

< 논문 >

운동학에 기초한 로봇 손가락의 관절구조 평가 및 설계

황 창 순*

(2004년 3월 9일 접수, 2004년 8월 23일 심사완료)

Evaluation and Design for Joint Configurations Based on Kinematic Analysis

Chang-Soon Hwang

Key Words: Robotic Finger(로봇 손가락), Fingertip Surface Manipulation(손가락 표면 조작), Inverse Kinematics(역 운동학), Finger Joint Configuration(손가락 관절구조), Manipulation Workspace(조작공간)

Abstract

This paper presents an evaluation of joint configurations of a robotic finger based on kinematic analysis. The evaluation is based on an assumption that the current control methods for the fingers require that the contact state specified by the motion planner be maintained during manipulation. Various finger-joint configurations have been evaluated for different contact motions. In the kinematic analysis, the surface of the manipulated object was represented by B-spline surface and the surface of the finger was represented by cylinders and a half ellipsoid. Three types of contact motion, namely, 1) pure rolling, 2) twist-rolling, and 3) slide-twist-rolling are assumed in this analysis. The finger-joint configuration best suited for manipulative motion is determined by the dimension of manipulation workspace. The evaluation has shown that the human-like fingers are suitable for maintaining twist-rolling and slide-twist-rolling but not for pure rolling. A finger with roll joint at its fingertip link, which is different from human fingers, proved to be better for pure rolling motion because it can accommodate sideways motions of the object. Several kinds of useful finger-joint configurations suited for manipulating objects by fingertip surface are proposed.

1. 서 론

인간의 손가락이나 앞으로 실현될 다기능의 범용적인 로봇 손의 손가락은 물건을 파지(grasping)하는 경우에 손가락 표면(fingertip surface)을 널리 사용한다. 그리고 물건을 조작(manipulation)하는 경우에 손가락 표면을 적극적으로 사용하고 손가락과 물체의 접촉점도 손가락 및 물체의 표면 위를 이동한다(Fig. 1). 따라서 인간의 손과 같이 정밀하고 다양한 작

업이 가능한 범용적인 로봇 손을 개발하기 위해서 손가락 표면을 적극적으로 이용하는 물체의 파지 및 조작을 고찰할 필요가 있다. Montana⁽¹⁾는 접촉 방정식(contact equations)의 개념을 도입하여 상대적 접촉운동을 속도의 관계로 표현했다. Cherif 등⁽²⁾은 굴림(rolling) 및 미끄러짐(sliding) 접촉을 이용하여 매끄럽고 볼록한 다면 물체(convex object)의 방향을 준정적으로 재조정하기 위한 동작계획에 관해 말했다. Kiss 등⁽³⁾은 3차원의 강체를 항시적인 굴림 접촉으로 조작하기 위한 방법에 관해 논했다. 그리고 굴림 및 미끄러짐 접촉을 이용하여 물체를 조작하기 위한 역학과 운동제어를 논한 연구도

* 회원, 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터
E-mail : cshwang@kist.re.kr
TEL : (02)958-6812 FAX : (02)958-5629

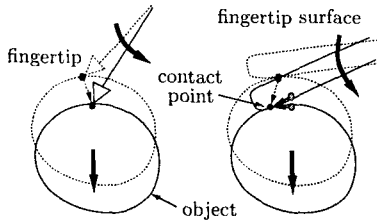


Fig. 1 Manipulation by fingertip and fingertip surface

있다.(4~7)

물체를 적절하게 파지하여 조작하기 위한 손가락의 관절구조 및 자세, 손가락 끝 부분의 재질 등을 고찰한 연구도 있다. Hirzinger 등⁽⁸⁾은 정밀 파지(precision-grasp) 및 강력 파지(power-grasp)의 작업성능을 향상하기 위해 가변적인 가상물체의 파지에 기초하여 DLR's Hand II를 제작했다. Carrozza 등⁽⁹⁾은 인간의 손과 매우 유사한 크기와 움직임을 갖는 로봇 손을 개발하기 위해 인간 손의 기하학적 및 운동학적 특징, 특히 엄지, 검지, 중지의 크기와 운동범위를 고찰했고, 3지 의수(prosthetic hand)의 설계에 응용했다. Xydas 등⁽¹⁰⁾은 접촉운동의 상태에 따른 유연한 손가락 끝 부분의 재질 및 마찰력에 대해 말했다. Erkmen 등⁽¹¹⁾은 작업내용의 조작성과 안정성을 고려한 효율성을 유전적 알고리즘으로 판단하고, 대상 물체의 파지에 대한 초기의 손가락 자세를 결정하는 기준을 제시했다.

저자가 소속했던 연구실에서는 부분적으로 언급된 로봇 손가락 표면에 의한 물체의 파지 및 조작에 관한 문제를 통일적으로 논하기 위해서 파지 및 조작에 관한 운동학 및 역학적 문제의 분류, 운동의 유지에 필요한 손가락의 수와 자유도 등과 같은 일반론을 정리했다.⁽¹²⁾ 이를 바탕으로 직선, 다면체, 원통, 구 등과 같이 비교적 간단한 형상의 물체와 손가락 표면의 접촉문제를 해석했으며,⁽¹²⁾ 복잡한 형상 물체를 취급하기 위해서 다면체 근사⁽¹³⁾ 및 B-스플라인 곡면⁽¹⁴⁾으로 표현된 물체와 손가락 표면의 접촉문제를 해석했다. 그리고 파지 및 조작에 관한 문제를 해석하는 시뮬레이션 시스템을 개발해 왔다. 하지만 조작운동에서 손가락의 관절구조 및 관절각의 변화, 물체의 위치 및 방향의 변화 등

의 상호관계에 대해 고찰하지 않았다.

