

소형 휴머노이드 '베이비봇' 개발

최영진, 류제훈, 오용환, 유범재, 오상록
한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇연구센터

1. 서론

로봇 공학의 최종 목표는 인간의 행동, 지능, 그리고 상호 작용을 모방할 수 있는 인간형 로봇을 만드는 데 있다[1]. 그중에서 지능을 모방하는 것이 미래 인간형 로봇의 핵심 기술이 되겠지만, 현재로서는 인간형 로봇을 개발하는데 있어 필요한 로봇의 동작이나 상호작용 기술을 개발하기 위한 로봇 플랫폼 기술 개발이 중요한 부분을 차지하고 있다. 로봇 플랫폼을 개발함에 있어서는 로봇 메커니즘 설계와 구동 제어기 설계가 중요한 기본 요소이다. 휴머노이드의 메커니즘을 설계함에 있어서는 인간의 표준 기구학 데이터를 이용하고, 구동 제어기를 설계함에 있어서는 인간의 동역학적 데이터를 사용하는 것이 좋은 방법이라 생각된다. 현재 KIST에서 개발 중인 베이비봇은 만 1세 한국 남자아이의 기구학/동역학적 데이터를 충실히 따르면서 개발되고 있다. 본 논문에서는 베이비봇의 설계 개념과 통신망 기반 분산형 제어기 구조 등을 설명하며, 24축 동작 제어기를 동시에 자동으로 동조할 수 있는 방법을 제시한다.

인간형 로봇은 인간의 행동을 모방하기 위해 매우 많은 구동기들을 사용한다. 실제로 다양한 종류의 구동기가 사용되기 때문에 각 제어기의 제어 이득 값을 동조(Tuning)하는데 많은 시간이 소요된다. 또한 이렇게 동조된 각각의 이득 값들이 로봇이 수행하고자 하는 목표 성능을 만족시킬 수 있는지 여부도 보장하지 못한다. 이런 관점에서 자동으로 동시에 목표 성능을 만족시킬 수 있는 자동 성능 동조 방법이 필요하며, 이를 개발 중인 베이비봇에 적용하여 좋은 실험 결과를 얻고 있다. 본 논문에서는 이를 중점적으로 설명하고자 한다.



그림 1. 소형 휴머노이드 : 베이비봇.

동작 제어기 측면에서만 보면 좋은 제어 성능을 발휘하는 적응 제어기(Adaptive Controller)에 관한 많은 참고 문헌이 있다[2,3]. 그러나 일반적으로 적응 제어기는 복잡한 동역학적 특성을 이용하여 구현되기 때문에 Centralized 형태의 제어기로 구현되어야 한다. 이를 이용하기 위해서는 다소 복잡한 동역학 관계식과 정밀한 시스템 식별이 요구되는 단점이 있다. 사실 로봇의 동작제어기로서는 일반적으로 Decentralized PID 제어기가 가장 많이 이용되고 있다. 최근 참고문헌 [4, 5]에서 역 최적 PID 제어기에 직접 적응 제어 방식을 이용하여 자동 성능동조 PID 제어기를 개발하였다. 제어 이득들에 대해서 몇 가지 조건을 만족시키면 자동 성능동조 PID 제어기는 로봇 동작제어기에 외란 입력에 대한 상태변수 안정성을 제공한다. 베이비봇은 개발 기간을 단축하면서 목표 성능에 달성하기 위해 자동 성능동조 PID 제어기를 사용하였다. 또한 본 논문에서는 이를 구현하여 목표 성능을 안정적으로 달성할 수 있다는 것을 보이고자 한다. 또한 목표 성능을 정량화하는 방법도 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 베이비봇의 메커니즘 측면과 통신망 기반 분산형 제어기의 설계 개념을 설명하고, 3장에서는 자동 성능동조 PID제어기가 목표 성능을 어떻게 추종하는지에 대해 설명하고, 실험 결과를 보이며, 4장에서 결론을 맺는다.

