애물로 인하여 채굴 시 장애물에 대한 굴삭기의 적절한 힘을 작동시키는 것과 버킷의 최적화된 경로를 설정하는 것은 매우 어려운 작업이기 때문에 이를 위한 작업자의 숙련된 경험과 지식이 요구되지만, 숙련된 작업자의 부족과 이에 따른 생산성 악화의 문제가 발생하고 있다. 그리고 굴삭기는 복잡한 경사 지형의 언덕과 산, 채굴 지역, 군사 등의 혹독한 조건에서 운용된다. 이러한 작업 환경은 험준하고 위험하기 때문에 굴삭기의 자세 안정성이 떨어지기 때문에 작업자가 직접 굴삭기를 운전하는 것은 전복, 협착, 추락 등의 안전사고 발생률이 매우 높아지는 상황이다.

[0007] 즉 다양한 토양의 유형 및 성질에 따라, 또 매장되어 있는 미확인된 장애물에 대하여 이를 탐지하고 이에 대응하는 채굴 힘의 설정, 최적화된 버킷 경로 및 버킷 용량 설정을 통해 생산성을 향상시킬 수 있도록 스스로 탐

지하고 추론할 수 있는 자율 최적 굴삭기의 개발이 필요한 실정이다.

[0008] 본 발명의 배경이 되는 기술은 대한민국 국내등록특허 제10-1186968호(2012. 09. 28 공고)에 개시되어 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 토양의 상태와 장애물의 위치에 따라 자율적으로 버킷의 경로를 결정할 수 있는 자율 최적화 굴삭기 시스템 및 그것을 이용한 제어 방법을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 이러한 기술적 과제를 이루기 위한 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템은, 버킷의 팁에 설치되어 굴착 대상이 되는 토양의 저항력을 측정하는 감지부, 상기 측정된 저항력으로부터 상기 토양의 강도 및 장애물의 위치를 추출하고, 상기 토양의 강도에 대응하여 굴착 동작을 결정하는 경로 결정부, 상기 버킷이 최대로 적재할 수 있도록 상기 버킷의 경로를 퍼지 논리에 의하여 모델링하는 모델링부, 그리고 설정된 상기 버킷의 경로에 대응하여 붐(boom) 조인트, 암(arm) 조인트 및 버킷 조인트의 동작을 제어하는 제어부를 포함한다.

[0011] 상기 경로 결정부는, 상기 토양의 저항력이 기준값보다 작은 경우, 관통(Penetration) 및 감기(curl) 과정을 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 할 수 있다.

[0012] 상기 경로 결정부는, 상기 토양의 저항력이 기준값 이상인 경우, 관통(Penetration), 끌기(drag), 및 감기(curl) 과정을 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 할 수 있다.

[0013] 상기 제어부는, 관통 영역에서 상기 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 상기 버킷 조인트를 동작하여 감기(curl) 과정을 진행하도록 제어하고, 끌기 또는 감기 영역에서 상기 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 상기 붐 조인트를 회전시켜 상기 버킷을 외부로 들어올리도록 제어할 수 있다.

[0014] 상기 모델링부는, 다음의 수학적식을 이용하여 상기 버킷의 경로를 퍼지화하여 모델링할 수 있다.

[0015]
$$V_{\max} = f(\alpha, \rho, h, d, \text{토양종류}, \text{매장된 장애물}, \text{기타제약조건들})$$

[0016] 여기서, α 는 지형의 기울기, ρ 는 버킷의 끝 부분과 지면 사이의 각도, d 는 채굴 거리, h 는 채굴 깊이를 나타내며, 상기 제약 조건들은 기하학적 특징, 용량, 힘, 작업 시간 중에서 적어도 하나를 포함한다.

[0017] 상기 경로 결정부는, 상기 버킷의 진행 과정에서 장애물에 접촉하는 경우, 상기 모델링된 버킷 경로 모델에 의하여 상기 버킷의 진행 경로를 다시 결정할 수 있다.

[0018] 본 발명의 다른 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템을 이용한 제어 방법은, 버킷의 팁에 설치되어 굴착 대상이 되는 토양의 저항력을 측정하는 단계, 상기 측정된 저항력으로부터 상기 토양의 강도 및 장애물의 위치를 추출하고, 상기 토양의 강도에 대응하여 굴착 동작을 결정하는 단계, 상기 버킷이 최대로 적재할 수 있도록 상기 버킷의 경로를 퍼지 논리에 의하여 모델링하는 단계, 설정된 상기 버킷의 경로에 대응하여 붐(boom) 조인트, 암(arm) 조인트 및 버킷 조인트의 동작을 제어하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0019] 이와 같이 본 발명에 따르면, 자율 최적 로봇 굴삭기의 지식 기반 자율 최적화 기능은 다양한 현장 환경에서 매장되어 있는 장애물들을 피할 수 있는 능력뿐만 아니라 채굴 환경에서의 안정성을 향상시키며, 채굴 생산성을 증가시킨다. 그리고 버킷 및 채굴 환경 사이의 상호 작용하는 힘의 측정을 통해 토양의 유형과 매장되어 있는 장애물을 예측할 수 있으며, 3D 레이저 센서 기술을 이용해 채굴 지형의 형태를 파악할 수 있다. 또한 측정된 데이터로부터 최대한의 버킷 용량의 흙을 얻을 수 있는 최적의 버킷 경로를 설정하며, 이를 위한 적절한 채굴 힘을 생성시킬 수 있다.

[0020] 또한 로봇 굴삭기가 해결할 수 없는 어려운 채굴 상황에서는 작업자의 원격 제어 모드를 이용해 이러한 장애를 극복할 수 있다. 작업자의 경험과 전문 지식뿐만 아니라 로봇 굴삭기의 자율 학습 능력과 자율 추론 능력의 조합은 매장되어 있는 장애물에 대응하는 솔루션을 통해 이를 피하거나 관통하게 함으로서 버킷 용량을 극대화시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0021]

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템의 구성을 나타낸 도면이다.

도 2은 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템의 채굴 동작을 설명하기 위한 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템의 버킷 궤적을 나타낸 도면이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템을 설명하기 위한 개략도이다.

도 5a는 부드러운 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 것이고, 도 5b는 딱딱한 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 것이다.

도 6은 모델링부가 시뮬레이션을 진행하는 과정을 설명하기 위한 것이다.

도 7a는 부드러운 토양에서의 버킷 경로를 시뮬레이션한 결과를 나타낸 도면이다.

도 7b는 도 7a에 나타난 버킷 경로를 부드러운 토양과 딱딱한 토양에서 각각 적용할 경우 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.

도 8a는 딱딱한 토양에서의 버킷 경로를 시뮬레이션한 결과를 나타낸 도면이다.

도 8b는 도 8a에 나타난 버킷 경로를 부드러운 토양과 딱딱한 토양에서 각각 적용할 경우 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.

도 9a는 버킷의 관통(Penetration) 영역에 장애물이 존재하는 경우를 시뮬레이션 하는 과정을 나타낸 도면이다.

도 9b는 도 9a의 경우에서의 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.

도 10a는 버킷의 감기(curl) 영역에 장애물이 존재하는 경우를 시뮬레이션 하는 과정을 나타낸 도면이다.

도 10b는 도 10a의 경우에서의 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.

도 11은 가상 굴삭기의 모델의 좌표계를 나타낸 도면이다.

도 12a 내지 도 12d는 장애물을 회피하기 위하여 자율 최적화 굴삭기 시스템이 버킷 경로를 생성하는 과정을 설명하기 위한 도면이다.

도 13a는 부드러운 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 도면이다.

도 13b는 딱딱한 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 도면이다.

도 14는 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템의 자율 최적화 과정을 나타낸 것이다.

도 15는 적응형 PID 제어 시스템의 블록 다이어그램도이다.

도 16a 및 도 16b는 본 발명의 실시예에 따른 퍼지 보상 과정의 입력 소속 함수와 출력 소속 함수를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022]

아래에서는 첨부한 도면을 참조하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시예를 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.

[0023]

명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.

[0024]

그러면 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다.

[0025]

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템의 구성을 나타낸 도면이다.

[0026]

도 1에 나타난 것처럼, 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템(100)은 감지부(110), 경로 결정부

(120), 모델링부(130), 제어부(140)를 포함한다.

