

〈論 文〉

복합형 이동로봇의 동력학적 모델링 및 제어

김형대* · 권대갑**

(1991년 2월 6일 접수)

Dynamic Modeling and Control of a Hybrid Locomotion Vehicle

Hyung-Dae Kim and Dae-Gab Gweon

Key Words: Hybrid Locomotion Vehicle(복합형 이동로봇), Robot Kinematics(로봇 운동학), Robot Dynamics(로봇 동력학), Resolved Acceleration Servo Control(분리 가속도 제어)

Abstract

A Hybrid Locomotion Vehicle (HLV) system is developed in KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology), to overcome the handicaps of other types of mobile robots (wheeled type and legged type). The vehicle has six locomotion devices, each of which has three degrees of freedom: leg lifting, wheel driving, and wheel steering. These hybrid locomotion devices enable flexible locomotion such as stepping over rises and going up and down stairs in a plant. In this study, kinematics and dynamics of the HLV are analyzed for plane motion and algorithms for a model based servo control are established. Computer simulation shows the path tracking performance of the control system.

기 호 설 명

F,L,B,H,S,A,W,C	: Floor, Load, Body, Hip, Steering Link, Axle, Wheel, Contact Point에 고정된 좌표계 (Fig. 3 참조)	${}^A\phi_B$: A 좌표계에 대한 B 좌표계의 Variable transformation matrix
\bar{X}	: X의 순간 좌표계	${}^A P_B$: A 좌표계를 기준으로 한 B 좌표계의 Position vector ${}^A P_B = ({}^A d_{Bx} \quad {}^A d_{By} \quad {}^A d_{Bz})^T$
$M(B), M(S)$: Body, Steering Link의 무게 중심에 고정된 좌표계	J	: Wheel Jacobian Matrix
${}^A\theta_{Bj} (j \in [x, y, z])$: A 좌표계의 j축에 대한 B 좌표계의 Rotational displacement	V_{Bj}	: 몸체의 j축 방향 속도
${}^A d_{Bj}$: A 좌표계의 j축에 대한 B 좌표계의 Translational displacement	ω_{Bj}	: 몸체의 j축 방향 각속도
${}^A T_B$: A 좌표계에 대한 B 좌표계의 Constant	ω_d, ω_s	: 바퀴, 조향축의 회전 각속도
		ω_c	: 접촉점에서의 바퀴의 Z축 방향 회전 각속도
		f_j	: j축 방향의 힘
		τ_j	: j축 방향의 토크
		${}^A f_B$: B 좌표계로부터 A 좌표계에 작용하는 힘/토크 벡터 (A 좌표계 기준)
		${}^A a_{Bj}$: A 좌표계를 기준으로 한 B 좌표계의 j축방향 가속도

* 한국과학기술원 생산공학과

** 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

- ${}^A a_{Bj}$: A 좌표계를 기준으로 한 B 좌표계의 j 축방향 각가속도
- M_L, M_B, M_S : Load, Body, Steering Link 의 질량 (kg)
- M_T : HLV의 총질량($M_L + M_B + M_S$)
- I_s : Steering Link의 관성 모멘트
- g : 중력 가속도
- β_a, β_s : Driving, Steering 축의 감속비
- τ_a, τ_s : Driving, Steering 모터에서 발생하는 토크
- τ_r : 역동력학으로부터 계산된 steering 및 driving motor에 공급될 토크 벡터
- τ_i : 외란 토크 벡터
- τ_c : 실제 steering 및 driving motor에 공급될 입력 토크 벡터
- ${}^A L_B$: Link Jacobian Matrix
- ${}^A P_B$: Propagation Matrix
- ${}^A C_{BC}$: Joint Coupling Matrix
- $l_1 \sim l_6$: HLV의 각부 치수 (Fig. 3 참조)
- R : 바퀴의 반경
- ζ_{rc} : 바퀴의 구름 마찰계수
- ζ_{cc} : 바퀴와 지면사이의 쿨롱 마찰계수
- ζ_{cw} : 바퀴와 Axle사이의 쿨롱 마찰계수
- ζ_{cs} : Steering Link와 Body 사이의 쿨롱 마찰계수
- K_P, K_V : Position Gain, Velocity Gain