2. 소형 휴머노이드 로봇 시스템 : 베이비봇

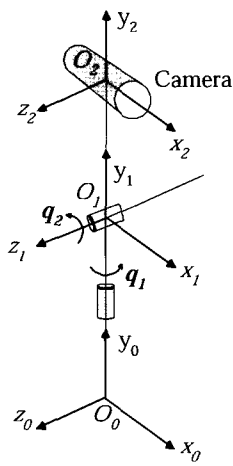
휴머노이드는 인간 생활환경에 대한 친화성이 강하여 실제 가정이나 사무실 환경에서 다양한 기능을 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 개발 중인 베이비봇의 메커니즘에 대한 설계 개념과 제어 구조에 대한 자세한 내용을 아래에서 설명하고자 한다.

2.1. 메커니즘 설계

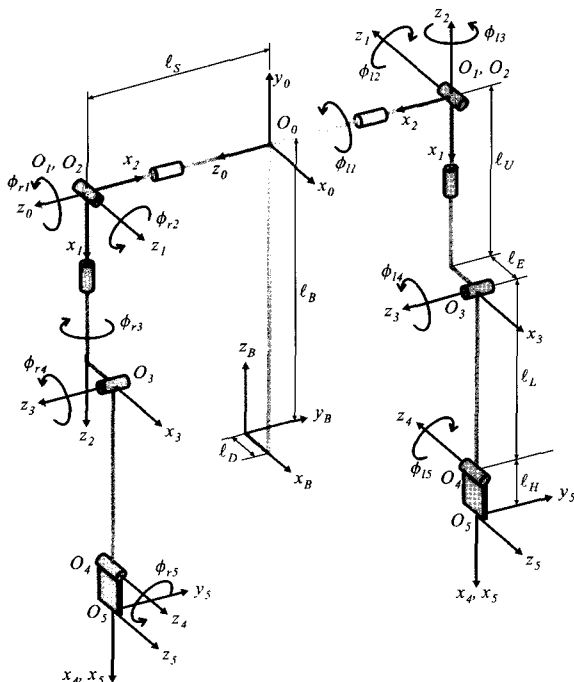
휴머노이드를 설계하기 위해서는 먼저 물리적인 치수들을 설정해야 한다. 이러한 기구학적 데이터들은 표준연구원 에서 제공하는 만 1세 아이의 한국인 표준을 참고하였다. 예를 들어 베이비봇의 신장은 75cm로서 이는 각각 74.6cm, 76.4cm 라는 한국 표준 여자, 남자 아이의 키를 참고하여 결정되었다. 또한 다른 기구학적 자료(어깨 넓이, 다리 길이,

팔 길이 등)를 한국인 표준에 맞추려고 최대한 노력하였다. 기구학적으로 설명하자면, Denavit-Hartenberg 파라미터들을 한국인 만 1세 아기의 표준에 맞추어 설정하였다. 그림 1에 보이는 베이비봇은 총 24자유도를 갖고 있다. 정확히 그림 2 처럼 목 동작에 2자유도, 각 팔에 5자유도, 각 다리에 6자유도씩이다. 두 팔과 다리에 관한 Denavit-Hartenberg 파라미터들은 표 1, 표 2에 나타내었다.