- [0027] 먼저 감지부(110)는 버킷의 틱에 설치되어 굴착 대상이 되는 토양의 저항력을 측정하며, 경로 결정부(120)는 측정된 저항력으로부터 토양의 강도 및 장애물의 위치를 추출하고, 토양의 강도에 대응하여 굴착 동작을 결정한다.
- [0028] 모델링부(130)는 버킷이 최대로 적재할 수 있도록 버킷의 경로를 퍼지 논리에 의하여 모델링한다.
- [0029] 제어부(140)는 설정된 버킷의 경로에 대응하여 붐(boom) 조인트, 암(arm) 조인트 및 버킷 조인트의 동작을 제어한다.
- [0030] 특히, 경로 결정부(120)는, 버킷의 굴착 과정에서 장애물에 접촉하는 경우, 모델링된 버킷 경로 모델에 의하여 버킷의 진행 경로를 다시 결정하도록 한다.
- [0031] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템의 채굴 동작을 설명하기 위한 도면이다. 특히, 도 2는 평평한 표면 형태 채굴 지형에서의 버킷 경로를 나타낸 도면이다.
- [0032] 도 2와 같이 굴삭기의 채굴 주기의 버킷 궤도는 관통(Penetration), 끌기(drag), 감기(curl)의 세 가지 경로로 구성된다.
- [0033] 도 2에서 버킷의 경로는 α (옆에서 본 지형의 기울기), ρ (버킷의 끝 부분과 지면 사이의 각도), d (채굴 거리), h (채굴 깊이), v (버킷 용량)과 같은 입력 매개변수 요소들에 따라 결정된다. 버킷 용량은 고정되어 있기 때문에 다음의 매개변수 (α , ρ , d , h)들에 의해 결정되며, 작업자는 세 개의 매개변수 (ρ , d , h)를 결정하면 많은 버킷 경로를 예측할 수 있다.
- [0034] 실제로 채굴 환경은 지형의 측면, 토양의 유형, 매장된 장애물로 인해 매우 복잡하다. 이러한 복잡한 장애 환경으로 인해 최대 버킷 용량(버킷의 130% 용량)을 얻기 위한 적절한 힘의 설정과 최적화된 버킷 경로를 예측하기란 매우 어렵다.
- [0035] 다음의 수학적 식 1과 같이 최적의 버킷 경로를 생성하기 위하여 α , ρ , d , h , 토양의 유형, 매장된 장애물, 제약 조건들(기하학적 특징, 용량, 힘, 작업 시간)을 포함한 매개변수들은 고려해야 할 필수 요소이다.

수학적 식 1

[0036]
$$V_{\max} = f(\alpha, \rho, h, d, \text{토양종류, 매장된 장애물, 기타 제약조건들})$$

- [0037] 특히 지형의 경사, 토양의 유형, 매장된 장애물과 같은 매개변수들은 최적의 버킷 경로를 생성하는 가장 중요한 요소이다.
- [0038] 이에 따라, 본 발명의 실시예에 따르면 모든 토양의 종류와 지형의 경사에 관계없이 최대 버킷 용량을 위하여, 최적의 버킷 경로 생성, 최적의 채굴 힘 예측, 매장된 장애물을 피하기 위한 시스템을 제안한다.
- [0039] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템의 버킷 궤적을 나타낸 도면이다.
- [0040] 더욱 상세하게 설명하면, 도 3은 매장된 바위(rock)와 같은 장애물을 피하기 위한 버킷의 궤적을 나타낸 것이다.
- [0041] 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템에 따르면 흙을 채굴할 때 힘/토크 센서를 사용하여 토양과 버킷에 상호 작용하는 힘이 급격히 증가하는 시점을 측정하여 바위, 나무뿌리, 금속과 같은 매장된 장애물을 감지할 수 있다. 이 때 장애물을 뚫기 위한 채굴 힘을 증가시킬 경우 굴삭기의 부품이 파손되는 사고가 발생할 수 있으므로, 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템은 장애물을 인식하고 앞뒤로 버킷의 회전각도 조정을 통해 이와 같은 사고를 방지할 수 있도록 한다. 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적 로봇 굴삭기 시스템의 모델링부(130)는 인간의 학습능력과 경험으로부터 획득된 퍼지논리, 신경망과 같은 자기 학습능력, 인공지능 알고리즘을 이용한 추론 능력 지식에 대한 모델을 가지고 있다.
- [0042] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템을 설명하기 위한 개략도이다. 우선적으로 채굴 과정에서 지형 경사, 굴삭기의 현재 위치와 각도와 같은 채굴 환경 매개변수들과 토양에 의한 버킷에 작용하는 저항력을 감지부(110)의 센서들을 통해 분석한다. 저항력은 채굴 힘이 설정된 입력 값보다 순간적으로 급증하

는 시점에 토양 종류별 또는 탐지된 매장되어 있는 장애물 별로 식별되고 분류된다. 각 토양별로 작용하는 각각의 저항력은 토양의 특성에 기반하며 자율 최적 로봇 굴삭기는 각 토양에 해당하는 채굴 힘을 식별할 수 있도록 학습하게 된다. 채굴 힘의 학습된 결과들은 굴삭기의 모델링부(130)에 저장되어 퍼지 논리에 의하여 모델링하는데 이용된다. 그러므로 이러한 과정을 통해 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템(100)의 제어부(140)는 최적의 버킷 경로와 매장된 장애물을 피하기 위한 적절한 버킷 경로를 생성할 수 있게 된다. 이와 같이 제어부(140)는 굴삭기의 구성 요소들을 원격으로 제어가 가능하며 목표로 하는 최적의 버킷 경로를 추적할 수 있다.

[0043] 이하에서는 도 5a 및 도 5b를 통하여, 경로 결정부(120)가 토양의 강도에 따라 버킷의 경로를 결정하는 과정에 대하여 설명한다.

[0044] 도 5a는 부드러운 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 것이고, 도 5b는 딱딱한 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 것이다.

[0045] 먼저 버킷이 지면에 접촉하도록 동작하면, 경로 결정부(120)는 버킷의 경로와 버킷 각도를 결정해야 하는데, 버킷 경로를 생성하기 위해 필요한 파라미터는 지형의 프로파일 데이터와 토양의 저항력이다. 여기서, 지형의 프로파일 데이터와 토양의 저항력은 자율 최적화 굴삭기 시스템(100)에 부착된 레이저 센서와 버킷에 부착된 저항력 센서에 의해 각각 측정된다.

[0046] 여기서, 토양의 저항력이 기준값보다 작은 경우, 즉, 모래와 같이 부드러운 토양(soft soil)인 경우에는 도 5a와 같이 경로 결정부(120)는 관통(Penetration) 및 감기(curl)의 2개의 단계를 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 한다. 이에 따라 제어부(140)는 먼저 붐(boom) 조인트를 조절하여 버킷이 지면에 거의 수직이 되도록 하고, 설정된 깊이에서 다다르면 버킷이 토양을 담도록 한다.

[0047] 반면, 토양의 저항력이 기준값 이상인 경우, 즉 딱딱한 토양(hard soil)인 경우에는 버킷이 쉽게 토양을 관통(Penetration)할 수 없다. 따라서, 경로 결정부(120)는 관통(Penetration), 끌기(drag), 및 감기(curl)의 3개의 단계를 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 한다.

[0048] 이에 따라, 제어부(140)는 먼저 붐(boom) 조인트를 조절하여 버킷이 지면에 거의 수직이 되도록 한 다음, 암(arm)을 움직임으로써 직선 형태로 버킷을 끌어 당기면서 동시에 버킷이 토양을 담도록 한다. 이와 같이 버킷에 담긴 토양은 덤프로 옮겨지게 된다.

[0049] 이하에서는 도 6 내지 도 10b를 통하여 모델링부(130)가 버킷 경로를 모델링하는 과정을 설명한다.

[0050] 먼저 도 6은 모델링부가 시뮬레이션을 진행하는 과정을 설명하기 위한 것이다.

[0051] 도 6에 나타낸 것처럼, 가상의 굴삭기는 붐(boom), 암(arm) 및 버킷(bucket)에 의해 동작하며, 붐(boom), 암(arm) 및 버킷(bucket)은 XOY 평면 좌표에서 각각의 축을 기준으로 회전 동작을 할 수 있다.

[0052] 특히, 붐(boom), 암(arm) 및 버킷(bucket)은 각각 0_1 , 0_2 , 0_3 의 위치에서 Z축을 축으로 회전할 수 있으며, 회전각도의 범위는 $-65^\circ < \theta_1 < 85^\circ$, $0^\circ < \theta_2 < 180^\circ$, $-30^\circ < \theta_3 < 150^\circ$ 으로 설정한다.

