

## 4각 보행 로봇의 정적 걸음새 생성

김남웅\*, 김국원<sup>+</sup>, 신호철<sup>++</sup>

(논문접수일 2007. 9. 7, 심사완료일 2007. 11. 29)

### Static Gait Generation of Quadruped Walking Robot

Nam Woong Kim\*, Kug Weon Kim<sup>+</sup> and Hyo-Chol Sin<sup>++</sup>

#### Abstract

This paper describes a static gait generation process and a mechanical design process of leg mechanisms for quadruped robots. Actually robot walking is realized with the joint motion of leg mechanisms. In order to calculate the time-angle trajectories for each joint of leg mechanisms, we generate end-tip trajectories with time for each leg in the global inertial coordinate system intuitively, followed by coordinate transformations of the trajectories into the local coordinates system fixed in each leg, finally the angle-time trajectories of each joint of leg mechanisms are obtained with inverse kinematics. The stability of the gait generated in this paper was verified by a multi-body dynamic analysis using the commercial software ADAMS<sup>®</sup>. Additionally the mechanical specifications such as gear reduction ratio, electrical specifications of motor and electrical power consumption during walking have been confirmed by the multi-body dynamic analysis. Finally we constructed a small quadruped robot and confirmed the gait.

**Key Words** : Quadruped walking robot(4각 보행 로봇), Gait generation(걸음새 생성), Static Gait(정적 걸음새), Dynamic Analysis(동역학 해석)

#### 기호설명

{G} : Inertial reference frame

{B} : Body-fixed frame

{S<sub>i</sub>} : Local frame at the base of each legs

R : Position vector of {B} with respect to {G}

J<sub>i</sub> : Position vector of {S<sub>i</sub>} with respect to {B}

<sup>B</sup>P<sub>i</sub> : Position vector of leg tip with respect to {B}

T<sub>i</sub> : Position vector of leg tip with respect to {G}

<sup>S<sub>i</sub></sup>P<sub>i</sub> : Position vector of leg tip with respect to {S<sub>i</sub>}

<sup>B</sup><sub>G</sub>T : Transformation matrix from {G} to {B}

<sup>S<sub>i</sub></sup><sub>B</sub>T : Transformation matrix from {B} to {S<sub>i</sub>}

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

+ 교신저자: 순천향대학교 기계공학과 (kimkug1@sch.ac.kr)

주소: 336-745 충남 아산시 신창면 읍내리 646

++ 서울대학교 기계항공공학부

## 1. 서론

다각 보행 로봇(legged robot)은 바퀴 구동 운송기구(wheeled vehicle)에 비해, 부정지면(irregular terrain)에서의 이동이 보다 자유롭다는 장점 때문에 많은 연구가 수행되고 있다. 한편 다각 보행 로봇은 속도가 느린 실용상의 단점을 비롯하여 많은 자유도를 동시에 제어해야 하고, 보행 시 발끝과 지면과의 접촉, 마찰 등을 고려해야 하는 등 구현상에 난점을 가지고 있다.

걸음새(gait)에 관한 연구는 본래 동물학자들이 동물의 보행을 이해하기 위해 수행되어 왔으며, 공학자들에 의한 연구는 1960년대부터 시작되었다<sup>(1)</sup>. Tomovic과 Karplus<sup>(2)</sup>는 걸음새 분석에 최초로 수학적 접근을 시도했다. Hildebrand<sup>(3)</sup>는 대칭 걸음새를 수학적으로 표현하기 위해 Gait Formula와 Gait Diagram을 도입했다. McGhee<sup>(4)</sup>는 걸음새 연구에 보다 엄밀한 수학적 접근을 시도했으며 이 과정에서 현재 걸음새 연구에 사용되고 있는 기본적인 용어들을 정의하였다. McGhee와 Frank<sup>(5)</sup>는 정적으로 안정한 4각 보행 걸음새를 연구하기 위해 세로 안정성 여유도(longitudinal stability margin)를 사용했으며 이를 최대화 하는 최적의 걸음새가 존재함을 수학적으로 밝혔다.

