

이족보행로봇 IWR을 위한 적응걸음새 알고리즘 개발

임선호*, 김진걸**

*인하대학교 자동화공정 석사과정.

**인하대학교 자동화공학과

Development of Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot

Lin Sun-Ho*, Kim Jin-Geol

Dept. of Industrial Automation, Inha University

ABSTRACT

This paper represents mechanical compliance & ZMP(Zero Moment Point) control algorithm for IWR(Inha Walking Robot) system. In case of walking in different environments, a biped walking robot must vary its gait(walking period or step length, etc.) according to the environments. However, most of biped walking robots do not have the capability to change their gaits or need more complex control algorithm, because ZMP cannot be defined in their control algorithm. Therefore new linear type with balancing joint is proposed which is used as an aid in balancing & ZMP control itself.

In IWR system, ZMP can be defined by solving differential equations and it does not need to be predefined ZMP trajectory. Furthermore we can input the desired ZMP position. In parallel with the development, we also considered a mechanical compliance for reducing the inverse kinematics, dynamics and the control complexity. It will figure out some powerful adaptations with 3D irregular terrains.

1. 서 론

현재, 산업이나 생활에 응용되고 있는 로봇은 대개의 경우 잘 정돈된 작업 환경하에서 작업하는 것이 대부분이며 작업 환경변화에 매우 민감한 편이다. 따라서, 원자력발전소 내부에서의 작업, 토목공사현장이나 재해 또는 전쟁지역에서의 복구 및 작업수행 등, 작업환경이 불균형하고 험난한 곳에서 사람의 작업을 대신하거나 보조하기 위해서는 이족, 혹은 다족보행 로봇의 개발은 필연적이다. 실제로 지구는 약 50%의 지형만이 바뀌나 무한궤도를 이용할 수 있다.^[1] 특히, 이족보행로봇의 경우는 진술한 산업적 활용 뿐만 아니라 군사적 목적이나 재활의 학, 스포츠 공학, 원격제어로봇 등에도 활용이 가능하며, 생명체의 위험을 무릅 쓴 심해저 개발이나 식민지 특성 개척, 여러 오염지역에서의 작업 등에도 그 활용성이 주목받고 있다.

이족보행로봇은 전술한 바와같이 잠재적 특수성과 넓은 활용성 때문에, 1960년대 후반부터 30여년간 세계곳곳에서 활발히 연구되어 왔다. 특히, 근래에 들어 우주개발이나 해저작업 등, 극한 환경에서의 작업의 필요성이 증대됨에 따라 더욱 더 박차를 가하게 된 것이 사실이다. 그러나 이족보행로봇이 실험실적 환경에서 벗어나 그 자체의 특수성(특히, 작업환경이 불균형하고 험난한 극한 환경에서의 작업수행능력)을 발휘하기 위해서는 뛰어난 지형 적응성과 균형점(Zero Moment Point)의 원활한 제어가 뒷받침 되어야 한다. 이에 본 논문에서는 몸체가 예정된 진로를 벗어나는 것을 최소화하고, 지면의 경사에 관계없이 몸체의 평행을 유지하며, 안정도의 여유와 불규칙 지형에 대한 적응도를 높일 수 있도록, 여러 지형에 적응 가능한 다양한 걸

음새와 구현 하드웨어를 제시하고 이들 걸음새의 조합을 이용하여 주어진 환경내의 장애물 및 지형지물에 의한 제한을 받지 않고 목표점까지 이동의 신뢰성을 높일 수 있는 이족보행로봇의 적응걸음새 알고리즘을 제시한다. 또한, 다양한 걸음새 구현에 필수적인 균형점, 전(前)처리 과정을 거치지 않고 다리의 동작과 몸통의 운동에 의해 제어할 수 있는 균형점 제어 알고리즘을 제시한다.