[0053] 그리고, 버킷의 경로는 토양의 종류를 고려하며, 토양의 종류는 부드러운 토양(soft soil)과 딱딱한 토양(hard soil)의 2개의 타입으로 나뉘도록 한다.

[0054] 또한, 강한 강도를 가지는 큰 바위와 같은 장애물이 버킷 경로 중에 존재하며, 장애물은 관통될 수 없다. 특히, 장애물은 관통(Penetration) 영역에 위치할 수 있으며, 끌기(drag)나 감기(curl) 영역과 같은 나머지 영역에 위치할 수 있다. 이와 같은 조건에서, 도 6에 나타낸 가상의 굴삭기는 ADAMS/View와 같은 프로그램을 통하여 구현될 수 있다.

[0055] 도 7a 내지 도 10b는 도 6에 따른 모델링부(130)가 다양한 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다.

[0056] 도 7a는 부드러운 토양에서의 버킷 경로를 시뮬레이션한 결과를 나타낸 도면이고, 도 7b는 도 7a에 나타낸 버킷 경로를 부드러운 토양과 딱딱한 토양에서 각각 적용할 경우 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.

[0057] 도 7a와 관련하여, 부드러운 토양에 대하여 경로 결정부(120)는 관통(Penetration) 및 감기(curl)의 2 단계를 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 시뮬레이션한다.

- [0058] 그리고, 도 7b는 도 7a에 나타난 2단계의 버킷 경로를 부드러운 토양과 딱딱한 토양에 각각 적용하였을 경우, 버킷 팁 부분에 위치한 저항력 센서에 의해 감지된 저항력의 크기를 나타낸 결과로서, 딱딱한 토양에서 관통(Penetration) 및 감기(curl)의 2개의 단계를 통하여 굴삭 과정을 수행하는 경우 저항력이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.
- [0059] 도 8a는 딱딱한 토양에서의 버킷 경로를 시뮬레이션한 결과를 나타낸 도면이고, 도 8b는 도 8a에 나타난 버킷 경로를 부드러운 토양과 딱딱한 토양에서 각각 적용할 경우 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.
- [0060] 도 8a와 관련하여, 딱딱한 토양에 대하여 경로 결정부(120)는 관통(Penetration), 끌기(drag) 및 감기(curl)의 3 단계를 통하여 굴삭 과정을 진행하도록 시뮬레이션한다.
- [0061] 그리고, 도 8b는 도 8a에 나타난 3단계의 버킷 경로를 부드러운 토양과 딱딱한 토양에 각각 적용하였을 경우, 버킷 팁 부분에 위치한 저항력 센서에 의해 감지된 저항력의 크기를 나타낸 결과이다. 도 8b에서, 토양이 단단하기 때문에 부드러운 토양에 비하여 버킷의 관통(Penetration) 깊이가 얕게 된다는 것을 알 수 있다.
- [0062] 도 9a는 버킷의 관통(Penetration) 영역에 장애물이 존재하는 경우를 시뮬레이션 하는 과정을 나타낸 도면이고, 도 9b는 도 9a의 경우에서의 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.
- [0063] 도 10a는 버킷의 감기(curl) 영역에 장애물이 존재하는 경우를 시뮬레이션 하는 과정을 나타낸 도면이고, 도 10b는 도 10a의 경우에서의 버킷 팁에서 측정된 저항력의 크기를 나타낸 그래프이다.
- [0064] 도 9a 내지 도 10b를 통하여, 장애물 위치는 버킷 팁에서 발생하는 저항력 벡터의 위치와 방향을 기초로 결정된다는 것을 알 수 있다.
- [0065] 이하에서는 가상 굴착기의 버킷이 굴착 과정에서 장애물에 걸렸을 때, 경로 결정부(120)가 새롭게 버킷 경로를 설정하는 과정에 대하여 설명한다.
- [0066] 도 11은 가상 굴착기의 모델의 좌표계를 나타낸 도면이다.
- [0067] 도 11과 같이 역동력학은 버킷 경로의 설정된 지점에 대응하여 조인트 각도 및 위치를 결정하는데 사용된다. 좌표계에서 O_1 , O_2 , O_3 , 및 O_4 지점은 도 11에 나타난 조인트의 위치에 대응된다. 도 11에서 a_1 , a_2 , a_3 는 각 붐(boom), 암(arm), 버킷(bucket)의 링크 길이를 나타내고, α 는 x축과 버킷이 이루는 각도(attack 각도)를 나타낸다.
- [0068] 버킷 조인트 (x_{Bj} , y_{Bj})의 위치는 다음의 수학식 2 및 수학식 3과 같이 버킷 팁의 위치에 기초하여 결정된다.

수학식 2

$$x_{Bj} = x_{Bt} + a_3 * \cos \alpha$$

수학식 3

$$y_{Bj} = y_{Bt} + a_3 * \sin \alpha$$

- [0071] 붐(boom)의 부착 위치와 연관된 버킷 조인트의 위치는 다음의 수학식 4 및 수학식 5와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 4

$$x_{Bj} = a_1 * \cos \theta_1 + a_2 * \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

수학식 5

$$y_{Bj} = a_1 * \sin \theta_1 - a_2 * \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

여기서, θ_1 , θ_2 , 그리고 θ_3 에 대한 역동력학 방정식은 다음의 수학식 6 내지 수학식 8과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 6

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x_{Bj}^2 + y_{Bj}^2 - (a_1^2 + a_2^2)}{2 * a_1 * a_2} \right)$$

수학식 7

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_{Bj} * (a_1 + a_2 \cos \theta_2) - x_{Bj} * a_2 * \sin \theta_2}{x_{Bj} * (a_1 + a_2 \cos \theta_2) - y_{Bj} * a_2 * \sin \theta_2} \right)$$

수학식 8

$$\theta_3 = \pi + \theta_1 - (\alpha + \theta_2)$$

where $(-65^\circ < \theta_1 < 85^\circ)$, $(0^\circ < \theta_2 < 180^\circ)$, and $(-30^\circ < \theta_3 < 150^\circ)$.

본 발명의 실시예에 따르면, 버킷 팁의 저항력이 급작스럽게 증가하는 것이 감지됨으로써 장애물이 검출될 수 있다. 여기서, 저항력은 기준 값보다 훨씬 큰 값을 가지게 된다.

이와 같은 정보와 위치 센서에 기초하여, 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴삭기 시스템(100)은 저항력 벡터의 크기와 방향에 기초하여 매장된 장애물의 위치를 확인할 수 있다. 그리고, 장애물이 검출되면, 매장된 장애물을 피하기 위하여 경로 결정부(120)는 버킷 경로를 다시 결정한다.

도 12a 내지 도 12d는 장애물을 회피하기 위하여 자율 최적화 굴삭기 시스템이 버킷 경로를 생성하는 과정을 설명하기 위한 도면이다. 즉, 도 12a 내지 도 12d는 버킷 경로에 장애물이 있는 경우, 토양의 상태에 따라 버킷 경로를 재설정하는 과정을 나타낸다.

도 12a는 부드러운 토양의 관통(penetration) 영역에 장애물이 있을 경우의 저항력 벡터를 나타낸 것이고, 도 12b는 부드러운 토양의 감기(curl) 영역에 장애물이 있을 경우의 저항력 벡터를 나타낸 것이다. 도 13a는 딱딱한 토양의 관통(penetration) 영역에 장애물이 있을 경우의 저항력 벡터를 나타낸 것이고, 도 13b는 딱딱한 토양의 끌기(drag) 영역에 장애물이 있을 경우의 저항력 벡터를 나타낸 것이다.

도 12a와 도 12c에 나타낸 것처럼, 버킷 팁이 관통(penetration) 영역에서 장애물 표면의 윗부분을 만나게 되면, 버킷 팁에서 측정된 저항력 벡터의 크기는 급격하게 증가하여 기준 값을 초과하고, 벡터의 방향은 양의 값을 가진다.

장치의 안정성을 위하여, 붐(boom)은 멈추게 되고, 버킷 조인트는 버킷에 토양을 감도록(curl) 제어된다. 그리고 버킷은 밖으로 제거되고, 새로운 굴착 사이클이 시작된다.