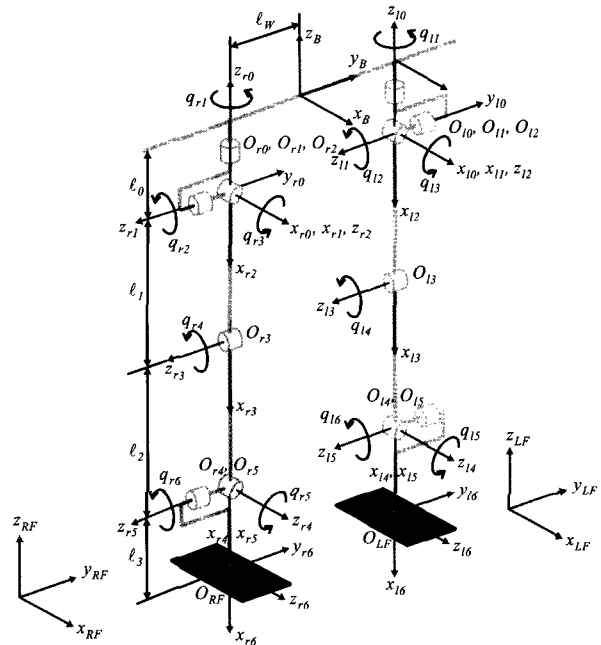
또한 베이비봇은 35개의 음성 명령을 인식하고 반응할 수 있는 음성 인식, 합성 모듈 기능이 내장되어있다. 예를 들어 앞으로 가, 뒤로 가, 좌로 돌아, 우로 돌아, 안녕하세요, 자기소개, 춤추기 등의 기능을 음성 명령을 통해 수행할 수 있도록 설계되었다. 또한 베이비봇은 스스로의 자세를 측정/제어하기 위해 자이로스코프를 가지고 있다.



(a) 2자유도 목 구동 시스템.



(b) 5자유도 양 팔 구동 시스템.



(c) 6자유도 양 다리 구동 시스템.

그림 2. 베이비봇의 기구학에 대한 설명도.

표 1. 양 팔 시스템에 대한 기구학적 자료.

Left Arm					
Link	θ_i	d_i	a_i	α_i	$\theta_{i,0}$
1	ϕ_{11}	$-l_S$	0	$\pi/2$	$-\pi/2$
2	ϕ_{22}	0	0	$-\pi/2$	$\pi/2$
3	ϕ_{33}	$-l_U$	l_E	$\pi/2$	$\pi/2$
4	ϕ_{44}	0	l_L	$\pi/2$	$-\pi/2$
5	ϕ_{55}	0	l_H	π	0
Right Arm					
2	ϕ_{11}	l_S	0	$-\pi/2$	$-\pi/2$
3	ϕ_{22}	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$
4	ϕ_{33}	l_U	l_E	$-\pi/2$	$\pi/2$
5	ϕ_{44}	0	l_L	$-\pi/2$	$-\pi/2$
6	ϕ_{55}	0	l_H	0	0

$l_S = 0.142$, $l_U = 0.105$, $l_L = 0.1$, $l_H = 0.08$, $l_E = 0.0025$

표 2. 양 다리 시스템에 대한 기구학적 자료.

Left/Right Leg					
Link	θ_i	d_i	a_i	α_i	$\theta_{i,0}$
1	q_{11}/q_{r1}	0	0	$\pi/2$	0
2	q_{22}/q_{r2}	0	0	$-\pi/2$	$-\pi/2$
3	q_{23}/q_{r3}	0	l_1	$\pi/2$	0
4	q_{44}/q_{r4}	0	l_2	$-\pi/2$	0
5	q_{55}/q_{r5}	0	0	$\pi/2$	0
6	q_{66}/q_{r6}	0	l_3	$-\pi/2$	0

$l_1 = 0.13$, $l_2 = 0.13$, $l_3 = 0.04$

2.2. 통신망 기반 분산형 제어 구조

베이비봇을 움직이기 위한 구동 장치로는 DC 서보 모터들을 사용하였다. 두 개의 팔과 목으로 구성된 상체에는 모터(Maxon, Minimotor 社)와 planetary gear-head를 사용하였다. 하체에는 모터와 하모닉 기어를 사용하여 정밀한 동작 제어가 가능하도록 설계하였다. 표 3에서는 구동 시스템의 사양을 자세히 기재하였다.

