

〈論 文〉

기계가공작업을 위한 강성이 큰 2단 평행구조 로봇트 암 설계

이 민 기

(1993년 12월 23일 접수)

Design of a High Stiffness Machining Robot Arm with Double Parallel Mechanism

Min-Ki Lee

Key Words : Double Parallel Mechanism(2단 평행구조), Conventional Articulated Robot(일반 다관절 로봇트), Machining(기계가공), Stiffness(강성), Machining Load(가공부하), Serial Mechanism(직렬구조), Area Moment of Inertia(면적 관성모멘트), Deformation(변형), Natural Frequency(고유주파수)

Abstract

Industrial robot has played a central role in the production automation such as welding, assembling, and painting. There has been, however, little effort to the application of robots in machining work(grinding, cutting, milling, etc.) which is typical 3D work. The machining automation requires a high stiffness robot arm to reduce deformation and vibration. Conventional articulated robots have serially connecting links from the base to the gripper. So, they have very weak structure for the machining work. Stewart Platform is a typical parallel robotic mechanism with a very high stiffness but it has a small work space and a large installation space. This research proposes a new machining robot arm with a double parallel mechanism. It is composed of two platforms and a central axis. The central axis will connect the motions between the first and the second platforms. Therefore, the robot has a large range of work space as well as a high stiffness. This paper will introduce the machining work using the robot and design the proposed robot arm.

1. 서 론

기계가공작업은 일반적으로 공작기계에 의해서 행해지고 있으나 주물의 주물귀제거, 프로펠러 표면연삭 등과 같이 가공물의 형상이 복잡하고 크기가 큰경우는 인력에 의존하게 된다. 이 작업은 분진과 소음으로 작업환경이 열악하여 작업들이 기피하

는 대표적인 3D 작업에 속한다. 열악한 작업환경을 개선하기 위해 관련업체에서 로봇트를 이용한 자동화를 추진하고 있다. 기계가공 작업의 자동화란 가공대상물의 이송, 가공, 후처리 작업을 자동으로 행하는 것을 말한다. 그 방법은 Fig. 1과 같은 가공물을 로봇트의 그리퍼가 잡아 Fig. 2와 같이 주위에 설치되어 있는 가공기계를 찾아가면서 작업을 하는 경우를 말한다. 이 경우 가공작업의 종류에 따라 로봇트 주위에 절단, 연삭, 밀링기계를 설치함으로써 다양한 작업을 한 작업대에서 수

* 정회원, 창원대학교 제어계측공학과

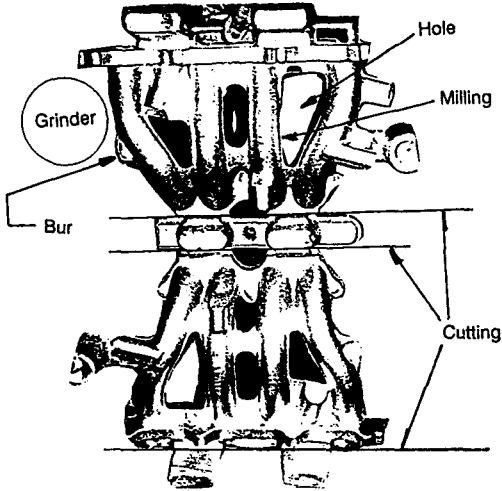


Fig. 1 Workpiece requiring several machining tools

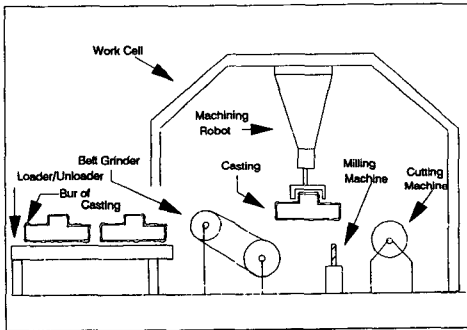


Fig. 2 Automation of machining work using a machining robot

행할 수 있다. 또한, 프로펠러와 같이 연삭물이 큰 경우에는 연삭기를 로봇트 그리퍼에 장착시키고 로봇트가 연삭할 부분을 찾아가면서 Fig. 3과 같이 작업한다. 이와같이 로봇트 사용시 유연한 자유도, 넓은 작업공간 등으로 공작 기계에서 할수 없는 작업을 쉽게 할수 있다. 그러나 가공작업은 특수한 사양의 로봇트를 요구한다. 즉, 로봇트 암의 강성이 커서 가공작업시 변형과 진동이 적어야 하며 작업공간이 넓어서 다양한 형상의 가공물을 핸들링할 수 있어야한다.

로봇트의 강성을 높이기 위한 연구는 많이 행해졌다. 대부분의 연구는 다관절 구조를 응용한 것으로 링크의 관성모멘트의 증가, 서로 수직인 조인트의 배열을 통해 강성을 높이려 했다.⁽¹⁾ 그러나 다관절 구조는 긴 외팔보 형상이므로 가공 로봇트로 사용하기는 취약한 구조이다. 이 구조보다 강성을

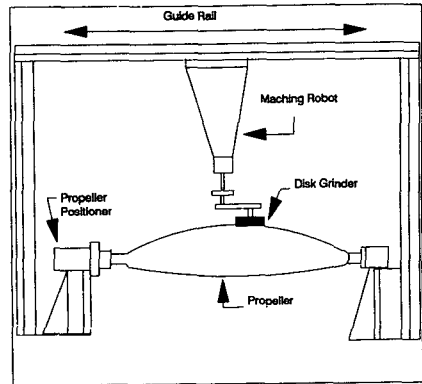


Fig. 3 Propeller blade grinding system using a machining robot

높이고 상위 링크에 부착되어 있는 액추에이터의 부하를 줄이기 위해서 폐루프(closed loop) 타입의 링크구조가 제안되었으나 가공작업을 행할 만큼 강성이 크지는 못하다.⁽²⁾

로봇트 암의 변형을 보상하기 위해서 변형을 감안한 구조해석,⁽³⁾ 동특성 해석⁽⁴⁾ 등이 제안되었으나 해석의 난이성과 과도한 계산량으로 실용화 단계에 이르지 못하고 있다. 또 한편으로 제어를 통한 암 변형을 해결하려 하지만 힘센서의 가격이 고가이고 피드백 계인 값에 따른 시스템 안정성때문에 실제 시스템 구현에는 어려움이 많다.^(5,6)

강성을 높이는 구조에 관한 연구로 가장 획기적인 것으로는 Stewart가 제안한 Stewart platform이다.⁽⁷⁾ 이것은 베이스와 플랫폼사이 에 6개의 리니어 액추에이터가 설치되어 있어 플랫폼을 밀고, 당겨줌으로써 운동을 만들어 내는 병렬구조로 항공기 시뮬레이터에 사용되었다. 병렬구조는 강성을 높이는 획기적인 구조이나 구조해석이 어려워 실용화에 많은 제한이 있다. 그러므로 연구결과들도 주로 기구학적 해석에 집중되어 있다. 순방향 구조해석(forward kinematics),^(8,9) 병렬구조를 변형한 구조해석,⁽¹⁰⁾ 직렬구조와 조합한 구조해석⁽¹¹⁾ 등이 연구되었다. 이러한 다양한 구조해석은 강성이 큰 마이크로 매니플레이터의 개발에 기여한 바가 크다.^(12,13)

병렬구조의 실용화를 위한 연구로 Hunt는 이를 로봇트 매니플레이터에 적용하고 장단점에 관해서 분석했고⁽¹⁴⁾ Fichter과 McDowell은 플랫폼의 위치에 따른 각 조인트의 운동을 해석 함으로써 실제 매니플레이터의 설계에 도움을 주었으며⁽¹⁵⁾ 마침내 Fichter가 병렬구조를 이용한 6자유도의 로봇트 매

니플레이터를 제작하고 kinematics와 dynamics의 해석을 완성했다.⁽¹⁶⁾ 그러나 이 로봇트는 1단 평행구조로 되어있어 작업공간이 작고 설치공간이 넓다는 단점을 가지고 있다.

이상에서 밝혔듯이 병렬구조를 이용한 로봇트의 개발은 1단 평행구조를 사용하고 있는 단계이며 마이크로 매니플레이터와 같이 소형 로봇트로 학교나 연구기관에서 작업공간이 작은 정밀작업에 적용되는 수준으로 아직 실용화 단계에는 이르지 못하고 있다.

본 논문에서는 로봇트를 이용한 기계가공작업을 소개하고 이를 일반 다관절 또는 병렬구조 로봇트를 적용시 문제점을 제시한다. 이를 해결하기 위해 작업공간이 넓고 설치공간이 적은 2단 평행구조를 제안한다. 이 구조는 각 단의 운동이 서로 분리되어 행해지므로 구조해석이 용이하고 각 단에 리니어 액추에이터의 설치가 2개 또는 3개 밖에 되지않아 설치공간이 작다. 본 논문에서는 제안한 로봇트를 구조해석하고 설계함으로써 향후 기계가공 로봇트의 실용화에 기여하고자 한다.

