

인간형 로봇 손 시스템과 실시간 파지 동작 제어에 관한 연구

A Study on Humanoid Robot Hand System and Real-Time Grasp Motion Control

임 미 섭, 오 상 록, 손 재 범, 이 병 주, 유 범 재, 홍 예 선
(Mee-Seub Lim, Sang-Rok Oh, Jaebum Son, Byung-Ju Yi, Bum-Jae You, and Ye-Sun Hong)

Abstract : This paper addresses the development of a 3-fingered humanoid robot hand system and a real-time grasp synthesis of multifingered robot hands to find grasp configurations which satisfy the force closure condition of arbitrary shaped objects. We propose a fast and efficient grasp synthesis algorithm for planar polygonal objects, which yields the contact locations on a given polygonal object to obtain a force closure grasp by the multifingered robot hand. For an optimum grasp and real-time computation, we develop the preference and the hibernation process and assign physical constraints of the humanoid hand to the motion of each finger. The preferences consist of each sublayer reflecting the primitive preference similar to the conditional behaviors of humans for given objectives and their arrangements are adjusted by the heuristics inspired from human's grasping behaviors. The proposed method reduces the computational time significantly at the sacrifice of global optimality, and enables the grasp posture to be changable within two-finger and three-finger grasps. The performance of the presented algorithm is evaluated via simulation studies to obtain the force-closure grasps of polygonal objects with fingertip grasps. The architecture suggested is verified through experimental implementation to our robot hand system by solving the 2- or 3-finger grasp synthesis.

Keywords : humanoid robot hand, grasp planning, real-time grasp synthesis, hand control

I. 서론

로봇의 응용 분야는 과거의 생산공장에서부터 사무실, 가정 등으로 확대되고 있고, 로봇이 수행해야 할 작업 또한 복잡 다양해지고 있어 로봇의 제어측면에서 보면 지능적이며 자율적 제어성능을 요구하고 있다. 일반적으로 산업 현장에서 적용되고 있는 로봇 매니플레이터는 직렬 링크 구조의 매니플레이터에 병렬 집게형(parallel jaw-gripper)의 end-effector가 장착된 형태로 구성되어 있다. 이러한 구조는 불규칙 평면과 다양한 모양의 물체에 대한 파지(grasp)와 조작이 쉽지 않으며, 그리퍼만으로는 작업 물체의 자세 보정이 어려워 미세한 자세 보정을 위하여 매니플레이터를 움직여야 하는 단점이 있다. 작업 영역의 확대와 다기능의 로봇 시스템의 개발의 필요성은 다양한 모양과 크기의 물체들의 파지와 유연한 조작을 위한 로봇 손(robot hand)의 개발과 연구로 이어졌다[1-6].

로봇 손의 개발과 동작제어에 있어서 중요한 점은 첫째, 로봇 손의 기구학적 설계문제로서 손가락의 배치와 기구적 파라미터의 결정으로서, 공간적 제한 문제로 인하여 작업 공간의 극대화를 위한 기구학적 구조와 손가락의 배치가 필요하다[4,6]. 또한, 로봇 손의 관절에 구동기를 직접 장착하는 직접 구동(direct driven) 형태의 구조는 적합한 구동기를 찾기가 어렵기 때문에 공간적 제한을 고려한 효과적인

인 구조의 설계가 중요하다. 둘째, 다양한 물체의 파지와 유연한 조작을 위한 파지 점(grasp point)과 손가락의 자세 결정을 위한 파지 계획구조(grasp planing)의 설계에 있다. 셋째, 로봇 손을 실제로 구현하는데 있어서 실시간 제어 성능을 보장할 수 있는 로봇 손 제어 시스템의 구조가 필요하며, 이를 위해 실시간(real-time) 제어 성능을 보장할 수 있는 알고리즘과 주어진 작업 특성에 따른 각 손가락들의 동기화 동작(synchronization motion)은 물론 비동기화(asynchronization) 동작과 같은 상위 수준(high level)에서의 동작계획(motion planning)과 함께 각 손가락별 관절들의 동작을 제어하기 위한 하위수준(low-level)에서의 효과적인 제어 알고리즘이 필요하다.

일반적인 로봇 손의 구동 방법들은 텐던(tendon)을 이용한 구동방법이 많이 이용되었다. 즉, 로봇 손이 고정된 하단부(base)에 구동기를 설치하고 텐던을 통하여 관절을 운동시키는 구조를 많이 이용하였는데, 텐던형 구동방식의 로봇 손은 구조의 단순함과 공간적 제한을 극복할 수 있다는 장점이 있지만 일정치 않은 텐던 특성과 backlash와 같은 비선형적 특성으로 인하여 지속적이고 반복적인 작업에 적합하지 않으며 정밀한 위치제어에는 한계가 있다. 또한, 직접 구동형태의 구동기로 초음파 모터를 이용한 경우가 있지만 초음파 모터의 비선형적 동작 특성과 토크 특성에 의하여 정밀한 동작제어가 어렵다.

본 연구에서는 인간 손의 형태와 기능을 갖는 엄지, 검지, 중지의 3 손가락과 각 손가락별 3개의 관절로 구성된 인간형 로봇 손에 대하여 실시간 파지계획 알고리즘을 제안한다. 제안한 파지계획 알고리즘은 기존의 로봇 손과 달

접수일자 : 1999. 7. 29., 수정완료 : 2000. 1. 24.

임미섭,오상록,유범재 : 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

손재범 : 미시간 대학교 기계공학과

이병주 : 한양대학교 전자컴퓨터 공학부

홍예선 : 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터

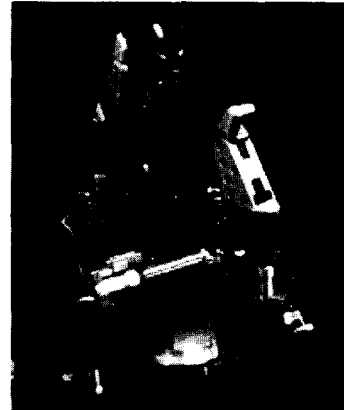
리 인간 손의 구조를 갖는 로봇 손을 위한 휴리스틱 방법을 기반으로 하는 실시간 파지계획 알고리즘이다. 기존의 인간의 행동특성(humanbeing's behavior)을 기반으로 하는 휴리스틱 파지계획 알고리즘들이 최근에 연구가 진행되고 있으며 특히, Beckey는 파지계획을 위하여 인간의 행동특성을 데이터베이스로 하는 지식-기반(knowledge-based) 제어 구조(architecture)를 제안하였다. 또한, Simon과 Jeon 그리고 Rossenblatt 등은 Brooks의 자율 이동로봇을 위한 subsumption architecture를 이용하여 로봇 손의 파지 계획을 위한 행동특성-기반의 제어구조(behavior-based control architecture)를 제안하였다. 본 논문에서는 참고문헌 [12-16]에 주어진 우선권을 기반으로 하는 새로운 실시간 파지계획 방법을 제안한다. 즉, 우선권 조정기(preference arbiter)를 제안하고 이를 이용하여 빠른 시간 내에 타당한 파지 후보 집합(grasp candidate set)을 결정하고 이를 다시 로봇 손의 구조와 물체의 형태 그리고 사용자의 파지형에 의한 최적의 파지 점을 구하기 위한 "동면"(hibernation)과 "조정", "Wake-up process"를 제안하여 실시간으로 최적의 파지점을 결정하도록 하였다.

개발한 로봇 손은 공간적 제한의 극복과 작업 공간의 효과적 이용을 위하여 홀로노믹 구조(holonomic structure) 또는 옴니 형태(OMNI-type)[7]의 동작 구조를 갖고 있으며 소형 직류 구동기를 장착하여 로봇 손의 구조를 단순화/소형화하였으며 따라서 정밀한 위치 제어성과 토크 특성을 갖는 로봇 손 시스템이라 할 수 있다. 또한, 다양한 모양과 구조의 다각형 물체에 대한 힘-균형 파지(force-closure grasp)를 위한 파지 계획 알고리즘을 제안한다. 제안한 파지계획 알고리즘은 인간의 파지 특성을 기반으로 하는 우선권(preference) 개념을 도입하였으며 실시간으로 파지 구성(grasp configuration)을 보장 할 수 있는 파지 계획 구조를 제안한다. 또한, 파지 구성에 있어서 유일한 파지 조합을 얻기 위하여 동면/부활(hibernation/wake-up) 프로세스를 제안하여 최적의 유일한 파지 구성 조합을 구하도록 하였다. 이를 실시간 인간형 로봇 손 제어 시스템으로 구현하였으며 다양한 물체에 대한 파지 계획을 통하여 성능을 보였다. 저자가 제출한 논문은 수정없이 원본 자체가 사진으로 찍혀 출판되도록 저자는 논문 작성시 투고 요령을 참고하고 다음의 지침 사항을 반드시 지켜야 한다. 워드프로세서 한글(HWP)을 사용하여 작성하고 문장 스타일은 본학회에서 우송하겠음.