1. 서 론

이제까지 개발된 이동로봇은 주행장치의 형식에 따라 wheeled type, crawler type, legged type 세 가지로 나누어진다. 그중 가장 보편적인 형식인 wheeled type은 연구가 많이 이루어져 왔다. 바퀴형 이동로봇은 다른 형식보다 에너지 효율이 좋고 기구 구성이 간단하며 제어도 용이하다. 그러나 mobility가 다른 형식에 비해 떨어지기 때문에 작업 환경의 표면이 평탄하고 단단해야 하는 불리한 점을 갖고 있다. 이런 문제를 해결 하기위해 wheeled type과 legged type의 기능을 조합시킨 복합형 이동로봇(HLV)을 제작하게 되었다. 이것은 wheeled type의 기동성, 안정성, 에너지 효율성을 살리고 legged type의 장애물 극복 능력을 부여한 것이다. hybrid type의 이동 로봇은 일본의 Y. Ichikawa, N. Ozaki 등이 개발한 원자력 발전소

작업용 로봇이 있다⁽¹⁾. 이 로봇은 모두 15개의 모터로 구동되며 5개의 locomotion part로 이루어져 있다. 각 locomotion part에서는 3개의 모터가 driving, steering과 바퀴 부분을 UP/DOWN하는 기능을 담당하고 있다. 바퀴 부분을 UP/DOWN하는 기능이 wheeled type으로 장애물을 극복할 수 있는 능력을 갖게 해준다. 이 로봇은 계단 승하강과 경사면을 몸체가 수평을 유지하도록 하면서 오를 수 있는 능력을 가진다.

본 연구의 대상이 되는 HLV는 KAIST생산공학과에서 개발한 것으로서 3개의 servo motor로 구동되는 이동 로봇이다. 직선 이동과 제자리 회전이 가능하고 계단 승하강을 할 수 있다. Fig. 1에 외관이 나타나 있다. 본 HLV는 크게 driving, steering, leveling 기능을 담당하는 부분으로 나누어진다. 이 세부분은 compact한 구조로 설계된 다리모양에 담겨져 있다. 이 다리는 원통형 몸체에 방사형태로 배치되어 있다. 또 제자리 회전 기능을 담당하는 삼각 보조다리가 몸체 하부에 설치되어 있다. driving 기능을 다리 중심부를 관통하는 스플라인축이 다리의 상하 운동에 관계없이 동력을 다리 하단의 바퀴에 전달할 수 있도록 하였고 steering 기능은 다리 바깥 부분의 스플라인형 키

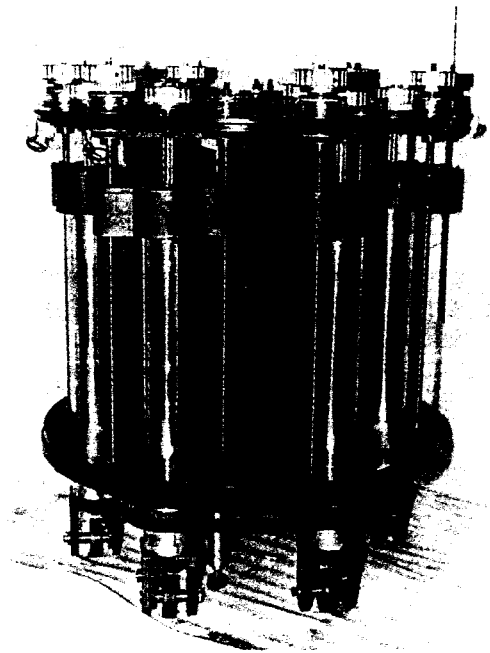


Fig. 1 Overview of HLV

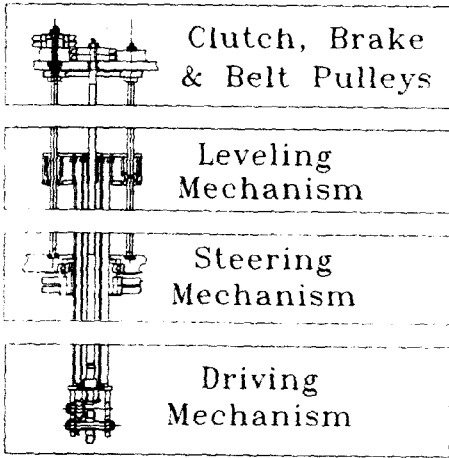


Fig. 2 Structure of HLV

홈을 통해 동력을 전달하여 이것 역시 다리의 상하 운동의 영향을 받지 않도록 설계되었다. 다리의 상하운동은 한쌍의 볼스크루축을 통해 모터의 회전운동을 직선 운동으로 변환하여 준다. 볼스크루 축에는 전자 클러치와 전자 브레이크가 양단에 설치되어 여섯개의 다리의 상하운동이 독자적으로 이루어지게 하였고 중력에 의한 다리의 상하 이동을 방지해 주고 있다(Fig. 2). 각기능을 담당하는 동력은 각 기능당 하나의 모터가 담당하고 있고 하나의 모터에서 여섯개의 다리로 타이밍 벨트가 동력전달을 해준다. 따라서 여섯개 다리의 driving과 steering은 동시에 일어난다.