한편, 걸음새의 안정성에 대해서도 많은 연구가 이루어져 왔다. 4각 보행은 보행 시, 몇 개의 다리가 지면에 접촉하고 있는가에 따라 3개 이상일 때는 정적 걸음새, 2개 이하일 때는 동적 걸음새로 나눌 수 있다. 정적 걸음새의 안정성에 관해서는, 전술한 대로 McGhee와 Frank의 지지 다각형(support polygon) 바탕의 세로 안정성 여유도, Song<sup>(1)</sup>에 의해 제안된 정적 안정성 여유도(static stability margin), Messuri와 Klein<sup>(6)</sup>에 의해 제안된 에너지 안정성 여유도 등이 있었다. 동적 걸음새는 최근에 들어 활발한 연구가 진행되고 있다. Kimura<sup>(7)</sup>등은 4각 보행 로봇이 가질 수 있는 여러 동적 걸음새에 2각 지지구간에서의 운동성 위주로 해석을 하고 안정된 걸음새를 위한 걸음새 인자들의 설정 방향에 관한 연구를 수행했다. 서영진<sup>(8)</sup>은 걸음새를 실패하게 하는 최소 외란을 동적 걸음새의 안정성으로 정의하여 다구찌 방법을 통해 걸음새를 최적화하였다. Yoneda와 Hirose<sup>(9)</sup>는 지지되고 있는 다리에 관해 시스템의 모멘트를 구해, 이를 이용한 전도 걸음새 안정성(tumble gait stability)를 제안하였다. 구태완과 윤용산<sup>(10)</sup>은 보행 시 매 순간의 걸음새 안정도를 판별할 수 있도록 각 운동량에 기반한 걸음새 안정도를 제안하였다. 한편 지능로봇의 작업을 효율적으로 수행하기 위해 행위기반의 하이브리드 제어기에 대한 연구 및 유전자 알고리즘을

이용한 이동제어 연구 등 로봇 동작특성에 대해서도 많은 연구가 수행되었다<sup>(11,12)</sup>.

본 연구에서는 4각 보행 로봇의 걸음새로서 비 실시간으로 생성되는 정적 걸음새를 고려하였다. 즉, 지면의 상태에 따라 실시간으로 걸음새를 생성해내는 복잡한 계산을 요하는 방법을 배제하고, 미리 정해진(pre-defined) 정적 걸음새를 구현하는 방법을 선택했다. 정적 걸음새는 기준 관성 좌표계와 로봇의 몸체 고정 좌표계 그리고 각 다리의 끝단에 대한 역기구학 모델을 통해 구현되었으며 동역학 모델을 통해 검증되어 실제 로봇에 적용되었다. 또한 로봇의 구동부를 설계함에 있어, 상술한 동역학 모델을 통해 보행을 해석하여 생성된 걸음새의 안정성을 판별하고, 다리 구동 메커니즘의 필요 토크 및 전류 소모 등을 예측하였다.

## 2. 4각 보행 로봇의 걸음새 생성

### 2.1 로봇의 구조 및 제어 시스템

본 논문에서 고려하는 로봇의 구조는 Fig. 1과 같은 시스템으로서, 각 다리에는 3자유도, 목에는 피칭과 롤링방향의 2자유도, 입에는 1자유도를 갖는 총 15 자유도의 시스템이다. 몸체의 전장은 약 20cm이고, 다리의 조인트간 길이는 앞 다리 상, 하박이 77, 97cm, 뒷 다리 상, 하박이 77, 73cm으로 앞 다리가 뒷 다리에 비해 길며, 전체의 무게는 약 1.4kg정도이다.

로봇의 CPU는 32 bit RISC 칩이 채용되었으며, 동작제어를 위해 16 bit 정수 연산 DSP 칩이 사용된다. 여기에 로봇의 지각에 필요한 센서로는 경사 센서, 빛 센서, 적외선 센서, 터치 센서, 터치 패널, 스테레오 마이크로폰이 채용되었으며, 로봇의 감정 표현을 위한 LED, LCD, 스피커가 채용되었다. 모든 hardware와 인터페이스는 LINUX Platform기반 하에 구현되었다. 로봇의 구동부라 할 수 있는 다리는 높은 감속비의 기어열을 채용해 동작에 필요한 토크를 구현하며, 위치 되먹임 센서로는 포텐서미터가 사용되었다.