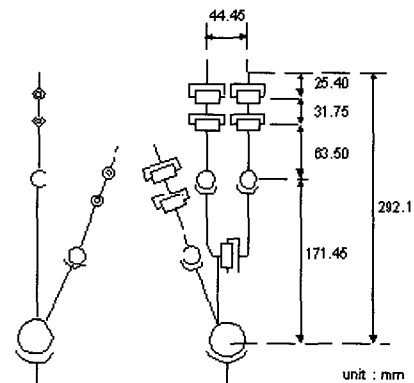
II. 인간형 로봇 손의 구조와 동작 특성

개발한 인간형 로봇 손은 기구적으로 홀로노믹 구조[7]로 3개의 손가락과 각 손가락별 3개의 관절로 구성된 전체 9 자유도의 로봇 손 시스템이다. 손가락의 배치는 구조적으로 인간의 손에 가까운 형태이지만 기구학적으로는 복잡한 형태를 갖고 있다. 인간형 로봇 손은 9개의 소형 DC 모터로 구동되도록 설계되었으며 각각의 구동기는 Minnac구조[7]의 소형 선형 구동(miniature linear actuation)방식으로 각 관절별 운동을 하도록 설계되어 정밀한 위치제어 성능과 토크 특성을 갖고있다. 또한, 구동

기가 손가락의 링크에 설치된 형태로 공간적 제한을 효과적으로 해결하였다. 그림 1은 개발한 인간형 로봇 손의 외관과 기구적 파라미터를 보여주고 있다.



(a) Human oid robot hand



(b) Kinem atic structure

그림 1. 인간형 로봇 손의 외관(a)과 기구적 파라미터(b).

Fig. 1. (a) Humanoid robot hand and (b) kinematic parameters.

인간형 로봇 손의 구조는 손목에서 손가락 끝까지의 길이가 29.21cm로 인간 손의 평균 크기인 20cm에 비해 약 50%정도 크다. 손가락별 링크 비율(ratio)은 엄지손가락의 경우, 손가락 끝으로부터 1:1.1:2이고 검지와 중지는 1:1.25:2.5이다. 이러한 구조는 인간 손의 형태와 흡사하며 엄지가 검지와 중지를 마주하도록 설계되었다. 각 관절의 운동 방식은 링크를 Minnac 실린더(cylinder)로 설계하여 모터의 회전운동이 직선운동으로 전환되어 관절을 움직이게 된다. Minnac의 구조는 2 부분으로 구성되어 있다. 첫째, 소형모터와 모터축에 회전기어를 장착하고 회전운동을 일으키는 구동부와 들레, 내부에 회전 나사홈이 있는 원통형 실린더로 구성되어 있다. 소형모터의 모터축의 회전기어와 원통형 실린더를 결합하면 모터의 회전운동은 실린더의 나사홈을 통하여 직선운동으로 변환된다. 이러한 구조를 Minnac이라 한다[7]. Minnac을 이용하여 각 손가

락 끝으로부터 3번째와 2번째 관절과 1:1 기어열로 맞물려진 종속적인 구부림 동작(prehensile motion)과 knuckle에서 두 개의 Minnac이 병렬로 결합되어 전방향(anterior) 동작과 측방향(lateral) 동작을 동시에 표현 할 수 있다. 즉, 손가락을 구부리고 펴기위한 동작은 두 개의 Minnac을 동시에 밀어주고 당겨주어 동작을 표현하고 좌우방향으로 동작은 Minnac들의 위치차이를 이용하여 구현되도록 하였다. Minnac 실린더의 외부 하단에 장착된 홀(hall) 센서로 각각의 관절별 자세 초기화(calibration)와 동작의 한계

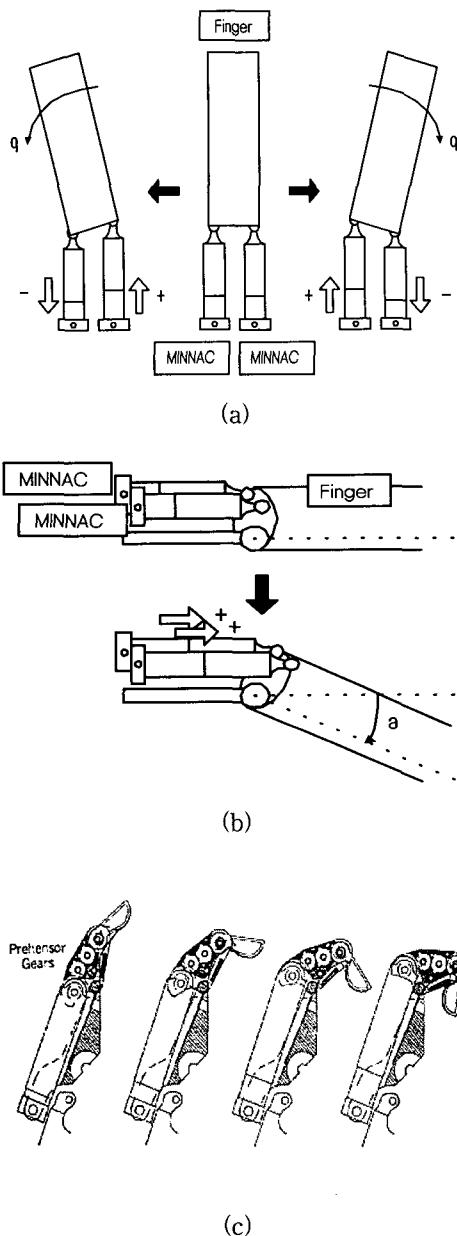


그림 2. (a) Minnac의 측 방향 동작, (b) Minnac의 전 방향 동작, (c) 손가락 끝의 구부림 동작.
 Fig. 2. (a) Interior motion of Minnac, (b) Anterior motion of Minnac, (c) Prehensile motion of fingertip.

범위(boundary)를 결정 할 수 있다. 그림 2는 Minnac의 구조에 의한 손가락의 동작 특성을 표현한 것이다. 기구학적 상세한 해석은 부록에 첨부하였다.

III. 실시간 파지 계획 구조

일반적인 파지 계획 알고리즘들을 실제 로봇 손에 적용할 때 손가락의 개수와 배치, 파지 자세(grasp posture), 그리고 물체의 기하학적 형태에 의해 구속 조건들이 결정된다. 그림 1의 인간형 로봇 손의 구조는 로봇 손의 각각의 손가락 끝(fingertip)의 크기와 손가락의 길이, 기구적 구속 조건들이 서로 다른 구조와 작업공간으로 구성되어 있다. 이러한 구속 조건들과 물체의 다면체의 개수에 의해 파지 점들을 결정하기 위한 파지 계획의 계산 시간이 지수 함수적으로 증가하게 된다. 따라서 물체의 기하학적 정보와 적절한 파지 구성을 위하여 많은 메모리와 계산시간과 같은 계산상의 자원들을 필요로 하며 실시간 성능을 보장하기 어렵다.

본 장에서는 인간형 로봇 손의 다각형 물체의 파지와 조작을 위한 최적의 파지 구성(grasp configuration)을 효과적으로 구하기 위하여 실시간 파지 계획 구조를 제안한다. 로봇 손으로 작업을 수행할 때 손가락들의 파지 구성은 매우 많은 조합들이 있을 수 있다. 그들 중에 하나를 선택하기 위한 일반적인 파지 계획 방법들은 성능의 기준을 설정하고 그 기준을 만족하는 최적의 해를 찾는 데 있었다 [8-11]. 그러나 주어진 작업을 위한 최적의 파지 구성을 구하더라도 그 과정에서 많은 계산 시간의 소요로 인하여 실시간 제어 성능을 보장하기 힘들었다. 한편, Lim 등[21]은 실시간 제어 성능을 보장할 수 있는 휴리스틱 방법을 기반으로 하는 파지 계획 알고리즘을 제안하였다. 실제로 인간의 물체에 대한 파지 과정을 주의 깊게 살펴보면 파지를 위하여 설정된 기준(criteria)에 최적인 파지구성의 전체적 계산을 하기보다는 주어진 작업을 위한 인간의 우선적 기호도에 따른 우선권에 의하여 하나의 파지 구성을 결정하게 된다[12-16]. 이와 같이 물체의 안정된 파지 특성을 분석하면 최적의 파지 구성을 얻기 위한 전체적인 정밀한 계산보다는 우선권을 기준으로 우선적인 파지 구성을 구하는 방법이 효과적일 수 있다.

