

다지 다과점은 보수로 손이 최적 저널 촉각 기관 바운더리

면주 841      4 6 3 2      2 8 6 5

1. 충남 대학교 대학원 고급양태석교수 선제교수학자 2. 충남 대학교 기계Eng. 석학교수

Joo Hyun Baek H Hong Suk Jongsoon Choi

<sup>1</sup> Graduate School, Hanyang Univ.  
<sup>2</sup> Dept. of Electronics Engg., Hanyang Univ.

ABSTRACT

An algorithm is proposed to determine the optimal contact forces of robotic hands, where the soft finger contact as well as the frictional point contact are considered. Especially, the algorithm can be efficiently applied to the case of multi-point contact by thumb-link as well as fingers.

To show the validity of the algorithm, several numerical examples are presented by employing a robot, based with three fingers, each of which has four joints.

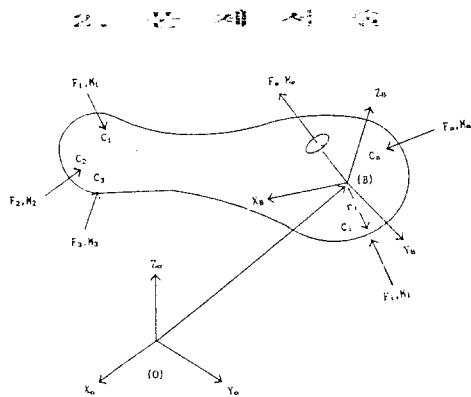
## 1. 시장

（이） 『한국』에 따르면, 세종은 신묘(辛卯)년에 청주 현경에서 보물(寶物)을 발견하였는데, 그 물체는 청주에 충사(忠寺)로 불리운 절터에 놓여 있었고, 그 물체는 대신(大臣)이 발견한 적은 또 없었다. 당시에는 그 물체를 보물이라 칭하였지만, 그 물체가 보물인지를 확정하는 데에는 그다지 확실하지 않았다. 그래서 그 물체를 보물이라 칭하는 데에는 그다지 확실하지 않았다. 그래서 그 물체를 보물이라 칭하는 데에는 그다지 확실하지 않았다. 그래서 그 물체를 보물이라 칭하는 데에는 그다지 확실하지 않았다.

이어 놓았던 풍자문을 읽어보니 그 속에  
‘나는 그대를 사랑하고 싶지 않아’라는  
뜻이 담겨 있었던 것이다. 그 문장은  
여전히 그대로 남아 있었지만, 그 뒤에  
‘나는 그대를 사랑하고 싶지 않아’라는  
뜻이 담긴 문장은 사라져버렸다.

교부하는 꽃집과 접촉接触을 통해 접촉에 대한  
도모는 물론이고, 이 접촉을 바탕으로 접촉을 확장  
하여 경쟁 경쟁을 하는 접촉의 유형 유형에 있어 그 경쟁  
하는 유형 유형 interpretation interpretation이 있다. 꽃집과 접촉  
의 유형에 접촉하는 유형은 유형을 유형화하는  
것은 하나로 내부의 internal function이다. 한편에는  
그것은 또 다른 하나로 꽃집에 학습학습을 경험할 수 있는  
접촉주의 접촉주의 멀어짐을 명시해 주는  
접촉주의 접촉주의이나 접촉주의 멀어짐은 행정 행정적인  
접촉이며, 예전에 학습학습은 전자학습학습은 행정 행정적인  
통해 통해 해석 해석하고 이해할 수 있는데 내부적으로  
개인화 개인화된 꽃집과 꽃집의 수직적 광범위로, 개인화

기준의 대부분이 손등을 주제로 제작된 물체와  
접촉부위를 준물 (Fingertip)으로만 한정하고  
있으나 [11]-[13], 일부 손의 관찰과 수사, 접촉형태  
(Contact Type)에도 그 세차이가 있었다 [14]-[18], [19]-  
[21], [22]. 그로다른 연구에서는 물체와 손의 관찰과  
의 접촉 주위를 준물 및 혼마디 (finger interlink)  
까지 확장했을 뿐 아니라 일부 혼마디 관찰 속  
접촉형태에 대해서만을 두지 않는 일반적인 형태로 접  
촉에 대한 확장 접촉력을 계산할 수 있는 효율적인  
알고리즘을 제시하였다.