2. 다관절(직렬) 로봇트 암을 이용한 기계가공작업

현재까지 연삭을 비롯한 기계가공작업을 자동화하고자 하는 노력은 일반 다관절(직렬) 로봇트의 적용범주를 벗어나지 못하고 있다.⁽¹⁷⁾ 그러나 이 로봇트의 구조는 링크와 링크가 베이스에서 그리퍼까지 직렬로 연결된 외팔보 형태이므로 그리퍼에 작용하는 가공부하에 의해서 로봇트의 베이스 부분에 큰 굽힘모멘트가 발생된다.

Fig. 4와 같이 로봇트의 그리퍼가 주물을 잡아 연삭숫돌로 주물귀를 갈아낼 경우 베이스부분에 부가되는 굽힘모멘트 M 은

$$M = L \times F \tag{1}$$

이다. 위의 굽힘모멘트(M)는 연삭부하(F)에 의해서 베이스쪽으로 갈수록 암의 길이(L)가 길어지므로 점점 커지며, 각 관절에 부착되어 있는 액추에이터는 위의 굽힘모멘트 뿐만 아니라 링크자체의 무게, 연삭대상물의 중량을 감당해야 한다. 그러므로 일반 다관절 로봇트는 구조적으로 가공부하에 견디기 취약한 구조이다. 또한, 큰 굽힘모멘트에 의한 다관절 로봇트 암 자체의 변형량은 외팔보이

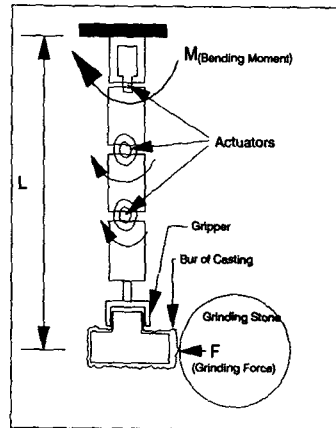


Fig. 4 Bending moment of a serial link robot arm by grinding force

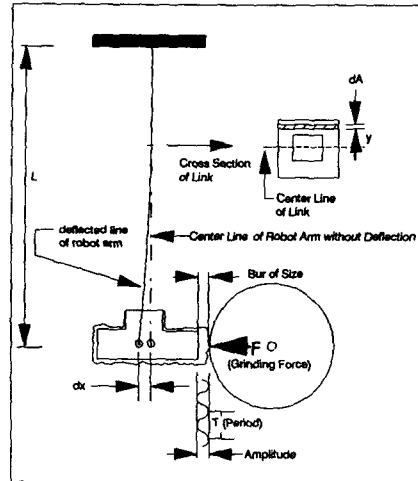


Fig. 5 Deflection and vibration of a serial link robot arm by grinding force

므로 아래와 같다.

$$dx = M / K \tag{2}$$

즉, 암의 변형량(dx)은 강성(K)이 크면 줄일 수 있으나 변형량이 클 경우 Fig. 5와 같이 연삭부위가 이동되므로 연삭량을 정확히 제어할 수 없는 결과를 낳는다.

이를 방지하기 위해 강성을 크게 해주어야 하는데 외팔보 암인 경우 강성은 아래와 같이 정의된다.

$$K = 3EI / (L^2) \tag{3}$$

즉, 강성은 Young's modulus(E)와 면적 관성모멘

트(I)에 비례하며 길이의 제곱(L^2)에 반비례한다. 그러므로 구조적으로 강성을 높이는 방법은 길이를 줄이거나 면적 관성모멘트를 증가시켜야 한다. 그러나 길이는 작업공간과 연관되므로 면적 관성모멘트, I 를 크게 해주어 강성을 늘려야 한다. 즉,

$$I = \int_A y^2 dA \quad (4)$$

위식에서와 같이 단면적(A)을 크게 해줌으로써 관성모멘트를 높일 수 있으나 단면적을 증가시킬 경우 링크의 중량이 늘어나 기형적인 로봇트 암이 된다. 그러므로 일반 다관절형 구조는 관성모멘트를 증가시키는 데는 한계가 있어 강성이 큰 암구조를 가질 수 없게 된다.

기계가공작업에서 진동의 영향은 심각하다. 이를 줄이기 위해서 제적생성⁽¹⁸⁾과 제어 알고리즘⁽¹⁹⁾ 등을 제안했으나 다관절 구조에는 강성에 한계가 있으므로 신뢰할 만한 방법으로 볼 수 없다. 외팔보의 일차 고유진동수, ω_{1s} 는 아래와 같다.⁽²⁰⁾

$$\omega_{1s} = (1.875/L)^2 (EI/m)^{1/2} \quad (5)$$

위의 식에서 ω_{1s} 는 I 가 클수록, 단위 길이당 암의 질량(m)이 작을수록 고유진동수가 되지만 구조상으로 변화시킬 수 있는 I 의 값에는 한계가 있으므로 저주파수가 생성된다. 저주파 진동으로 진폭이 커지고 이 진폭으로 인하여 연삭면과 연삭숫돌사이에 심한 진동이 일어나 연삭면이 고르지 못한 결과를 낳는다. 그러므로 위에서 언급했듯이 가공작업에 사용된 다관절 로봇트는 큰 굽힘모멘트, 큰 변형, 그리고 저주파 진동으로 가공작업에 부적합하다.

3. 1단 평행구조(병렬) 로봇트 암을 이용한 기계가공작업

가공전용 로봇트의 고려사항인 강성을 높이기 위해서 로봇트의 그리퍼를 여러개의 링크가 지지해주는 구조를 생각할 수 있다. 이런 구조는 Stewart⁽⁷⁾가 처음 제안한 것으로 Fig. 6과 같이 베이스에서 6개의 링크가 병렬연결로 플랫폼을 직접 지지하는 방법이다.

이 구조의 가장 큰 특징은 가공부하가 분산되고 강성이 크다는 것이다. 다관절 로봇트의 강성은 링크의 단면적에 의해서 결정되나 이 병렬구조는 링크가 이루고 있는 공간이 또 하나의 인자가 된다. 따라서 링크설치 공간을 조절함으로써 충분히 강성

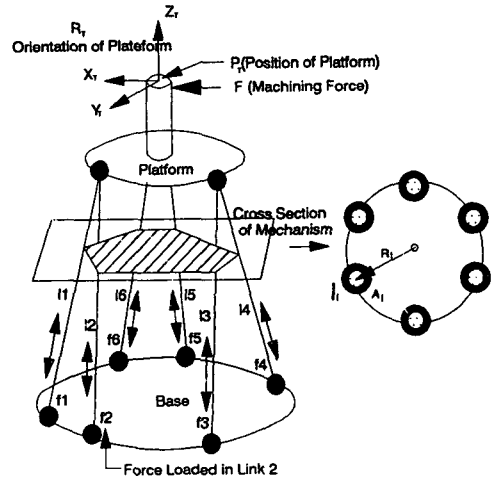


Fig. 6 Stewart mechanism using one parallel mechanism

을 높일 수 있다. Fig. 6과 같은 배열의 면적 관성모멘트, I_p 는

$$I_p = \sum_{i=1}^6 I_i + A_i R_i^2 \quad (6)$$

이 된다. 여기서, I_i 는 각 링크의 면적 관성모멘트, A_i 는 단면적, 그리고 R_i 는 공간의 중심에서 단면적까지의 거리이다. 따라서 링크의 수와 공간의 조절로 강성을 획기적으로 증가시킬 수 있다. 이 큰 강성으로 인하여 굽힘모멘트에 의한 변형이 매우 작아지고 고유진동수도 높아진다. 그러나 병렬구조는 높은 강성에도 불구하고 산업용 로봇트로 실용화되기에는 구조해석이 난해하며 작업공간이 작다는 문제점을 가지고 있다.

병렬구조의 구동방식은 플랫폼의 위치와 자세를 6개의 리니어 액추에이터의 길이조절을 통하여 간접적으로 제어하는 방식이다. 즉, 링크의 길이를 늘이고 줄임으로써 원하는 플랫폼의 위치, P_T 와 오리엔테이션(orientation), R_T 를 만들어 낸다.

$$\begin{aligned} P_T &= P_T \text{ cont} (l_1, l_2, \dots, l_6) \\ R_T &= R_T \text{ cont} (l_1, l_2, \dots, l_6) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $l_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 는 각 링크의 길이이고, $P_T \text{ cont}$ 과 $R_T \text{ cont}$ 는 길이에 따른 위치와 오리엔테이션 관계를 나타내는 기하학적 구속조건이다.^(8,9,12) 병렬구조의 구조해석이란 위의 구속조건을 구하는 것으로 많은 계산을 요구한다. 다관절형인 경우 각 액추에이터의 운동이 Homogeneous matrix에 의해서 베이스에서 그리퍼까지 직접 전달되므로 쉽게

구할 수 있다.⁽²¹⁾ 즉, 6자유도인 경우 오리엔테이션을 조절하는 상위 3링크들의 조인트를 서로 직각으로 한점에 설치하고 하위 3링크들은 이 조인트를 공간상에 위치시킨다. 그러므로 Piper와 Roth⁽²²⁾가 제안했듯이 위치와 오리엔테이션이 분리되어 해석이 용이해진다. 그러나 병렬구조는 식(7)에서 보듯이 6개의 링크들의 운동이 플랫폼의 위치와 오리엔테이션 운동에 모두 관여하므로 분리가 불가능하다.