이와 같은 인간의 파지 특성의 관찰로부터, 본 논문에서는 다각형 물체의 파지 점(grasp point)들의 조합들 중에서 실시간으로 최적의 파지 구성을 결정하기 위하여 우선권 조정(preference arbitration) 프로세서를 제안하고 동면(hibernation)과 부활(wake-up) 개념을 이용한 그림 3과 같은 파지 계획 구조를 구성하였다.

조정기(arbiter)는 주어진 작업 특성에 따른 우선권들에게 가중치(weight)를 설정하여 파지 구성 조합들 중 열성(recessive) 조합들을 조사하여 동면(hibernate)시키는 프로세스이다. 그래서 작업에 적합한 우성(dominant) 파지 조합만을 다음 단계로 통과시켜 하나의 우성 조합이 최적의 파지 구성으로 결정되게 된다. 제안한 파지 계획 구조는 매우 빠른 계산과 단계별 파지 구성 조합의 수를 줄이면서 최적화를 가능케 한다.

그림 3의 조정 프로세스(arbitration process)는 물체 특성 계산기(object property calculator), 타당성 검사기(feasibility checker)와 그리고 우선권 조정기(preference arbiter)등의 3개의 요소로 구성되어 있으며, 우선권 조정기는 전처리 조정기(pre-arbiter), 모드 관리기(mode manager), 파지 구성기(grasp synthesizer)로 이루어져 있다.

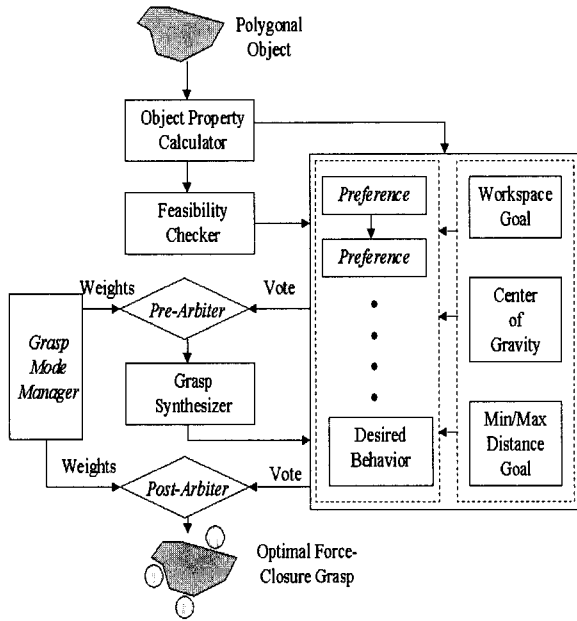


그림 3. 파지 계획 구조.
Fig. 3. The grasp planning architecture.

1. 물체 특성 계산기

다각형의 꼭지점(vertex)들의 행렬로 주어진 물체의 모델을 얻기 위하여 꼭지점들간의 선 방정식, 각 모서리(edge)들의 기준 좌표계에서의 각도, 마찰원추(friction cone)와 각 모서리의 중심점에서의 수직 벡터(normal vector), 마찰원추의 프리미티브 렌치(primitive wrench)[17], 그리고 물체의 무게 중심점 등을 계산하기 위한 프로세서이다.

2. 타당성 검사기

물체의 2-손가락 파지(2-finger grasp)와 3-손가락 파지를 위한 힘-균형 파지 조합[18-19]들을 구하는 프로세서이다. 힘을 f , 모멘트를 m 이라 할 때 렌치 w 로 표현하면

$$w = (f, m)^T \in R^n \tag{1}$$

로 주어지며 평면 구조에서 $n=3$ 이며 공간 구조에서 $n=6$ 이다[17].

3. 우선권 조정기

계산된 파지 조합들의 우선권의 조정을 위한 프로세서로서 여기서 우선권은 주어진 물체의 파지를 위한 원하는 인간형 행동 특성(humanbeing's behavior)을 정의한 것이다. 파지할 물체의 수많은 파지 구성 후보(candidate)들 가운데서 찾고자 하는 파지 구성의 해가 존재한다면 인간형 행동 특성에 의해서 최적의 파지 구성을 결정하는 방법이

다. 예를 들어, 인간형 동작특성들은 2-지형-파지(prefer-2-finger-grasp), 3-지형-파지(prefer-3-finger-grasp), 기본-자세형-파지(natural-posture-grasp)등이 가능한 우선권이 될 수 있다. 즉, 2-지형-파지는 해가 존재할 때 2-지형-파지를 최적의 해로 결정하고 3-지형-파지는 여러 해 중에서 3-지형-파지 구성을 선택하게 된다. 따라서 우선권의 집합에서 작업 특성에 따라서 인간형 동작특성인 우선권에 의해 원하는 파지 구성이 결정된다. 우선권은 작업 공간과 물체에 따른 파지 구성 후보들 중에서 각각의 우선권별 고유한 파지 구성과 자세, 그리고 구속조건을 만족하는 후보를 선택하고 반대의 경우 동면시키는 과정을 거쳐서 유일한 최적의 파지 구성 후보를 결정하게 된다. 결국, 우선권 조정기는 인간형 동작 특성을 기반으로 최적의 파지 자세를 결정하는 프로세서라 할 수 있다. 우선권 조정기를 구성하는 요소들의 기능은 다음과 같다.

3.1 모드 관리기

원하는 작업에 따른 적절한 가중치를 설정하는 프로세서이다. 위에서 언급한 바와 같이 우선권 조정기는 인간의 파지 동작특성을 고려하여 여러 종류의 우선권을 정의하고 이러한 우선권에 대하여 모드 관리기는 작업 특성에 따른 우선권별 가중치를 결정하는데 예를 들어, 운영자가 원하는 특정 우선권에 대하여 "1"의 가중치를 설정하고 나머지 우선권에 대하여 "0"을 설정하여 우선권 조정기에서 원하는 파지구성을 얻도록 한다.

3.2 전처리 조정기

작업 특성에 따른 설정된 가중치에 의해 원하는 파지 구성 후보들을 결정하는 조정의 전처리 단계이다. 즉, 우선권에 따른 구속조건들을 만족치 못하는 부적합한 파지 구성 후보들을 제외하여 주어진 작업에 적합한 파지 구성 후보들을 결정하는 기능을 하게된다. 이때 적용되는 구속조건들은 최소거리 구속조건, 최대거리 구속조건들이 있다. 물체의 파지 점에 대한 충분한 작업공간을 확보하기 위하여 다각형의 최소 변(edge)의 길이를 최소 거리 d_{min} 이 접촉 손가락 끝의 두께보다 커야하는 최소거리 구속조건을 조사하고 최대거리 구속조건인 다각형의 최대 변의 길이 d_{max} 가 엄지에서 검지 또는 중지까지의 최대 작업공간보다 작은지를 조사하게 된다. 이 과정은 간단한 비교 과정으로 고속 처리가 가능하며

i) 파지를 위해 관절 각 한계(limit)와 관절 각 사이의 유용한 각도,

ii) 현재의 손가락 끝의 위치와 파지 점까지의 거리,

iii) 파지 점들에 대한 손가락 배치와 파지 점간의 상호 간섭

등과 같은 문제들을 조사한다. 예를 들어, 그림 4와 같이 6개의 꼭지점으로 구성된 다각형 물체의 2지형 또는 3지형의 힘-균형 구속 조건을 만족하는 파지 구성 조합들은 표 1과 같다. 표 1에서 2-지형-파지와 3-지형-파지를 위한 엄지, 검지, 그리고 중지 에 대한 파지 조합들은 주어진 우선권에 대한 조사(evaluation)를 거쳐 부적합한 조합들은 제거되게 되는데, 모드 관리기에서 2-지형-파지와 3-지형-파지에 같은 가중치를 부여했을 경우 전처리 조정기는

파지 조합 중에서 (0,2,5) 와 (0,4,5)를 제거하게 된다. 그 이유는 3-지형에서 2-지형으로 파지 형태를 바꿀 때 힘-균형 안정도가 만족되지 않기 때문이다.