본 로봇은 wheeled type과 legged type의 장점을 함께 가지고 있으므로 주행속도가 빠르며 환경적응력이 좋다. 기존 로봇과 비교할때 Y.Ichikawa등이 개발한 HLV와 가장 유사하지만 모터 3개로 6개의 바퀴-다리 유닛을 구동하므로 모터15개로 5개의 바퀴-다리유닛을 구동하는 Ichikawa HLV와 동력전달구조에서 많이 상이하다. 뿐만아니라 본 로봇은 3개의 모터만 사용했기 때문에 주행제어가 훨씬 간단하고 제작비가 저렴하며 장애물 및 계단승강시 걸음새가 훨씬 간단하다. (Ichikawa HLV 경우 뒷쪽 2개의 다리를 동시에 들 수 없기 때문에 계단승강시 몸체 회전을 적절하게 섞어야 한다.)

2. HLV의 운동학

2.1 운동학적 모형(Kinematic Modeling)

본 연구에서 수행할 운동학적 분석은 단지 평면

주행에 관한 것으로서 P.F.Muir가 사용한 방법을 사용한다⁽⁹⁾. 본 연구의 대상인 HLV는 구조의 특성상 모든 바퀴가 같은 주행 속도와 조향각을 가지므로 중심에 하나의 바퀴를 가지는 구조와 같은 운동을 하게 된다. 따라서 운동학 분석에는 HLV가 몸체 중앙에 하나의 바퀴를 가지는 구조(Fig. 3)로 단순화 되었으며 분석을 위하여 다음과 같이 가정되었다.

- (1) HLV는 평면상을 주행한다.
- (2) lateral slip이 없다.
- (3) rotational slip이 없다.
- (4) 모든 조향축은 지면에 수직이다.

2.2 운동학적 분석

각 링크사이의 위치관계를 나타내주는 변환 매트릭스를 구하면 다음과 같다. body와 hip, steering link와 contact point는 서로 상대적 움직임이 없기 때문에 변환 매트릭스는 일정하고 hip과 steering link는 Z축 방향의 상대적인 회전이 되므로 ${}^H\theta_{sz}$ 를 변수로 하는 variable transformation matrix가 만들어진다.

$${}^B T_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$${}^S T_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_6 - R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$${}^H \Phi_s = \begin{bmatrix} \cos^H \theta_{sz} & \sin^H \theta_{sz} & 0 & 0 \\ -\sin^H \theta_{sz} & \cos^H \theta_{sz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

HLV의 속도를 floor 좌표계에서 body의 순간 좌표계로 변환해주는 floor transformation matrix M은 HLV의 구조상 Z축 방향으로 몸체가 회전하는 일이 없으므로 (${}^F\theta_b = 0$) identity matrix가 된다.

$$M = \begin{bmatrix} \cos^F \theta_{Bz} & -\sin^F \theta_{Bz} & 0 \\ \sin^F \theta_{Bz} & \cos^F \theta_{Bz} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

($\because \theta_B = 0^\circ$)

따라서 floor 좌표계 상에서의 몸체 위치는 몸체의 순간 좌표계에 대한 위치와 일치한다.

즉 ${}^F P_B = M^B P_B = {}^B P_B$ (2.5)

바퀴의 속도($\omega_d, \omega_s, \omega_c$)를 몸체의 속도($V_{Bx}, V_{By}, \omega_{Bz}$)로 변환시켜주는 wheel velocity equation 과 wheel jacobian matrix를 (2.1)~(2.5)식으로부터 구하면⁽²⁾ 다음과 같다.