### 2.2 걸음새 생성

로봇의 보행(walking)은 몸체가 전도되지 않는 안정된 상태에서 몸체의 무게중심을 원하는 방향으로 이동시키는 것이다. 이를 구현하기 위해서는 각 다리의 이동구간과 지지구간을 디듀티(duty factor, b)에 의해 배분해야 하고, 지지구간에 있는 다리들의 상호운동을 적절히 구현하는 것이 필요하다. 따라서, 보행은 다리를 이동(swing)시키는 운동과 지면에 지지(support)하고 있는 발바닥에 대해서 몸체를 이동

시키는 운동으로 해석할 수 있으며, 각각은 개방형 혹은 폐쇄형 기구학적 연쇄(open loop or closed loop kinematic chain)상태에서 수행될 수 있다. 이를 통합적으로 해석하기 위해서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 기준 관성 좌표계 {G}와 로봇 몸체에 고정된 좌표계 {B}, 그리고 각각의 다리 관절의 근저에 국소 좌표계 {S<sub>i</sub>}를 정의해서 기구학적 해석을 수행했다.

기본적으로 로봇의 걸음새는 관성 기준 좌표계에 대해 정의된다. 관성 기준 좌표계 {G}는 보행의 기준면에 대해 XY 평면을 평행하게 위치시켜 걸음새 궤적 T<sub>i</sub>를 직관적으로 저작할 수 있도록 한다. 여기서 걸음새 궤적이라 함은 관성 기준 좌표계 {G}에서 정의된 로봇 몸체의 위치와 방향, 그리고 각 다리 끝 단의 위치를 보행 주기 동안의 시계열 정보로 나타낼 것이다. 이를 식 (1)과 같이 좌표변환 <sup>B</sup>P<sub>i</sub>를 통해 {B}에 대해 정의하고, 재차 식 (2)와 같이 각각의 {S<sub>i</sub>}에 대해 좌표변환 <sup>S<sub>i</sub></sup>P<sub>i</sub>를 통해 정의하면, {S<sub>i</sub>}에서 정의된 걸음새 궤적을 얻을 수 있다.

$${}^B P_i = {}^B_c T(T_i - R) \tag{1}$$

$${}^{S_i} P_i = {}^{S_i}_B T(P_i - J_i) \tag{2}$$

국소 좌표계 {S<sub>i</sub>}에서 재정의된 보행궤적은 3개의 회전 자유도를 가진 로봇 다리 끝 단의 궤적 계획 정보이므로 3R 머니플레이터의 역기구학(inverse kinematics) 해석을 통해 각 조인트의 각도 정보를 구할 수 있다. 이러한 걸음새 생성 방법은 로봇 고정 좌표계를 기준으로 걸음새를 생성하는 방법에 비해 직관적이며, 특히 로봇의 위치와 방향을 정확히 고려할 수 있다는 점에서 장점을 가진다. 한편, Fig. 1에서 나타난 바와 같이 편의상 3R 머니플레이터의 각각의 조인트는 초단부터 각각 shoulder, wing, knee라고 명명한다.

본 논문에서 로봇의 보행은 신뢰성에 그 초점이 맞추어지고 있기 때문에, 보행주기 동안 안정성이 보장되는 정적 걸음새로 구현되었으며, 또한 정칙(regular), 대칭(symmetric)의 특성을 갖는다. Table 1은 걸음새 생성에 고려된 인자들을 나타내며, Fig. 2는 이에 따라 전술한 걸음새 생성과정을 통해 설계된 로봇의 다리 1의 걸음새 궤적을 나타낸다.