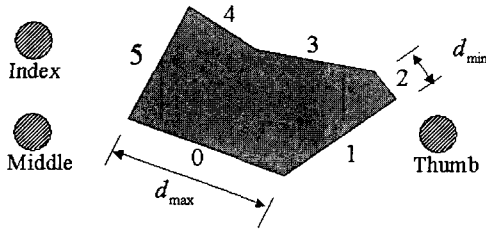


그림 4. 6면체 다각형 물체와 손가락 배치.

Fig. 4. Planar polygonal object and fingertip arrangement.

표 1. 6면체 다각형의 파지 조합.

Table 1. The grasp combination set of polygonal object with 6 vertices.

파지 모드	파지 조합
2-finger grasp	(0,3), (1,5)
3-finger grasp	(0,1,3), (0,1,5), (0,3,4), (0,3,5), (0,4,5), (1,2,5), (1,3,5), (1,4,5)

3.3 파지 구성기

일반적인 힘-균형 파지 구성방법[8,9,18,19]을 이용하여 파지 구성 조합들 중에서 적합한 파지 구성 조합을 결정하게 된다.

3.4 후처리 조정기

위의 과정을 통과한 파지 조합들 중에서 최종적인 파지 구성 조합을 결정하는 과정으로 조사 방법은 인간형의 파지 방법을 기반으로 하는 휴리스틱 규칙(heuristic rule)들을 이용하게 된다. 즉, 현재 손가락의 위치와 파지 점들 간의 최소 이동거리를 기준으로 최종적인 파지구성 조합을 결정한다. 일반적인 힘-균형 파지 구성방법을 이용하여 파지 구성 조합들 중에서 적합한 파지 구성 조합을 결정하게 된다. 이는 손가락 끝의 움직임을 최소화하는 조합으로 최적의 파지 자세를 결정함을 의미한다.

4. 우선권 검사

그림 4의 파지계획구조에서 본 논문에서는 인간의 파지 동작특성을 기반으로 한 우선권을 도입하였으며, 이는 Bekey[12]의 지식-기반 제어방법보다 폭넓은 개념으로 파지 작업에서 발생하는 가능한 모든 파지 조합들을 포함하고 있다. 최적의 파지 조합 결정 과정에서 우선권에 대한 조사결과 논리적인 값인 “예”, “아니오”로서 결과를 표현하기 때문에 조사과정에서 정확한 파지 구성을 결정하는데 한계가 있다. 따라서, 최적의 유일한 파지 구성을 얻기 위해서 동면(hibernation)/부활(wake-up) 개념을 도입하여 우선권 조사 과정의 한계를 극복하였다.

일반적으로 주어진 파지물체에 대한 기하학적 정보는 카메라를 이용하여 얻게된다. 카메라를 통해 얻어진 물체

의 기하학적 정보는 타당성 조사를 위한 물체 특성 계산기에서 먼저 파지물체를 다각형으로 모델링하게 되고, 손가락의 구속조건인 최소 거리와 최대 거리조건들에 의해 가능한 파지 조합들을 조사하게된다. 그리고 통과된 조합들은 우선권 1에 의해 검사된다. 우선권 1에 의한 구속조건들을 만족하는 조합들은 다시 우선권 2를 거치면서 해당 우선권의 구속조건들에 적합한 조합을 조사하게 되고 이와 같은 과정을 거쳐서 최적의 파지 구성조합을 결정한다. 이 과정을 우선권 검사(stratification of preference)라 한다. 최종적으로 선택된 조합은 파지구성기에 의해 파지 점을 결정하게 된다. 그러나 이와 같은 휴리스틱 방법은 유일한 파지 조합의 결정을 보장 할 수는 없다. 즉, 하나 이상의 조합들이 결정 될 수 있음을 말하며 이를 해결하기 위하여 동면/부활 프로세서를 이용하여 유일한 파지 조합을 결정하도록 하였다. 우선권 검사 과정은 그림 5에 주어져 있다.

5. 동면/부활(Hibernation/Wake-Up) 프로세서

우선권 프로세서에서 검사과정의 과도한 단순화와 같은 요인들에 의해 유일한 조합의 결정에 실패할 수도 있다. 동면/부활 프로세스는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법이다. 위에서 말한 바와 같이 많은 파지 조합 후보들은 우선권 검사과정을 거치면서 각각의 구속조건들에 의해 조사되어 적합한 조합들이 결정된다. 이때, 부적합한 조합들을 완전히 제거하기보다는 이를 예비 후보로 저장해서 우선권 검사에서 결정된 조합이 없을 경우 동면(hibernate)된 조합들 중에서 가장 최근에 동면된 조합을 부활(wake-up)시켜 이를 조사하여 최적의 파지 조합으로 결정하는 과정을 동면/부활 프로세스라 한다. 만약 이 과정이 실패할 경우 다음의 동면된 조합을 부활시켜 이를 조합으로 선택하게 된다. 결국 인간의 파지 특성을 기반으로 한 우선권 검사와 동면/부활 과정을 거쳐서 유일한 파지 조합이 결정되게 된다. 그림 6은 동면/부활 프로세스의 구조를 보여주고 있다.

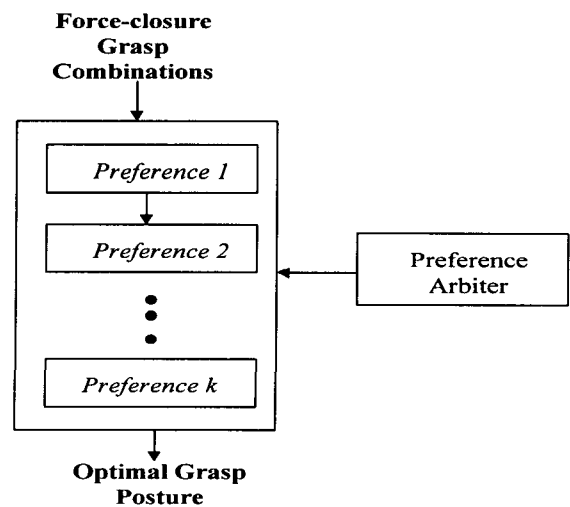


그림 5. 우선권 프로세스의 구조.

Fig. 5. Preference process structure.

이와 같은 파지 조합 선택 과정은 주어진 물체와 우선권을 만족하는 최적의 조합이 없을 경우에도 만약 근사한 파지 조합이 존재할 경우 파지 작업을 만족할 수 있는 파지 구성 조합을 결정 할 수 있음을 보장하고 있다.

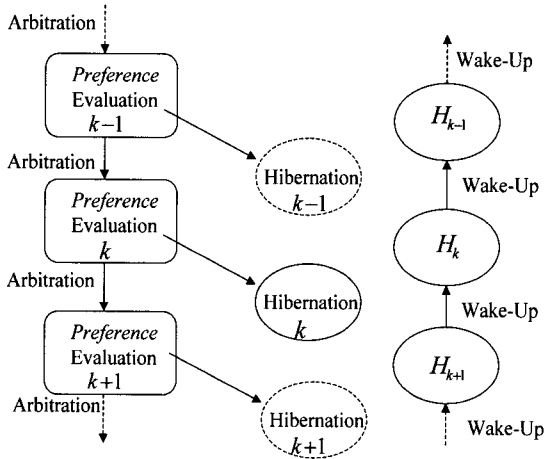


그림 6. 동면/부활 프로세스의 구조.
Fig. 6. Hibernation/wake-up process.

IV. 실시간 로봇 손 제어기의 구현

본 장에서는 앞에서 설명한 파지 계획 알고리즘을 그림 1의 인간형 로봇 손 시스템에 적용하기 위한 로봇 손 제어기의 설계와 하드웨어 및 소프트웨어의 구조를 설명하고 다양한 다각형 물체에 대한 파지 계획 결과를 보인다.