휴머노이드의 동작 제어기는 DSP(TMS320VC33, TI 社)들과 작은 모터 증폭기를 이용해 가능한 작게 제작하였다. 그리고 DSP들 사이의 통신은 그림 3에 나타난 것과 같이 CAN 네트워크를 사용하였다. Main DSP 모듈은 음성 인식 모듈, 자이로스코프와 각 팔, 다리, 목의 동작을 제어하는 DSP들로부터 데이터를 받아들여서 동작을 구현할 수 있도록 제작되었다. Local DSP 모듈은 해당 부위의 역기구학을 계산할 수 있도록 하여, Main DSP에서 수행해야하는 계산을 분담할 수 있도록 하였다.

표 3. 베이비봇 구동 시스템의 사양.

Joint 번호	Power [W]	기어비	구동기	토크상수 [Nm/A]
Leg J1	42.5	492:1	2657W	0.0348
J2	42.5	200:1	2657W	0.0348
J3	42.5	250:1	2657W	0.0348
J4	42.5	200:1	2657W	0.0348
J5	42.5	250:1	2657W	0.0348
J6	42.5	200:1	2657W	0.0348
Arm J1	23.2	100:1	2642W	0.0346
J2	23.2	100:1	2642W	0.0346
J3	6.0	157:1	RE-21	0.0250
J4	2.64	159:1	1724T	0.0264
J5	2.09	134:1	1717T	0.0168
Neck J1	2.64	246:1	1724T	0.0264
J2	2.09	159:1	1717T	0.0168

3. 동작 제어를 위한 자동 성능동조 방법

로봇과 같은 기계 시스템을 위한 PID 제어기의 역 최적화 기법이 참고문헌 [4]에서 개발되었으며 최적화를 이루기 위해 제어기 이득 값을 설정하는 방법이 또한 제시되어 있다. 이에 따라 설계된 제어기를 "역 최적 PID 제어기"라고 부른다. 베이비봇은 역 최적 PID 제어기를 이용하여 설계되었으며 다음 식과 같이 구현된다.

$$\tau_i = \left(k_i + \frac{1}{\gamma} \right) s_i \quad (1)$$

$$s_i = \dot{e}_i + k_p e_i + k_I \int e_i dt \quad (2)$$

for $i = 1, 2, \dots, n$

위의 제어기 설계를 위한 조건은 다음과 같다.

$$(C1) \quad k_i > 0, k_p > 0, k_I > 0, \gamma > 0$$

$$(C2) \quad k_p^2 > 2k_I$$

여기서 τ_i 는 제어 입력 토크, s_i 는 복합 오차, $\dot{e}_i, e_i, \int e_i dt$ 는 각각 i -번째 구동기의 속도 오차, 위치 오차, 누적(적분) 오차를 의미한다. 또한 n 은 전체 구동기의 개수로서 베이비봇의 경우 $n = 24$ 이다. 베이비봇의 구동기들의 배치를 고려해 볼 때 각 구동기는 일정한 제어 성능을 만족하기 위해서 다른 제어 이득 값이 일반적으로 필요하다. 다시 말해서 구동기가 이용되는 로봇내의 위치에 따라 요구되는 이득 값들이 달라진다. 실제로 베이비봇은 총 72개의 이득 값(24개 구동기 × 3개의 PID 이득 값)이 필요하기 때문에, 동일한 성능을 보장 할 수 있는 각각의 이득 값을 수동적으로 찾아가는 것은 거의 불가능하다. 그 해결책으로 참고 문헌 [5]에서는 식 (1)의 역 최적 PID 제어기의 자동 성능

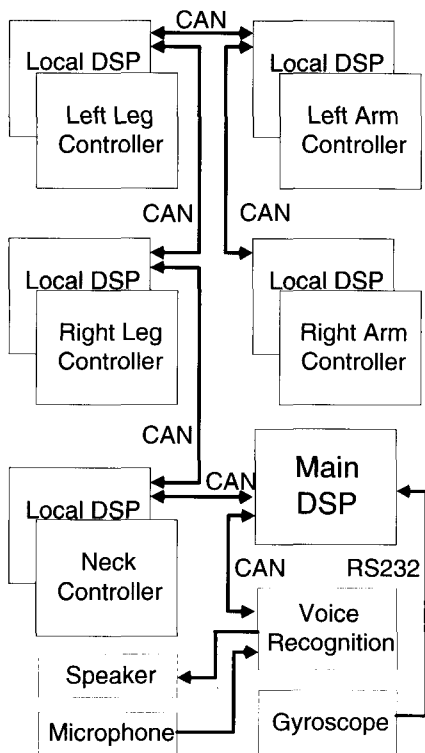


그림 3. 베이비봇의 제어 구조.