Wheel velocity equation

$$\dot{P} = J \dot{q} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Bx} \\ V_{By} \\ \omega_{Bz} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \omega_d \\ \omega_c \\ \omega_s \end{bmatrix}$$

Wheel Jacobian

$$J = \begin{bmatrix} -R \sin^H \theta_s & 0 & 0 \\ R \cos^H \theta_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

steering축과 바퀴의 Z축이 일직선상에 놓여 있으므로 ω_c 는 ω_s 와 같은 값이 된다. 식(2.6)을 전개하면 ω_d 와 ${}^H \theta_s$ 로부터 V_{Bx}, V_{By} 를 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$V_{Bx} = -R \omega_d \sin^H \theta_s \quad (2.8)$$

$$V_{By} = R \omega_d \cos^H \theta_s \quad (2.9)$$

$$\omega_{Bz} = 0 \quad (2.10)$$

(2.8)식과 (2.9)식으로부터 역운동학 해를 구하면

$${}^H \theta_s = \text{TAN}^{-1}(-V_{Bx}/V_{By}) \quad (2.11)$$

$$\omega_d = \frac{-V_{Bx} \sin^H \theta_s + V_{By} \cos^H \theta_s}{R} \quad (2.12)$$

3. HLV의 동력학

3.1 동력학적 모형(Dynamic Modeling)

운동학적 분석에서와 마찬가지로 HLV는 하나의

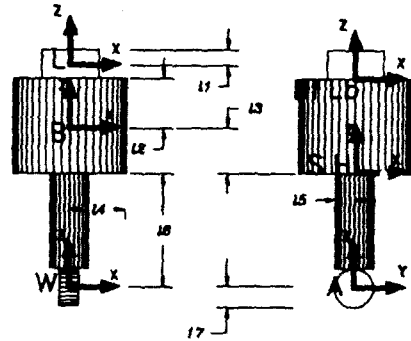


Fig. 3 Coordinate systems of HLV

바퀴가 중앙에 설치된 형태로 단순화하였다. HLV는 크게 다섯개의 링크(load, body, steering link, wheel, floor)로 이루어졌다. 각 링크의 고유 좌표계가 Fig. 3에 표시되어 있다. 각 링크는 네개의 조인트(load, bottom, hip, axle, contact point)로 서로 연결되어 있다.

모형화 과정에서 바퀴의 질량을 무시하고 slip이 없는 것으로 가정하였다.

3.2 HLV의 운동 방정식

각 링크의 force/torque source들을 propagation matrix를 통하여 main link 즉 body의 좌표계로 변환하여 모두 더하면 Newton의 힘평형 법칙에 의하여 그 합은 제로가 된다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$${}^B P_C^C f_{ew} + {}^B P_A^A f_{as} + {}^B P_W^W f_{aw} + {}^B P_H^H f_{ax} + {}^B P_L^L f_{ls} + {}^B P_{G(S)}^{G(S)} f_{as} + {}^B P_S^S f_{as} + {}^B P_L^L f_{ll} + {}^B f_{ib} + {}^B f_{gb} = 0 \quad (3.1)$$

여기서 각 힘에 붙은 하첨자 e, a, g, i는 각각 주변력(enviromental force), 구동력(actuation force), 중력(gravitational force), 그리고 관성력(inertial force)을 의미한다. 즉 f_{ew} 는 바퀴(W)에 작용하는 주변력(e)을 접촉점(C)좌표계로 표시한 것을 의미한다. 또 propagation matrix ${}^B P_A$ 는 A좌표계로 힘을 전달하는 matrix로서 일반적으로 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$${}^A P_B = [{}^{M1} L_M^{L1} {}^{M1} C_{ML} \dots {}^{B1} L_B^{L1} {}^{B1} C_{BA} {}^A L_{B1}] \quad (3.2)$$

여기서 ${}^A L_{B1}$ 은 한 링크의 두 좌표계 A, B1간의 힘관계를 나타내는 link Jacobin matrix이고 ${}^{B1} C_{AB}$

는 A, B 두 링크의 조인트 부분 B1에서 A 링크에서 B 링크로 힘이 전달되는 관계를 표시한 joint coupling matrix이다⁽²⁾.