로봇 손 시스템의 동작제어는 상위수준의 동작과 하위수준의 동작으로 구분 할 수 있다. 상위 수준의 동작은 파지 물체에 대한 파지 계획과 얻어진 파지 점에 대한 각 손가락별 동작들에 대한 조정(coordination) 그리고 각 손가락들의 동기(synchronization) 및 비동기(asynchronization) 동작의 계획을 말하며 하위 수준의 동작은 각 손가락별 파지 점에 대한 기구적 해석과 관절별 자세 결정, 그리고 모터와 각종 센서들의 제어이다.

로봇 손 시스템의 하드웨어 구조는 VME-기반의 분산형 제어구조이며 소프트웨어는 계층적 구조로서 그림 7과 그림 8에 주어져 있다. 상위 수준의 연산을 위하여 68040 CPU를 탑재한 MVME162 single board computer를 CPU로 사용하였으며 힘-균형 안정도를 만족하는 파지 점들을 구하기 위한 파지 계획과 동기 및 비동기 동작제어와 같은 손가락의 협조제어를 위한 작업 관리(task supervisory), 그리고 각 관절의 온라인 제어이득 스케줄링 등과 같은 역할을 담당한다. 하위수준에서는 각 손가락별로 실험실에서 자체 제작한 VME-기반의 TMS320c30 신호처리 chip을 이용한 고속 신호 처리 프로세서가 할당되어 고속의 연산을 하게된다. 상위의 CPU에서 전달된 파지 점들에 대해서 각 손가락의 좌표계 시스템(coordinate system)으로의 변환과 관절기구학의 연산, 그리고 모터와 센서를 구동하게 된다

1. 실시간 파지 계획

그림 1의 인간형 로봇 손을 위하여 제안한 그림 3의 파

지 계획 알고리즘을 2차원 평면물체에 대한 손가락 끝 파

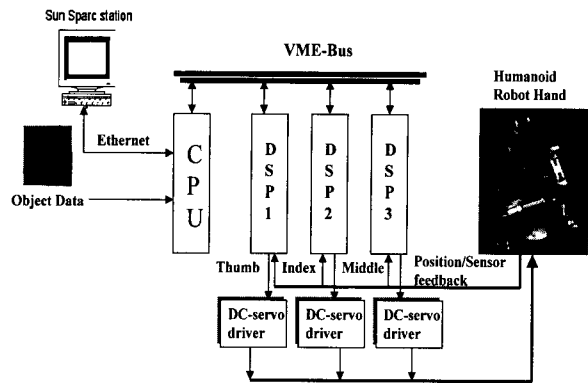


그림 7. 인간형 로봇 손 제어 시스템의 하드웨어 구조.
Fig. 7. Hardware structure for humanoid robot hand system.

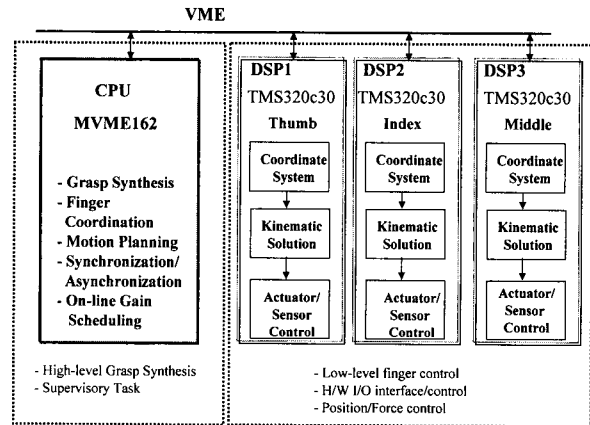


그림 8. 인간형 로봇 제어 시스템의 소프트웨어 구조.
Fig. 8. Software structure for humanoid robot hand system.

지(fingertip grasp) 방법에 대하여 실시간으로 적용하였다. 작업물체는 단순한 다각형에서부터 복잡한 모양의 다각형에 대하여 수행되었다. 주어진 다각형 물체의 파지의 적합성과 부적합성을 조사하기 위하여 적용된 구속 조건들은

- i) 힘-균형 파지 안정도,
- ii) 작업 공간,
- iii) 손가락 배치,
- iv) 손가락 끝의 크기

등이다. 파지 점의 마찰 계수(frictional coefficient)는 0.2로 고정하였고 각 손가락 끝의 크기는 1.0cm, 엄지 손가락 끝에서 검지 손가락의 끝과 중지 손가락 끝까지의 최대거리 d_{max} 는 20cm, 그리고 검지 손가락 끝에서 중지 손가락 끝까지의 최소거리 d_{min} 는 2cm로 하였다. 모든 파지 조합의 손가락 배열은 (엄지, 검지, 중지)의 순서로 표현하였다. 작업 공간 구속조건은 주어진 물체에 대한 손가락별 작업 공간을 구하는데 있어서 관절 각의 한계(limit), 파지 점에

서의 각 관절 각, 물체의 표면 모양에 따른 손가락의 배치 등에 의해 결정되는 d_{max} 와 d_{min} 을 이용하여 작업 공간을 결정하게 된다. 예를 들어, 테이블에 놓여있는 물체를 오른손으로 파지를 한다면 손가락의 배치는 그림 9와 같이 시계방향으로 엄지, 검지, 중지가 결정된다.

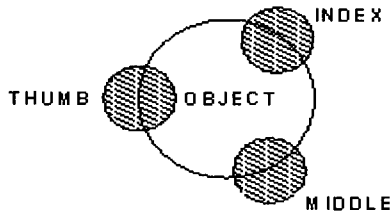


그림 9. 오른 손의 손가락 배치.
Fig. 9. Finger arrangement of right hand.

실험에서 우선권은 인간의 파지 특성을 고려하여 가능한 많은 형태의 우선권을 파지 자세 결정을 위하여 적용하였다. 적용된 우선권은 Nguyen[8] 과 Beckey[12]에서 제안한 enough-area-grasp, natural-posture-grasp, prefer-3-finger-grasp, prefer-2-finger-grasp, firm-grasp, hand-over-grasp, avoid-pinch-grasp, exclude-deviated-orientation, exclude-deviated-grasp 등을 적용하였다.

그림 10은 가로변이 세로변 보다 긴 bar형의 사각형 물체로 이 경우 3-지형-파지에 큰 가중치를 설정하였을 경우의 파지 구성의 결과를 보여주고 있으며, 그림 11은 짧은 bar형의 사각형 물체에 대하여 2-지형-파지와 enough-area-grasp에 가중치를 설정하였을 경우의 파지 구성 결과이다. 그림 12의 삼각형 물체의 경우 그림 1의 인간형 로봇 손에 대한 firm-grasp은 실패하였는데 이는 검지와 중지의 허용 각도 제한에 의해 물체의 접촉면에 수직(normal) 방향으로의 파지가 불가능했기 때문이다. 따라서, 3-지형-파지를 선택했을 경우 파지 계획 알고리즘에 의해 그림 12와 같이 파지 구성이 결정된다. 또한, 그림 13의 원형의 물체에 대한 파지 계획은 좀더 많은 시간이 소요된다. 이는 다각형으로 모델링하는 과정과 다각형의 꼭지점들의 개수에 따라 결정되며 3-지형-파지 구성 결과를 보여주고 있다. 제안한 알고리즘의 강인성을 보이기 위하여 복잡한 다각형 물체에 대해서 파지 계획 알고리즘을 적용하였다. 그림 14의 경우, 타당성 검사기과정을 거쳐 30개의 적합한 파지 조합들이 결정되었다. 이를 다시 작업 공간조건, 최소/최대 거리 조건, 2-지형과 3-지형-파지에 같은 가중치 조건 설정 등의 조사 과정을 거치면서 56회의 조사과정과 1회의 부활과정이 소요되었다. 결국, 최적의 파지 구성으로 2-지형-파지를 결정하였으며 3지형의 경우 적절한 구성이 없었다. 그림 15의 복잡한 모양의 물체의 경우, 초기에 268개의 조합들이 언어졌으며 2-지형-파지와 3-지형-파지에 같은 가중치를 부여했을 때 우선권 조정기에서 첫 번째 단계에서 45개의 조합을 결정하고 이를 다시 31개 그리고 2개를 결정한 후 최종적으로 1개의 파지

구성을 결정하였다.