인간의 손가락으로 물체를 조작하는 동작은 굴림, 미끄러짐, 비틀림(twisting) 등의 상대운동을 복잡하게 동반하며 똑같은 운동을 계산으로 구하는 것은 쉽지 않다. 로봇 손의 손가락 관절을 제어하는 관점에서 고찰하면 관절각과 구동 토크를 유일하게 결정할 수 있는 방식이 적합하다. 따라서 물체의 조작을 위한 손가락의 관절구조는 반드시 인간과 유사할 필요는 없으며 로봇 손가락은 제어에 적합한 관절구조로 선택하고 설계되어야 한다.

본 논문의 목적은 손가락 표면과 물체가 상대적 접촉운동의 조건을 유지하면서 움직일 수 있는 동작범위를 다양한 관절구조의 손가락과 대상 물체의 운동에 대해서 해석하고 평가하는 것이다. 즉 손가락 관절구조의 설계문제를 고찰하기 위해 운동학에 근거한 방법을 이용하여 다양한 관절구조의 손가락을 평가하고 판단하는 것이다. 로봇 손만으로 수행할 수 있는 작업에는 한계가 있으므로, 로봇 손으로 도구를 사용한 작업(절단, 구멍 뚫기, 집가락 이용 등)을 실현할 필요가 있다. 인간이 도구를 사용하는 것과 같이 로봇 손으로 도구지향적인 정밀하고 복잡한 작업을 수행하기 위해서 손가락 표면과 물체의 상대적 접촉운동을 적극적으로 이용하지 않으면 안되며, 본 논문의 결과를 통해서 조작능력이 우수한 관절구조의 로봇 손을 선택할 수 있게 된다.

본 논문에서 물체의 조작은 준정적인(quasi-static) 운동이 되도록 수행하고, 손가락과 물체의 접촉은 언제나 손가락 끝 부분의 링크 위의 1점에서 일어나고, 조작하는 도중에 손가락과 물체는 떨어지지 않고, 모든 관절은 독립적으로 구동되며, 물체의 형상 및 크기 그리고 조작의 시작점에서 물체의 위치 및 방향은 사전에 주어지는 것으로 가정한다.

2. 손가락 표면에 의한 조작의 역 운동학

Fig. 2와 같이 접촉을 동반하는 2 물체의 상대운동은 다음과 같이 단순하게 분류할 수 있다.^(12, 15)

- 1) Pure rolling 운동
- 2) Twist-rolling 운동

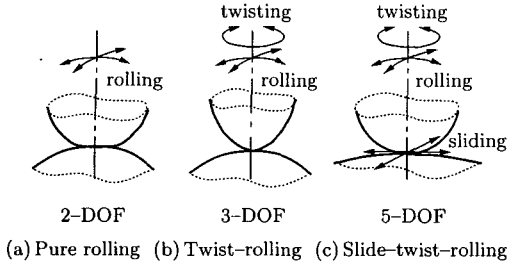


Fig. 2 Three types of contact motion

3) Slide-twist-rolling 운동

각각의 상대적 접촉운동을 만족하는 조건과 조작운동을 유지하기 위해 필요한 손가락의 수와 자유도가 존재한다.⁽¹²⁾

물체 조작의 역 운동학은 물체의 위치 및 방향의 미소변위(δr_w , $\delta \Theta_w$)에서 손가락 관절각의 미소변위(δq)를 구하는 것이다. 여기서 운동하기 전의 접촉점의 좌표와 관절각, 물체의 위치 및 방향 등은 파지의 역 운동학에서 알고 있는 것으로 한다.⁽¹²⁾ 접촉점에서 2 물체의 속도 및 법선 중심의 회전속도가 같아야 한다는 Pure rolling 운동의 조건에서

$$\delta q = \begin{pmatrix} J_a \\ n^T J_s \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \delta r_w + \delta \Theta_w \times (r_c - r_w) \\ (\delta \Theta_w \cdot n) \end{pmatrix} \quad (1)$$

인 $\delta q \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ 를 얻는다. 그리고, 접촉점에서 2 물체의 속도가 같아야 한다는 Twist-rolling 운동의 조건에서

$$\delta q = J_a^{-1} (\delta r_w + \delta \Theta_w \times (r_c - r_w)) \quad (2)$$

인 $\delta q \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 를 얻는다. 그리고, 접촉점에서 2 물체의 법선 방향의 속도가 같아야 한다는 Slide-twist-rolling 운동의 조건에서

$$\delta q = \frac{((\delta r_w + \delta \Theta_w \times (r_c - r_w)) \cdot n)}{(J_a \cdot n)} \quad (3)$$