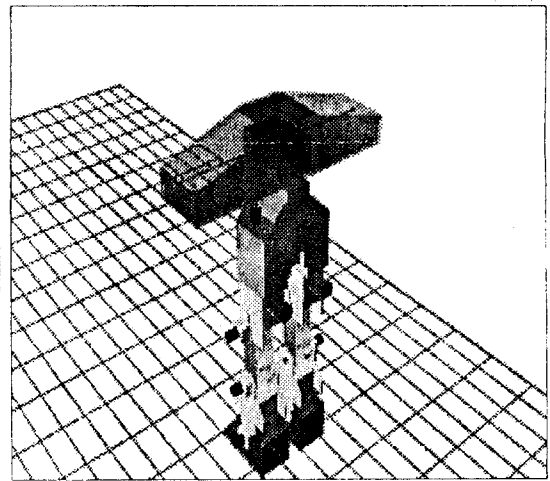


Fig.1 IWR System

2. IWR 시스템

Fig.1은 이족보행로봇 IWR(Inha Walking Robot)의 외형도이며 Fig.2는 IWR의 조립도를 나타내고 있다. 전체 무게는 약 130kg, 키는 약 1.7m로 설계 되었으며, 링크의 구조는 Fig3과 같이, 3차원 불규칙 지형적응을 위해 각 다리에 5자유도(roll, pitch, pitch, yaw)씩 10자유도, 몸통에 2자유도(roll & prismatic)의 12자유도로 구성되어 있다.

2.1 다리부의 기구모델

이족보행로봇이 진행방향을 변경하기 위해서는 보폭과 다리의 높이를 변화시키는 자유도 이외에 옆걸음을 할 수 있도록, 최소 4자유도 이상의 자유도를 고려해야한다. 또한, 이족보행

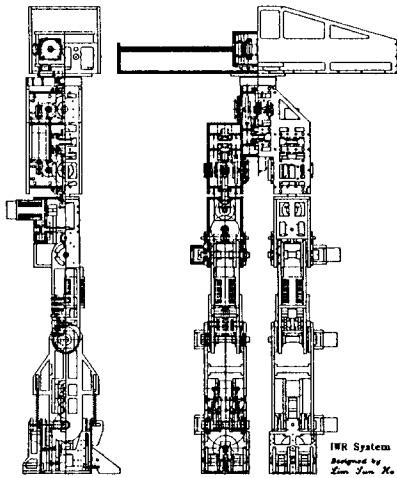


Fig. 2 IWR 시스템 조립도

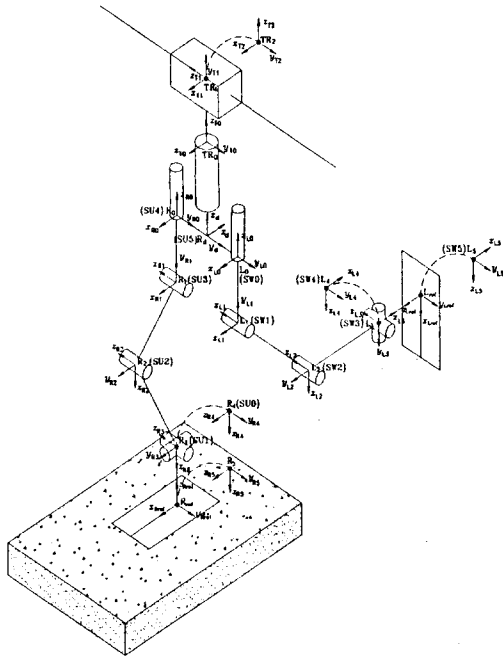


Fig. 3 IWR 링크구조 및 좌표계 시스템

로봇이 3차원 불규칙 지형에 적응하기 위해서는 진행방향이외에 진행방향에 수직인 평면의 경사에도 적응성을 가져야 하며 정지상태에서의 자세유지, 유각상(swing phase)과 지지각상(supporting phase)에서의 부하의 변화(유각상→다리의 자체중량, 지지각상→몸체중량)에 따른 상태별 변속시스템, 등이 고려되어야 한다.^[2]