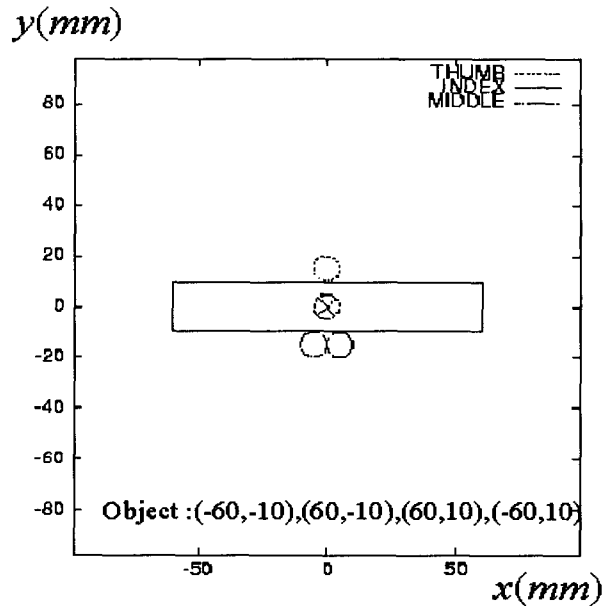


그림 10. 긴 bar형 물체의 3-지형-파지.
Fig. 10. prefer-3-finger-grasp for a long bar type rectangular object.

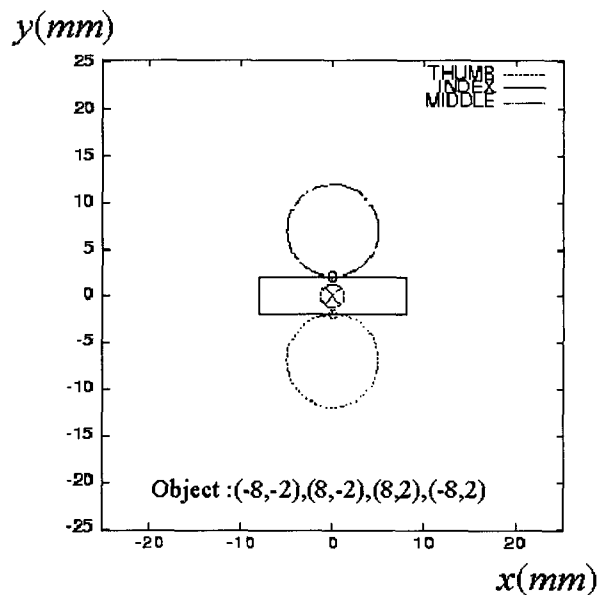


그림 11. 짧은 bar형 물체의 enough-area-grasp를 만족하는 2-지형-파지.
Fig. 11. prefer-2-finger-grasp with enough-area-grasp for a short bar type rectangular object.

2. 파지를 위한 로봇 손 동작 제어

파지계획에서 결정된 파지 구성은 3차원 공간으로 변환된 후 각 손가락별로 전달된다. 로봇 손의 동작을 제어하기 위한 동작들은 각 손가락의 직선운동과 유연한 관절운동, 위치 제어와 힘 제어, 절대 좌표계 운동과 상대 좌표계

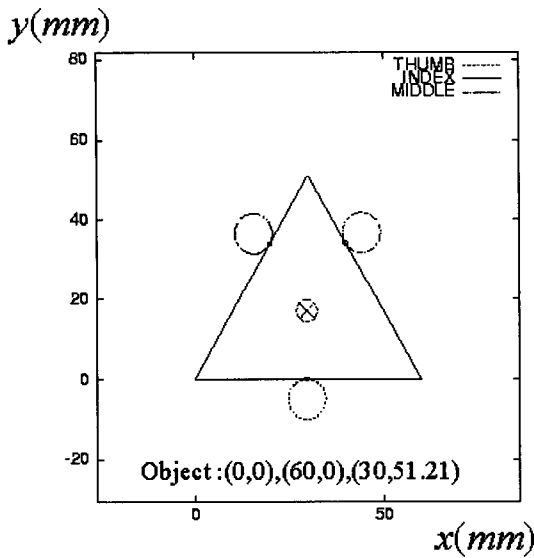


그림 12. 삼각형 물체의 3-지형-파지.
Fig. 12. prefer-3-finger-grasp with force-closure for triangle.

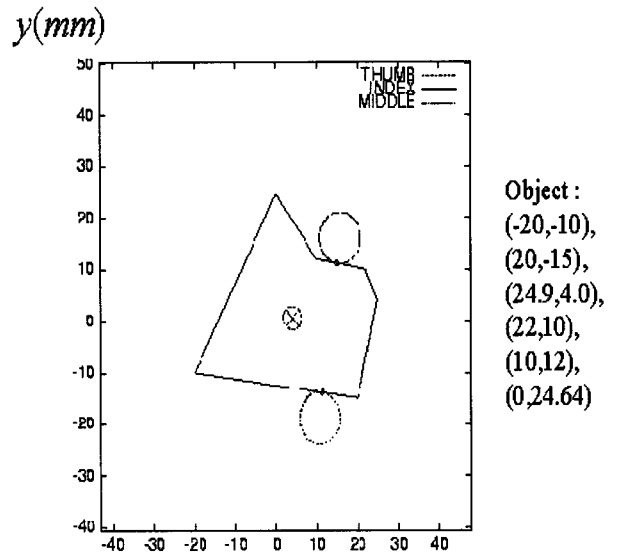


그림 14. 6각형 물체의 파지 계획 (feasible sets 30-8-8-7-3-1).
Fig. 14. The grasp posture for a complex shaped polygon with 6 vertices.

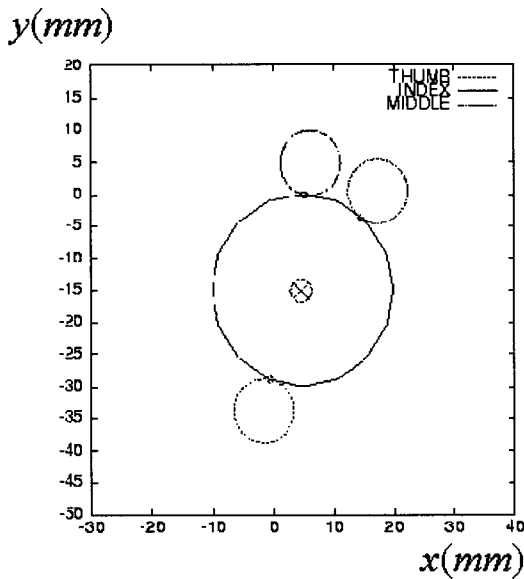


그림 13. 원형물체의 3-지형-파지.
Fig. 13. prefer-3-finger-grasp for a circular shaped object.

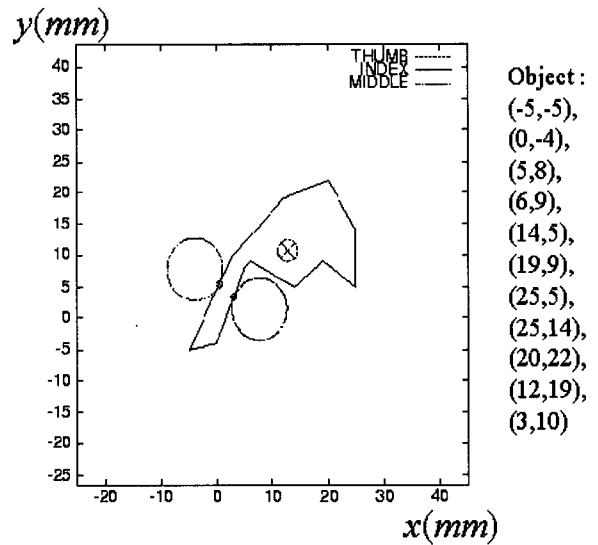


그림 15. 복잡한 다각형 물체의 파지 계획(feasible sets 268-45-31-2-1).
Fig. 15. The grasp posture for a complex shaped polygon.

운동을 모두 포함한다. 그러므로, 일반적으로 사용되는 단순한 제어 방식은 인간형 로봇 손을 제어하기에는 부적합하다. 따라서 복수-계층 (multi-layer)을 가진 다목적 (multi-purpose) 동작제어 구조를 설계하였다. 제어 시스템의 계층적 구조는 상위 수준의 로봇 손 제어기와 하위 수준의 손가락 제어기의 계층으로 구성된다. 로봇 손 제어 계층은 파지 점들에 대한 각 손가락의 동작 방식을 계획하고 파지행렬을 결정하여 손가락별 동작으로 구분한다. 손가락 제어계층은 파지 점에 대한 각 손가락별 2단계의 기구학적 연산을 수행하여 각 관절별 궤적을 생성하며 구동

기와 센서들의 궤환제어기를 구성하여 실제 각 손가락을 제어하게 된다. 제안한 제어기의 하드웨어 및 소프트웨어의 구조는 앞의 그림 7과 그림 8에서 보았다.