다른 예로서, 도 12b와 도 12d에 나타낸 것처럼, 버킷 팁이 감기(curl) 또는 끌기(drag) 영역에서 장애물의 측면을 만나게 되면, 버킷 팁에서 측정된 저항력 벡터의 크기는 급격하게 증가하여 기준 값을 초과하고, 벡터의 방향은 음의 값을 가진다.

- [0085] 버킷과 암 조인트는 멈춘 상태에서, 붐 조인트는 버킷을 들어올리기 위하여 역방향으로 회전하게 된다.
- [0086] 이와 같은 조인트의 순차적인 동작에 대하여 도 13a와 도 13b에 도시하였다.
- [0087] 도 13a는 부드러운 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 도면이고, 도 13b는 딱딱한 토양에서의 버킷 경로를 나타낸 도면이다. 도 13a 및 도 13b에 나타난 것처럼, 본 발명의 실시예에 따르면, 붐 조인트, 암 조인트, 버킷 조인트는 장애물이 없을 경우, 관통(penetration) 영역에서 장애물을 만날 경우, 감기(curl) 또는 끌기(drag) 영역에서 장애물을 만날 경우 각각에 대하여 동작 시점을 달리하여, 장애물을 도중에 만나더라도 효과적으로 피하면서 굴착 과정을 진행할 수 있다.
- [0088] 특히 제어부(140)는, 도 13a 및 도 13b와 같이, 관통 영역에서 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 버킷 조인트를 동작하여 감기(curl) 과정을 진행하도록 제어하고, 끌기 또는 감기 영역에서 버킷이 장애물과 접촉하는 경우, 붐 조인트를 회전시켜 버킷을 외부로 들어올리도록 제어한다.
- [0089] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴착기 시스템에 포함된 모델링부(130)의 모델링 과정 및 자율적 동작 과정에 대하여 설명한다.
- [0090] 도 14는 본 발명의 실시예에 따른 자율 최적화 굴착기 시스템의 자율 최적화 과정을 나타낸 도면이다.
- [0091] 굴착 과정에서, 목표 경로 파라미터는 굴착 조건의 변화에 따라 실시간으로 계속하여 변한다. 따라서, 제어기 파라미터들도 역시 시스템 파라미터의 변화에 적응되도록 업데이트 되어야 한다.
- [0092] 따라서, 본 발명의 실시예에서는 장애물이나 굴착 조건의 변화에 대응하기 위하여, 모델링부(130)는 퍼지 보상기를 이용한 적응형 슬라이딩 모드 PID 제어기(adaptive sliding mode PID controller with a fuzzy compensator (ASMPIDF))를 포함하며, PID 제어를 통하여 굴착기의 조인트들을 제어한다.
- [0093] PID 제어기의 게인 성분들인 비례 게인($\hat{k}_p$), 적분 게인($\hat{k}_i$), 미분 게인($\hat{k}_d$)은 기울기 강하법(gradient descent method)에 근거하여 자동적으로 변경된다. 그리고, 퍼지 보상기는 장애물 존재에 따른 파라미터 변수를 보상하는 역할을 수행한다.
- [0094] 본 발명의 실시예에 따른 굴착기 시스템은 MIMO(다중 입출력) 방식의 비선형 시스템을 고려한다. 즉, 각각의 암 조인트는 2차 비선형 시스템을 고려하며, 입력으로서 제어력(u_i)을 가지고, 출력으로서 조인트 각도(q_i)를 가지는 것으로 설계한다.
- [0095] 암 조인트의 상태 방정식은 다음의 수학적 식 9와 같이 나타낼 수 있다.

수학적 식 9

[0096]
$$\ddot{q}(t) = f(q, \dot{q}) + bu(t)$$

[0097] 여기서 q 는 시스템 상태이고, $f(q, \dot{q})$ 는 비선형 함수이며, b 는 미지의 양수의 상수이다. 그리고, $u(t)$ 는 제어 상수이다.

[0098] 제어 목적은 PID 제어기를 조인트 위치 상태 $q(t)$ 가 기준 경로 $q_r(t)$ 를 추종할 수 있도록 설계하는 것이다. 여기서, 트래킹 에러는 다음의 수학적 식 10과 같이 나타낼 수 있다.

수학적 식 10

[0099]
$$e(t) = q_r(t) - q(t)$$

[0100] 그리고, 슬라이딩 표면은 다음과 같이 정의될 수 있다.

수학식 11

$$s(t) = \dot{e}(t) + k_1 e(t) + k_2 \int_0^t e(t) dt$$

여기서 k_1 와 k_2 는 non-zero 양의 상수이다.

이상적인 PID 제어기는 슬라이딩 표면을 0으로 가정하여(i.e. $s \rightarrow 0; \dot{s} = 0$) 수학식 9으로부터 획득할 수 있다.

수학식 12

$$u^*(t) = b^{-1}[-f(q, \dot{q}) + \ddot{q}_r + k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t)]$$

$\dot{s}(t) = 0$ 인 경우, 수학식 11은 다음의 수학식 13과 같이 정리할 수 있다.

수학식 13

$$\ddot{e}(t) + k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t) = 0$$

이하에서는 도 15를 이용하여 적응형 PID 제어 시스템에 대하여 설명한다.

도 15는 적응형 PID 제어 시스템의 블록 다이어그램도이다.

수학식 14

$$u = u_{pid} + u_f$$

여기서 u_{pid} 는 이상적인 제어기 $u^*(t)$ 에 근사화하기 위해 사용되는 APID 제어기이고, u_f 는 이상적인 제어기와 APID 제어기 사이의 잔여 근사 오차(residual approximate error)의 영향을 극복하기 위하여 설계된 퍼지 보상기이다.

적응형 슬라이딩 모드 PID 제어기는 다음의 수학식 15와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 15

$$u_{pid} = k_p e + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \dot{e}$$

여기서, $\hat{k}_p, \hat{k}_i, \hat{k}_d$ 는 각각 k_p, k_i, k_d 의 추정치이다.

수학식 10을 2번 미분하고, 수학식 9을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 16

[0115]

$$\ddot{e} = -f - bu + \ddot{q}_r$$

[0116]

수학식 11의 양측을 미분하고 수학식 16을 이용하면 다음과 같은 수학식 17을 얻을 수 있다.

수학식 17

[0117]

$$\dot{s} = \ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_2 e = -f - bu + A$$

[0118]

여기서, $A = \ddot{q}_r + k_1 \dot{e} + k_2 e$ 이다.

[0119]

수학식 14을 수학식 17에 대입하고, 양단에 s를 곱하면 다음의 수학식 18과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 18

[0120]

$$s\dot{s} = -s[b(u_{pid} + u_f) + f - A]$$

[0121]

리아프노프 안정성 이론에 따르면, 다음의 수학식 19와 같다.

수학식 19

[0122]

$$V = \frac{1}{2} s^2$$

[0123]

안정성 조건은 다음의 수학식 20과 같다.

수학식 20

[0124]

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0$$

[0125]

수학식 20을 정리하면 다음과 같다.

수학식 21

[0126]

$$\dot{V} = sA - sbu_{pid} - su_f - sf < 0$$

[0127]

PID 제어기의 비례 게인($\hat{k}_p$), 적분 게인($\hat{k}_i$), 미분 게인($\hat{k}_d$)은 기울기 강하법(gradient descent method)과 수학식 15 및 수학식 17에 나타난 연쇄 법칙(chain rule)에 기초하여 갱신될 수 있다.

수학식 22

$$\dot{\hat{k}}_p = -\eta_p \frac{\partial s \dot{s}}{\partial u_{pid}} \frac{\partial u_{pid}}{\partial \hat{k}_p} = \eta_p s b e$$

[0128]

수학식 23

$$\dot{\hat{k}}_i = -\eta_i \frac{\partial s \dot{s}}{\partial u_{pid}} \frac{\partial u_{pid}}{\partial \hat{k}_i} = \eta_i s b \int_0^t e(t) dt$$

[0129]

수학식 24

$$\dot{\hat{k}}_d = -\eta_d \frac{\partial s \dot{s}}{\partial u_{pid}} \frac{\partial u_{pid}}{\partial \hat{k}_d} = \eta_d s b \dot{e}$$

[0130]

[0131] 여기서, η_p, η_i, η_d 는 각각 $\hat{k}_p, \hat{k}_i, \hat{k}_d$ 의 신경망 학습률(learning rates)이다.