### 3. 로봇 다리 구동부의 기계적 설계

#### 3.1 로봇 보행의 동역학 해석

2.2절에서 전술한 로봇의 걸음새 생성은 기본적으로 기구학적 해석을 통해 수행되는 것으로, 동역학적 모델을 통해

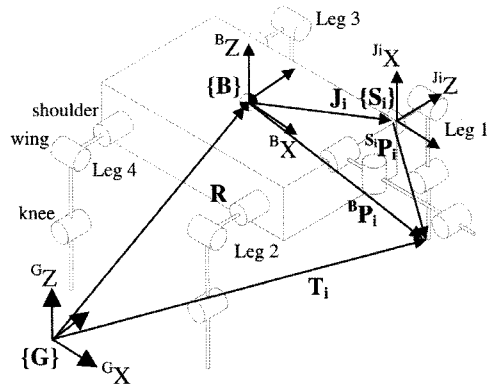


Fig. 1 Schematic diagram of quadruped walking robot

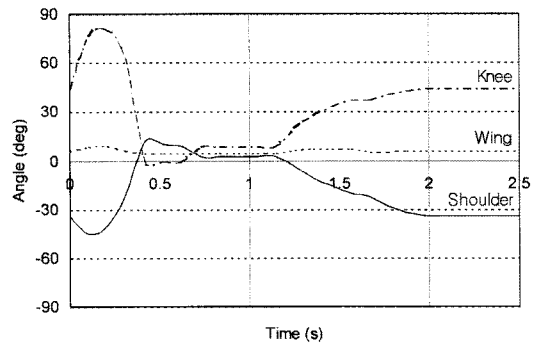


Fig. 2 Gait trajectory of leg 1

Table 1 Gait parameters

Parameter	Value
Duty Factor (β)	0.75
Cycle Time (T)	2.5s
Stride Length (λ)	100mm

걸음새의 안정도와 자연스러움을 정량적, 직관적으로 평가할 필요가 있다. 이러한 동역학 해석은 또한 실제 로봇제작 전의 사양 선정에 다음과 같이 주요한 정보를 제공할 수 있다. 첫째, 보행 중에 발생하는 최대 관절 토크와 관절 속도를 구해 모터를 선정할 수 있다. 둘째, 전력 소모량을 계산하여 전원부를 설계할 수 있다. 셋째, 걸음새에 대한 발바닥 마찰 계수의 영향을 해석해서 발바닥의 재질을 결정할 수 있다. 넷째, 걸음새에 대한 무게 중심의 영향을 고려할 수 있다.

한편, 다각 보행 로봇의 동역학 해석이 여타의 산업용 로봇과 다른 점은 발바닥이 지면과 접촉하고 있다는 것이다.

따라서 접촉을 고려할 수 있는 동역학 모델이 필요하다. 본 연구에서는 상용 동역학 전용 해석 소프트웨어인 ADAMS®를 사용해 다각 보행 로봇의 거동을 해석했다. Fig. 3은 ADAMS®에서 모델링 된 로봇이다. 로봇 발바닥의 형상은 원형으로 지면과 점접촉을 하고 있다.

Table 2는 로봇의 다리 구동부에 채용을 고려 중인 모터의 주요 사양을 나타낸다. 고려 중인 모터와 기어열의 감속비가 로봇의 보행을 구현하기에 적합한 것인가를 판단하기 위해 동역학 해석을 통해 보행 중에 발생하는 각 관절의 각속도와 토크를 계산했다. Fig. 4는 2.2 절에서 전술한 과정을 통해 설계된 걸음새를 구현했을 때의 관절 토크와 각속도를 모터의 N-T특성 곡선과 비교한 것이다. 보다 구체적으로는, ADAMS®를 이용한 동역학 해석에서 계산된 관절 토크 및 각속도는 기어열 최종단의 값이므로, 관절 토크에는 고려한 기어열 감속비 250으로 나누고, 각속도에는 곱하여, 모터축단의 값으로 환산한 후, 이 값들을 모터의 N-T 특성과 비교한 것이다. 한편 Fig. 4에 나타나고 있는 점들은 보행의 한 주기를 일정한 시간간격으로 시뮬레이션 했을 때, 각각의 적분 시간에서의 값들을 나타낸다. 관절에 걸리는 토크와 속도는 모터의 동작 영역 내에 존재하고 있으므로, 선정된 감속

비와 모터가 보행을 무리 없이 구현할 것으로 사료된다. 설계된 걸음새에서 롤링을 최소화했으므로 wing 조인트에 걸리는 토크는 매우 작았다.