IWR의 다리부는 회전보행 등, 진행방향 변경을 위한 롤(roll)과 보폭과 다리의 높이를 조절하는 3개의 피치관절(pitch joint), 3차원 지형적응에 따른 보행 오차를 최소화하기 위한 발목의 피치(pitch)와 요(yaw), 5축으로 구성되어 있으며, 발목과 발은 구동원외에 불규칙 지형에서도 항상 일정 수준이상의 지지면적을 유지하고 안정도 여유를 배가할 수 있도록 건

(tendon)시스템을 구축하였다.^[2] 특히, 발목의 두 관절(pitch와 yaw)은, 지지지형에 대한 지형적응도를 최적화하면서 아울러 지면과의 마찰에 의한 보행오차나 몸체의 흔들림을 방지할 수 있도록, 다른 관절과는 달리 지지평면의 반발력에 의하여 수동적으로 구동되도록 기계적인 순응성을 부여하였다.^[2] 이외에 정전 등의 비상시와 정지시의 자세유지를 위한 자체결속시스템(self-locking system)을 구축하였고, 보행시 상태별 변속은, 유각으로 자유스럽던 다리가 다시 지지각(support leg)으로 지면에 고정된다는 점에 착안하여 육성치차열(plannery gear train)을 이용, 토오크 등의 제어없이 기계적으로 각 단계에 따라 변속되도록 트랜스미션(transmission)을 설계하였다.^[2]

2.2 몸통의 기구모형

보행로봇의 안정성은, 다족보행로봇의 경우 지지다각형, 이족보행로봇의 경우 발바닥의 지지평면에 대한 부영 영역 등의 안정영역내의 균형점의 존재여부로 판단할 수 있으며 균형점은 항상 지지평면상에 존재한다. 따라서, 안정된 보행의 수행은 지지평면상의 균형점 제어와 직결된다. 본 연구에서는 지지평면상의 균형점의 원활한 제어와 몸통의 운동특성을 결정하는 운동방정식의 선형화를 위하여 도입된지형과 선형운동형의 몸통 형태를 고려, 분석하였으며 최종적으로 향후 가반능력이 좋고 제어가 용이하며, 운동방정식의 선형화가 용이하고, 몸통부의 자유도와 전체 자중을 줄일 수 있는 선형운동형을 선정하여^[2] 롤(roll)과 직선운동관절(prismatic joint)의 2자유도로 설계하였으며 그 외형은 Fig. 4와 같다.

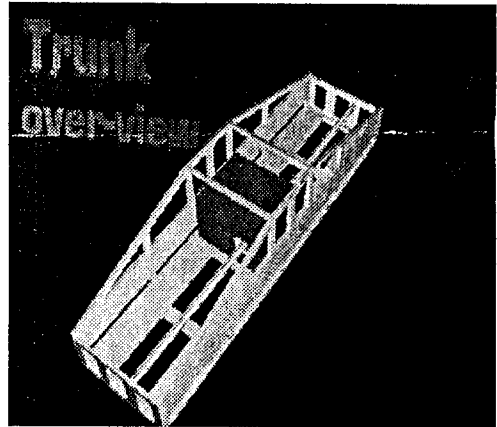


Fig. 4 IWR시스템의 몸통외형

3. 균형점 제어 알고리즘

이족보행로봇의 균형점 제어는 걸음새에 의한 제어와 걸음새와 무관한 독립적 관절에 의한 제어로 대별된다. 전자의 경우는 걸음새를 이용하여 균형점을 제어하므로 걸음새의 다양화나 방향전환성, 지형적응성, 등이 상대적으로 취약하다 할 수 있다. 이와 달리 후자의 경우는 균형추(balancing weight)를 이용, 걸음새와 무관하게 균형점을 제어하므로 다양한 걸음새를 가질 수 있어 방향전환, 3차원 불규칙 지형적응성, 등이 우수하다. 그러나 균형점 제어를 위한 몸통이나 균형추의 운동특성이 전(前)처리 과정을 거친 후, 보행을 수행할 경우는 미지의 지형에 대한 적용이 어려울 뿐만 아니라 다양한 걸음새의 구현에 제약을 받게 된다. 이에 본 연구에서는 전(前)처리 과정을 거치지 않고 유각(swing leg)의 궤적과 원하는 균형점의 위치, 보행패턴을 이용하여 몸통의 운동 특성을 결정, 균형점을 제어하는 알고리즘을 소개한다.