（註）此句與前句「其」字，當讀爲「其」，即指「其」事，非指「其」人。又「其」字在古文裏，常有此種用法。

제 31 주 장로회

앞으로 본 장에서는 그림 1에서 와 같이 물체에 부착된 물체간 표면 거리에 대해 다룬 내용으로 한다. 각 물체간 거리에 대해서는 물체간 거리  $R$  = (Fig. 1)과 같은 거리에 대해서는 접촉 확률을 계산하는 방식이다. 그림 1과 같이 각 접촉 확률을 계산하는 방식은 물체간 접촉 확률 계산 (Contact Probability)을 계산할 때, 접촉 확률 계산 (Contact Index)을 계산하는 방식과 유사하다. Soft Finger Contact은 경우  $\alpha = 1$ 이 되고 Hard Finger Contact은 경우  $\alpha = 0$ 이 되어야 한다.

$$F_{\alpha} = \sum_{k=1}^n F_k \quad (1a)$$

$$M_0 = \sum_{i=1}^n r_i \times F_i + \sum_{i=1}^n g_i \times \mu_i \times F_i(S_i, N_i) \quad (16)$$

이 때 부호는 Torsional Friction Moment의 방향  
에 대한 선택적인 것으로 볼 수 있다.

제작자, 헌법을 행정부 행위로 표절하면 제224

$$T = \lambda^{-1} \tilde{T} \quad (2)$$

이 때,  $T$ 는 총 결과력/모멘트 벡터  $\in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ 이고  $F$ 는 접촉력 벡터  $\in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ ,  $A$ 는 아래와 같은 변환 행렬  $\in \mathbb{R}^{6 \times 3n}$ 이 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1_3 & \cdots & 1_3 \\ V_1 & V_2 & \cdots & V_n \end{bmatrix}$$

$V_i = P_i + k \mu_i Q_i$   
 $I_n: n \times n$  단위 행렬  $\in \mathbb{R}^{n \times n}$   
 $P_i: 3 \times 3$  반대칭 행렬  $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

$$P_i = \begin{bmatrix} 0 & -r_{iz} & r_{ix} \\ r_{iz} & 0 & -r_{iy} \\ -r_{ix} & r_{iy} & 0 \end{bmatrix}$$

$Q_i: 3 \times 3$  대칭 행렬  $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

$$Q_i = \begin{bmatrix} N_{ix}^2 & N_{ix}N_{iy} & N_{ix}N_{iz} \\ N_{iy}N_{ix} & N_{iy}^2 & N_{iy}N_{iz} \\ N_{iz}N_{ix} & N_{iz}N_{iy} & N_{iz}^2 \end{bmatrix}$$

우리가 원하는 것은 로봇 손이 물체를 잡고 작업을 하는데 필요한 접촉력을 구하는 것이다. 제한 조건식(2)에서 작업에 따라  $T$  벡터가 주어지고 접촉 위치에 따라  $A$ 가 결정되며 접촉력 벡터  $F$ 를 구할 수 있다. 이 때 접촉점의 수가 세개 이상이 되면 Matrix  $A$ 는  $(3n-6)$ 의 여유자유도(Redundancy)를 갖게 되어 주어지는  $T$  벡터에 대해서 무한히 많은 해를 갖게 된다. 그러므로 이 무한히 많은 해 중에서 최적화 기법을 도입하여 (2)식과 다음 장에서 정의될 추가적인 제한 조건들 하에서 접촉력이 최소화되는 최적해를 구하고자 한다.

### 3. 추가적인 제한 조건식

#### 3.1 동일 손가락 내의 접촉력을 간의 종속 관계식

손끝과 손마디가 물체와 동시에 접촉하고 있는 경우에 각 접촉점을 통해 물체에 가해지는 힘은 상호 종속 관계에 있게 된다. 전의 상 손가락 기준 좌표계(Finger Base)에서 멀리 떨어져서 가해지는 힘을 주접촉력이라 하고 반대로 손가락 기준 좌표계에 가까운 쪽에 가해지는 힘을 從접촉력이라 부르자.