플랫폼의 운동을 제어하기 위해서는 플랫폼과 베이스에 6개의 링크가 집중 설치되어야 한다. 그러므로 링크운동시 서로 간섭이 일어나지 않으려면 링크의 설치공간이 넓어야 하고 결과적으로 로봇의 크기는 대형화되어 소형 가공물의 작업에는 비효율적인 결과를 초래한다. 또한, 링크의 간섭을 피하기 위해 링크의 각관절의 운동을 제한해야 하므로 작업공간이 작아진다. 그러므로 강성을 높이기 위해 병렬구조를 사용하되 설치공간을 줄이고, 작업공간을 넓히며, 구조해석이 간단한 로봇 암 설계가 필요하다.

4. 2단 평행구조 로봇 암

위에서 언급한 가공 로봇 암의 조건을 만족시키기 위해 Fig. 7과 같은 2단 평행구조 로봇 암을 제안한다. 이 로봇 암은 2개의 플랫폼과 중앙축으로 되어 있다. 첫 단계는 3개의 리니어 액추에이터, (A1, A2, A3)로 이루어져 있으며 각 리니어 액추에이터의 양단에는 유니버설 조인트가 설치되어 첫단의 베이스(Base-1)와 플랫폼 (Platform-1)에 각각 연결되어 있다. 리니어 액추에이터는 Fig. 8과 같이 구동원인 서보모터, 볼스크루(ball screw), 실린더로 이루어져 있으며 모터의 회전방향과 회전량에 따라서 실린더를 밀고 당겨줌으로써 길이를 조절한다.

중앙축은 암의 중앙에 있으며 한 몸체로 되어 있는 Platform-1과 두번째단의 베이스(Base-2)를 축을 따라 이동하게 하는 가이드 역할을 한다. 두번째단은 2개의 리니어 액추에이터로 이루어져 있으며 첫단과 같이 양단에 설치된 유니버설 조인트가 베이스(Base-2)와 플랫폼(Platform-2)에 각각 연결되어 있다. 마지막 회전 액추에이터(A6)는 Platform-2에 설치되어 그리퍼의 회전운동을 담당한다.

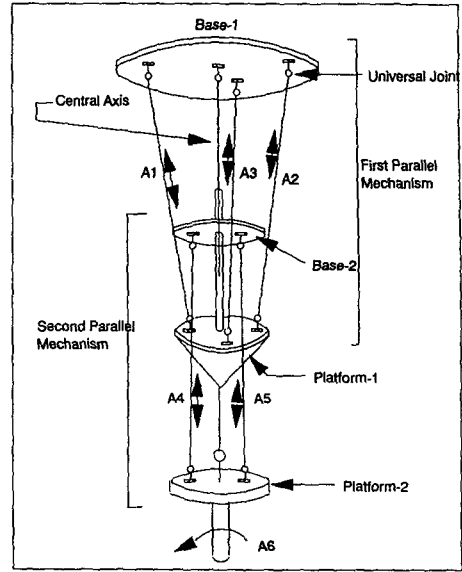


Fig. 7 Machining robot arm with double parallel mechanism

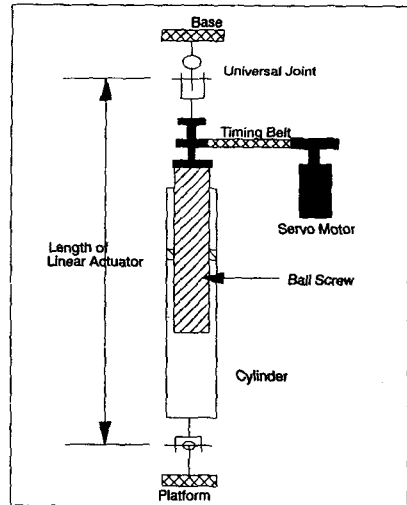


Fig. 8 Servo linear actuator

이 구조는 각단의 운동이 서로 독립적으로 행해지므로 다관절 로봇과 같이 위치와 오리엔테이션 운동이 분리된다. 즉, 첫단은 두번째단을 공간상에 위치시키는 기능을 하며 두번째단은 Platform-2의 각도를 조절함으로써 그리퍼의 yaw와 pitch운동을 생성한다. Roll운동은 Platform-2에 설치되어 있는 A6의 회전운동으로 행해지는데 이 운동만이 유일하게 회전 액추에이터에 의한 직접구동이고 나머지 운동은 리니어 액추에이터의 길이조절에 의한 간접

구동이다. 이와 같이 2단의 평행구조를 사용함으로써 강성이 크고, 구조상으로 각단의 운동이 분리되어 운동해석이 간단하며, 플랫폼과 베이스에 설치되는 조인트의 수가 3개 또는 2개 밖에 되지 않아 설치공간이 작은 로봇트가 설계된다.

4.1 자유도 해석

2단 평행구조 로봇 암의 자유도를 해석하기 위해 Gruebler의 법칙⁽²³⁾을 적용한다. 즉, 자유도(F)는

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (8)$$

이다. 여기서, λ 는 메카니즘이 운동할 수 있는 공간 자유도, n 은 링크수, j 는 조인트수이며, f_i 는 i -link의 자유도를 말한다.

위의 식을 첫단에 대입하면,

- (1) $\lambda=6$ (메카니즘이 공간운동을 하므로)
- (2) $n=9$ (Base-1^(link=1), 3-리니어 액추에이터의 하우징^(link=2,3,4), 3-실린더^(link=5,6,7), 중앙축^(link=8), Platform-1^(link=9))
- (3) $j=11$ (3-리니어 액추에이터의 상, 하단 universal joints^(j=1, \dots, 6), 중앙축의 상단 universal joint^(j=7), 3-리니어 액추에이터의 side 및 revolute joints^(j=8, 9, 10), 중앙축의 slide joint^(j=11))

$$(4) \sum_{i=1}^{11} f_i = (f_1=2) + (f_2=2) + (f_3=2) + (f_4=2) + (f_5=2) + (f_6=2) + (f_7=2) + (f_8=2) + (f_9=2) + (f_{10}=2) + (f_{11}=1) = 21$$

이므로 자유도는

$$F = 6 \times (9 - 11 - 1) + 21 = 3 \quad (9)$$

이다. 위의 식에서 리니어 액추에이터의 길이가 변할 경우 slide joint가 자유도를 가져 전체 메카니즘은 3자유도를 갖고, 길이를 구속할 경우 slide joint는 자유도를 상실하므로 0자유도를 갖는다. 그러므로 첫단은 3자유도를 갖고 Base-1과 Platform-1를 임의 공간에 위치시키며 길이를 구속하므로 그 위치를 고정시킬 수 있는 메카니즘이 된다.

두째단도 첫단과 같이 Gruebler의 법칙에 대입하면

- (1) $\lambda=6$
- (2) $n=7$ (Base-2^(link=1), 2-리니어 액추에이터의

하우징^(link=2,3)과 2-실린더^(link=4,5), Platform-2^(link=6), 회전링크^(link=7))

(3) $j=8$ (2-리니어 액추에이터의 상, 하단 universal joints^(j=1, \dots, 4), 중앙축의 하단 universal joint^(j=5), 2-리니어 액추에이터의 slide 및 revolute joints^(j=6,7), 회전 joint^(j=8))

$$(4) \sum_{i=1}^8 f_i = (f_1=2) + (f_2=2) + (f_3=2) + (f_4=2) + (f_5=2) + (f_6=2) + (f_7=2) + (f_8=1) = 15$$

이다. 그러므로 자유도는

$$F = 6 \times (7 - 8 - 1) + 15 = 3 \quad (10)$$

이다. 위의 식에서 A6의 회전운동을 제외하면 2자유도를 가지는 메카니즘이 되는데 이는 두 개의 리니어 액추에이터에 의해서 Platform-2의 yaw와 pitch운동을 제공해 준다. A6를 포함시킴으로써 roll운동이 첨가된 3자유도의 두번째단의 메카니즘이 된다.

위의 분석을 전체 2단 구조에 적용할 경우 자유도는

$$F = 6 \times (15 - 19 - 1) + 36 = 6 \quad (11)$$

이 되어 일반 다관절과 같이 6자유도를 가지는 로봇 암이 된다.

4.2 중앙축의 구조해석

본 연구에서 제안한 로봇 암의 특징은 각단의 운동을 연결시켜 주는 중앙축의 도입이다. 중앙축은 Base-2를 중앙축를 따라 이동하게 함으로써 Base-2와 한 몸체로 되어 있는 Platform-1의 운동과 Platform-2의 운동을 연결해 주는 역할을 한다. 그러므로 로봇의 운동이 중앙축의 관절운동으로 표현되어 운동해석이 간단해진다. 또한, 중앙에 위치함으로써 가공부하를 분산시키는 중추적 역할도 한다.