윗식을 매트릭스 계산에 의해 전개하면 다음과 같은 여섯개의 일차힘-토크 식을 얻을 수 있다.

$$f_x \text{COS}^H \theta_s - f_y \text{SIN}^H \theta_s - (M_B + M_L + M_S) \bar{M}^{(B)} a_{M(B),x} = 0 \quad (3.3)$$

$$f_x \text{SIN}^H \theta_s - f_y \text{COS}^H \theta_s - (M_B + M_L + M_S) \bar{M}^{(B)} a_{M(B),y} = 0 \quad (3.4)$$

$$f_z - (M_B + M_L + M_S) g = 0 \quad (3.5)$$

$$f_x(l_3 + l_6 + R) \text{SIN}^H \theta_{sz} + f_y(l_3 + l_6) \text{COS}^H \theta_{sz} + f_z \zeta_{cw} \text{COS}^H \theta_{sz} - \beta_d \tau_d \text{COS}^H \theta_{sz} - l_3 M_S \bar{M}^{(B)} a_{M(B),y} + (l_1 + l_2) M_L \bar{M}^{(B)} a_{M(B),y} = 0 \quad (3.6)$$

$$-f_x(l_3 + l_6 + R) \text{COS}^H \theta_{sz} + f_y(l_3 + l_6) \text{SIN}^H \theta_{sz} + f_z \zeta_{cw} \text{SIN}^H \theta_{sz} - \beta_d \tau_d \text{SIN}^H \theta_{sz} - l_3 M_S \bar{M}^{(B)} a_{M(B),x} - (l_1 + l_2) M_L \bar{M}^{(B)} a_{M(B),x} = 0 \quad (3.7)$$

$$\zeta_{ca} f_z - \beta_s \tau_s - \zeta_{ca} M_S g + \zeta_{cc} (M_S + M_L + M_B) g + I_s \bar{M}^{(S)} a_{M(S),z} = 0 \quad (3.8)$$

또 링크사이의 조인트에서 발생하는 내부 힘-토크는 각각의 링크에서 작용 반작용 관계를 이용하여 다음과 같은 이차 힘-토크식을 이끌어낼 수 있다.

$$\begin{aligned} [I - {}^c C_{FW} {}^c C_{WF}] {}^c f_F &= 0 \\ [I - {}^A C_{WS} {}^A C_{SW}] {}^A f_W &= 0 \\ [I - {}^H C_{SB} {}^H C_{BS}] {}^H f_S &= 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

(3.9)식을 다시 전개하면 아래와 같이 4개의 이차 힘-토크식을 얻는다.

$$\zeta_{rc} f_z + \tau_x = 0 \quad (3.10)$$

$$\tau_y = 0 \quad (3.11)$$

$$\zeta_{cc} f_z + \tau_z = 0 \quad (3.12)$$

$$\zeta_{cw} f_x + R f_y + \zeta_{rc} f_z + \beta_d \tau_d = 0 \quad (3.13)$$

3.3 운동방정식의 정/역 해

(1) 역 동력학 해

역 동력학 해는 (3.3~8), (3.10~13)의 10개의 식과 8개의 미지수 ($f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z, \tau_d, \tau_s$)으로부터 구할 수 있다. (3.13)식으로부터 f_y 를 구하여 식(3.3)와 (3.4)에 대입한후 두식을 사인 법칙을 이용하여 τ_d 에 대하여 풀면

$$\begin{aligned} \tau_d &= \frac{R}{\beta_d} M_T \left[-\frac{(\zeta_{rc} + \zeta_{rc})g}{R} \right. \\ &\quad \left. + (\bar{M}^{(B)} a_{M(B),x} \text{SIN}^H \theta_{sz} \right. \\ &\quad \left. - \bar{M}^{(B)} a_{M(B),y} \text{COS}^H \theta_{sz}) \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

식(3.5)로부터 f_z 를 구하여 식(3.8)에 대입한 후 두식을 사인 법칙을 이용하여 τ_s 에 대하여 풀면

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{1}{\beta_s} (\zeta_{ca} f_z - \zeta_{ca} M_S g) \\ &\quad + \zeta_{cc} M_T g + I \bar{M}^{(S)} a_{M(S),z} \end{aligned} \quad (3.15)$$

(2) 정 동력학 해 (forward dynamic solution)

정 동력학 해는 (3.3~8), (3.10~13)의 10개의 식과 9개의 미지수 ($f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z, \bar{M}^{(B)} a_{M(B),x}, \bar{M}^{(B)} a_{M(B),y}, \bar{M}^{(S)} a_{M(S),z}$)로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{M}^{(B)} a_{M(B),x} &= \left[\frac{\beta_d \tau_d}{R(M_S + M_L + M_B)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\zeta_{rc} + \zeta_{rc})g}{R} \right] \text{SIN}^H \theta_{sz} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \bar{M}^{(B)} a_{M(B),y} &= \left[\frac{-\beta_d \tau_d}{R(M_S + M_L + M_B)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(\zeta_{rc} + \zeta_{rc})g}{R} \right] \text{COS}^H \theta_{sz} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \bar{M}^{(S)} a_{M(S),z} &= \frac{1}{I_s} [\beta_s \tau_s - \zeta_{ca} M_T g \\ &\quad + \zeta_{cc} M_S g - \zeta_{cc} M_T g] \end{aligned} \quad (3.18)$$