먼저 한 손가락 내에 두 개 이상의 접촉이 일어날 때 각 접촉력 간의 상호 종속 관계를 규명하기 위하여 그림 2와 같이 한 손가락 내에서 두 개의 접촉점을 갖는 문제를 생각해 보자.

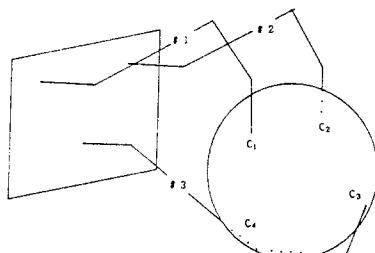


그림 2. 손마디를 이용하여 물체를 잡는 경우

그림 2는 세개의 손가락을 이용하여 구(sphere)를 잡고 있는 것으로, 손가락 # 3이 손끝과 두 번째 링크(손마디)를 동시에 이용하여 물체를 잡고 있는 것인데, 이런 손가락 형상(Grasping Configuration)의 경우 손마디까지 접촉을 하면서도 물체를 6 자유도로 마음대로 조종(Manipulation) 할 수 있으며, 또한 물체를 완전히 구속(Complete Restraint) 할 수 있게 된다 [1]. 다른 두 개의 손가락은 손끝에서만 각각 하나의 접촉을 이루어 물체를 잡고 있는 모습이다.

이 때  $F_3$  와  $F_4$ 는 같은 손가락 내에 존재하는 힘으로 서로 복집적인 토모그램에 의해서 유발될 수 없고 상호 종속관계에 있게 되는데, 하나의 토모그램 두 힘이 동시에 유발된다면 조건에서 식(3)과 같은 관계식이 유도될 수 있다.

$$F_4 = (J_4^T)^+ J_{30}^T F_3 \quad (3a)$$

이 때  $(J_4^T)^+$ 는 4 번째 접촉점의 Jacobian 반치 행렬의 가상역변환(Pseudo-Inverse) 행렬이고,  $J_{30}^T$ 는 3 번째 접촉점의 Jacobian 반치 행렬의 상한(upper) 행렬이다. 식(3a)를 간단히 나타내보면 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$F_4 = B F_3 \quad (3b)$$

이런 방법으로  $m$ 개의 從접촉력이 존재하는 파지(Grasping)의 경우  $m$ 개의 従접촉력 벡터를  $Y$  라 하고  $m$ 개의 主접촉력 벡터를  $X$  라 할 때 일반적으로 다음과 관계가 성립한다.

$$Y = B X \quad (4)$$

이 때  $B$ 는 아래와 같은 블럭 대각 행렬  $\in \mathbb{R}^{3m \times 3m}$ 이 된다.

$$B = \begin{bmatrix} \beta(n-m+1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \beta(2(n-m+2)) & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \beta_n \end{bmatrix}$$

#### 3.2 미끄럼 방지 위한 제한 조건

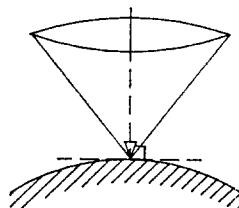


그림 3. 마찰 Cone

로봇 손이 물체를 잡았을 때 물체를 놓치지 않기 위해서는 접촉력의 방향이 마찰 Cone 내에 있어야 한다.  $\mu_i$ 를  $i$  번째 접촉점의 경마찰 계수라 하고,  $F_i$ 를  $i$  번째 접촉점에 가해지는 접촉력이라 하자. 또,  $N_i$ 를  $i$  번째 접촉점의 단위 법선 벡터라 하고  $n$ 을 전체 접촉점의 수라 하면 이 조건은 수학적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \mu_i^2}} \leq \frac{F_i^T \cdot N_i}{\| F_i \|} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

#### 3.3 Actuator 용량 초과 방지 제한 조건

파지를 실현시키기 위해서는 계산된 접촉력의 크기가 Actuator 용량 내에 있어야 한다. 이 제한 조건을 수학적으로 표현하면 아래 식(6)과 같다.