표 3에 보였듯이 휴머노이드는 다양한 모터와 기어가 사용되기 때문에 제어기 각각의 이득 값을 동조하는데 많은 시간이 소요된다. 사실 제어기 이득 값을 이용하여 제어 성능을 동조하는 것은 어려운 일이 아니지만, 모든 구동기가 같은 제어성능을 보이도록 24개 구동 제어기를 동조하는 것은 거의 불가능에 가깝다. 이에 대한 해결책으로 제어기 이득 값을 동시에 자동으로 동조하는 방법과 자동 성능동조의 기준을 다음 장에서 설명하고자 한다.

동조 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{dk_i}{dt} = \Gamma_i s_i^2 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

여기서 $k_i(t)$ 는 i -번째 제어기의 자동 동조 이득 값이고 Γ_i 는 i -번째의 자동 동조 이득의 갱신 속도를 결정하는 갱신 이득이다. 실제로 위의 $k_i(t)$ 을 이용해서 제어기에서 쓰이는 PID 이득 값들은 다음처럼 만들어 질 수 있다.

비례 제어: $(k_i(t) + \gamma^{-2}) \cdot k_p \cdot e_i$

적분 제어: $(k_i(t) + \gamma^{-2}) \cdot k_I \cdot \int e_i dt$

미분 제어: $(k_i(t) + \gamma^{-2}) \cdot e_i$

식 (3)의 자동 성능동조 규칙을 이용하면 제어 안정성을 유지하면서 목표성능을 달성할 수 있지만, 목표 성능을 달성한 이후에도 식 (3)의 자동 성능동조 규칙은 계속 작동하게 된다. 로봇과 같은 실제 궤적추종 기계 시스템에서 오차를 영으로 계속 유지시킨다는 것은 사실 불가능하다. 그러므로 다음 장에서 일정한 제어 성능을 의미하는 목표 성능을 설정하는 방법과 이에 따른 비동조 영역을 설정하는 방법을 설명하고자한다.

3.1. 목표 성능

실제로 로봇의 각 구동기에 대해 목표 성능(Ω_i)을 보장해 주는 제어기 이득 값들이 존재하지만, 이를 실험을 통해 확인하기 전에는 목표 성능을 보장해 주는 이득 값을 정확히 알 수 없다. 그 이유는 베이비봇에 장착된 구동기의 배치에 따라 필요로 하는 제어 입력이 다르기 때문이다. 베이비봇의 각 구동기가 목표 성능을 만족시키기 위해서는 자동 성능동조 방법을 목표 성능의 크기보다 더 작은 복합 오차에 대해 적용하여야 한다. 또한 식 (3)의 자동 성능동조 법칙은 Decentralized 형태이므로 다음과 같은 자동 성능동조의 범위를 Decentralized된 형태로 제안 하고자 한다.

$$|s_i| > \frac{\Omega_i}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

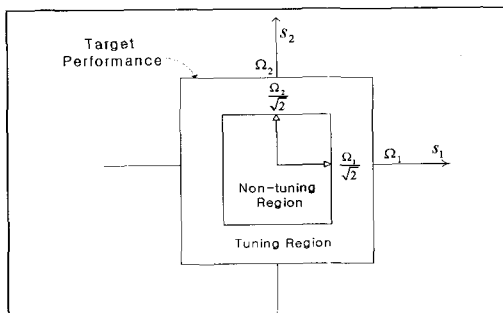


그림 4. 목표 성능과 비동조 영역 (n=2).