중앙축은 스플라인 샤프트(spline shaft)와 보스(boss)로 이루어져 있으며 양단에 유니버설 조인트가 설치되어 있다. 스플라인 샤프트의 상단에 설치된 유니버설 조인트의 회전운동, α 와 β 는 보스에 부착 되어있는 Base-2와 Platform-1를 임의 공간에 위치시키기 위한 2자유도를 제공한다. 스플라인 샤프트는 Base-2와 Platform-1이 축을 따라 이동하는 가이드 역할을 하며 이동하는 거리, L 은 베

이스에서부터 거리를 조절하는 자유도를 제공한다. 보스의 하단에 설치된 유니버설 조인트의 회전운동, α_b 와 β_b 는 Platform-2의 yaw와 pitch 운동을 제공하는 역할을 한다. 그러므로 중앙축은 4개의 revolute joint와 1개의 prismatic joint를 가지고 있는 5자유도의 다관절 구조로 생각할 수 있다. Platform-2에 roll운동을 생성할 수 있는 메커니즘을 첨가할 경우 완벽한 6자유도를 갖는 일반 다관절 로봇과 동일하다. 그러나 중앙축의 회전각도와 이동거리는 passive parameter로 각 플랫폼에 설치되어 있는 리니어 액추에이터의 길이와 기하학적 구속조건에 의해서 결정된다.

중앙축 설계시 구조해석은 일반 다관절로 가정하여 실행한다. Denavit-Hartenburg⁽²¹⁾방법을 이용하여 순방향 구조해석(forward kinematics)을 하면 아래와 같다.

$$A_T(R_T, P_T) = Kin_{center}(a, \beta, L, \beta_b, \alpha_b, \gamma_b, cb, cp, ct) \quad (12)$$

여기서, A_T 는 $\{0\}$ 와 $\{T\}$ 사이 Homogeneous trans-

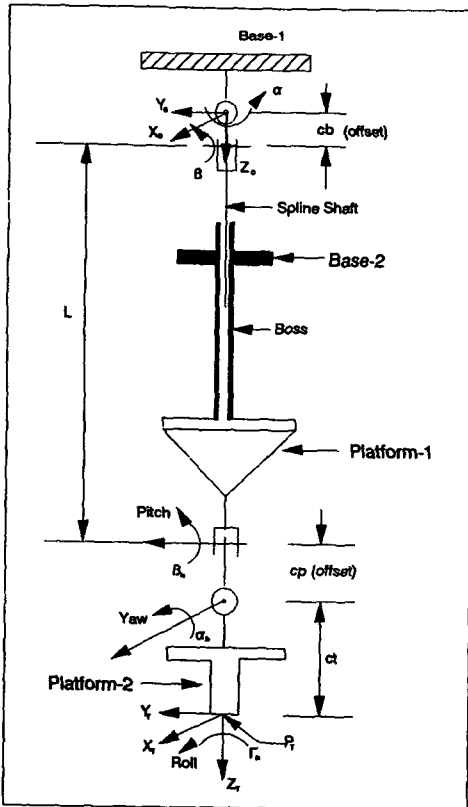


Fig. 9 Mechanism of central axis

form으로 구성요소인 R_T 는 $\{T\}$ 의 오리엔테이션을 나타내는 rotation 행렬이고, P_T 는 $\{T\}$ 의 위치를 나타내는 벡터이다. cb 와 cp 는 각각 중앙축의 상단과 하단에 주어진 유니버설 조인트의 오프셋(offset)이다. 이 오프셋은 로봇의 작업공간을 넓히는 중요한 역할을 한다. Fig. 10에서와 같이 두 조인트 사이에 오프셋을 줌으로써 아랫 링크의 운동이 윗 링크의 간섭범위에서 많이 벗어날 수 있어 운동범위를 확대할 수 있다. 뒷식에서 오프셋과 ct 는 고정된 값이므로 R_T 과 P_T 는 나머지 6개의 parameter에 의해서 구해진다.

역으로 역방향 구조해석(inverse kinematics)도 일반 다관절 로봇과 같이 해석된다.

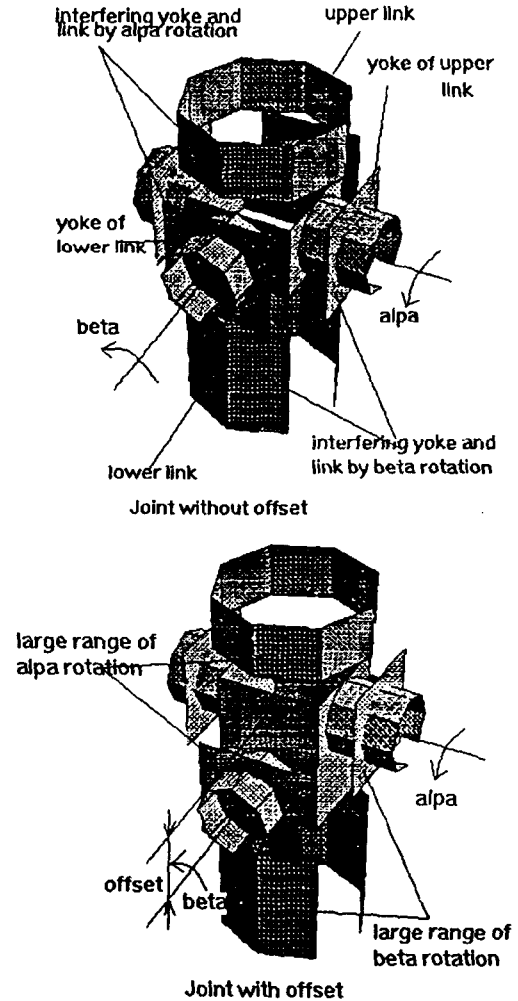


Fig. 10 Large range of motion of universal joint with offset

$$\{\alpha, \beta, L, \beta_h, \alpha_h, \gamma_h\} = Invkin_{center}(R_T, P_T) \quad (13)$$

위 식(12)와 (13)에서 다루는 값들은 passive parameter로 직접제어가 불가능하다. 그러므로 제어 가능한 active parameter, 즉 리니어 액추에이터의 길이를 1단과 2단 해석에서 구함으로써 구조해석이 완료된다.

4.3 첫단 플랫폼의 구조해석

본 연구에서 제안한 평행구조의 특징은 Fig. 11과 같이 리니어 액추에이터 양단에 유니버설 조인트를 사용하는 것이다. 평행구조에서는 주로 보울소켓 조인트(ball-socket joint)를 사용해 왔다. 그러나 Griffis⁽⁸⁾와 Lin⁽⁹⁾등이 지적했듯이 보울소켓 조인트는 구조적 취약성때문에 가능하면 피해야한다. 특히 Fichter⁽¹⁰⁾가 실제 제작에서 사용한 이중보울소켓 조인트는 최악의 경우이다. 그러나 Stewart 구조은 1단의 플랫폼에 6자유도를 보장해야 하므로 6개의 보울소켓 조인트(혹은 3개의 이중보울소켓 조인트)의 사용을 필수로 한다.⁽⁷⁾ 그러나 2단 구조에서는 작업공간을 넓히기 위해 각 리니어 액추에이터의 양단에 유니버설 조인트를 설치한다.

첫단의 역할은 Platform-1의 끝단, P_F 를 임의 공간에 위치시키는 것이다. P_F 는 Base-1에 부여된 {0} 좌표의 원점에서부터 Platform-1의 끝단에 부

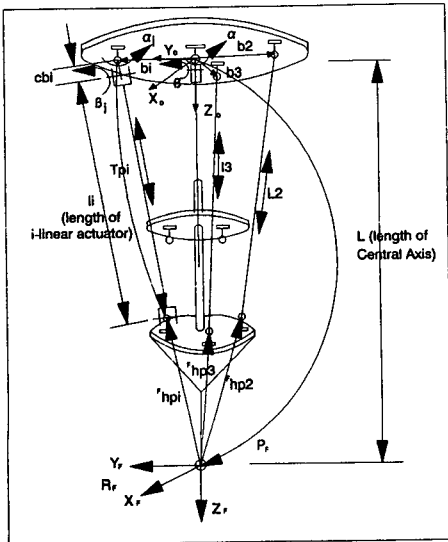


Fig. 11 Parallel mechanism of first platform

여된 {F} 좌표의 위치벡터를 나타내며 리니어 액추에이터의 길이 {l1, l2, l3}에 의해서 결정된다. 이 벡터는 또한, Platform-1이 중앙축을 따라 이동하면서 공간상에 놓여지므로 중앙축의 passive parameter, {α, β, L}로 나타내진다.

$$P_F = kin_{center}(\alpha, \beta, L) \quad (14)$$

위식의 passive parameter는 링크의 길이와 첫단의 기학적 구속조건으로 나타내진다.

$$\begin{aligned} L &= L_{cont}(l_1, l_2, l_3) \\ \alpha &= \alpha_{cont}(l_1, l_2, l_3) \\ \beta &= \beta_{cont}(l_1, l_2, l_3) \end{aligned} \quad (15)$$