CPU의 로봇 손 제어기는 주어진 작업에 따른 우선권의 가중치를 설정하고 파지 계획을 수행하여 하위의 각 손가락 제어기로 파지 점들을 전달한다. 또한 각 손가락별 동기 및 비동기 동작을 결정하고 이에 따른 각종 제어기를 선택하거나 궤환이득 (gain)을 조정하는 등의 동작계획 작업을 온라인 상태에서 처리할 수 있다. DSP보드의 손가락

제어기로 부터 새로이 갱신할 데이터를 dual port memory 로 전달하며 새로운 동작 명령을 전달받는다.

이상의 실험에서 파지 계획 및 동작 제어 알고리즘들은 C-언어로 구현되었으며 실시간 운영체제인 VxWorks를 사용하였다. 실험 결과 주어진 물체의 파지 작업은 전체적으로 상위 수준의 파지 계획과 동작계획 그리고 작업 관리에 수행시간의 85%가 소요되었으며 하위수준의 손가락 제어에는 15%가 소요되었다. 예를 들어, 그림 10의 물체의 파지를 위해 상위 수준에서 1780msec, 하위 수준에서 30msec이 각각 소요되었다. 그림 16의 결과는 'ㄷ' 형 물체에 대한 3-지형 파지 실험 결과를 보여 주고 있다.

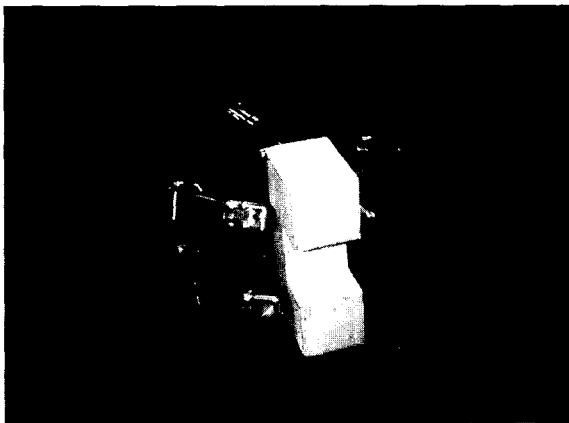


그림 16. 'ㄷ' 형 물체에 대한 3-지형 파지 실험 결과를 보여 주고 있다.

Fig. 16. Experimental result of 3-fingered grasp for a 'ㄷ'-type object.

V. 결론

본 논문에서는 기존의 로봇 손들의 단점을 보완하면서 인간 손의 형태와 기능을 갖는 로봇 손을 제안하고 실시간 로봇 손 제어시스템을 구현하였다. 이를 위하여 실시간 제어 성능을 보장할 수 있는 빠르고 효과적인 파지 계획 알고리즘을 제안하고 유연한 파지 동작 제어 구조를 실시간 제어시스템으로 구현하였다. 실시간 파지 계획 구조는 인간의 파지 특성을 기반으로 하는 우선권을 이용한 효과적 파지 조합의 조사방법을 제안하였다. 휴리스틱 조사방법인 우선권 조정 방법의 단점을 보완하고 최적의 파지 구성을 결정하기 위한 동면/부활 프로세서를 제안하였다. 제안한 파지 계획 구조는 전체적으로 최적의 파지 조합을 결정함에 있어서 연산 시간을 효과적으로 줄임으로 실시간 제어를 가능케 하였다. 또한, 분산형 제어구조의 로봇 손 제어 시스템에서의 다양한 모양의 물체에 대한 파지 계획 결과는 제안한 인간형 로봇 손 시스템의 실시간 제어 성능을 보여 주었다.

참고문헌

[1] K. B. Shimoga, "Robot grasp synthesis algorithms : a survey", *International Journal of Robotics Research*, vol. 15, no. 3, pp. 230-266, 1996.

- [2] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms", *International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.
- [3] T. Yoshikawa, "Dynamic manipulability of robot manipulators", *International Journal of Robotics Research*, vol. 2, no. 2, pp. 113-124, 1985.
- [4] E. F. R. Crossley and F. G. Umholtz, "Design of a three-fingered hand", *Journal of Mechanics and Machinery Theory*, vol. 12, pp. 85-93, 1977.
- [5] M. R. Cutkosky and I. Kao, "Computing and controlling the compliance of a robotic hand", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 2, pp. 151-165, 1989.
- [6] S. C. Jacobson, E. K. Iverson, D. F. Knutti, R. T. Johnson, and K. B. Biggers, "Design of the utah/mit dexterous hand," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1520-1532, 1986.
- [7] M. E. Rosheim, *Robot Evolution: The Development of Anthrobotics*, John Wiley & Sons Inc., pp. 218-225, 1994.
- [8] V. D. Nguyen, "Constructing force closure grasps", *International Journal of Robotics Research*, vol. 7, no. 3, pp. 3-16, 1988.
- [9] V. D. Nguyen, "Constructing stable grasps", *International Journal of Robotics Research*, vol. 8, no. 1, pp. 26-37, 1989.
- [10] J. Ponce and B. Faverjon, "On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 6, pp. 868-881, 1995.
- [11] N. S. Pollard and T. Lozano-Perez, "Grasp stability and feasibility for an arm with an articulated hand", *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp.1581-1585, 1990.
- [12] G. A. Beckey, H. Liu, R. Tomovic, and W. J. Karplus, "Knowledge-based control of grasping in robot hands using heuristics from human motor skills", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 6, pp. 709-722, 1993. [12]
- [13] Y. Jeon, et al, "An object-oriented implementation of behavior-based control architecture", *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 706-711, 1996.
- [14] E. Gat, et al, "Behavior control for robotic exploration of planetary surfaces", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 4, pp. 490-503, 1994.
- [15] J. K. Rossenblatt and C. E. Thrope, "Combining multiple goals in a behavior-based architecture", *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 136-141, 1995.
- [16] R. G. Simmons, "Structured control for autonomous robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 1, pp. 34-43, 1994.
- [17] B. Roth, "Screws, motors, and wrenches that cannot be bought in a hardware store",

International Symposium of Robotics Research, Cambridge, MA:MIT Press, pp. 679-693, 1984.

- [18] B. Faverion and J. Ponce, "On computing two-finger force-closure grasps of curved 2d objects", *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Sacramento, pp. 1581-1585, 1991.
- [19] J. Ponce, D. Stam, and Faverion, "On computing force-closure grasps of curved 2d objects", *International Journal of Robotics Research*, vol. 12, no. 3, pp. 263-273, 1993.
- [20] I. M. Chen and J. W. Burdick, "Finding antipodal point grasps on irregularly shaped objects", *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2278-2283, 1992.
- [21] Mee-Seub Lim, J. Son, S.-R. Oh, N.-Y. Jung, "Real time grasp synthesis and force-closure grasp of polygonal objects for humanoid robot hands", Proc. of ICAM'98, 1998.[1] S. Arimoto, "Linear controllable systems," *Nature*, vol. 135, pp. 18-27, July, 1990.

부록

로봇 손은 Minnac에 의해 구동되기 때문에 2-단계의 기구학을 거쳐야 Cartesian 공간에서의 움직임을 알 수 있다. 즉, Cartesian 공간에서의 1-단계 기구학과 이를 다시 구동기에 대한 2-단계 기구학을 해석하여야한다. 먼저, 1-단계로 관절 각 기준의 역 기구학(inverse kinematics)은 다음과 같다. 로봇 손의 손목을 기준으로 손가락의 관절 2와 관절 3이 기어 열로 맞물려져 있으므로 일반적인 기구학과는 약간 다른 형태의 역 기구학이 나타난다. 엄지손가락의 기구적인 구조를 살펴보면 손목부분에 고정된 작은 판(base) 위에 엄지손가락 전체가 붙어 있고 그 판의 양옆으로 내부에 Minnac 구동기가 부착되어 있는 두 개의 링크들이 판에 연결되어 있다. 좌표계를 그림17과 같이 설정하였다.