[0132] 사용불능 시스템 동력(unavailable system dynamic) b 는 $\text{IbIsign}(b)$ 로 나타내었으므로, 수학식 22 내지 24에 나타난 PID 제어기 게인들은 다음의 수학식 25 내지 27과 같이 다시 정리할 수 있다.

수학식 25

$$\dot{\hat{k}}_p = \eta_p |b| \text{sgn}(b) s e$$

[0133]

수학식 26

$$\dot{\hat{k}}_i = \eta_i |b| \text{sgn}(b) s \int_0^t e(t) dt$$

[0134]

수학식 27

$$\dot{\hat{k}}_d = \eta_d |b| \text{sgn}(b) s \dot{e}$$

[0135]

[0136] 이하에서는 도 16a 및 도 16b를 통하여 퍼지 보상기에 대하여 상세히 설명한다.

[0137] 도 16a 및 도 16b는 본 발명의 실시예에 따른 퍼지 보상 과정의 입력 소속 함수와 출력 소속 함수를 나타낸 도면이다.

[0138] 굴삭 과정에 있어서, 굴삭기의 링크가 확대되고 회수될 때, 굴삭기의 링크의 중량은 늘 변하게 된다. 게다가,

관통된 깊이가 증가할수록 굴삭기의 부하 역시 증가한다. 따라서, 적응형 PID 제어기에 의해 유도되는 근사 오차는 불가피하다. 시스템의 안정성을 위하여, 퍼지 보상기는 근사 오차를 줄이고, 채터링 현상을 없애도록 한다.

[0139] 본 발명의 실시예에 따른 퍼지 보상기는 입력과 출력을 가지는데, 입력은 미끄럼면(sliding surface)(s)이고, 출력은 퍼지 계인이다. 도 16a 및 도 16b와 같이 입력 소속 함수는 삼각형 형태를 가지며, 출력 소속 함수는 싱글톤(singleton) 형태를 가진다.

[0140] 퍼지 보상기의 퍼지 규칙은 다음의 표 1과 같이 정의된다.

표 1

s	NB	NS	Z	PS	PB
u_f	NB	NS	Z	PS	PB

[0141]

[0142] 여기서, NB는 Negative Big, NS는 Negative Small, Z는 Zero, PS는 Positive Small, PB는 Positive Big 을 의미한다.

[0143] 출력의 비퍼지화(defuzzification)는 무게중심점 방법에 의해 다음의 수식식 28과 같이 수행된다.

수식식 28

$$u_f = \frac{\sum_{i=1}^3 \delta_i w_i}{\sum_{i=1}^3 w_i} = \delta_1 w_1 + \delta_2 w_2 + \delta_3 w_3$$

[0144]

[0145] 여기서, $0 \leq w_1 \leq 1$, $0 \leq w_2 \leq 1$, $0 \leq w_3 \leq 1$ 이고, $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 이다.

[0146] 이와 같이, 경로 결정부(120)는 버킷의 굴착 과정에서 장애물에 접촉하는 경우, 모델링부(130)에 의해 모델링된 버킷 경로 모델에 의하여 버킷의 진행 경로를 다시 결정하도록 한다.

[0147] 이와 같이 본 발명의 실시예에 따르면, 자율 최적 로봇 굴삭기의 지식 기반 자율 최적화 기능은 다양한 현장 환경에서 매장되어 있는 장애물들을 피할 수 있는 능력뿐만 아니라 채굴 환경에서의 안정성을 향상시키며, 채굴 생산성을 증가시킨다. 그리고 버킷 및 채굴 환경 사이의 상호 작용하는 힘의 측정을 통해 토양의 유형과 매장되어 있는 장애물을 예측할 수 있으며, 3D 레이저 센서 기술을 이용해 채굴 지형의 형태를 파악할 수 있다. 또한 측정된 데이터로부터 최대한의 버킷 용량의 흙을 얻을 수 있는 최적의 버킷 경로를 설정하며, 이를 위한 적절한 채굴 힘을 생성시킬 수 있다.

[0148] 또한 로봇 굴삭기가 해결할 수 없는 어려운 채굴 상황에서는 작업자의 원격 제어 모드를 이용해 이러한 장애를 극복할 수 있다. 작업자의 경험과 전문 지식뿐만 아니라 로봇 굴삭기의 자율 학습 능력과 자율 추론 능력의 조합은 매장되어 있는 장애물에 대응하는 솔루션을 통해 이를 피하거나 관통하게 함으로서 버킷 용량을 극대화시킬 수 있다.

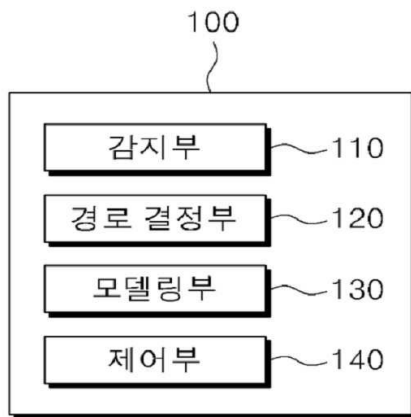
[0149] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

부호의 설명

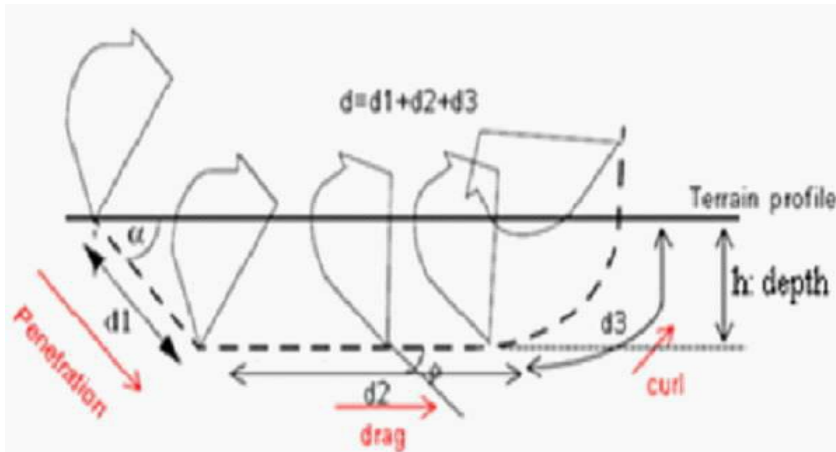
- [0150]
- | | |
|----------------------|------------|
| 100: 자율 최적화 굴삭기 시스템, | 110: 감지부, |
| 120: 경로 결정부, | 130: 모델링부, |
| 140: 제어부 | |