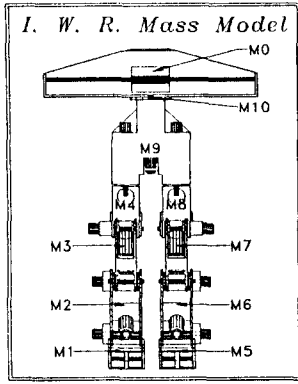


Fig. 5 IWR 질량체계

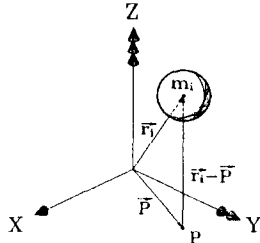


Fig. 6 기준좌표계에 대한 벡터량의 표현

3.1 균형점 검증 및 로봇 모델링

IWR의 걸음새 제어와 안정도 해석에 있어서 다음을 가정한다.

- 1) 각 링크의 하중은 링크의 무게중심에 집중된다.
- 2) 지지평면은 외력이나 외부모멘트에 의해 변형되지 않는다.
- 3) 지지평면과 발바닥사이의 미끄러짐은 일어나지 않는다.
- 4) 몸통운동의 기준 좌표계와 유각, 또는 지지상의 양다리 운동의 기준 좌표계의 XY평면은 지지평면과 평행하게 유지한다.

참고로, 각 링크의 무게, 무게중심, 질량 관성 모멘트 등은 솔리드 모델링(solid modeling)을 이용하여 추정하였으며 IWR의 질량체계는 Fig. 5와 같이 11개의 질량중심으로 구분하였다.

링크의 하중은 위의 가정한 바와 같이 각각의 무게중심에 집중되어 있으므로 Fig. 6과 같이 임의의 기준 좌표계에 대하여 각 링크의 위치, 속도, 가속도 등의 벡터량을 표현할 수 있으며 D'Alembert 원리에 의하여 임의의 점 P의 운동은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{\vec{r}}_i - \ddot{\vec{P}}) \times (\ddot{\vec{r}}_i + \vec{G}) + \vec{T}_M = 0 \quad (1)$$

여기서,

- m_i : i 번째 강체의 질량
- $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$: i 번째 강체 질량중심의 거리벡터
- $\vec{P} = (x_P, y_P, z_P)$: XY평면위의 균형점P의 거리벡터
- $\vec{G} = (g_x, g_y, g_z)$: 중력가속도
- $\vec{T}_M = (T_{Mx}, T_{My}, T_{Mz})$: 점P에 작용하는 전체 모멘트

Fig. 5의 질량체계에 대하여 식(1)을 적용하면,

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)(x_i - x_{amp}) - \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{x}}_i + \vec{g}_x)z_i = 0 \\ \Rightarrow & \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)x_i - \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{x}}_i + \vec{g}_x)z_i = \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)x_{amp} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)(y_i - y_{amp}) - \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{y}}_i + \vec{g}_y)z_i = 0 \\ \Rightarrow & \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)y_i - \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{y}}_i + \vec{g}_y)z_i = \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)y_{amp} \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)와 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

여기서,

x_i, y_i, z_i : i th Link 무게중심의 지지각 기준좌표계에 대한 위치

$\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$: i th Link 무게중심의 지지각 기준좌표계에 대한 가속도

식(2)와 (3)을 x_{amp} 와 y_{amp} 에 대하여 정리하면,

$$x_{amp} = \frac{\sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)x_i - \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{x}}_i + \vec{g}_x)z_i}{\sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)} \quad (4)$$

$$y_{amp} = \frac{\sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)y_i - \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{y}}_i + \vec{g}_y)z_i}{\sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)} \quad (5)$$

식(4), (5)의 균형점 검증 방정식을 세울 수 있다.