4. 서보 제어기 설계

Fig. 4는 본 연구에 사용된 resolved acceleration 서보 제어기의 block diagram이다. resolved acceleration 서보 제어기는 dynamic

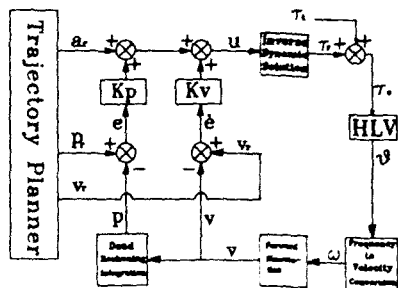


Fig. 4 Block Diagram of resolved acceleration servo controller

based cartesian space 제어기로서 control loop안에 역 동력학 해를 구하는 block이 들어있다. 기준 입력은 X, Y 좌표계로 나타낸 HLV의 가속도와 속도 그리고 위치가 주어진다. feedforward path에 있는 역 동력학 해는 HLV 고유의 역학을 상쇄시키므로 역학이 정확히 분석되었다면 HLV는 기준 가속도 경로를 정확하게 따라갈 것이다. 그러나 modeling을 정확하게 할 수 없고 고려되지 않은 힘과 토크 또는 외란이 작용하기 때문에 위치, 속도 궤환이 이런 효과에 의해 발생 하는 시스템 추적오차를 제거 하기위해 도입되었다. resolved acceleration 서보 제어기는 경로 계획에서 위치, 속도, 가속도의 데이터 뿐만 아니라, 역학 및 마찰 변수에 관한 데이터를 필요로 하며 계산적으로 매우 복잡하다. 그러나 마찰력과 같은 각종 힘과 토크를 보상해주기 때문에 resolved motion rate control보다 정확한 동작을 취할 수 있다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션에는 네가지 계산을 담당하는 부분으로 이루어졌다. 첫째는 경로 계획, 둘째는 서보 제어 알고리즘, 셋째는 정 동력학해, 넷째는 적분계산을 하는 부분이다. (Fig. 5) 실제의 시뮬레이션에서는 전체의 기준 경로를 계산하여 Table에 넣고 매 sampling time마다 차례대로 읽는 방법을 사용한다.

시뮬레이션에 사용된 기준 경로는 중심이 (0,0), 반경이 5m인 원이고 좌표(5,0)에서 반시계 방향으로 원운동해서 다시 (5,0)점에서 동작완료 하도록 하였다. sampling 시간은 0.1sec, 전체 sampling point는 300 point이며 각 sampling point 사이는 직선이동 하도록 했다.

시뮬레이션 알고리즘 에는 두가지의 loop이 있는데 안쪽의 것은 적분스텝 하나에 한번 이루어지고 바깥 loop는 매 sampling time마다 한번씩 이루어진다. 매 sampling time 시작할 때마다 기준HLV의 입력(위치, 속도, 가속도)이 계산(결정)되고 서보 제어 알고리즘에서 command signal을 계산하게 된다. 매 적분 스텝 마다 정동력학해로 HLV의 가속도를 구하고 이것을 Runge-Kutta 적분 방법(4)을 사용하고 HLV의 속도와 위치를 구한다. 기준 경로의 유형과, sampling 시간, 작업시간, 마찰계수등을 변화시켜가면서 position error, overshoot,

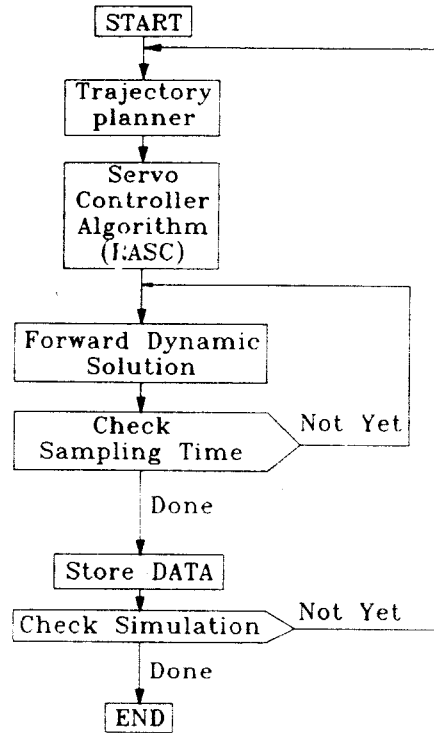


Fig. 5 Flow chart of HLV simulator

settling time등을 계산하여 서로 비교한다.