도면

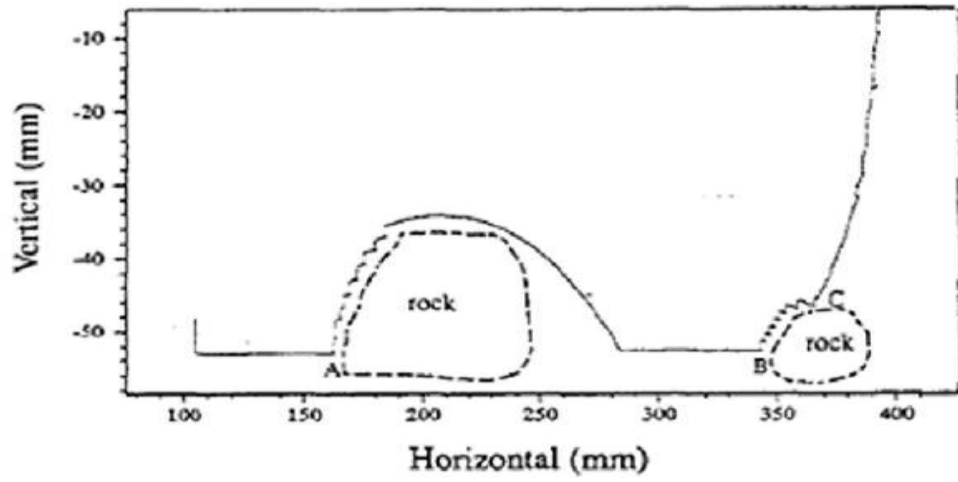
도면1



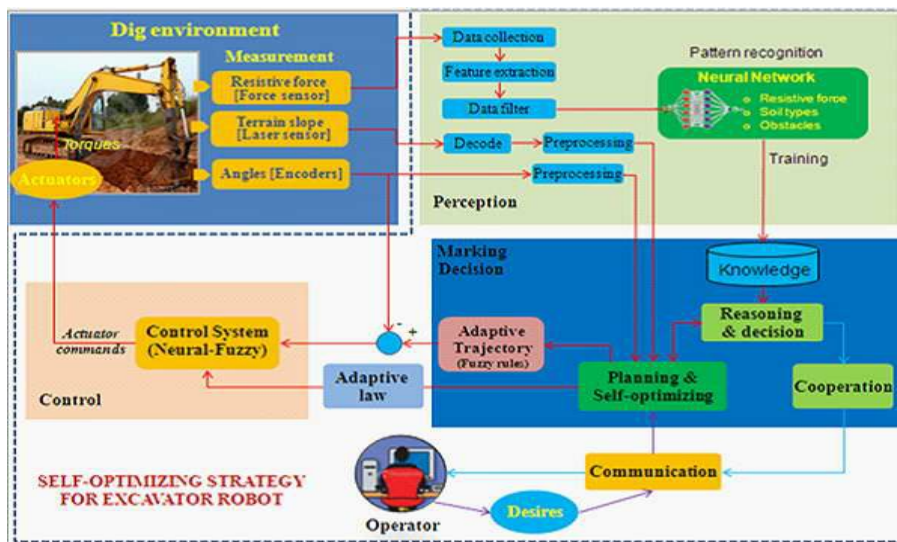
도면2



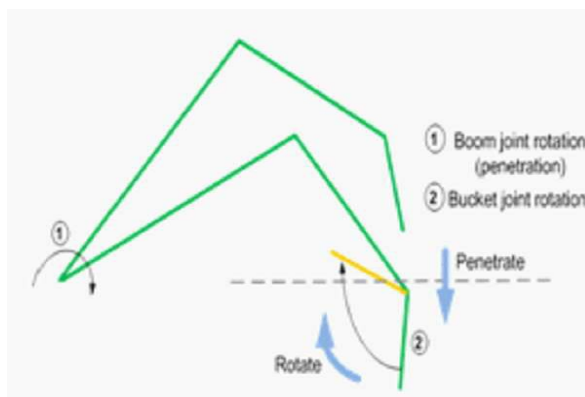
도면3



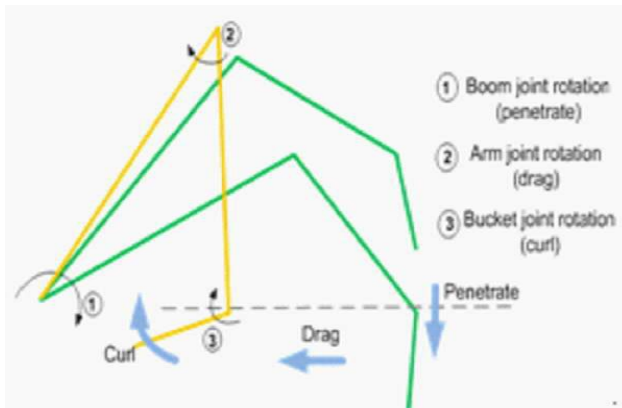
도면4



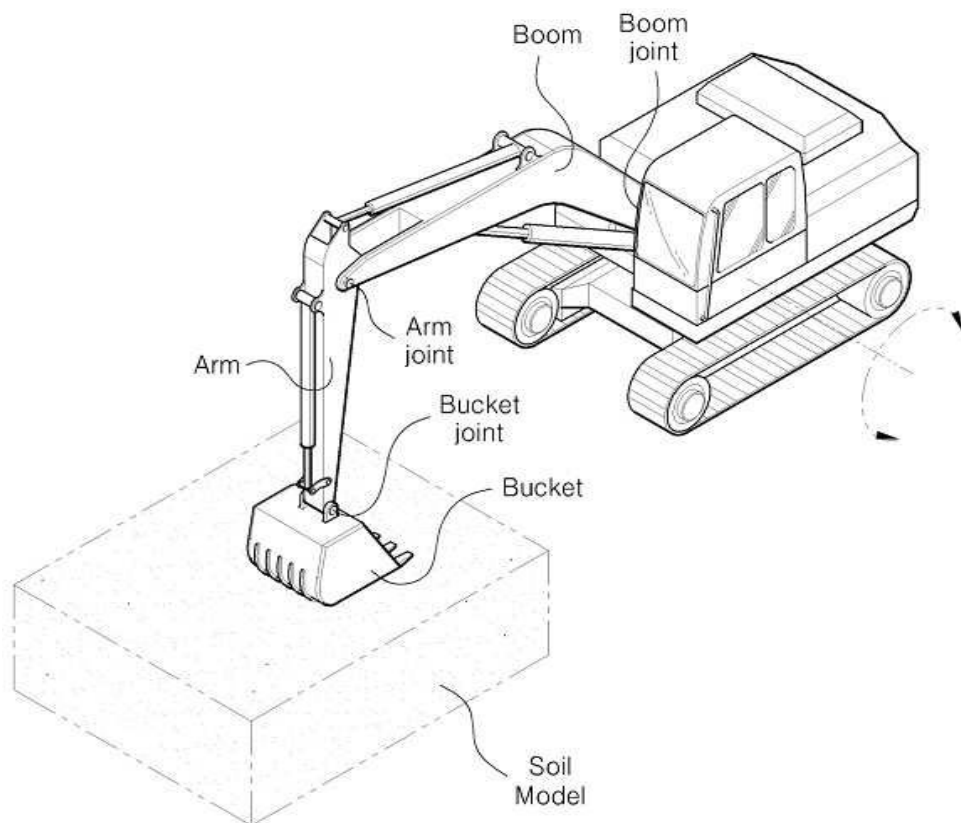
도면5a



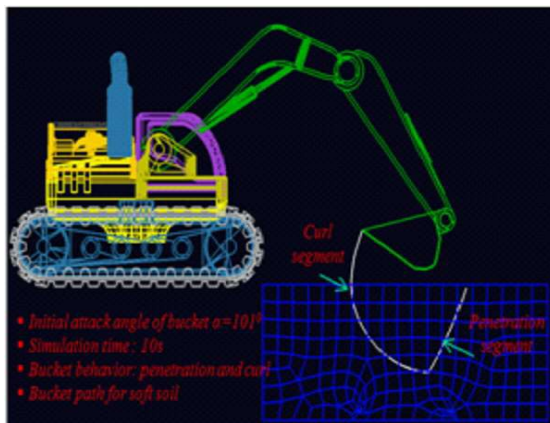
도면5b



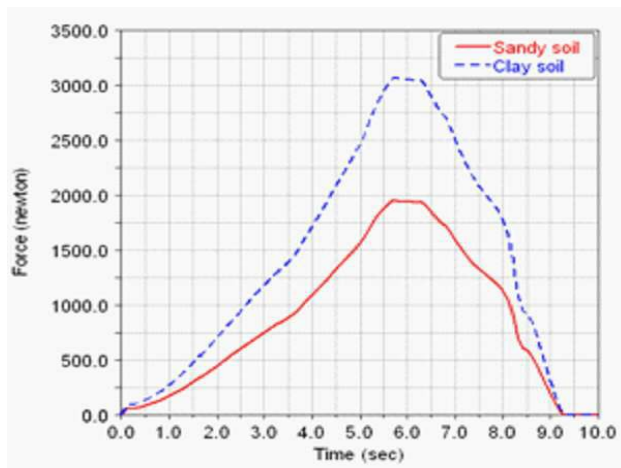
도면6



도면7a



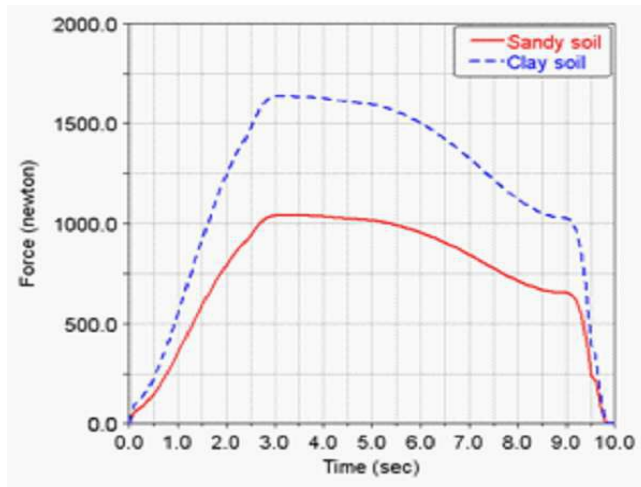