인 $\delta q \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ 를 얻는다.⁽¹²⁾ 여기서 Fig. 3과 같이 r_c 는 손가락과 물체의 접촉점 좌표, r_w 는 물체의 대표점 좌표, n 은 손가락의 법선 벡터,

$$J_s = (s_1, s_2, \dots, s_m) \quad (4)$$

$$J_a = (s_1 \times (r_c - r_1), \dots, s_m \times (r_c - r_f)) \quad (5)$$

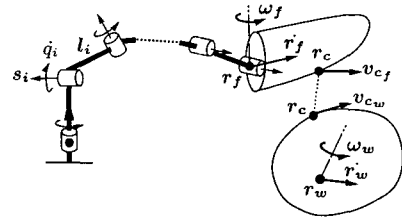


Fig. 3 Velocities of contact points on finger and object

s_i 는 제 i 관절 회전축의 방향 벡터, r_i 는 제 i 손가락 링크의 기준점, r_f 는 물체와 접촉하고 있는 손가락 링크의 기준점, m 은 손가락의 자유도(관절의 수), $i = 1, 2, \dots, m$ 이다.

식 (1), (2), (3)을 고찰하면 물체의 위치 및 방향의 미소변위(δr_w , $\delta \Theta_w$)에서 손가락 관절각의 미소변위(δq)를 구하는 조작의 역 운동학은

- 1) 물체의 형상, 위치 및 방향(r_c , r_w)
- 2) 물체의 위치 및 방향의 변화(δr_w , $\delta \Theta_w$)
- 3) 손가락의 관절구조(n , J_s , J_a)

에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 손가락과 물체의 접촉이 물체의 일부분에서 일어나므로 물체의 형상에 의한 영향보다 물체의 위치 및 방향, 물체의 위치 및 방향의 변화, 손가락의 관절구조에 의한 영향이 더욱 크다. 주어진 관절구조의 손가락으로 물체를 어디까지 조작할 수 있는가, 즉 주어진 상대적 접촉운동의 조건을 유지하면서 움직일 수 있는 손가락의 동작공간(manipulation workspace)을 종합적으로 비교하여 평가하도록 한다.

3. 물체와 손가락의 형상

대상 물체는 Fig. 4와 같이 B-스플라인 곡면으로 표현된 폐곡면 모양의 물체이고, 전체가 매끈한 형상이다. 그리고 로봇 손가락은 Fig. 4와 같이 인간의 손가락과 닮은 형상이고, 손가락의 제1, 2 링크는 원통 모양, 끝 부분인 제3 링크는 원통과 타원체가 반반씩 연결된 모양이다. 손가락의 모든 관절은 회전관절이고 독립적으로 구동되며, 손가락의 자유도는 Pure rolling 운동, Twist-rolling 운동, Slide-twist-rolling 운동이 가능하도록 4 자유도이다.⁽¹²⁾ 그리고 상대적

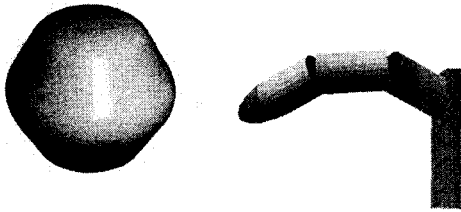


Fig. 4 Shape of object and finger

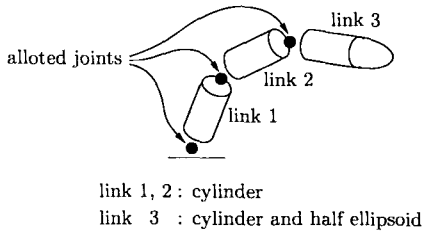


Fig. 5 Joint configurations

Table 1 Types of finger

(a) Pure rolling			
Type	link 1	Base of link 2	link 3
2-1-1	q_1, q_2	q_3	q_4
1-2-1	q_1	q_2, q_3	q_4
1-1-2	q_1	q_2	q_3, q_4
(b) Twist-rolling			
Type	link 1	Base of link 2	link 3
1-1-1	q_2	q_3	q_4
2-1	.	q_2, q_3	q_4
1-2	.	q_2	q_3, q_4

접촉운동의 종류에 따라 사용하는 관절을 선택하고, 필요최소한의 관절을 사용함으로써 접촉운동을 유일하게 결정할 수 있도록 한다.

4. 손가락 관절구조의 분류

회전관절의 배치와 각 관절의 중심 회전축 방향의 조합에 따라서 다양한 관절구조의 손가락을 생각할 수 있다(Fig. 5). Pure rolling 운동은 상대 자유도가 굴림의 2 자유도이므로 물체의 6 자유도 운동을 위해 손가락은 4 자유도를 가질 필요가 있고,⁽¹²⁾ 관절의 배치에 따라 Table 1(a)와 같이 Type 2-1-1, Type 1-2-1,