6. 시뮬레이션 결과

운동학 및 동력학 분석을 통한 결과 본 연구의 대상인 HLV는 구조적인 특성에 의해 driving과 steering이 서로 decoupled된 시스템으로 나타났다. Fig. 6은 시뮬레이션 결과이며 시각적인 효과를 높이기 위해 전체 300 sampling point중 50개의

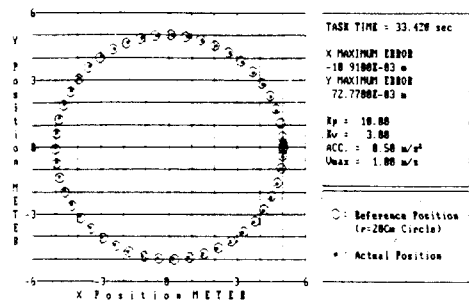


Fig. 6 Reference trajectory and actual output

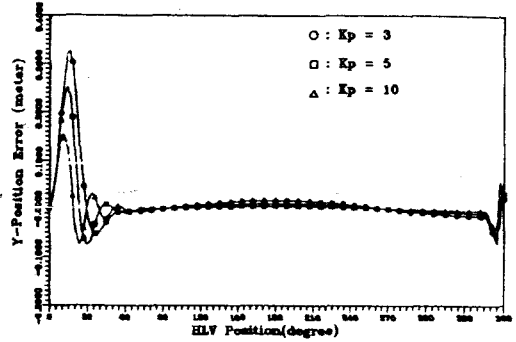
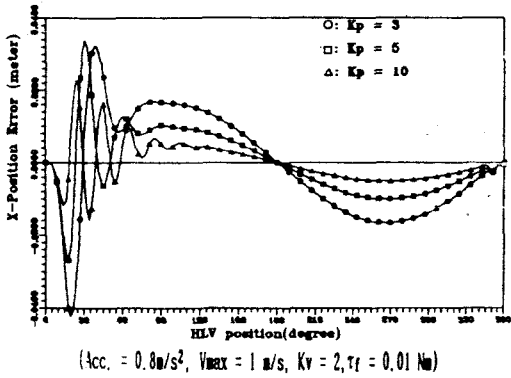


Fig. 7 Variation of Kp

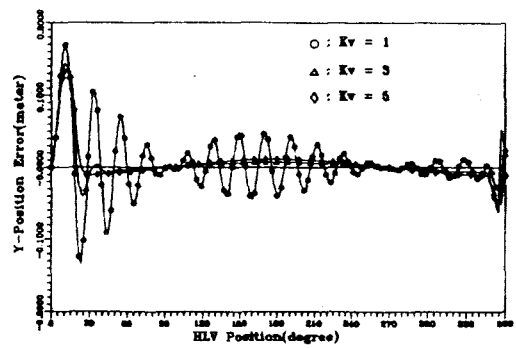
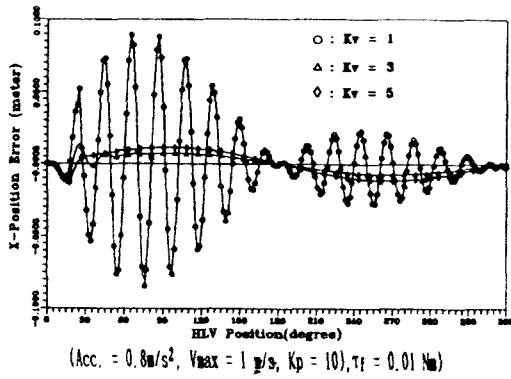