$$J^T F \leq \tau_{\max} \quad (6a)$$

$$- J^T F \leq -\tau_{\min} \quad (6b)$$

이 때,  $d$ 를 손가락의 완결 수라 하고  $l$ 을 로봇 손의 손가락 수라고 하면  $J^T$ 는  $(d, l) \times 3n$ 의 다음과 같은 블럭 대각 행렬이 된다.

$$J^T = \begin{bmatrix} J_1^T & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & J_2^T & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & J_n^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times d}$$

식 (6) 를 한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$J^T F = P \quad (7)$$

이 때  $J$  는 토모로 재한 개수 행렬이 되고,  $J^T$  는 1 번

$$J = \begin{bmatrix} J_1^T & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & J_2^T & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & J_n^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -J_1^T & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -J_2^T & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -J_n^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times d}$$

째 접촉점의 Jacobian 행렬,  $P$  는 다음과 같은 형태다.  
최소 토모로 상수 벡터가 된다.

$$P = \begin{bmatrix} T_{1\text{MAX}} \\ \vdots \\ T_{n\text{MAX}} \\ \vdots \\ T_{1\text{MIN}} \\ \vdots \\ T_{n\text{MIN}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times d}$$

## 4. 수식화

앞에서 주어진 제한 조건들을 이용하여 본 문제는 다음과 같이 수식화될 수 있다.

$$\text{Minimize } \|F\| \quad (7)$$

$$\text{Subject to } A' F = T \quad (8)$$

$$B' X = Y \quad (9)$$

$$J^T F \leq P \quad (10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \frac{F_i^T X_i}{\|F_i\|} \leq 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (11)$$

식(7)은 접촉력의 전 세그먼트의 합을 최소화하는 목적 함수이고, 식(8)은 주어지는 하중 조건과 접촉력을 간의 힘/모멘트 평형 방정식이다. 그리고 식(9)는 동일 손가락내에  $T$ , 從 접촉력이 존재할 경우 그 종속 관계를 나타낸 것이다. 식(10)은 Actuator 용량초과 방지 제한 조건, 식(11)은 미끄럼 방지 마찰 제한 조건이다.

상기 바운더리 최적화 문제를 풀면 접촉력  $F$  를 바로 구할 수 있다. 그러나 이 경우 등식 제한 조건 (Equality Constraint) 때문에 비교적 많은 반복 횟수 (Iteration) 를 요구하게 되어 비효율적인 경우가 발생할 수도 있다. 그러므로 식(4)를 식(2)에 대입하여 종속 관계식을 소거하고, 작업력 (Manipulation Force) 과 내부력 (Internal Force) 의 합으로 구성된 접촉력  $F$  중 내부력 성분만이 무한히 많은 값을 갖는다는 점을 이용하여 최종적으로 내부력만을 최적화 함으로써 계산 시간을 줄일 수 있는 새로운 수식화를 형성한다.

## 5. Solution Approaches

이제, 보다 효율적인 수식화의 형성을 위해 내부력, 작업력, 접촉력에 대한 구체적인 수식을 전개해 나가기로 한다.

### 5.1 내부력 (Internal Force)

내부력  $F_I$  는 앞에서 정의 한 바와 같이 접촉력의 방향이 마찰 Cone 내에 있도록 하는 힘으로 다음 조건을 만족하는 점이다.

$$\sum_{i=1}^n F_{ii} = 0, \quad \sum_{i=1}^n r_i \times F_{ii} = 0 \quad (12a)$$

식 (12a) 를 행렬식으로 표현하면 식 (12b) 와 같다.

$$A_1 F_I = 0 \quad (12b)$$

이 때  $A_1$  은 다음과 같은 행렬이다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} I_3 & I_3 & \cdots & I_3 \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_n \end{bmatrix}$$

손바닥을 이용해 물체를 잡는 경우, 힘의 종속 관계가 존재하게 되는데, 이 때 상호 종속 관계인 등식 제한 조건을 없애기 위하여 식(4) 를 식(12b)에 대입하면 아래와 같이 복잡 내부력  $F_I'$  의 형태로 재정형될 수 있다.

$$A_1' F_I' = 0 \quad (13)$$

이 때,  $F_I'$  는 내부력의 성질을 만족하는  $A_1'$  의 Nullspace Basis  $N$  과 크기 벡터  $\lambda$  의 양으로 다음과 식 (14) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_I' = N \cdot \lambda \quad (14)$$

상기 식에서  $N$  은  $I - (A_1')^+ (A_1')$  이 된다.