3.2 균형점 제어물 위한 몸통운동 결정

3.1절에서 유도한 균형점 검증 방정식에서 균형추(balancing weight)의 성분을 분리하여 재정리하면 다음과 같다.

$$\left\{ \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)(x_i - x_{amp}) - \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{\vec{x}}_i + \vec{g}_x)z_i \right\} - \{ M_0 (\ddot{z}_0 + \vec{g}_z)(x_0 - x_{amp}) - M_0 (\ddot{x}_0 + \vec{g}_x)z_0 \} = 0 \quad (6)$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{\vec{z}}_i + \vec{g}_z)(y_i - y_{amp}) - \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{\vec{y}}_i + \vec{g}_y)z_i \right\} - \{ M_0 (\ddot{z}_0 + \vec{g}_z)(y_0 - y_{amp}) - M_0 (\ddot{y}_0 + \vec{g}_y)z_0 \} = 0 \quad (7)$$

여기서,

- x_i, y_i, z_i : i th Link 무게중심의 지지각 기준좌표계에 대한 위치
- x_0, y_0, z_0 : 균형추 무게중심의 지지각 기준좌표계에 대한 위치
- $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$: i th Link 무게중심의 지지각 기준좌표계에 대한 가속도
- $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$: 균형추 무게중심의 지지각 기준좌표계에 대한 가속도

위에서 유도한 식(6), (7)을 살펴보면 시간의 함수인 항들이 서로 간섭되어 있는 비선형 미분방정식임을 알 수 있다.

여기서 본문 2.2절을 상기하면, 균형점은 지지평면에 존재한다는 것과, IWR시스템이 운동방정식의 선형화, 원활한 평면운동, 등을 목적으로하는 몸통관절로 설계되었음을 알 수 있다. 이 내용을 식(6), (7)과 연관시켜 살펴보자.

지지각에 의해 추진되는 몸통이 지지평면과 평행한 평면위의 궤적을 따라 운동을 하면서, 균형추 역시 지지평면과 평행한 평면위에서 운동을 한다고 가정하면, 몸통의 Z방향 성분 즉, z_0 는 상수, \dot{z}_0, \ddot{z}_0 는 0이다. 따라서 (6)식으로부터

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{z}_i x_i - \ddot{z}_i x_{amp} + x_i g_x - x_{amp} g_x) - \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{x}_i z_i + g_x z_i) \\ & + M_0 (x_0 g_x - x_{amp} g_x) - M_0 (\ddot{x}_0 z_0 + g_x z_0) = 0 \end{aligned}$$

윗 식을 풀어쓰면,

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i x_i - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i x_{amp} + \sum_{i=1}^{10} m_i x_i g_x \\ & - \sum_{i=1}^{10} m_i x_{amp} g_x - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^{10} m_i g_x z_i \\ & + M_0 x_0 g_x - M_0 x_{amp} g_x - M_0 \ddot{x}_0 z_0 - M_0 g_x z_0 = 0 \end{aligned}$$