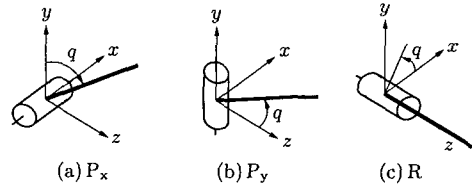


Fig. 6 Three types of revolute joint

Table 2 Types of finger joint

1-DOF	R	P_x	P_y
2-DOF	$P_x R$ $P_y R$	$R P_x$ $P_y P_x$	$R P_y$ $P_x P_y$

Type 1-1-2의 3 종류로 분류된다. Twist-rolling 운동은 상대 자유도가 비틀림의 1 자유도, 굴림의 2 자유도인 합계 3 자유도이므로 손가락은 3 자유도를 가질 필요가 있고,⁽¹²⁾ 관절의 배치에 따라 Table 1(b)와 같이 Type 1-1-1, Type 2-1, Type 1-2의 3 종류로 분류된다. 여기서 Type 2-1-1은 제1 손가락 링크의 밑 부분에 2 자유도(q_1, q_2), 제2 손가락 링크의 밑 부분에 1 자유도(q_3), 제3 손가락 링크의 밑 부분에 1 자유도(q_4)가 배치되어 있는 것을 의미하고, Type 1-1-1은 제1 링크의 밑 부분에 1 자유도(q_2), 제2 링크의 밑 부분에 1 자유도(q_3), 제3 링크의 밑 부분에 1 자유도(q_4)가 배치되어 있는 것, 즉 Type 2-1-1의 제1 관절을 고정하는 것을 의미한다.

회전관절은 Fig. 6과 같이 중심 회전축의 방향에 의해 P_x, P_y, R 의 3 종류로 분류된다. P_x 의 중심 회전축은 x 축, P_y 의 중심 회전축은 y 축, R 의 중심 회전축은 z 축이다. 초기상태의 손가락이 일직선으로 뻗어 있다고 가정하고, 손가락 전체를 물체 방향으로 굽히기 위해 제1 링크의 밑부분에 적어도 하나의 P_x 가 있도록 한다. 그리고 2 자유도 관절의 경우에 $P_x P_x, P_y P_y, R R$ 과 같이 같은 종류의 관절을 나열해도 의미가 없다. 이와 같은 배치기준에서 Table 2와 같이 3 종류의 1 자유도 관절과 6 종류의 2 자유도 관절을 생각할 수 있다.

4.1 Pure rolling 운동의 손가락 분류

Pure rolling 운동에서 손가락은 4 자유도이고, 관절의 배치기준에서 36 종류의 Type 2-1-1, 18 종류의 Type 1-2-1, 18 종류의 Type 1-1-2인 합계 72 종류의 손가락 관절구조를 생각할 수 있

Table 3 Combinations of joints for pure rolling

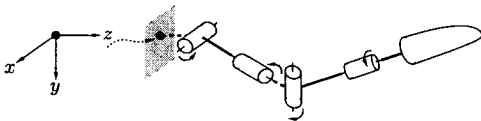
Type 2-1-1 (36 kinds)		
$P_xR - R - R$	$P_xR - R - P_x$	$P_xR - R - P_y$
$P_xR - P_x - R$	$P_xR - P_x - P_x$	$P_xR - P_x - P_y$
$P_xR - P_y - R$	$P_xR - P_y - P_x$	$P_xR - P_y - P_y$
$R P_x - R - R$	$R P_x - R - P_x$	$R P_x - R - P_y$
$R P_x - P_x - R$	$R P_x - P_x - P_x$	$R P_x - P_x - P_y$
$R P_x - P_y - R$	$R P_x - P_y - P_x$	$R P_x - P_y - P_y$
$P_yP_x - R - R$	$P_yP_x - R - P_x$	$P_yP_x - R - P_y$
$P_yP_x - P_x - R$	$P_yP_x - P_x - P_x$	$P_yP_x - P_x - P_y$
$P_yP_x - P_y - R$	$P_yP_x - P_y - P_x$	$P_yP_x - P_y - P_y$
$P_xP_y - R - R$	$P_xP_y - R - P_x$	$P_xP_y - R - P_y$
$P_xP_y - P_x - R$	$P_xP_y - P_x - P_x$	$P_xP_y - P_x - P_y$
$P_xP_y - P_y - R$	$P_xP_y - P_y - P_x$	$P_xP_y - P_y - P_y$

Type 1-2-1 (18 kinds)

$P_x - P_xR - R$	$P_x - P_xR - P_x$	$P_x - P_xR - P_y$
$P_x - P_yR - R$	$P_x - P_yR - P_x$	$P_x - P_yR - P_y$
$P_x - R P_x - R$	$P_x - R P_x - P_x$	$P_x - R P_x - P_y$
$P_x - P_yP_x - R$	$P_x - P_yP_x - P_x$	$P_x - P_yP_x - P_y$
$P_x - R P_y - R$	$P_x - R P_y - P_x$	$P_x - R P_y - P_y$
$P_x - P_xP_y - R$	$P_x - P_xP_y - P_x$	$P_x - P_xP_y - P_y$

Type 1-1-2 (18 kinds)

$P_x - R - P_xR$	$P_x - R - R P_x$	$P_x - R - R P_y$
$P_x - P_x - P_xR$	$P_x - P_x - R P_x$	$P_x - P_x - R P_y$
$P_x - P_y - P_xR$	$P_x - P_y - R P_x$	$P_x - P_y - R P_y$
$P_x - R - P_yR$	$P_x - R - P_yP_x$	$P_x - R - P_xP_y$
$P_x - P_x - P_yR$	$P_x - P_x - P_yP_x$	$P_x - P_x - P_xP_y$
$P_x - P_y - P_yR$	$P_x - P_y - P_yP_x$	$P_x - P_y - P_xP_y$



$P_x - R P_y - R$ (Type 1-2-1)

Fig. 7 Example of 4 degrees-of-freedom finger

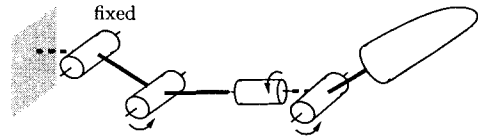
다(Table 3). 그리고 Fig. 7은 4 자유도 손가락의 예이다.