도면7b



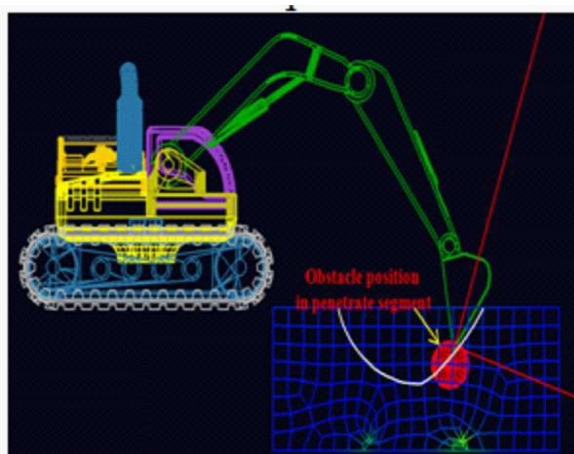
도면8a



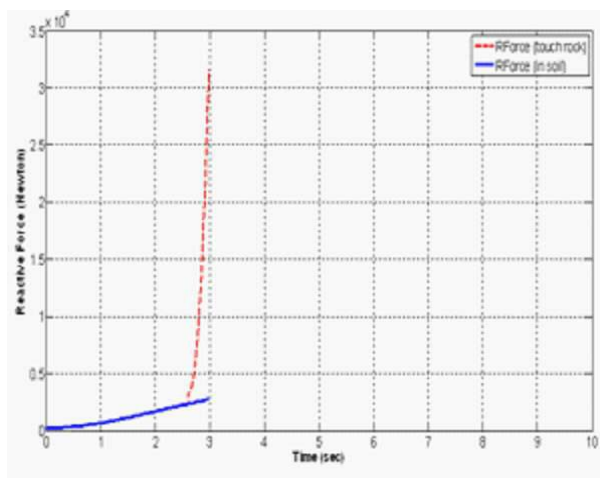
도면8b



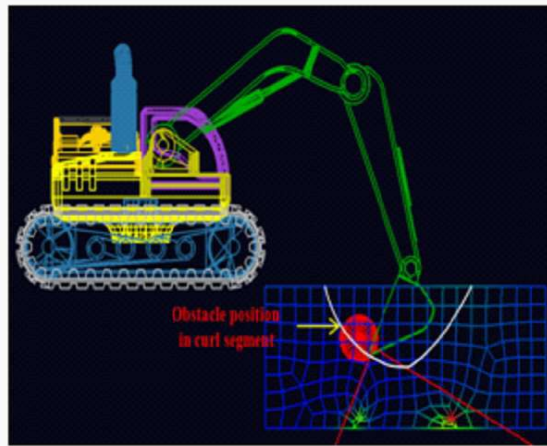
도면9a



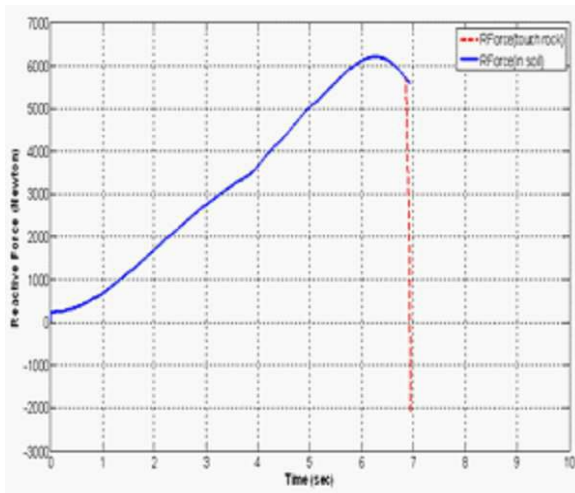
도면9b



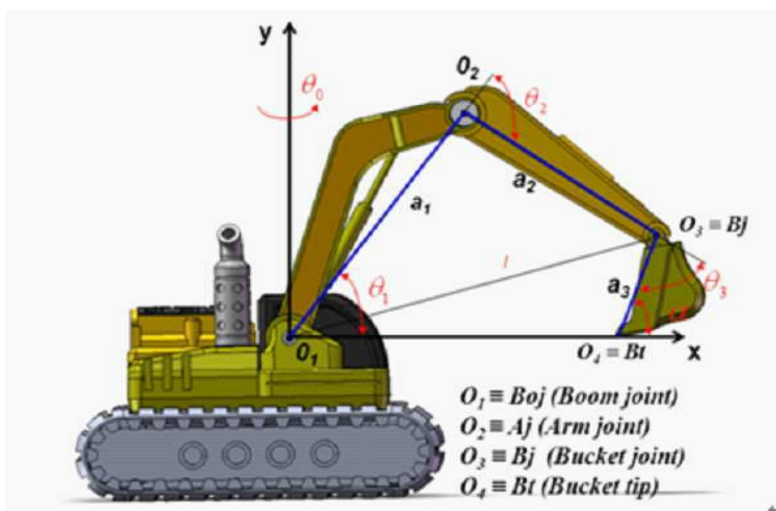
도면10a



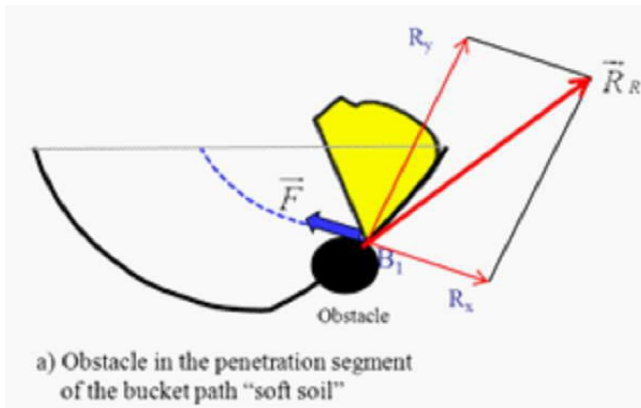
도면10b



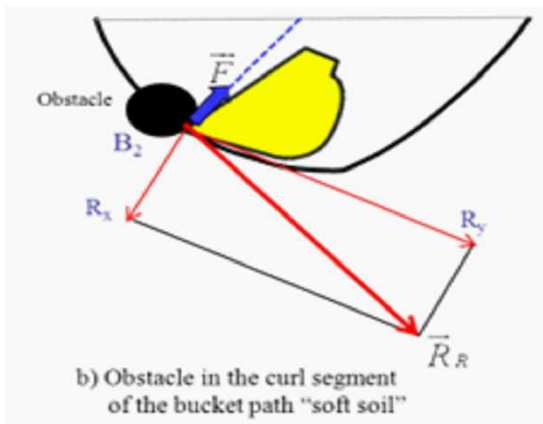
도면11