예를 들어 그림 4에서 $n=2$ 일때 비동조 영역과 목표 성능의 관계가 나타나 있다. 복합 오차가 동조 영역 식(4)를 만족한다면 목표성능을 달성하기 위해 자동 성능동조 법칙을 적용시켜서 제어기의 이득들을 증가시켜야 한다. 반대로 복합 오차가 그림 4의 비동조 영역에 머무른다면, 즉 $|s_i| \leq \frac{\Omega_i}{\sqrt{2}}$ 를 만족한다면 자동 성능동조를 멈추어서 불필요한 제어기 이득 갱신을 피해야 한다. 이 경우 자동 성능동조 법칙 식 (3)에 의해 갱신된 이득 $k_i(t)$ 가 목표 성능을 달성할 수 있는 이득 값보다 컸다고 생각할 수 있다. 실제로 자동 성능동조 법칙은 전체 제어 시스템에 대해 비선형 감쇠 특성을 제공하고 있다. 다시 말해서 식 (1)과 (3)을 사용하는 자동성능 PID 제어기의 첫 번째 항은 제어 시스템을 안정화시키는 비선형 감쇠 제어기를 의미하고, 두 번째 항은 선형 제어기를 의미한다.

이제는 목표 성능을 설정하는 방법을 설명하고자 한다. 목표 성능(Ω_i)은 식 (2)의 복합 오차를 이용하여 설정하는 것이 가장 타당한 방법이지만, 이를 물리적인 어떤 상수 값으로 설정하기 어렵다. 이를 근사적이지만 가장 쉽게 설정할 수 있는 방법은 다음의 근사적인 관계를 이용하는 것이다.

$$\Omega_i \approx k_p |e_i| \quad (5)$$

여기서, $|e_i|$ 는 목표로 하는 위치오차의 한계를 의미한다. 복합 오차는 근사적으로 k_p 의 비례 상수를 가지고 위치 오차에 비례한다. 예를 들어, 각 구동기에서 위치 오차가 0.025rad 이상 벗어나지 않기를 바란다면, 즉 $|e_i| < 0.025$ 인 성능을 얻고자 하면 목표 성능은 식 (5)에 의해 $\Omega_i = 20 \times 0.025 = 0.5$ 로 정해진다.

3.2. 실험 결과

베이비봇의 목표 성능을 보장하는 제어 이득 값을 찾기 위해 식 (1)과 (3)을 이용한 자동 성능동조 PID 제어기를 베이비봇의 제어 시스템에 사용하였다. 목표로 하는 동작은 인간의 행동을 모방하기 위해 이족 보행과 양 팔 흔들기로 구성하였다.

먼저 제어기의 설계 조건에 따라서 이득 값들을 $k_p = 20$, $k_I = 100$, $\gamma = 0.5$ 로 설정하였다. 이를 이용하여 실험에 이용된 제어기는 $i = 1, 2, \dots, 24$ 에 대해 다음과 같은 형태로 구성된다.

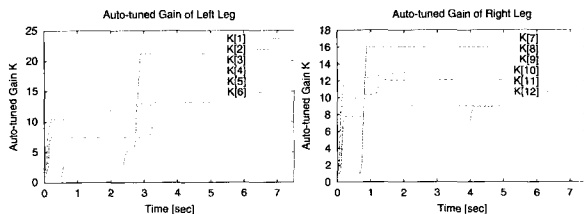
$$\begin{aligned} \tau_i &= (k_i(t) + 4) s_i \\ s_i &= \dot{e}_i + 20e_i + 100 \int e_i dt \\ \frac{dk_i}{dt} &= \Gamma_i s_i^2, \quad \text{if } |s_i| > \frac{\Omega_i}{\sqrt{2}} \\ \frac{dk_i}{dt} &= 0, \quad \text{else} \end{aligned}$$

모든 구동기에 대해서 자동 성능동조 파라미터의 초기 값은 $k_i(0) = 1.0$ 로 설정하였다. 또한 갱신 이득 값 $\Gamma_i = 500$ 로 설정하였고 목표 성능은 각 구동기에 대해 $|e_i|_t < 0.025$ 의 성능을 얻고자 하여 식(5)에 의해 $\Omega_i = 0.5$ 로 설정하였다.