Fig. 8 Variation of Kv

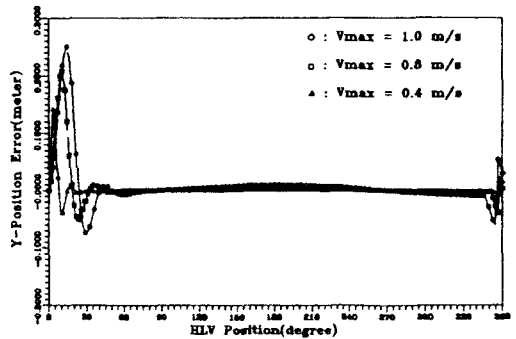
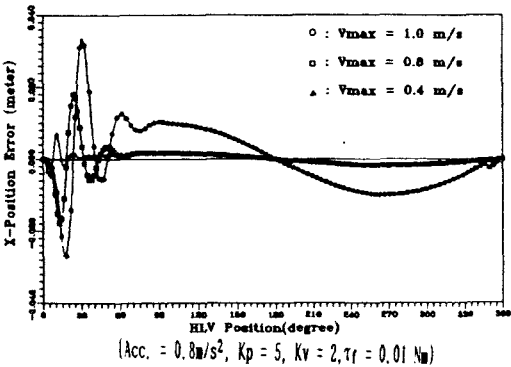


Fig. 9 Variation of V max

sampling point만 도시되었다.

이때 최대 속도와 가속도값을 주면 가속 시간과 등속 시간이 간단한 계산에 의해 구해진다. K_p 값을 변화시켰을 때의 HLV의 tracking 성능이 Fig. 7에 나타나있다. K_p 값이 증가할수록 tracking 성

능이 좋아지다가 어느 이상이되면 가속 구간이 지나서도 얼마간 진동하는 것을 알 수 있다. K_v 변화에 따른 결과는 Fig. 8에 나타내었다. K_v 값이 증가하면 제어계에 damping을 증가시켜 K_p 의 증가로 인한 진동을 줄여주지만 어느 이상 증가시키면

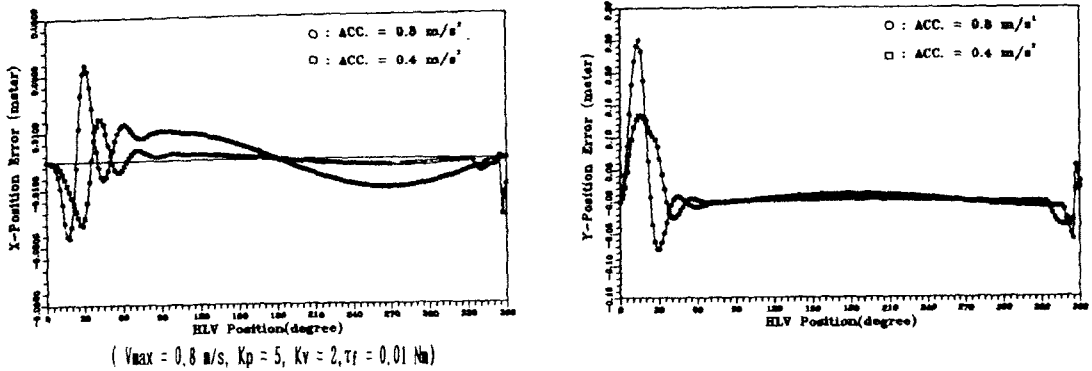


Fig. 10 Variation of Acc

over damping으로 인해 오차가 커지는 것을 알 수 있었다. 최고속도값 변화에 따른 경로 주행결과가 Fig. 9에 표시되었다. HLTV의 최고속력에 의해 주행성능이 많이 좌우됨을 알 수 있다. 최고속력이 작을수록 성능이 좋아짐을 알 수 있다. 초기 가속도 값의 변화에 따른 주행성능이 Fig. 10에 표시되었다. 가속도값의 변화에 따른 주행성능은 상당히 심하고 좋은 성능을 얻기 위해서는 다른 parameter와 조합이 잘 이루어져야 함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Ichkawa, Y., Ozaki, N. and Sadakene, K., 1983, "A Hybrid Locomotion Vehicle for Nuclear Power Plants," IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, No. 6, pp.1089~1093.
- (2) Muir, P.F., 1988, "Modeling and Control of Wheeled Mobile Robots," Ph.D. Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- (3) Muir P.F. and Neuman, C.P., 1986, "Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots," Robotics Institute Technical Report No. CMU-RI-TR-86-12, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- (4) James, M.L., Smith G.M. and Wolford, J.C., "Applied Numerical Methods for Digital Computation," 3rd ed., Harper & Row.
- (5) Paul, R.P., 1981, "Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control," The MIT Press, Cambridge, MA.
- (6) Whittaker, W., Kanade T. and Mitchell, T., 1989, Year End Report-Autonomous Planetary Rover at Carnegie Mellon, CMU-RI. TR-90-04.