결정된 값을 포함하고 있는 항을 a 항으로 묶으면,

$$\therefore -M_0 \ddot{x}_0 z_0 + M_0 x_0 g_x + a = 0$$

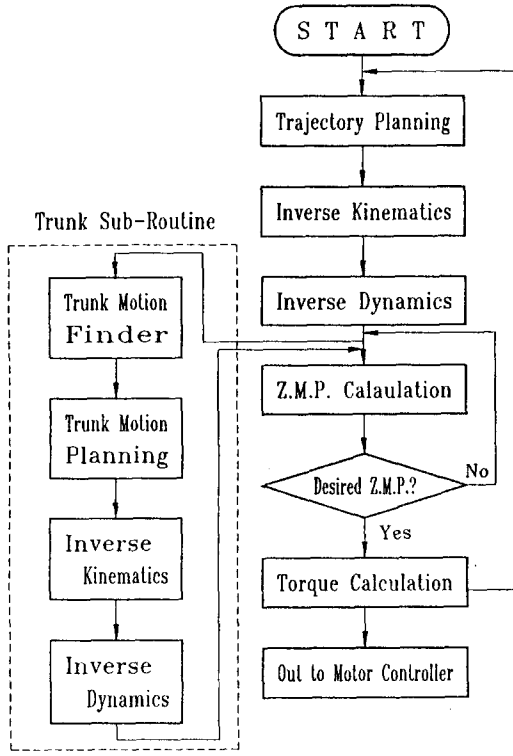


Fig. 7 IWR 보행 순서도

$$\begin{aligned}
 a = & \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i x_i - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i x_{amp} + \sum_{i=1}^{10} m_i x_i g_z \\
 & - \sum_{i=1}^{10} m_i x_{amp} g_z - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^{10} m_i g_x z_i \\
 & - M_0 x_{amp} g_x - M_0 g_x z_0
 \end{aligned}$$

이상을 정리하면,

$$\therefore \ddot{x}_0 - \frac{M_0 g_x}{M_0 z_0} x_0 = \frac{a}{M_0 z_0} \quad (8)$$

또한, (7)식으로부터,

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{z}_i y_i - \ddot{z}_i y_{amp} + y_i g_x - y_{amp} g_x) - \sum_{i=1}^{10} m_i (\ddot{y}_i z_i + g_y z_i) \\
 + M_0 (y_0 g_x - y_{amp} g_x) - M_0 (\ddot{y}_0 z_0 + g_y z_0) = 0
 \end{aligned}$$

윗 식을 풀어쓰면,

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i y_i - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i y_{amp} + \sum_{i=1}^{10} m_i y_i g_x \\
 - \sum_{i=1}^{10} m_i y_{amp} g_x - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^{10} m_i g_y z_i \\
 + M_0 y_0 g_x - M_0 y_{amp} g_x - M_0 \ddot{y}_0 z_0 - M_0 g_y z_0 = 0
 \end{aligned}$$

여시, 결정된 값을 포함하고 있는 항을 β 항으로 묶으면,

$$\therefore -M_0 \ddot{y}_0 z_0 + M_0 y_0 g_x + \beta = 0$$

$$\begin{aligned}
 \beta = & \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i y_i - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{z}_i y_{amp} + \sum_{i=1}^{10} m_i y_i g_x \\
 & - \sum_{i=1}^{10} m_i y_{amp} g_x - \sum_{i=1}^{10} m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^{10} m_i g_y z_i \\
 & - M_0 y_{amp} g_x - M_0 g_y z_0
 \end{aligned}$$

윗 식을 정리하면,

$$\therefore \ddot{y}_0(t) - \frac{M_0 g_x}{M_0 z_0} y_0(t) = \frac{\alpha}{M_0 z_0} \quad (9)$$

식(8)과 (9)는 식(6), (7)을 선형화한 것으로, 전형적인 이차미분방정식으로 정리되었다.

전술한 바와 같이 미분방정식 (8), (9)를 균형점 제어에 응용하기 위해서는 유각의 궤적과 균형점의 위치, 몸체가 추진되는 보행궤적, 등이 결정되어야 하며 Fig.7은 IWR의 보행에 필요한 운동특성을 결정하는 순서도이다.

4. 모의실험 및 결과

다음은 IWR이 초기상태에서 다양한 지형에 적응하는 데 고려되는, 방향전환, 장애물 회피, 경사면 등에 대한 걸음새들이다. 모델링과 수치해석 등의 오차에 의해 균형점이 고정되지는 않으나, 다양한 걸음새에 대해서 안정영역인 지지영역 내부에서 균형추의 궤적과 비슷한 궤적을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 실험전에 예상했던 것과는 달리 균형점이, 균형추의 자중과 중력가속도보다는 균형추의 XY방향 운동특성과 지지평면으로부터 균형추 무게중심까지의 거리와 균형점의 궤적에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다.