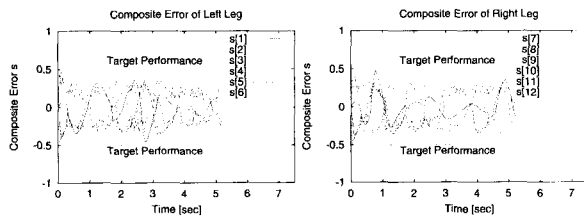
그림 5, 6에서는 자동 성능동조 파라미터, 복합 오차, 위치 오차의 실험 결과를 보이고 있다. 그림 5에서 자동 성능동조에 의해 목표성능 설정값에 가까워질수록 자동 동조 이득이 증가하면서 오차가 목표성능을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 식 (4)에서 제시된 자동 동조 이득의 기준은 그림 5.(b) 나 그림 6.(b)에서 표시된 것과 같이 다음으로 결정된다.

$$|s| \geq 0.35 (= \Omega_i / \sqrt{2} = 0.5 / \sqrt{2})$$

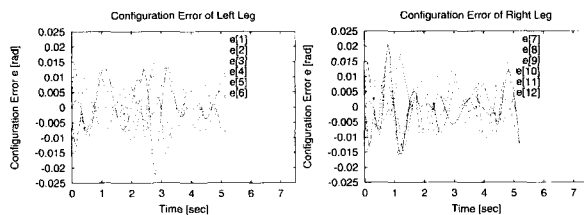
다시 말해서 복합 오차가 위의 기준을 넘어설 때만 자동 성능동조가 진행되며, 이는 제어기가 목표 오차를 만족시키는데 중요한 역할을 하게 된다. 그림 5.(a)의 실험결과를 살펴보면 왼다리와 오른다리에서 자동 동조되는 시간대가 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 이는 오른 다리가 먼저 걸음새를 만들고 이어서 왼다리가 걸음새를 만들기 때문이다. 이와 같이 걸음새를 만들면서 자연스럽게 요구되는 제어기 이득 값이 다르더라도 모든 구동기에서 목표 성능을 만족시킬 수 있다. 그림 6에서는 양팔의 자동 성능동조에 대한 실험 결과를 제시하였다.



(a) 왼다리/오른다리의 자동 동조된 이득.

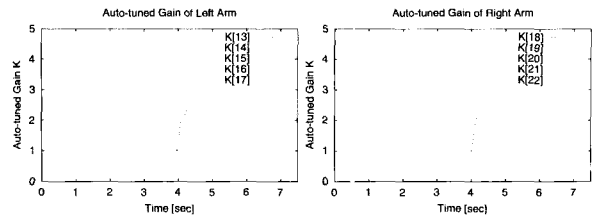


(b) 왼다리/오른다리의 복합오차.

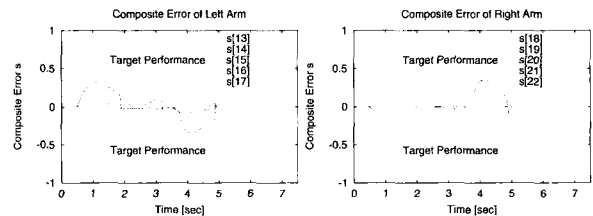


(c) 왼다리/오른다리의 위치오차.

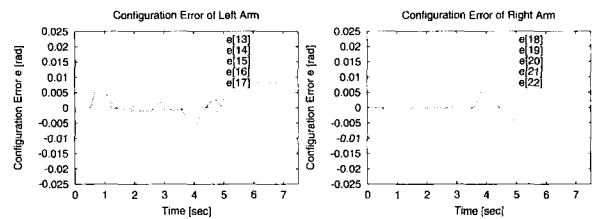
그림 5. 왼다리/오른다리의 실험결과.