한편, 로봇이 보행하는 중에는, 항상 12개 이상의 모터에서 보 제어가 수행되고 있으므로, 이때 필요한 전류 소비량은, 전원부 설계에 가장 중요한 인자라 할 수 있다. 전류 소비량을 계산하기 위해서는 동역학 해석을 통해 계산된 조인트 부하 토크로부터 모터의 구동에 필요한 전류를 계산해야 한다. Fig. 5는 한 주기의 보행 동안에 요구되는 12개 조인트의 필요 토크를 모두 합산한 후, 모터의 전기적 특성치를 고려하여 계산된 전류 소모량을 나타내는 것으로, 최대값과 평균값은 각각 2.31A와 1.22A이다. 고려 중인 로봇의 전원부는 평균 7A의 전류 소비를 만족하므로, 전원부 선정에는 문

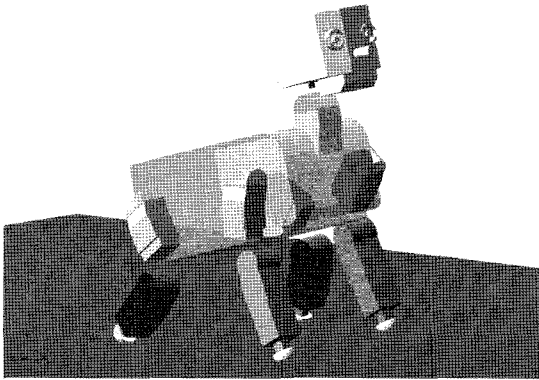


Fig. 3 Robot model in ADAMS®

Table 2 Motor characteristics

Parameter	Value
Operating Voltage (V)	5.5 V
Amateur Resistance ( $R_a$ )	4.8 $\Omega$
Stall Torque ( $T_s$ )	42.0 gcm
No-load Speed ( $\omega$ )	12917 rpm