4.2 Twist-rolling 운동의 손가락 분류

Twist-rolling 운동에서 손가락은 3 자유도이고, 관절의 배치기준에서 9 종류의 Type 1-1-1, 12 종류의 Type 2-1, 6 종류의 Type 1-2인 합계 27 종류의 손가락 관절구조를 생각할 수 있다(Table 4). 그리고 Fig 8은 3 자유도 손가락의 예이다.

Table 4 Combinations of joints for twist-rolling

Type 1-1-1 (9 kinds)		
$P_x - R - R$	$P_x - R - P_x$	$P_x - R - P_y$
$P_x - P_x - R$	$P_x - P_x - P_x$	$P_x - P_x - P_y$
$P_x - P_y - R$	$P_x - P_y - P_x$	$P_x - P_y - P_y$
Type 2-1 (12 kinds)		
$P_xR - R$	$P_xR - P_x$	$P_xR - P_y$
$R P_x - R$	$R P_x - P_x$	$R P_x - P_y$
$P_yP_x - R$	$P_yP_x - P_x$	$P_yP_x - P_y$
$P_xP_y - R$	$P_xP_y - P_x$	$P_xP_y - P_y$
Type 1-2 (6 kinds)		
$P_x - P_xR$	$P_x - R P_x$	$P_x - R P_y$
$P_x - P_yR$	$P_x - P_yP_x$	$P_x - P_xP_y$



$P_x - R P_x$ (Type 1-2)

Fig. 8 Example of 3 degrees-of-freedom finger

Table 5 Specifications of finger

	Link 1, 2		Link 3
Shape	cylinder	cylinder	ellipsoid
Dimensions	$l=35$ [mm] $r=10$ [mm]	$l=25$ [mm] $r=10$ [mm]	$r_1=25$ [mm] $r_2=10$ [mm]

5. 시뮬레이션의 결과 및 고찰

5.1 손가락 관절구조의 평가방법

조작의 시뮬레이션에서 단위는 거리가 밀리미터 [mm], 각도가 도 [deg]이다. 손가락의 크기는 Table 5와 같다. 여기서 l 은 원통의 길이, r 은 원통의 반지름, r_1 은 타원체의 장축의 반지름, r_2 는 타원체의 단축의 반지름이다. 4개의 회전관절 중에서 Pure rolling 운동은 제1, 2, 3, 4 관절(4 자유도)을, Twist-rolling 운동은 제2, 3, 4 관절(3 자유도)을, Slide-twist-rolling 운동은 제4 관절(1 자유도)을 사용한다. 물체의 크기는 폭이 110 [mm], 깊이가 110 [mm], 높이가 100 [mm]이고, 원형의 횡단면을 가지고 있는 매끈한 형상이다(Fig. 4).

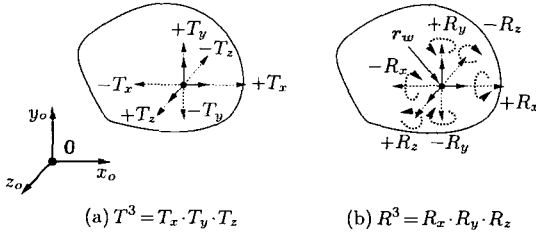


Fig. 9 Dimension of manipulation workspace

물체의 위치 및 방향의 변화는 Fig.9와 같이 좌표축 원점(0) 중심의 x_0, y_0, z_0 축 방향의 위치변화($\pm T_x, \pm T_y, \pm T_z$)와 물체 대표점(r_w) 중심의 x_w, y_w, z_w 축 방향의 방향변화($\pm R_x, \pm R_y, \pm R_z$)로 나눌 수 있다. 여기서 \pm 는 변화의 방향을 나타내고, x_0, y_0, z_0 축은 원점(0) 고정의 좌표축, x_w, y_w, z_w 축은 물체 대표점(r_w) 고정의 좌표축이고, 물체의 대표점(r_w)은 B-스플라인 곡면을 표현하는 2 매개변수의 값이 영인 물체 위의 점이다. 손가락의 조작공간(manipulation workspace)은 Fig.9와 같이 위치변화의 조작공간(T^3 : manipulation workspace for object translation)과 방향변화의 조작공간(R^3 : manipulation workspace for object rotation)

$$T^3 [\text{mm}^3] = T_x \cdot T_y \cdot T_z \quad (6)$$

$$R^3 [\text{deg}^3] = R_x \cdot R_y \cdot R_z \quad (7)$$

으로 나누고, 각각 물체의 위치 및 방향 변화에 대한 손가락의 대응능력을 나타낸다. 여기서

$$T_x [\text{mm}] = |+T_x| + |-T_x|$$

$$R_x [\text{deg}] = |+R_x| + |-R_x|$$

등을 의미한다.