위의 기하학적 구속조건은 복잡한 수식으로 표현되는데 본 논문의 발표 범위에서는 제외하고 다음 논문에서 기술하고자 한다. 이는 병렬구조의 순방향 구조해석으로 지금까지 많은 연구가 진행되고 있으나 모든 메카니즘에 적용이 가능한 명확한 방법은 실현되지 못한 단계이다.^(8,9,12)

그러나 중앙축의 일반 다관절 개념을 도입할 경우 위의 passive parameter는 $Invkin_{center}(\cdot)$ 에 의해서 쉽게 구해진다.

$$\{\alpha, \beta, L\} = Invkin_{center}(P_F) \quad (16)$$

또한 Platform-1의 오리엔테이션, R_F 는 α와 β의 회전각도로 아래와 같이 나타내진다.

$$R_F = Rot[\alpha] Rot[\beta] \quad (17)$$

여기서, $Rot[\cdot]$ 는 각도의 회전에 의한 rotation 행렬을 나타낸다. 위의 위치와 오리엔테이션을 만족시키는 리니어 액추에이터의 길이를 구하기 위해 $bi(i=1,2,3)$ 와 ${}^F hpi(i=1,2,3)$ 를 정의한다. bi 는 {0} 좌표의 원점에서부터 상단 유니버설 조인트까지의 거리벡터이고, ${}^F hpi$ 는 {F} 좌표의 원점에서부터 하단의 유니버설 조인트까지의 거리벡터를 나타낸다. 벡터의 왼쪽 상단 첨자는 그 벡터를 나타내는 좌표로 bi 와 ${}^F hpi$ 로부터 Tpi 가 아래와 같이 유도된다.

$$Tpi = P_F + R_F {}^F hpi - bi \quad (18)$$

Tpi 는 각 리니어 액추에이터의 유니버설 조인트의 회전각도, α_i 와 β_i , 링크길이, li 그리고 오프셋, cbi 에 의해서 결정된다. 이는 순방향 구조해석 $Kin_{first}(\cdot)$ 에 의해서 아래와 같이 나타내진다.

$$\{Tpxi, Tpyi, Tpz_i\} = Kin_{first}(\alpha_i, \beta_i, li, cbi) \quad (19)$$

윗식의 c_{bi} 는 상단 유니버설 조인트의 오프셋으로 중앙축에서와 같이 운동범위를 넓혀주는 역할을 한다. α_i 와 β_i 는 Platform-1의 자세에 따라 결정되는 passive parameter이고 l_i 는 $Invkin_{first}(T_{pi})$ 에 의해서

$$l_i = \{T_{pi} / \cos[\text{ArcTan}(-T_{py}/T_{pz})] - c_{bi} / \cos[\text{ArcTan}(T_{pxi} / (T_{pzi} / \cos[\text{ArcTan}(-T_{py}/T_{pz})])]\} \quad (20)$$

이 된다. 위 식의 결과인 l_i 는 서보 리니어 액추에이터에 의해 제어가 가능한 active parameter로 늘리고 줄임으로써 Platform-1이 당겨지고 밀리게 되어 위치가 조절되며 Platform-1과 한 몸체가 되어 있는 Base-2의 위치도 동시에 조절된다.

4.4 두째단 플랫폼의 구조해석

가공물을 핸들링하기 위해서는 그리퍼의 위치뿐 아니라 임의 가공각도를 줄수 있는 오리엔테이션 구동도 필요하다. 가공각도를 임의로 조절하기 위해서는 yaw, pitch, roll 운동을 제공할 수 있어야 한다. 이를 만족시키기 위해 3개의 자유도를 두번째단에서 첨가시킨다.

Base-2는 Fig. 12와 같이 첫단에서 Platform-1이 제어될때 한 몸체가 되어 움직이게 된다. 그러므로 Base-2에 고정되어 있는 {B}좌표의 오리엔테이션,

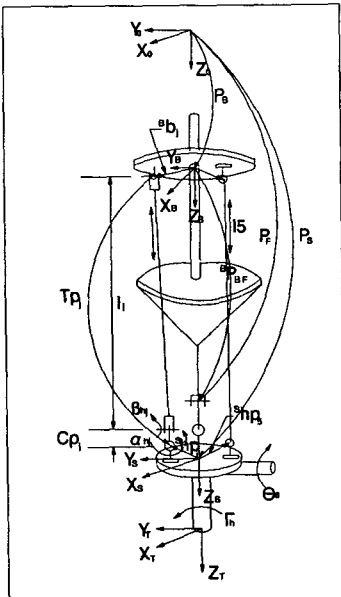


Fig. 12 Parallel mechanism of second platform

R_B 은 R_F 와 동일하며 위치는

$$P_B = P_F - F_B {}^B P_{BF} \quad (21)$$

이다. ${}^B P_{BF}$ 는 Base-2과 Platform-1 사이의 고정 벡터이고 Platform-2에 고정된 {S}좌표의 위치와 오리엔테이션은 중앙축의 $Invkin_{center}(\cdot)$ 에서 구했던 passive parameter를 $Kin_{center}(\cdot)$ 에 대입함으로써 구해진다.

$$A_S(R_S, P_S) = Kin_{center}(\alpha, \beta, L, \beta_h, a_h) \quad (22)$$

R_S 는 yaw와 pitch는 포함하고 있으나 Roll운동을 포함하지 않으므로 Platform-2에 베벨기어를 이용한 회전 액추에이터를 설치하여 R_T 를 구한다.

$$R_T = R_S Rot[\gamma_n] \quad (23)$$

γ_n 는 직접 roll 운동을 만들어내는 active parameter로 액추에이터 A6의 회전각도, θ_6 에 의해서 {S}에 대한 {T}의 Roll 운동을 만들어낸다.

$${}^S R_T = Rot[\gamma_n(\theta_6)] \quad (24)$$

그러나 yaw와 pitch운동을 생성하는 α_n 와 β_n 는 passive parameters로 첫단에서와 같이 Base-2와 Platform-2사이에서 설치된 리니어 액추에이터의 길이와 기하학적 구속조건에 의해서 결정된다.

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \alpha_n \cos(14, 15) \\ \beta_n &= \beta_n \cos(14, 15) \end{aligned} \quad (25)$$

일정한 가공각도를 만족시키는 R_T 가 주어지면 중앙축의 구조해석에 의해서 γ_n 가 구해지고 이 Roll운동을 제외한 오리엔테이션 ${}^0 R_S$ 는 아래와 같이 구해진다.

$${}^0 R_S = {}^0 R_T {}^S R_T [\gamma_n]^{-1} \quad (26)$$

윗 오리엔테이션을 만족시키는 active parameter, 14와 15를 구하기 위해 리니어 액추에이터의 양단에 설치되어 있는 유니버설 조인트의 위치를 ${}^B b_j$ 과 ${}^S h_{pj}(j=4, 5)$ 벡터로 정의한다. ${}^B b_j$ 는 {B}좌표의 원점에서부터 상단 유니버설 조인트까지의 벡터를 말하며 ${}^S h_{pj}$ 는 {S}좌표의 원점에서부터 하단 조인트까지 벡터를 나타낸다. 이 정의로부터 ${}^S h_{pj}$ 과 ${}^B b_j$ 사이의 벡터 T_{pj} 는

$$T_{pj} = P_B + {}^0 R_B {}^B b_j - P_S - {}^0 R_S {}^S h_{pj} \quad (27)$$

이다. 윗 벡터를 {S}좌표로 환산한 벡터, ${}^S T_{pj}$ 를 구하면

$${}^S T_{pj} = {}^0 R_S^{-1} P_B + {}^S R_B {}^B b_j - {}^0 R_S^{-1} P_S - {}^S h_{pj} \quad (28)$$

이다. ${}^sT_{pj}$ 는 리니어 액추에이터의 하단 조인트의 회전각도 α_{kj}, β_{kj} , 링크길이 l_j, C_{pj} 에 의해서 결정된다. 이들의 관계를 두번째단의 순방향 구조해석, $Kin_{second}(\cdot)$ 로 나타내면

$$\{{}^sT_{pjx}, {}^sT_{pjy}, {}^sT_{pjz}\} = Kin_{second}[\alpha_{kj}, \beta_{kj}, l_j, C_{pj}] \quad (29)$$

이다. 여기서, C_{pj} 는 오프셋으로 두번째단에서는 Platform-2의 유연한 오리엔테이션 운동을 위해 하단 유니버설 조인트에 오프셋을 준다. α_{kj} 와 β_{kj} 는 Platform-2의 자세에 따라서 결정되는 passive parameter이고 자세를 결정하는 active parameter, l_j 는 $Invin_{second}({}^sT_{pj})$ 에 의해서

$$l_j = \sqrt{[(-{}^sT_{pjz} / \cos[\text{ArcTan}[-{}^sT_{pjz}, -{}^sT_{pjy}]] - C_{pj})^2 + {}^sT_{pjx}^2]} \quad (30)$$

이다. 위의 식으로 오리엔 테이션을 결정하는 active parameter, 14와 15를 구하고 이 값에 의해서 서보 리니어 액추에이터의 길이는 조절되어 로봇트는 임의 가공각도를 가질 수 있게된다.