### 5.2 작업력 (Manipulation Force)

작업력  $F_m'$  는 일반적으로 마찰 제한 조건을 만족하지 못하는 힘으로 앞에서 정의한 바와 같이 작업에 필요한 힘과 모멘트를 물체에 유발시키는 힘이다. 작업력의 경우도 앞에서와 마찬가지로 식(2)에 식(4) 를 대입하여 식(2) 를 다시 형성하여 아래와 같이 표현한다.

$$T = A' F' \quad (15)$$

여기서 다시 윗 식에 독립적인 주 접촉력  $F'$  가  $F_m'$  와  $F_I'$  의 합인 관계를 이용하면 아래 식(16) 같은 작업력 표현식을 얻을 수 있다.

$$A' (F_m' + F_I') = T \quad (16a)$$

$$A' F_m' = T - A' F_I' \quad (16b)$$

$$A' F_m' = T - A_2' F_I' \quad (16c)$$

이 때,  $A_1' F_I' = 0$  이고  $A' = A_1' + A_2'$  이다. 따라서 다음과 같은 관계식이 성립될 수 있다.

$$F_m' = (A')^+ T - (A')^+ A_2' F_I' \quad (17)$$

다시 식(17)에 식(14) 를 대입하여 최종적인 작업력 표현식 (18) 을 아래와 같이 형성한다.

$$F_m' = L - M \cdot \lambda \quad (18)$$

이 때,  $L = (A')^+ T$  이고,  $M = (A')^+ A_2 N$  이다.

### 5.3 접촉력 ( Contact Force )

접촉력  $F'$ 는 작업력과 내부력의 합이므로 주접촉력을 다음과 같이 표시 된다.

$$F' = Fm' + F_i' \\ = L + E + \lambda \quad (19)$$

이 때,  $E = N - M$  이다. 상기 식 (19)에서 보는 바와 같이 접촉력  $F'$  보다 구체적으로 주접촉력  $F'$ 는  $\lambda$ 라는 변수의 항으로 표현될 수 있다. 그러므로, 앞으로  $F$  대신  $\lambda$ 를 설계변수로 수식을 전개해 나가고자 한다.

### 5.4 최종적인 수식화

(19)식을 주접촉력 단위의 행렬로 각각 나누어 표현하면  $F_i = L_i + E_i \cdot \lambda$ ,  $i=1, \dots, n-m$ 의 관계가 성립한다. 나머지  $m$ 개의 종접촉력은 식 (19)의 표현식 중 종접촉력을 제외하는 주접촉력 표현식에 식 (4)를 적용하여  $\lambda$ 를 포함하는 식으로 나타낼 수 있다. 그러므로, 앞에서 형성한 제한조건식에 각각의 표현식을 대입하여 부동식 제한조건만으로 표현되는 다음과 같은 최종적인 비선형 최적화 문제를 형성할 수 있다.

$$\text{Minimize} \quad \| \lambda \| \quad (20)$$

Subject to

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \leq \frac{(L_i + E_i \cdot \lambda) \cdot N_i}{\| L_i + E_i \cdot \lambda \|} \quad (21a)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \leq \frac{B_i(L_i + E_i \cdot \lambda) \cdot N_i}{\| B_i(L_i + E_i \cdot \lambda) \|} \quad (21b)$$

$$J \cdot \lambda \leq E \quad (22)$$

$$\text{where } J = \begin{bmatrix} J & E \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} P - J \cdot L \end{bmatrix}$$

식 (20)은 접촉력의 전체 크기를 지배하는 설계변수  $\lambda$ 의 크기를 최소화하는 것으로, 접촉력의 전체 크기가 커지면 커질수록 작은 위치모자에도 물체 무게중심에 대하여 커다란 모멘트를 유발하여 작업의 전체 안정성이 떨어지게 된다[3]. 그리고, 식 (21a)와 식 (21b)는 마찰 제한조건식으로 주접촉력에 대한 마찰 제한조건과 From 접촉력의 마찰 제한조건을 나타내고 식 (22)은 Actuator 용량 제한조건식이 된다.