어떤 관절구조의 손가락이 물체의 위치 및 방향 변화에 잘 대응하는가를 결정하기 위해 Table 3과 Table 4의 손가락을 대상으로 좌표축 원점 중심의 x_0, y_0, z_0 축 방향의 위치변화와 물체 대표점 중심의 x_w, y_w, z_w 축 방향의 방향변화의 시뮬레이션을 행한다. 조작의 시작부터 물체의 운동에 대응하지 못하게 되는 조작의 한계까지의 물체의 운동량에서 조작공간의 넓이를 구하고, 절대적 비교와 상대적 비교를 조합하여 손가락의 조작공간을 종합적으로 평가하고 판단한다. 여기서 절대적 비교는 조작공간(T^3 ,

R^3)의 넓이에 근거한 것이고, 상대적 비교는 위치변화의 조작공간 지표(I_T : workspace index for translational manipulation), 방향변화의 조작공간 지표(I_R : workspace index for rotational manipulation), 운동변화의 조작공간 지표(I_W : workspace index for object manipulation)

$$I_T = 3 \left(\frac{T_x \cdot T_y \cdot T_z}{T_x^3 + T_y^3 + T_z^3} \right) \quad (8)$$

$$I_R = 3 \left(\frac{R_x \cdot R_y \cdot R_z}{R_x^3 + R_y^3 + R_z^3} \right) \quad (9)$$

$$I_W = \frac{1}{2} (I_T + I_R) \quad (10)$$

를 고려한 것이다. 여기서 $0.0 \leq I_T, I_R, I_W \leq 1.0$ 을 만족한다. I_T 는 T^3 에 관한 T_x, T_y, T_z 의 공간적 분포 균등성을 나타내는 값이고, I_R 는 R^3 에 관한 R_x, R_y, R_z 의 공간적 분포 균등성을 나타내는 값이므로 상대적 비교는 T^3, R^3 에 관한 전체적인 분포 균등성, 즉 I_W 의 값을 고려하는 것이 된다. 손가락의 조작공간이 넓다고 해서 반드시 물체의 조작에 적합한 관절구조의 손가락이라고 말할 수 없다. 예를 들면 $T^3 = T_x T_y T_z = 40 \cdot 40 \cdot 10 = 16,000 [\text{mm}^3]$, $I_T = 0.372$ 인 손가락과 $T^3 = 25 \cdot 25 \cdot 25 = 15,625 [\text{mm}^3]$, $I_T = 1.000$ 인 손가락의 경우, T^3 의 절대적 비교에서 $T^3 = 16,000 [\text{mm}^3]$ 인 손가락이 적합하다고 생각되나, 종합적으로 생각하면 $T^3 = 15,625 [\text{mm}^3]$ 인 손가락은 T^3 가 조금 좁지만 T^3 에 관한 T_x, T_y, T_z 의 공간적 흠어짐이 작고, I_T 가 크므로 물체의 조작에 적합한 관절구조의 손가락이 된다. 식 (6)과 같이 T^3 의 단순한 넓이 뿐만 아니라 식 (8)과 같이 T^3 을 $(T_x^3 + T_y^3 + T_z^3)$ 으로 나눔으로써 T^3 에서 T_x, T_y, T_z 가 공간적으로 어느 정도 균등하게 퍼져 있는가를 무차원의 값인 I_T 로 알 수 있다. 따라서 I_T 가 클수록 T^3 에서 T_x, T_y, T_z 의 공간적 분포 균등성이 높아진다. 식 (7)의 R^3 과 식 (9)의 I_R 도 마찬가지이다. 그리고 I_W 와 I_T, I_R 는 식 (10)과 같은 관계에 있다. I_T, I_R, I_W 를 0.0과 1.0 사이의 값으로 만들기 위해 각각 정수 3.0, 3.0, 0.5를 곱했다. 따라서 손가락의 조작공간을 종합적으로 비교하여 관절구조를 평가하고 판단하는 기준은 다음과 같다.

- 1) 먼저 손가락의 T^3 과 R^3 의 값이 같아 클 것 (절대적 비교)

2) T^3 과 R^3 가 다같이 큰 손가락의 경우, I_W 의 값이 더 클 것 (상대적 비교)

I_W 는 무차원의 값이고 T^3 , R^3 에서 공간적인 분포 균등성을 나타내는 값이므로, 조작공간의 단순한 넓이 뿐만 아니라 조작공간 전체의 공간적인 분포 균등성을 고려하는 것이 된다. 그리고 절대적 및 상대적 비교는 통계의 평균 및 분산과 본질적으로 동일한 의미를 가진다.

일반적으로 굴림을 동반하는 2 물체의 상대적 접촉운동은 nonholonomic 구속을 받으므로 전체 운동은 운동의 경로에 의존하고, (16, 17) 동작공간(workspace)을 타원체의 모양으로 취급하는 연구가 많다. (18, 19) 그리고 동작공간은 대상 물체의 크기에 영향을 받으며, 물체가 작을수록 넓어진다. (20) 손가락의 조작공간(manipulation workspace)도 운동의 경로와 대상 물체의 크기 및 형상 등에 영향을 받으므로, 물체의 각 운동 방향에 대한 위치 및 방향의 변화량을 운동의 경로 및 물체의 크기까지 고려하여 구하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 물체의 조작에서 손가락의 관절구조가 가지는 일반적인 경향을 정량적으로 비교하기 위해 손가락의 조작공간을 식 (6), (7)과 같이 단순한 체적으로 간주하고 평가한다.