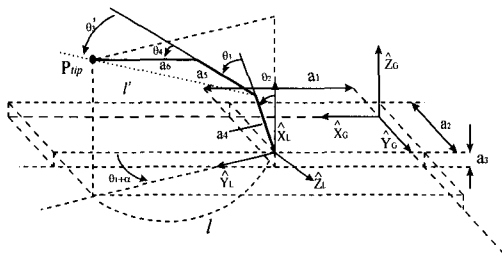


그림 17. 엄지손가락의 좌표계.
Fig. 17. Coordinate system of thumb finger.

이를 기준으로 각 관절 각(편의상 θ_i^T , $i=1, \dots, 4$ 로 한다. 여기서 첨자 T는 엄지손가락(thumb)을 의미하는 첨자이다)을 구하면

$$\theta_1^T = \text{atan2}((y_G - a_2)/l, (x_G - a_1)/l) \quad (A1)$$

$$\theta_3^T = \text{atan2}(S_3, C_3) \quad (A2)$$

여기서, $C_3 = (-a_5(a_4 + a_6) + \sqrt{F_1})/4a_4a_6$, 이며

$$F_1 = a_5^2(a_4 + a_6)^2 - 4a_4a_6(-2a_4a_6 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2 - x_l^2 - y_l^2)$$

이다. 그리고

$$S_3 = \sqrt{1 - C_3^2} \text{ 이며,}$$

$$\theta_2^T = \text{atan2}(y_l, x_l) - \text{atan2}(k_2, k_1) \quad (A3)$$

$$\theta_4^T = \theta_3^T \quad (A4)$$

이다.

(A3-A4)에서 $x_l = z_G - a_3$,

$$y_l = \sqrt{(x_G - a_1)^2 + (y_G - a_2)^2},$$

$$\theta_3^T = \text{atan}\left(\frac{a_6 \sin \theta_3^T}{a_5 + a_6 \cos \theta_3^T}\right),$$

$$k_1 = a_4 - \frac{a_6 \sin \theta_3^T}{\sin \theta_3^T} \cos(\theta_3^T + \theta_3^{T'}),$$

$$k_2 = \frac{a_6 \sin \theta_3^T}{\sin \theta_3^T} \sin(\theta_3^T + \theta_3^{T'})$$

이다.

한편, 검지 손가락의 좌표계를 그림 17과 같이 설정하고 첨자 I는 검지를 의미하며, 각 관절 각을 구하면

$$\theta_3^I = \text{atan2}(S_3, C_3) \quad (A5)$$

$$\theta_1^I = \text{atan2}((y_G - b_2)/l, (x_G - b_1)/l) \quad (A6)$$

여기서 $C_3 = (-b_5(b_4 + b_6) + \sqrt{F_2})/(4a_4a_6)$,

$$F_2 = b_5^2(b_4 + b_6)^2 - 4b_4b_6(-2b_4b_6 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2 - x_l^2 - y_l^2),$$

$$S_3 = \sqrt{1 - C_3^2}, x_l = z_G - b_3,$$

$$y_l = \sqrt{(x_G - b_1)^2 + (y_G - b_2)^2} \text{ 이며}$$

$$\theta_2^I = \text{atan2}(y_l, x_l) - \text{atan2}(k_2, k_1) \quad (A7)$$

이다. 여기서 $k_1 = b_4 + \frac{b_6 \sin \theta_3^I}{\sin \theta_3^I} \cos(\theta_3^I + \theta_3^{I'})$,

$$k_2 = \frac{b_6 \sin \theta_3^I}{\sin \theta_3^I} \sin(\theta_3^I + \theta_3^{I'}) \text{ 이며,}$$

$$\theta_3^{I'} = \text{atan}\left(\frac{b_6 \sin \theta_3^I}{b_5 + b_6 \cos \theta_3^I}\right) \text{ 이다.}$$

중지의 역 기구학은 검지의 역 기구학과 동일한 방법으로 구할 수 있으며 생략하기로 한다. 순 기구학(forward kinematic)은 손가락의 끝은 일정한 반지름을 가지는 원의 일부형태를 지니며, 끝 형상에 따른 기구학은 따로 해석하지 않기로 가정하고, 동작제어 시에 이를 고려하도록 하였다. 이 원의 중심을 마지막 링크의 중단이라 보았을 때, 손가락 끝점에 대한 순 기구학은 각 관절 각에 대한 변환행렬의 곱으로 계산되며, 행렬의 4번째 열의 처음 세 개의 원소가 각각 원점 좌표계에 대한 위치(x, y, z)를 나타낸다. Minnac의 운동 특성으로 1-단계 기구학을 통한 각 관절 각은 2-단계 기구학을 이용하여 구동기 기준의 위치 값으로 표현해야 한다. 그림 18은 2-단계 기구학을 해석한 것

이다. 그림 18에서 Minnac의 길이에 해당하는 l_L 과 l_R 은

$$l_L = \sqrt{((-L_h \sin a \sin \theta - L_b \cos \theta + L_b)^2 + (L_h \sin a \cos \theta + L_c - L_b \sin \theta)^2 + (L_h \cos a - L_h)^2)} \quad (A8)$$

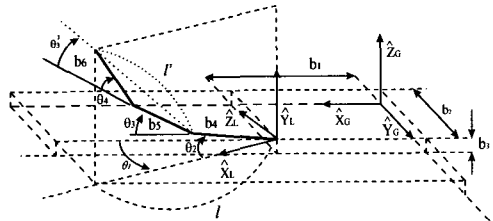


그림 18. 검지 손가락의 좌표계.

Fig. 18. Coordinate system of index finger.

$$l_R = \sqrt{((-L_h \sin a \sin \theta + L_b \cos \theta - L_b)^2 + (L_h \sin a \cos \theta + L_c + L_b \sin \theta)^2 + (L_h - L_h \cos a)^2)} \quad (A9)$$

임 미 섭

제어·자동화·시스템공학 논문지 제5권, 제6호, 참조.



손 제 범

1993년 한국과학기술원 정밀기계공학과과 졸업. 포항공과대학교 기계공학과 석사(1996), 현재 미시간 주립대학교 기계공학과 박사과정. 관심분야는 bio-mechanical engineering 및 응용, 모델링.



유 범 재

1985년 서울대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1987), 한국과학기술원 박사(1991). 1991년 ~ 1994년 (주)터보테크 근무, 1995년 ~ 현재 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 선임연구원. 관심분야는 DSP-기반 영상처리, 고속 영상추적 시스템, Head-Eye 시스템제어.



홍 예 선

1955년 4월 2일생. 1978년 2월 한국항공대학교 항공기계과 졸업(학사).1980년 2월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1986년 Aachen 공대 기계공학부 졸업(박사). 1982년 3월 ~ 1987년 2월 Aachen 공대 유공압제어연구소 연구원. 1987년 2월 ~ 2월 한국과학기술연구원 선임연구원. 1993년 3월 ~ 현재 한국과학기술연구원 기전연구부 책임연구원. 주 관심분야는 유공압제어를 응용한 보행로봇 및 로봇 손 개발.

으로 결정되어진다.

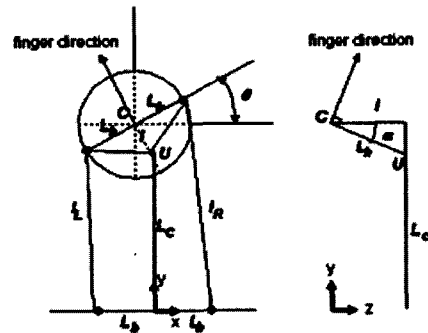
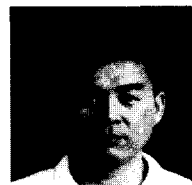


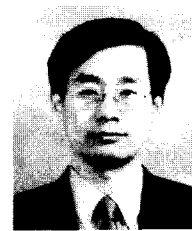
그림 19. 구동기 위치를 위한 2-단계 기구학.

Fig. 19. The 2nd-step kinematics of actuator position.



오 상 록

1980년 서울대 전자공학과과 졸업. 한국과학기술원 전기전자공학과 석사(1982), 동대학 박사(1987). 1988년~현재 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 책임연구원. 관심분야는 로봇의 지능제어, 이동 매니플레이터의 동작제어. 로봇 손 제어, 서비스 로봇제어.



이 병 주

1984년 한양대학교 기계공학과 졸업, 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1986), 동대학원 박사(1991년). 1992-1995년 한국 기술교육대학교 제어공학과 조교수, 1995년-현재 한양대학교 제어계측공학과 조교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and controls, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.