### 5.5 최적 접촉력 결정 순서

이제 최적 접촉력은 다음과 같은 과정을 통하여 결정되어 진다.

순서 1: 로봇 손의 손가락 수, 손가락당 관절수와 접촉형태 등 로봇 손의 제원 입력

순서 2: 작업에 따른 각 접촉점의 위치벡터, 물체와 두개 이상의 접촉점을 갖는 손가락의 위치 행상 및 작업 하중조건 입력

순서 3: 설계변수  $\lambda$ 의 값을 최적화 방법으로 결정

순서 4: 구해진  $\lambda$ 를 이용하여 주접촉력의 결정

순서 5: 구해진 접촉력 중 From 접촉력을 지배하는 주 접촉력에 식 (4)의 관계를 적용하여 From 접촉력을 결정

순서 4와 5에서 얻어진 주, From 접촉력들이 최종적인 최적 접촉력이 된다.

## 6. 시뮬레이션 결과

제안된 알고리즘의 유효성을 입증하기 위하여 그림 2의 경우와 같은 문제를 다루어 보자. 그림 2와 같은 작업을 하기 위한 기타 세원들은 표 1, 2에 나타나 있다.

표 1. 로봇 손의 제원

손가락의 수	손가락당 관절 수	접촉형태
3 개	4 개	마찰을 갖는 접촉
각 손가락의 링크 길이 (cm)		
# 0: 2.8	# 1: 6.2	# 2: 3.6
# 3: 2.4		

표 2. 작업 정보

물체의 형태	구 (Sphere)
물체의 질량	M = 100 g
물체의 크기	반경 3 cm
마찰 계수	$\mu_i = 0.4$ ( $i = 1, \dots, 4$ )
접촉점의 수	n = 4
종속관계의 수	m = 1
접촉 형태	마찰을 갖는 접촉, R = 0

예제 1: 표 1, 2의 정보를 이용하여 다음과 같은 경우에 대한 최적 접촉력을 구해 보자.

접촉점의 위치 벡터 (Unit: cm)	$C_1 (-1 1.5 2.3979)$ $C_2 (-1 -1.5 2.3979)$ $C_3 (2.65 0 -1.2)$ $C_4 (-2 0 -2.25)$
두개 이상의 접촉점을 갖는 손가락의 관절각 (Unit: Degree)	$\theta_1: 0^\circ$ $\theta_2: -43.34^\circ$ $\theta_3: 32.17^\circ$ $\theta_4: 90^\circ$
주어진 하중조건 (Unit: dyne)	$F_e = [0 0 98000 0 0 0]$

본 예제를 풀기 위한 최적화 기법으로는 비선형 제한조건 문제를 푸는데 효과적인 ALM (Augmented Lagrange Multiplier) 방법을 이용한 소프트웨어인 IDOL (Interactive Design Optimization Library) Ver. 1.5를 사용하였는데 IBM 386 Board에서 Elaps Time이 약 8 초 걸렸으며 두번 반복(Iteration) 만에 최적해를 구하였다. 본 알고리즘을 통해 얻어진 결과는 다음 표와 같다.