(a) 왼팔/오른팔의 자동 동조된 이득.



(b) 왼팔/오른팔의 복합오차.



(c) 왼팔/오른팔의 위치오차.

그림 6. 왼팔/오른팔의 실험결과.

그림 5, 6에서 제시된 실험결과에서 알 수 있듯이 베이비봇 제어기의 초기 이득을 모두 같은 값으로 설정했음에도 요구되는 동작에 따라 목표 성능을 만족시킬 수 있도록 제어기가 안정성을 잃지 않고 자동 동조되고 있음을 실험적으로 보였다.

4. 결론

작은 휴머노이드인 베이비봇의 설계 개념과 CAN 통신망 기반 분산형 제어 구조를 본 논문에서 제시하였다. 또한 휴머노이드 플랫폼이 20개 이상의 구동기를 장착함에 의해 상당히 힘들어 질 수 있는 제어기 성능동조에 관해서 자동적으로 이를 구현할 수 있는 방법을 제시하였고, 이를 실험적으로 보였다.

참고문헌

1. T. Fukuda, R. Micheline, V. Pokonjak, S. Tzafestas, K. Valavanis and M. Vukobratovic, "How far away is 'Artificial Man,'" *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 8, no. 1 pp. 66-73, March, 2001.

2. R. Johansson, "Adaptive Control of Robot Manipulator Motion," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 4, pp. 483-490, 1990.
3. R. Ortega and M. W. Spong, "Adaptive Motion Control of Rigid Robots: A Tutorial," *IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 1575-1584, 1988.
4. Y. Choi and W. K. Chung, *PID Trajectory Tracking Control for Mechanical Systems*, Springer, 2004.
5. 최영진, "로봇 시스템에 대한 PID 궤적추종 제어기의 자동 성능동조," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, vol. 10, no. 6, 2004.

..... 저자약력



《최영진》

- 1994년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업.
- 1996년 포항공과대학교대학원 기계공학과 석사.
- 2002년 동대학 박사.
- 2003년~현재 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 연구원.
- 관심분야 : 로봇 제어, 동적 걸음새 제어, 휴먼 모델링.



《류제훈》

- 2003년 건국대학교 전자공학과 졸업.
- 현재 연세대학교대학원 전자전기공학과 석사 및 한국과학기술연구원 학연 과정 재학 중.
- 관심분야 : 제어, 임베디드 시스템, 휴먼 모델링.



《오용환》

- 1991년 포항공과대학교 기계공학과 졸업.
- 1993년 동대학원 기계공학과 석사.
- 1999년 동대학 박사.
- 1999년 5월~2000년 8월 일본 와세다 대학 기계공학과 JSPS Post-Doc. Fellow.
- 2001년~2004년 2월 한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇연구센터 연구원.
- 2004년 3월~현재 한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇연구센터 선임연구원.
- 관심분야 : 로봇 제어, 동적 걸음새 제어, 휴먼 모델링.



《유범재》

- 1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업.
- 1987년 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 석사.
- 1991년 동대학원 박사.
- 1991년~1994년 (주)터보테크 기술연구소 연구실장.
- 1994년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇연구센터 책임연구원.
- 관심분야 : Vision-based Robotics, Vision-based Control, Real-time Computer Vision, 신호처리소자 및 마이컴 응용기술, 지능형 서비스 로봇, 휴머노이드.



《오상록》

- 1980년 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업.
- 1982년 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 석사.
- 1987년 동대학원 박사.
- 1991년~1992년, 미국 IBM Watson 연구소 방문연구원.
- 1988년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 책임연구원. 현재는 정보통신부 IT 정책자문단 지능형 서비스 로봇 PM으로 근무 중.
- 관심분야 : 로봇의 지능제어, 행위기반제어 및 생체모방 시스템.