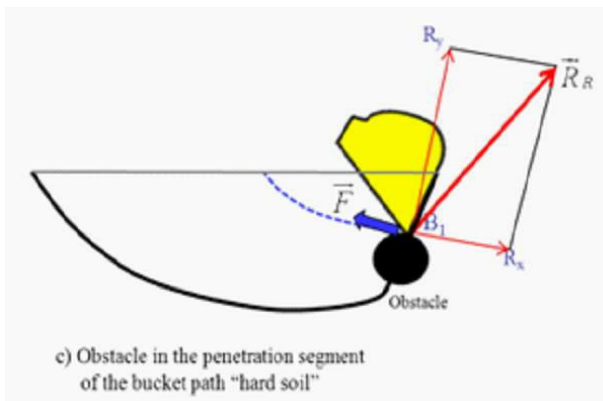
도면12a



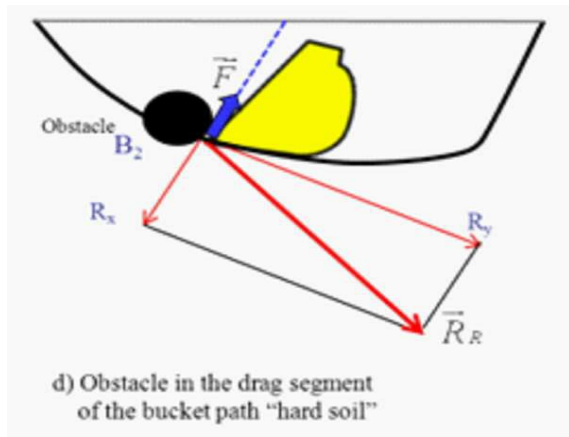
도면12b



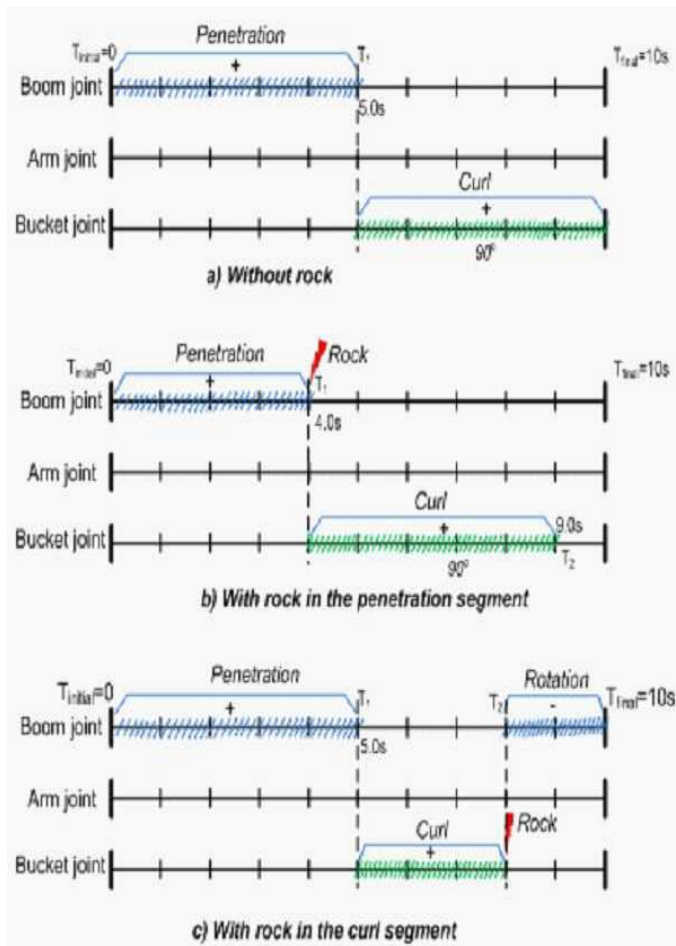
도면12c



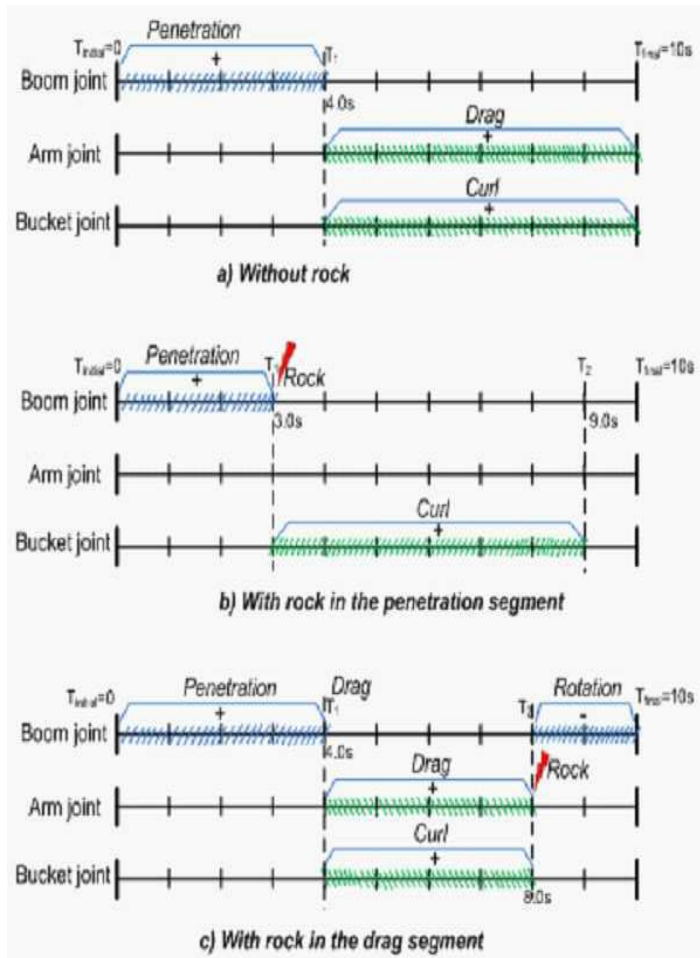
도면12d



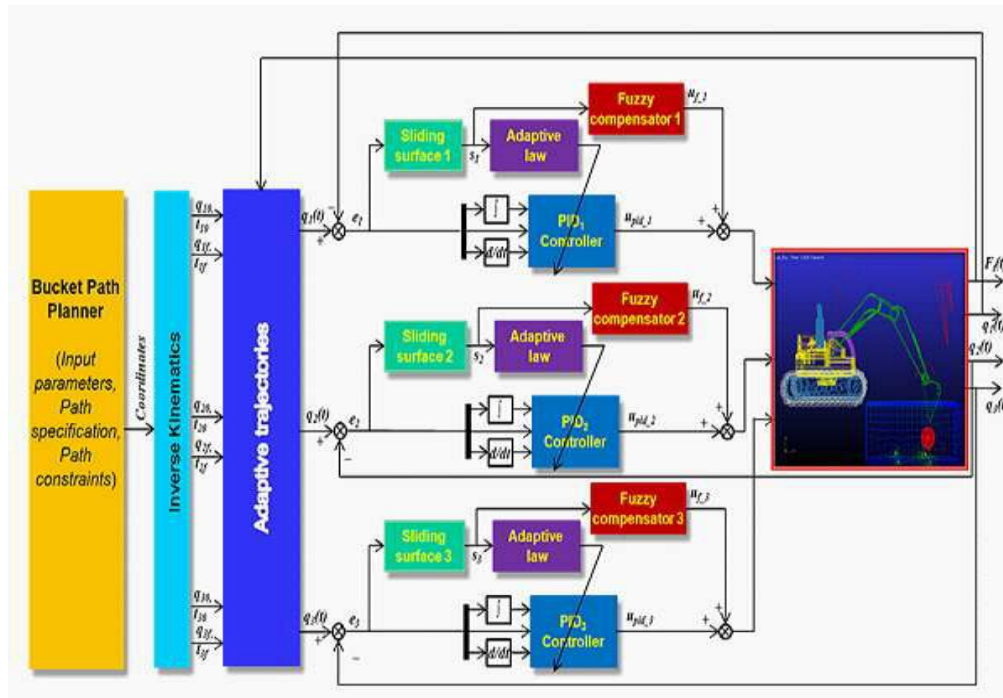
도면13a



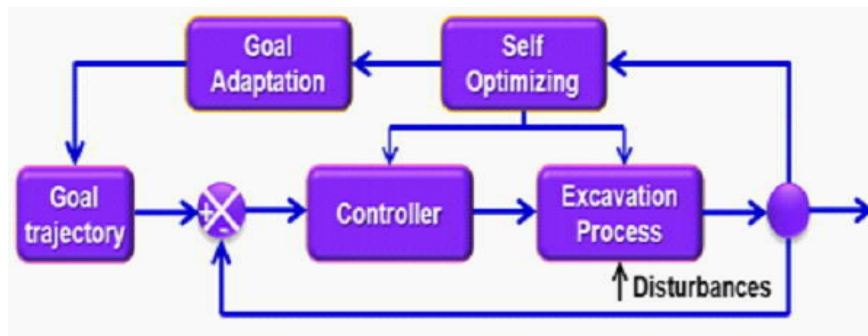
도면13b



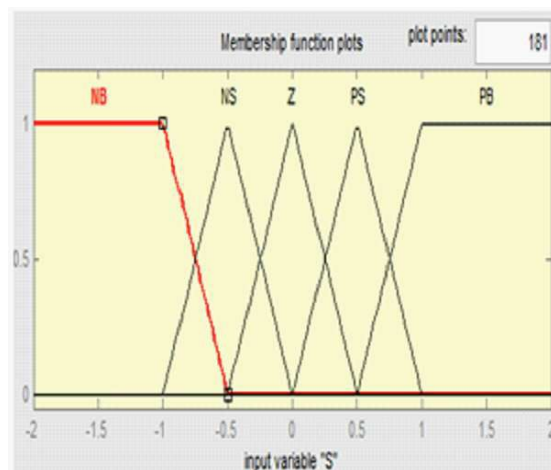
도면14



도면15



도면16a



도면16b