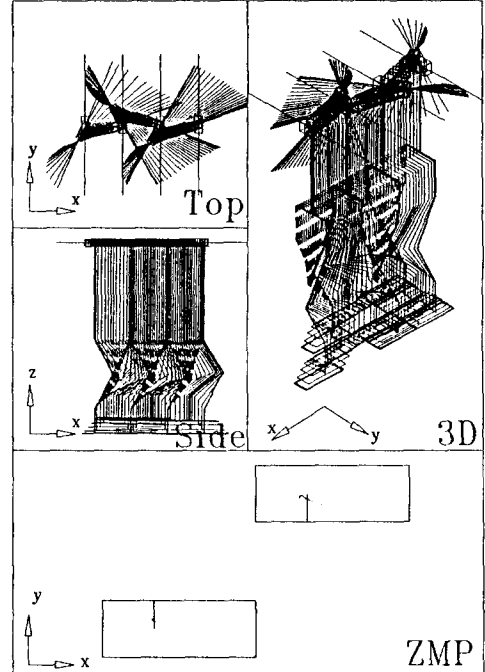


Fig. 8 평지 직선보행 궤적

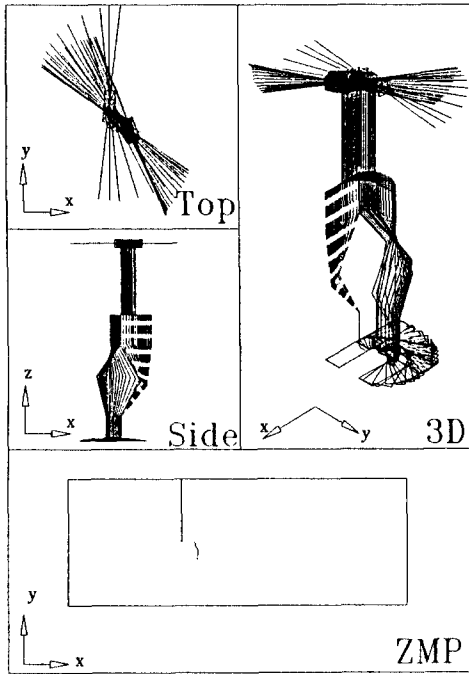


Fig. 9 제자리 방향회전 궤적

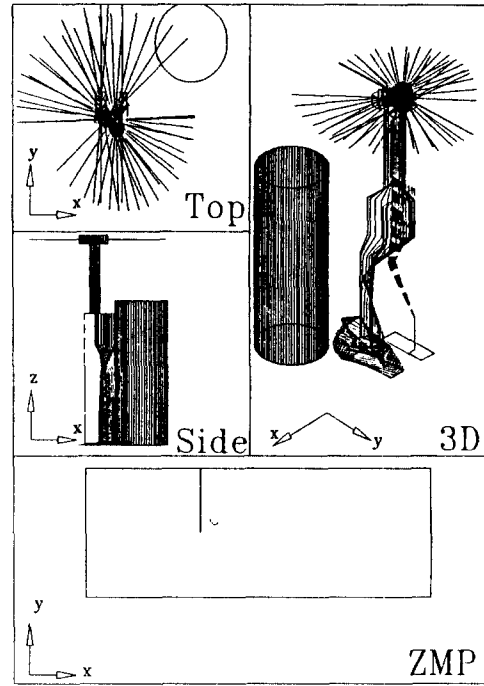


Fig. 11 장애물 회피 또는 보행중 방향전환 궤적

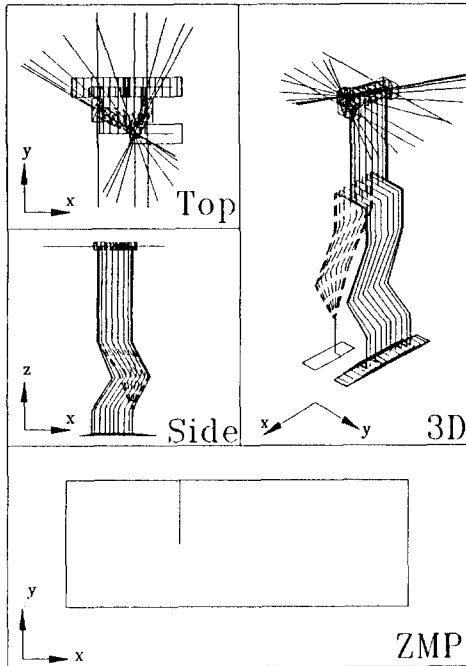


Fig. 10 뒀길을 보행 궤적

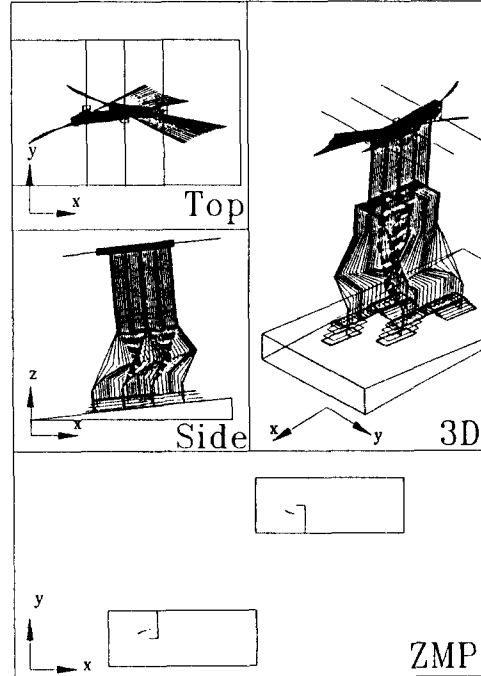


Fig. 12 경사지형 보행 궤적

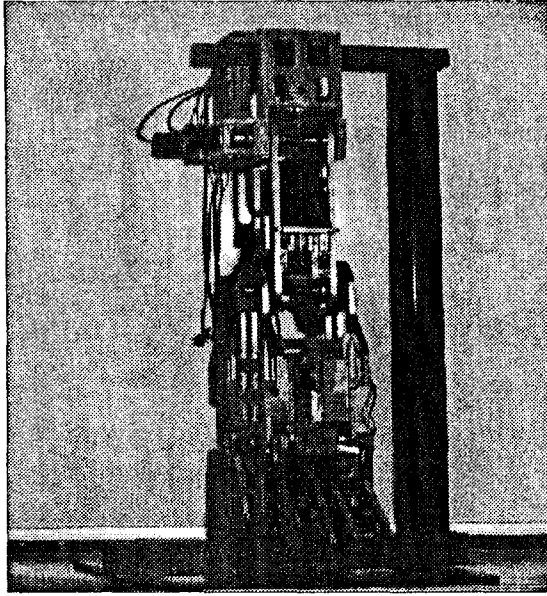


Fig.13 현재 제작중인 IWR

5. 향후 연구 방향

지금까지, 소개한 IWR의 적응 걸음새는 부분적으로만 조합되어 있는 상태이다. 그러나 주어진 목표점까지의 순항이나 여러 목적의 활용을 위해서는 여러걸음새의 원활한 조합에 의한 보행이 필수적이다. 이를 위해서는 각 걸음새의 균형추 운동을 원활하게 연결시키는 알고리즘의 개발과 순항궤적 및 보행궤적을 자체생성할 수 있는 알고리즘 개발이 선행되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

[1] R.B.McGeer, "Vehicular Legged Locomotion.", in *Advances in Automation and Robotics.*, Vol.1, ed, by G.Surodis, JAI Press, Inc., 1985.

[2] 김 진걸, 임 선호, "기계적 순응성을 고려한 이족보행로봇", "92 로보틱스 및 자동화 연구회 WORKSHOP 논문집", pp.21-25, 1992