다관절 로봇 손의 조작성(manipulability)은 손가락 링크의 길이나 손가락 사이의 상태적 배치방법(배치 간격, 배치 각도 등)에 영향을 받으며, 또한 로봇 손을 장착하는 로봇 팔의 손목 자유도에 영향을 받는다. 그러므로 로봇 손의 조작성을 종합적으로 평가하는 것은 쉽지 않으며, 특히 상대운동(굴림, 미끄러짐, 비틀림)을 동반하는 접촉운동에서 로봇 손의 동작공간(workspace)을 평가하기 위해 고려해야만 하는 사항이 너무 많다. (18) 그러나 기본적으로 각 손가락이 대상 물체의 운동에 대해 넓은 조작공간(manipulation workspace)을 가지는 것이 중요하며, 1개의 손가락과 물체의 운동에 한정하여 동일한 조건에서 시뮬레이션을 행하도록 한다.

물체 조작의 방향에 따른 차이를 해소하기 위해 조작의 시작점에서 손가락 위의 접촉점이 마지막 링크의 원통 부분과 타원체 부분의 연결부분 위에 있도록, 그리고 물체 위의 접촉점이 매끈한 물체 부분 위에 있도록 물체의 초기 위치 및 방향을 조절한다. 손가락 위의 초기 접촉점

과 물체 위의 초기 접촉점이 손가락의 관절구조와 무관하게 같은 좌표값을 가지도록 한다. 조작의 시작점에서 손가락의 자세는 관절구조에 의존하므로 동일하게 설정할 수 없지만, 손가락의 관절구조나 상식적인 판단(인간의 손가락과 같은 자연스러운 초기 자세)에서 손가락의 초기 자세를 설정하고, 조작운동의 방향과 무관하게 대응되도록 한다.

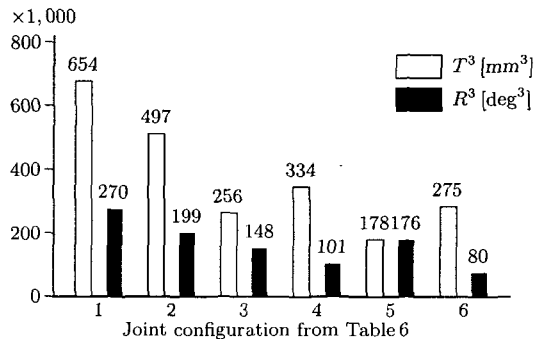
조작하는 도중에 손가락이 특이 자세가 되어 물체를 조작할 수 없게 되고 설정한 접촉운동도 유지할 수 없게 되는 조작 능력의 한계는 손가락이 일직선으로 뻗어 물체의 운동에 대응할 수 없는 경우, 손가락 관절이 가동범위를 넘은 경우, 손가락의 등쪽 표면이 물체와 접촉하여 손가락의 전체적 자세가 불안정한 경우, 손가락과 물체의 접촉점이 제2 링크로 이동해 손가락 끝부분에 의한 조작이 아닌 경우에 발생한다. 본문에서 손가락 관절의 가동범위를 $\pm 90^\circ$ 로 설정했다.

5.2 Pure rolling 운동의 해석 결과

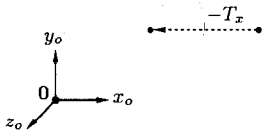
손가락과 물체의 접촉을 기구학적인 대우로 간주하면, Pure rolling 운동(미끄러짐과 비틀림이 없는 굴림)은 손가락과 물체가 굴림 2 자유도의 대우이므로 손가락에 4 자유도가 있으면 물

Table 6 Configurations suitable for pure rolling

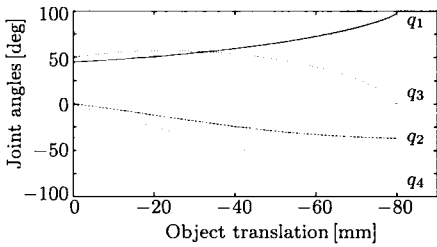
Joint configuration	T^3	R^3	I_W
1. $P_x - P_y - P_x R$ (1-1-2)	653, 649	270, 298	0.567
2. $P_x - R - P_x R$ (1-1-2)	497, 540	199, 343	0.608
3. $P_x - P_y - P_y P_x$ (1-1-2)	256, 505	148, 077	0.774
4. $P_x - R - P_y P_x$ (1-1-2)	334, 534	101, 208	0.648
5. $P_x P_y - P_y - P_x$ (2-1-1)	178, 324	175, 843	0.808
6. $R P_x - P_x - R$ (2-1-1)	274, 936	79, 903	0.472
Average	365, 915	162, 445	0.646