5. 2단 평행구조 로봇 암의 설계

본 연구에서 제안한 2단 평행구조의 설계 및 제작은 일반 다관절 로봇 암보다 간단하다. 일반

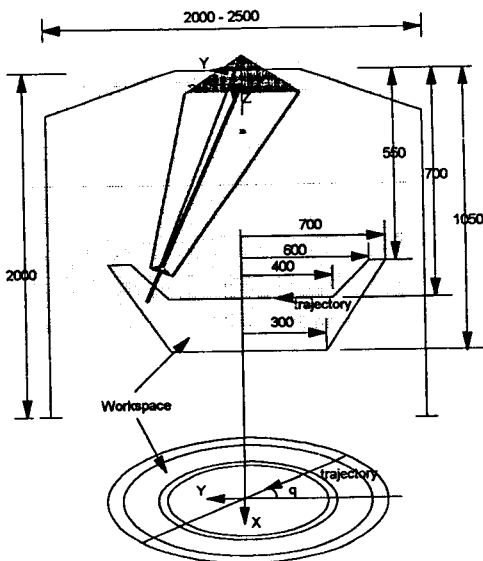


Fig. 13 Positional workspace in the first parallel mechanism

다관절 로봇트는 모터, 감속기, 베어링 등 다양한 종류의 부품이 각 링크마다 필요하나 본 연구에서 제안하는 로봇 암은 동일한 규격의 리니어 액추에이터를 모든 링크에 사용할 수 있으므로 한 리니어 액추에이터의 설계가 모든 링크에 적용된다. 또한, 구성하는 부품도 간단해서 마지막 회전 액추에이터를 제외하고는 리니어 액추에이터, 베이스, 플

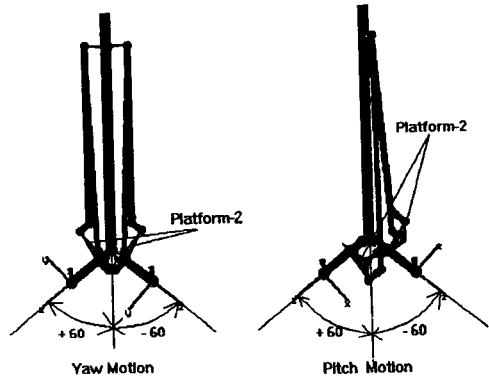


Fig. 14 Orientational workspace in the second parallel mechanism

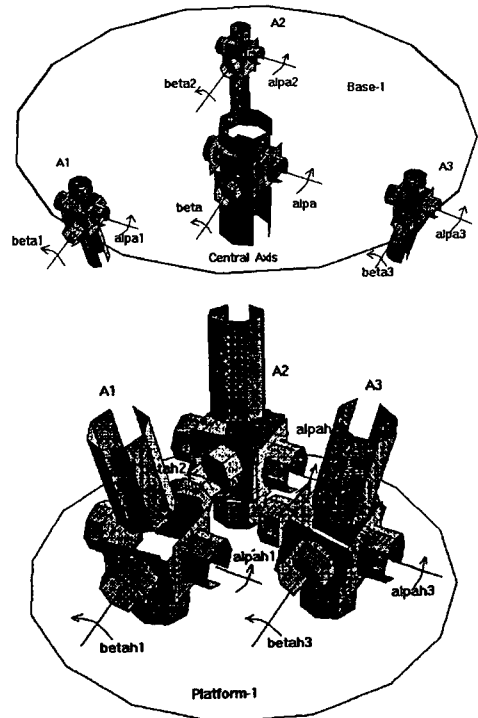


Fig. 15 Arrangement of universal joints in base-1 and platform-1

랫폼으로 되어 있으므로 설계 및 제작이 용이하다. 그러나 설계시 고려할 사항은 평행구조 로봇의 취약점인 링크끼리 간섭을 줄이기 위한 링크의 배치이다. 즉, 베이스와 플랫폼의 적절한 크기 선택과 리니어 액추에이터의 양단에 설치된 유니버설

조인트의 적절한 배치로 설치공간을 작게하면서 작업공간을 극대화하는 것이다.

본 연구에서는 2단 평행구조의 운동을 해석하고 모델화시켜 각 플랫폼과 베이스의 크기, 리니어 액추에이터의 운동범위를 결정한다.