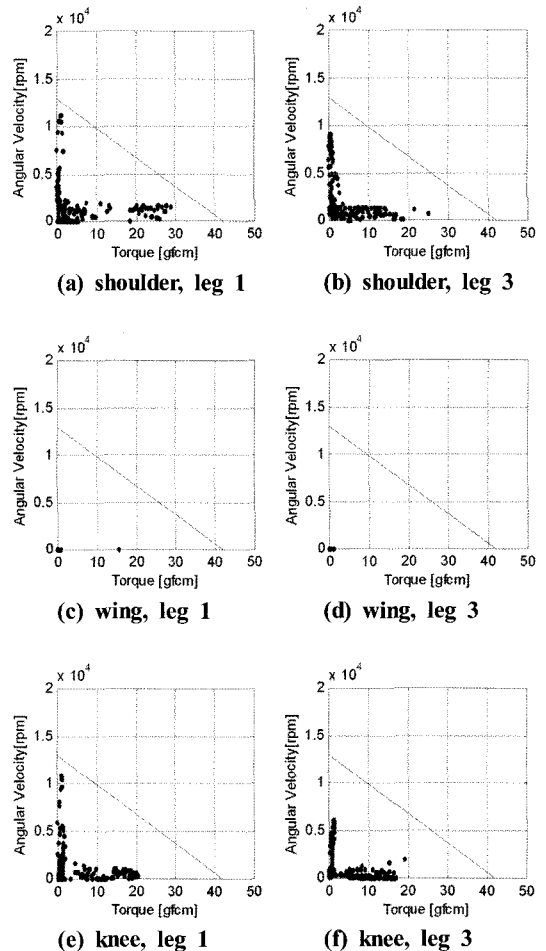


Fig. 4 Required torque and angular velocity on walking

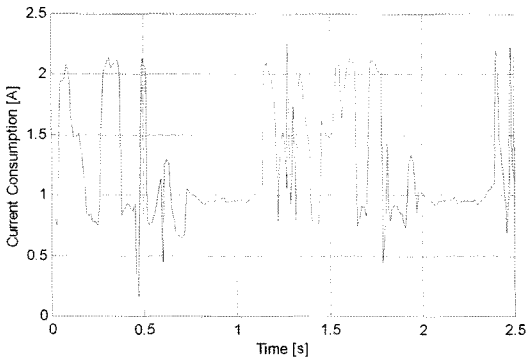


Fig. 5 Current consumption on walking

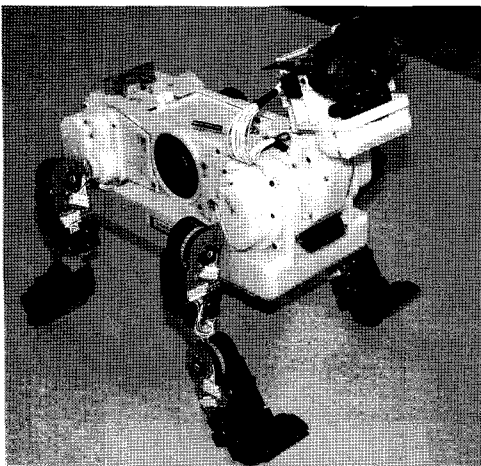


Fig. 6 Robot system designed

제가 없는 것으로 사료된다. Fig. 6은 최종적으로, 상술한 걸음새 생성과정과 동역학 해석을 통한 사양 설정을 통해 설계된 로봇을 보인다. 구현된 로봇은 생성된 걸음새를 잘 구현하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 4각 보행 로봇의 걸음새 생성, 로봇 다리 구동부의 기계적 설계와 전원부의 사양설정에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 로봇의 고정 좌표계가 아닌 관성 기준 좌표계에서 로봇의 이동 경로에 대한 걸음새를 계획하고, 이를 좌표변환과 기구학 모델을 통해 각 관절의 시계열 정보로 전환하

여, 최종적인 걸음새를 생성하였다. 이는 일반적으로 사용되는 로봇의 고정 좌표계에서 생성되는 걸음새 생성 방법에 비해 직관적으로 걸음새를 생성할 수 있다. 걸음새 생성에는 로봇의 위치, 방향을 비롯해 디딤울, 보폭, 주기 등의 걸음새 인자를 모두 고려할 수 있다.

- (2) 생성된 걸음새를 평가하기 위해 다물체 동역학 해석을 수행하였으며, 이를 통해 걸음새의 안정성 및 자연스러움을 정량적, 직관적으로 평가할 수 있었다.
- (3) 상술한 동역학 해석을 통해 로봇 다리의 구동부를 구성하는 기어열의 감속비 및 모터와 전원부의 필요 사양을 계산하여 효율적으로 로봇 시스템을 설계할 수 있었다.

#### 참고 문헌

- (1) Song, S. M. and Waldron, K. J., 1989. *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, The MIT Press.
- (2) Tomovic, R. and Karplus, W. J., 1961, "Land Locomotion Simulation and Control", *Proceedings Third International Analogue Computation Meeting*, Opatija, Yugoslavia, pp. 385~390.
- (3) Hildebrand, M., 1967, "Symmetrical Gaits of Horses", *Science*, Vol. 150, pp. 701~708.
- (4) McGhee, R. B., 1968, "Some Finite State Aspects of Legged Locomotion", *Mathematical Biosciences*, Vol. 2, No. 1/2, pp. 67~84.
- (5) McGhee, R. B. and Frank, A. A., 1968, "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits", *Mathematical Biosciences*, Vol. 3, pp. 331~351.
- (6) Messuri, D. A. and Klein, C. A., 1985, "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle during Rough Terrain Locomotion", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. RA-1, No. 3, pp. 132~141.
- (7) Kimura, H., Shinoyama, I. and Miura, H., 1990, "Dynamics in the Dynamic Walk of a Quadruped Robot", *Advanced Robotics*, Vol. 4, No. 3, pp. 283~301.
- (8) Seo, Y. J. and Yoon, Y. S., 1995, "Development of Simulation Algorithm of Quadruped Walking Robot", *Transactions of the Korean Society of Mechanical*

- Engineers*, Vol. 19, No. 11, pp. 2721~2735.
- (9) Yoneda, K. and Hirose, S., 1996, "Tumble Stability Criterion of Integrated Locomotion and Manipulation," *Proc. IROS 96*, pp. 870~876.
- (10) Koo, T. W. and Yoon, Y.S., 1999, "A Gait Stability Measure for Quadruped Walking Robot", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 23, No. 4, pp. 669~677.
- (11) Han, S. H., 2004, "An Intelligent Control of Mobile Robot Using Genetic Algorithm", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 126~132.
- (12) Kim, K. I., Choi, K. H. and Lee, S. H., 2005, "A Study on Behavior-based Hybrid Control Architecture for Intelligent Robot", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 5, pp. 27~34.