### 표 3 시뮬레이션의 결과

( Unit : dyne )

작업력 ( Manipulation Forces )			
$F_{m1} = (-2446.20 \quad 0.00 \quad 27212.30)$			
$F_{m2} = (-2446.20 \quad 0.00 \quad 27212.30)$			
$F_{m3} = (-15396.12 \quad 0.00 \quad 22079.58)$			
$F_{m4} = (20288.52 \quad 0.00 \quad 21495.80)$			
내부력 ( Internal Forces )			
$F_{i1} = (-35295.63 \quad -27216.85 \quad -56786.06)$			
$F_{i2} = (-35295.63 \quad 27216.85 \quad -56786.06)$			
$F_{i3} = (-112007.36 \quad 0.00 \quad 69691.50)$			
$F_{i4} = (41416.12 \quad 0.00 \quad 43880.62)$			
접촉력 ( Contact Forces )			
$F_1 = (32849.43 \quad -27216.85 \quad -29573.76)$			
$F_2 = (32849.43 \quad 27216.85 \quad -29573.76)$			
$F_3 = (-127403.51 \quad 0.00 \quad 91771.09)$			
$F_4 = (61704.65 \quad 0.00 \quad 65376.43)$			

## 7. 결론

본 연구에서는 다섯 마디손을 로봇 손의 최적 접촉력 결정 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘은 로봇이 손가락의 무른으로 물체를 잡고 작업하는 경우에도 적용할 수 있으며, 또한 물체와 로봇 손과의 접촉형태가 마찰을 갖는 점접촉의 경우뿐만 아니라 Soft Finger Contact의 경우에도 적용 가능한 일반적인 알고리즘이 된다. 본 알고리즘을 통해 앞으로 보다 복잡하고, 다양한 종류의 작업을 로봇 손이 성공적으로 수행할 수 있을 것으로 사료된다. 앞으로 실시간 계산(Real Time Computation)이 가능화되는 향후 위하여 계산량을 줄일 수 있는 방법이 모색되어야 하며, 또한 선형태(Line Type)나 평면 형태(Planar Type) 등의 접촉까지도 적용할 수 있는 알고리즘이 개발되어야 할 것이다.

## 8. 참고 문헌

- [1] J. K. Salisbury and B. Roth, "Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands," Journal of Mechanical, Transmissions and Automation in Design, Vol.105, pp.35-41, 1983.
- [2] J. Hollerbach and S. Narasimhan, "Finger Force Computation without the Grip Jacobian," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.871-875, 1988.
- [3] Y. Nakamura, K. Nagai, and T. Yoshikawa, "Mechanics of Coordinative Manipulation by Multiple Robotic Mechanisms," in Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp.991-998, Raleigh, NC, March 1987
- [4] T. Yoshikawa and K. Nagai, "Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multi-Fingered Hands," Proc. IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp.1998-2004, 1987.
- [5] J. Kerr and B. Roth, "Analysis of Multi-Fingered Hands," International J. of Robotics Research, pp.3-17, 1986.
- [6] T. Yoshikawa and K. Nagai, "Evaluation Determination of Grasping Forces For Multi-Fingered Hands," Proc. IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp.245-248, 1988.

- [7] V. Kumar and K. J. Waldron, "Force Distribution in closed Kinematic Chains," IEEE J. Robotic and Automation, Vol 4, No. 6, pp. 657-664, Dec. 1988.
- [8] Z. Ji and B. Roth, "Direct Computation of Grasping Force for Three-Fingertip Prehension Grasps," J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design Vol.110, pp.405-413, Dec. 1988.
- [9] V. Kumar and K. J. Waldron, "Sub-Optimal Algorithms for Force Distribution in Multi-Fingered Gripper," IEEE J. Robotic and Automation, Vol. 5, No. 4, pp. 491-498, 1989.
- [10] Young C. Park and Gregory P. Starr, "Finger Force Computation for Manipulation of An Object by A Multi-Fingered Robot Hand," Pro. IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp.930-935, 1989.
- [11] J. Demmel and G. Lafferriere, "Optimal Three Finger Grasps," Pro. IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp.936-942, 1989.
- [12] Fan-Tien Cheng and David E. Orin, "Efficient Algorithm for Optimal Force Distribution in Multipie-Chain Robotic Systems -The compact Dual Lp Method," Pro. IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp.943-950, 1989.
- [13] G. Strang, Linear Algebra and Its Application, New York : Academic Press, second edition, 1980.
- [14] Garret N. Vanderplaats, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications, McGraw-Hill Book Company, 1984
- [15] Matthew T. Mason and J. Kenneth Salisbury Jr., Robot Hands and the Mechanics of Manipulation, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England