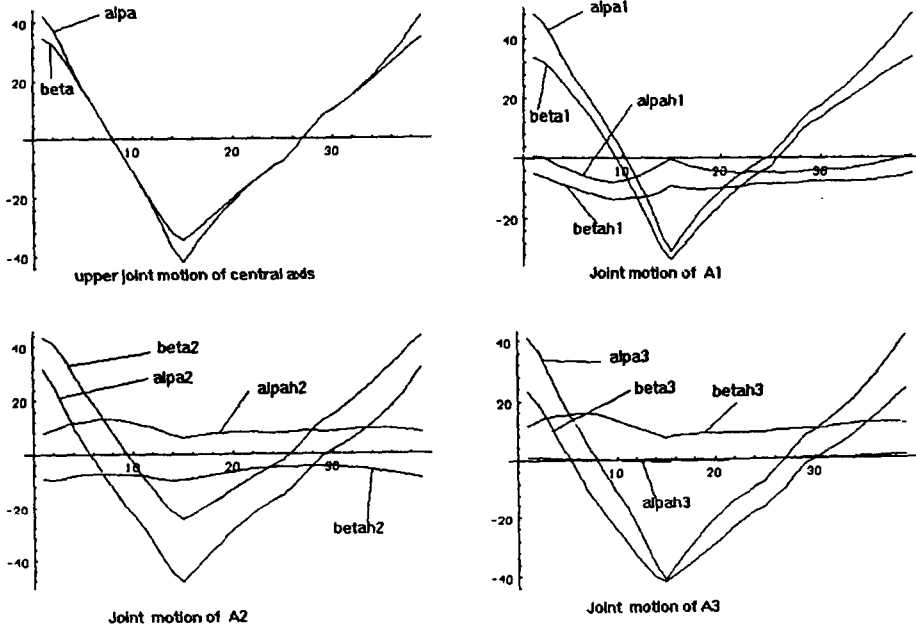


Fig. 16 Motions of universal joints in base-1 and platform-1

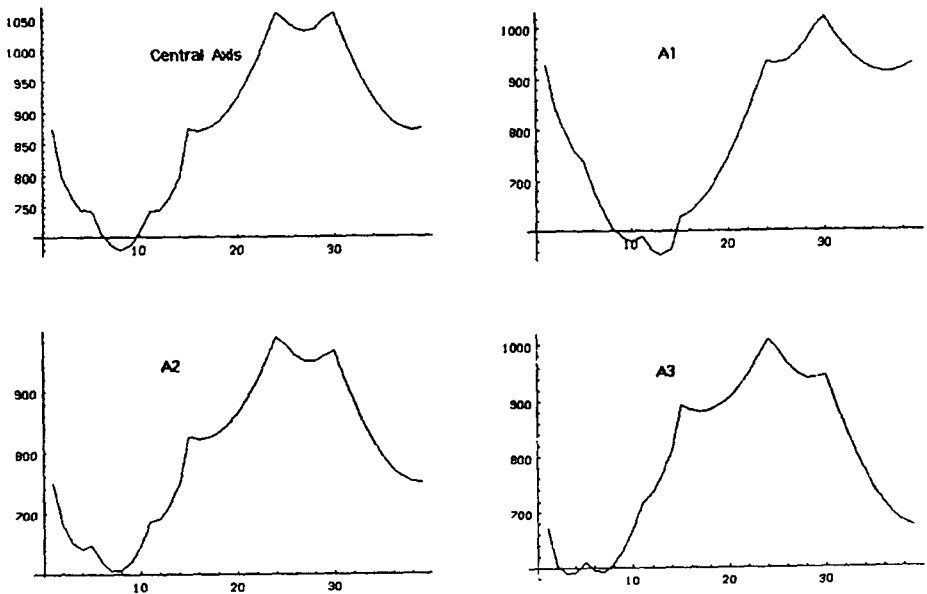


Fig. 17 Length of linear actuators in first parallel mechanism

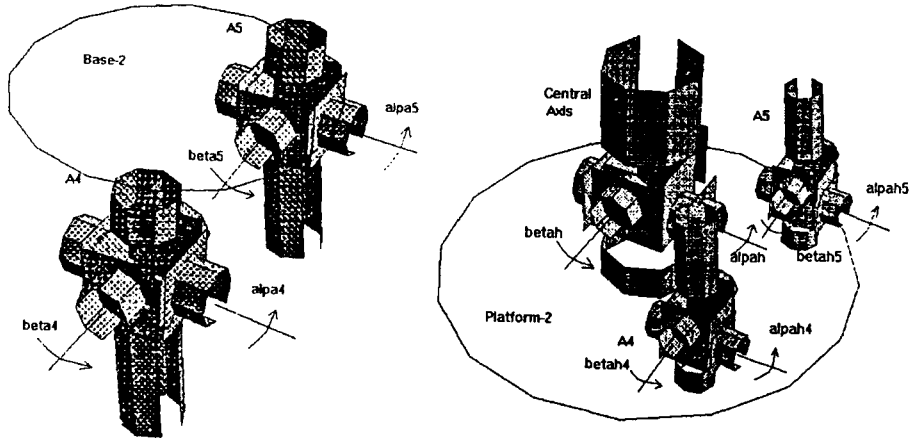


Fig. 18 Arrangement of universal joints in base-2 and platform-2

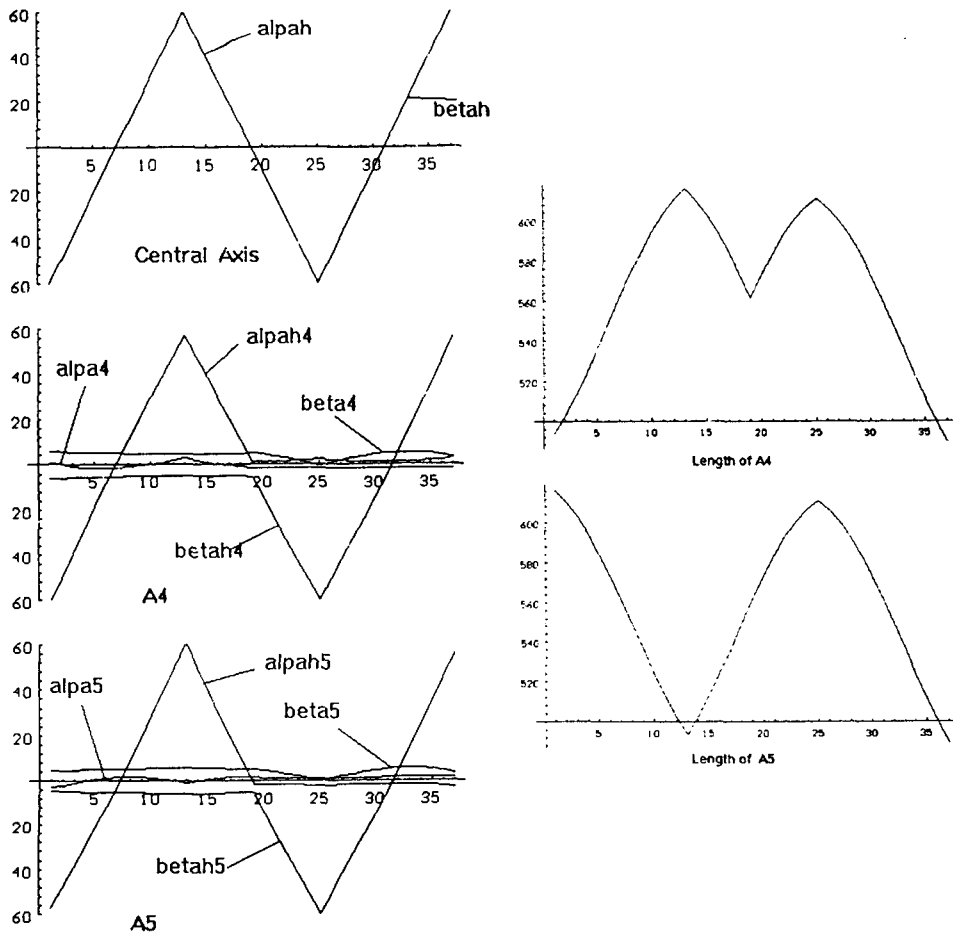


Fig. 19 Motions of joints and linear actuators in the second parallel mechanism

5.1 작업공간

작업공간은 로봇의 크기를 결정하는 기본적인 요소이다. 본 연구에서는 중형의 크기를 가지면서 일반 기계부품 가공작업에 적합한 로봇을 설계한다. 로봇의 구조상 포지션과 오리엔테이션의 작업공간이 분리되는데, 첫단에 의한 포지션운동은 상하 500 mm 이동이 가능하고, 운동반경은 600 mm인 것으로한다. 평행구조의 특성상 운동공간은 Fig. 13과 같이 원뿔모양이 되는데, 윗 부분은 링크길이의 제약때문에 작업반경이 커지고 아랫 부분은 작아지게 된다. Fig. 13에서 설정한 작업공간으로 로봇 주위반경 600 mm 이내에 가공기계를 설치하고 로봇이 가공품을 잡아 상하 500 mm 이내로 운동하면서 가공할 수 있게 된다. 작업공간은 0.7 m³의 부피를 가지는데 설치공간은 폭과 길이가 2000~2500 mm 이내 높이가 2000 mm로 일반 수직 다관절 로봇의 설치 공간과 동일하다. 설치공간에 따른 작업공간은 일반 수직 다관절 로봇보다 작으나 작업공간의 효율성을 고려할 때 조립, 용접 로봇의 경우 작업의 특성상 사용하지 않는 공간

이 많고 또한 충돌회피를 위해서 사용하는 공간이 많아 효율면에서는 가공 로봇이 결코 뒤지지 않는다. 위의 작업공간으로 만족시킬 수 없는 작업은 가공기계의 상하이동 운동이나 Gripper의 Flange 설계로 해결할 수 있다. 작업공간을 획기적으로 넓히는 방법으로 Fig. 3과 같이 로봇 베이스를 guide rail에 정착시키는 방법도 고려할 수 있다.

첫단 평행구조에서 위치가 확보되면 그 위치에서 독립적으로 두째단 평행구조에 의해서 오리엔테이션 운동이 행해질 수 있다. 오리엔테이션 운동은 링크의 길이 뿐만아니라 아랫링크와 윗 링크의 요크사이의 간섭에 의해서도 제한을 받으므로 Fig. 14와 같이 yaw와 pitch운동을 각각 60°씩 운동할 수 있도록 설계한다.

5.2 첫단 평행구조의 설계

Base-1은 로봇의 설치공간을 결정하는 요소이며 크기에 따라 링크와 조인트의 간섭이 크게 달라진다. Platform-1은 액추에이터 A1, A2, A3의 하단 조인트가 모이는 곳으로 조인트끼리의 간섭뿐

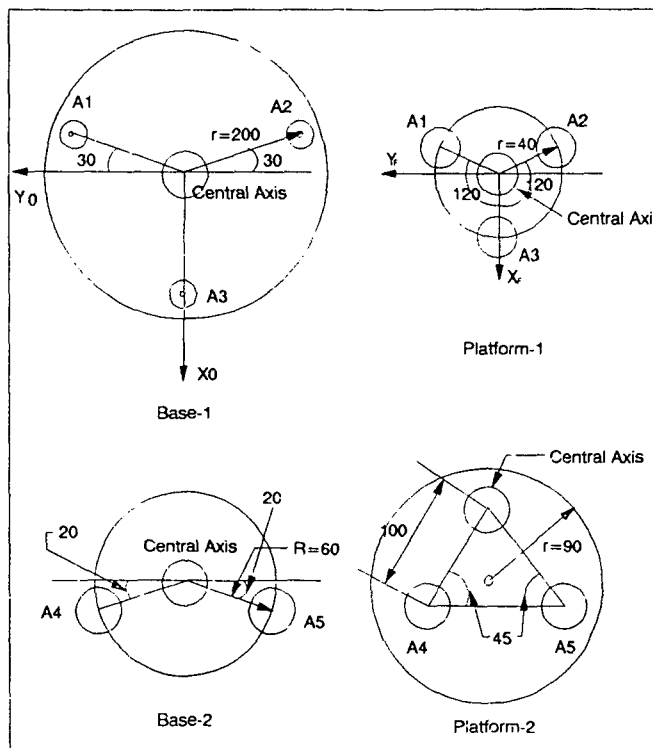


Fig. 20 Platforms and bases of double parallel mechanism

아니라 두째단 링크의 간섭도 피해야한다. 리니어 액추에이터의 상하단 유니버설 조인트를 Fig. 15와 같이 Base-1 과 Platform-1에 각각 120°의 간격으로 설치한다. 공간상의 운동을 분석하기 위해 조인트를 3차원으로 모델링한 후 위에서 설정한 작업 공간상에서 각 조인트와 링크의 운동을 분석한다. 첫단의 운동 궤적은 설정된 작업공간의 경계를 따라가며 각도 q 를 조정함으로써 Y-Z 평면($q=0$), X-Z 평면 ($q=90$), 또는 임의의 평면이 선택 가능하도록 한다. 여러 조건중 가장 큰 조인트의 간섭과 링크 운동은 $q=45^\circ$ 일 때이며 Fig. 20과 같이 Base-1의 반경을 200 mm, Platform-1의 반경을 40 mm로 설정할 때 각 조인트의 간섭운동은 Fig. 16과 같다. 중앙축을 포함한 모든 리니어 액추에이터의 상단 조인트의 운동 (α, β)는 45° 이내의 운동을 한다. 이는 링크와 요크사이의 간섭으로 운동이 불가능하므로 Fig. 10과 같이 20 mm의 offset를 주어 운동공간을 넓히도록 설계한다. 하단 유니버설 조인트(α_n, β_n)의 운동은 15° 이내로 offset을 줄 필요가 없다. 또한, 설정된 작업공간에서 리니어 액추에이터의 운동은 Fig. 17과 같다. 이 결과에 의해서 중앙축은 $600 \text{ mm} \leq L \leq 1050 \text{ mm}$ 으로 리니어 액추에이터는 $580 \text{ mm} \leq l_i \leq 950 \text{ mm}(i=1, 2, 3)$ 로 결정한다.

5.3 두째단 평행구조의 설계

Base-2는 A1, A2, A3의 링크들과 Platform-1이 이루는 삼각뿔안에서 움직이므로 최소한 작게 설계되어야 한다. 또한 Base-2에 설치된 A4와 A5의 링크가 첫단의 링크와 간섭이 없으면서 오리엔테이션 운동을 극대화할 수 있도록 Platform-2가 설계되어야 한다. 첫단과 같이 조인트와 링크의 운동을 Fig. 18에서 분석한다. 첫단의 링크 간섭을 감안하여 Base-2와 Platform-2를 Fig. 20과 같이 설계했을 때 위에서 설정한 오리엔테이션운동 $-60^\circ \leq \text{yaw} \leq 60^\circ$ 와 $60^\circ \leq \text{Pitch} \leq 60^\circ$ 를 얻을 수 있다. 위 오리엔테이션 운동시 각 조인트의 운동은 Fig. 19와 같다. 중앙축 하단운동(α_n, β_n)은 yaw와 pitch 운동의 궤적을 나타내는 것으로 각각 60° 운동영역을 가진다. 다른 조인트의 경우 하단 조인트는 60° 이나 상단 조인트는 10° 이내이므로 두째단의 경우 하단에 20 mm의 offset를 주어 설계한다. 위에서 설정한 offset, Base-2 및 Platform-2으로 작업공간에서 설정한 오리엔테이션 운동을 실시했을 때 링

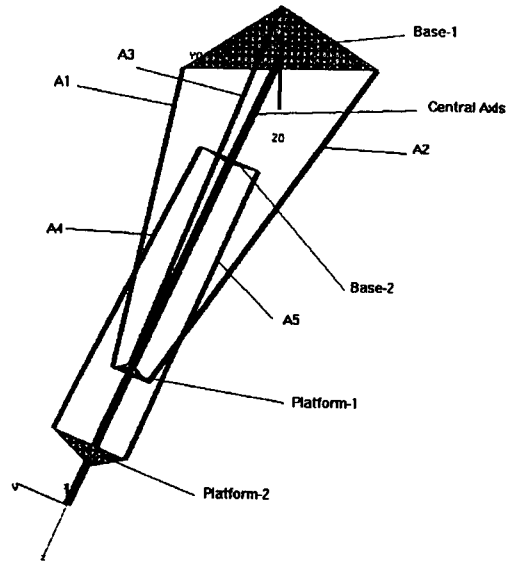


Fig. 21 Designed machining robot arm with double parallel mechanism

크의 길이는 Fig. 19와 같다. 이 결과로써 링크의 길이는 $460 \text{ mm} \leq l_j \leq 640 \text{ mm}(j=4, 5)$ 으로 결정한다. 마지막으로 회전 액추에이터의 사양은 360° 의 Roll운동을 만족시키기 위해 $-180^\circ \leq \theta_b \leq 180^\circ$ 로 설계한다.

결과적으로 첫단과 두째단이 결합된 2단 평행구조 로봇트 암의 전체 모양은 Fig. 21과 같으며 그림에서 보듯이 각 링크가 서로 간섭을 피하도록 충분한 공간을 가지는데 이는 본 논문에서 제안하는 2단의 평행구조를 사용함으로써 가능했다.

6. 결 론

본 연구에서는 기계가공작업 자동화를 위해 강성이 큰 로봇트 암을 설계했다. 설계된 로봇트는 2단의 플랫폼으로 되어있어 다음과 같은 장점이 있었다.

- (1) 병렬구조로 되어있어 가공부하가 분산된다.
- (2) 강성이 크므로 가공작업시 변형이 작고 진동의 영향을 적게 받는다.
- (3) 각 단의 운동이 분리되어 행해지므로 운동해석이 용이하다.
- (4) 중앙축이 중앙에 위치하여 각 단의 운동을 연결시키므로 일반 다관절과 같이 그리퍼의 위치와 오리엔테이션이 분리된다.

(5) 각 단에 링크의 설치수(3개 또는 2개)가 작으므로 설치공간이 작고 작업공간이 넓다.

(6) 위치와 오리엔테이션이 분리되므로 어느 작업공간에서나 일정한 그리퍼의 가공각도를 가질 수 있다.

위의 장점은 직렬구조와 병렬구조의 장점을 조화시켜 기계가공 작업에 적합한 로봇 암을 설계한 것이다. 앞으로 연구분야는 순방향 구조해석, 속도 및 동력학 해석 등이 실시되어야 하며 로봇트를 가공분야에 적용하기 위해서 실질적인 제작이 행해져야 한다. 로봇트 제작은 관련업체와 진행중이며 위의 연구결과는 다음 논문에 발표하고자 한다.

참고문헌

- (1) Asada, H. and Kanade, T., 1983, "Design of Direct-Drive Mechanical Arms," *ASME J. of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 105, pp. 312~316.
- (2) Orin, D. E. and Oh, S. Y., 1981, "Control of Force Distribution in Robotic Mechanisms Containing Closed Kinematic Chains," *ASME J. of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 102, pp. 134~141.
- (3) Chang, L. W. and Hamilton, J. F., 1991, "The Kinematics of Robotic Manipulators with Flexible Links Using an Equivalent Rigid Link System Model," *ASME J. of Dyn. Sys., Meas. and Contr.*, Vol. 113, pp. 48~53.
- (4) Asada, H. and Ma, Z. D., 1990, "Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms: Modeling and Computation for Trajectory Control," *ASME J. of Dyn. Sys., Meas. and Contr.*, Vol. 112, pp. 177~185.
- (5) Kazerooni, H. and Waibel, B. J., 1990, "On the Stability of Robot Compliant Motion Control: Theory and Experiments," *ASME J. of Dyn. Sys., Meas., and Contr.*, Vol. 112, pp. 417~426.
- (6) Whitney D. E. and Edsall, A.C., 1990, "Development and Control of an Automated Robotic Weld Bead Grinding System," *ASME J. of Dyn. Sys., Meas., and Contr.*, Vol. 112, pp. 166~176.
- (7) Stewart, D., 1965, "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proc. Instn. Mech. Engrs*, London, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371~386.
- (8) Griffis, M. and Duffy, J., 1989, "A Forward Displacement Analysis of a Class of Stewart Platforms," *Journal of Robotic Systems*, John Wiley, 6(6) pp. 703~720.
- (9) Lin, W., Duffy, J. and Griffis, M., 1990, "Forward Displacement Analysis of the 4-4 Stewart Platforms," *ASME Mechanisms Conference*, pp. 263~269.
- (10) Earl, E. F. and Rooney, J., 1983, "Some Kinematic Structures for Robot Manipulator Designs," *ASME J. Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, Vol 105, pp. 15~22.
- (11) Hunt, K. H., 1983, "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms," *ASME J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, Vol 105, pp. 705-712.
- (12) Waldron, K. J., Raghavan, M., and Roth, B., 1989, "Kinematics of a Hybrid Series Parallel Manipulator System," *ASME J. of Dyn., Sys., Meas. and Cont.*, Vol. 111, pp. 211~221.
- (13) Lee, Kok-Meng and Arjunam, Shankar, 1991, "A Three Degrees of Freedom Micromotion In Parallel Actuated Manipulator," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 5, pp. 634~641.
- (14) Hunt, K. H., 1978, "Kinematic Geometry of mechanisms," Oxford, Great Britain: Oxford University Press.
- (15) Fichter, E. F. and McDowell, E. D., 1983, "Determining the motions of Joints on a Parallel Connection Manipulator," *Proc. 6th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, New Delhi.
- (16) Ficher, E. F., 1986, "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 5, pp. 157~182.
- (17) Whitney, D. E. and Tung, E.D., 1992, "Robot Grinding and Finishing of Cast Iron Stamping Dies," *ASME J. of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 114, No. 1, pp. 132~140.
- (18) Butler, J., Haack, B. and Tomizuka, M., 1991, "Reference Input Generation for High Speed

- Coordinated Motion of a Two Axis System," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 113, pp. 67~74.
- (19) Her, M. G. and Kazerooni, 1991, "Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control," *ASME J. of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 113, pp. 60~66.
- (20) Vierck, R. K., 1979, "Vibration Analysis," Maple Press Company.
- (21) Craig, J. J., 1989, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Addison-Wesley.
- (22) Piper, D. and Roth, B., 1969, "The Kinematics of Manipulators Under Computer Control," *Proceedings of the Second International Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, Zakopane, Poland, Vol. 2, pp. 159~169.
- (23) Sandor, George N. and Erdman, Arthur G., 1984, *Advanced Mechanism Design : Analysis and Synthesis*, Prentice-Hall.