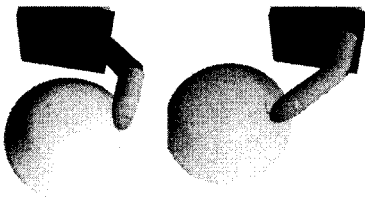
체의 6 자유도 운동이 가능하다.⁽¹²⁾ 즉 4 자유도의 손가락으로 물체에 비틀림도 가하면서 물체를 임의의 위치 및 방향으로 조작하는 것이 가능하고, 손가락은 Pure rolling 운동의 조건에 따라서 움직인다. Table 3에 열거한 4 자유도의 손가락 중에서 Pure rolling 운동에 적합한 관절구조를 조작공간의 종합적인 비교로 평가하고 판단했고, 결정된 6개의 손가락을 Table 6에 정리했다. Fig. 10은 Pure rolling 운동의 시뮬레이션이다. 관절구조가 $P_x-P_y-P_xR$ (Type 1-1-2)인 손가락(Fig. 12(a))으로 $-T_x$ 의 방향에 물체를 조작했을 때, 조작의 시작점부터 종료점까지 손가락과 물체의 모습과 손가락 관절각의 변화를 나



(a) Object translation



(b) Trajectory of joint angles



(c) Initial

(d) Final

$$r_{w_i} = (20.0, -35.0, 45.0)^T \rightarrow r_{w_f} = (-60.0, -35.0, 45.0)^T$$

Fig. 10 Simulation example of pure rolling

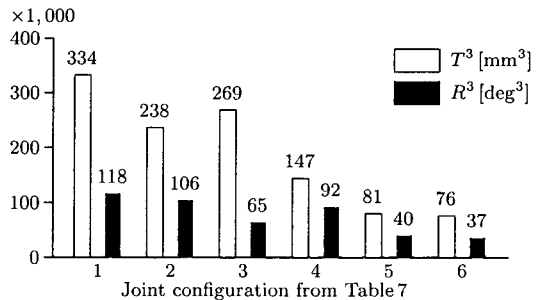
타냈다. 물체의 위치가 x_0 축으로 -80.0 [mm] 만큼 변하고, P_x 인 q_3 가 0° 로 되어 손가락이 일직선으로 뻗었기 때문에 조작 능력의 한계가 된 경우이다. 여기서 r_{w_i} , r_{w_f} 는 각각 조작의 시작점 및 종료점에서 물체 대표점의 좌표이다.

5.3 Twist-rolling 운동의 해석 결과

Twist-rolling 운동(비틀림을 허용하는 굴림)은 손가락과 물체가 비틀림 1 자유도, 굴림 2 자유도의 합계 3 자유도의 대우이므로 손가락에 3 자유도가 있으면 물체의 6 자유도 운동이 가능하다.⁽¹²⁾ 즉 3 자유도의 손가락으로 자연스럽게 발생하는 비틀림도 허용하면서 물체를 임의의 위치 및 방향으로 조작하는 것이 가능하고, 손가락은 Twist-rolling 운동의 조건에 따라서 움직인다. Table 4에 열거한 3 자유도의 손가락 중에서 Twist-rolling 운동에 적합한 관절구조를 조작공간의 종합적인 비교로 평가하고 판단했고, 결정된 6개의 손가락을 Table 7에 정리했다. Fig. 11은 Twist-rolling 운동의 시뮬레이션이다. 관절구조가 $P_x-P_y-P_x$ (Type 1-1-1)인 손가락(Fig. 13(a))으로 $-R_x$ 의 방향에 물체를 조작했을 때, 조작의 시작점부터 종료점까지 손가락과 물체의 모습과 손가락 관절각의 변화를 나타냈다. 물체의 방향이 x_w 축으로 -20.3 [°] 만큼 변하고, P_x 인 q_4 가 90° 이상으로 되어 조작

Table 7 Configurations suitable for twist-rolling

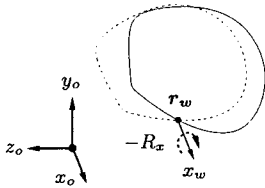
Joint configuration	T^3	R^3	I_w
1. $P_x-P_y-P_x$ (1-1-1)	334,079	118,524	0.605
2. P_x-R-P_x (1-1-1)	237,638	105,908	0.529
3. P_x-P_x-R (1-1-1)	268,623	65,345	0.554
4. P_x-P_xR (1-2)	147,532	91,757	0.496
5. $R-P_x-P_x$ (2-1)	81,264	40,412	0.598
6. P_x-R-P_x (1-2)	76,386	37,303	0.596
Average	190,920	76,542	0.563



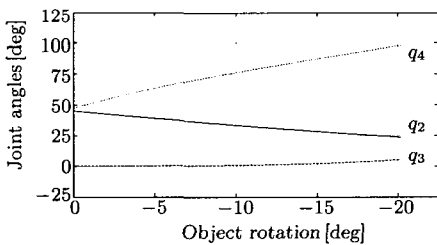
능력의 한계가 된 경우이다.

5.4 해석 결과의 고찰

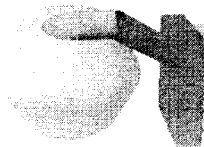
로봇 손가락의 작업범위(workspace)는 전체적 작업범위(total workspace)와 부분적 작업범위(partial workspace)로 나눌 수 있다. 전체적 작업범위는 손가락의 모든 링크에 속한 관절의 구동으로 만들어지는 작업범위이고, 부분적 작업범위는 손가락의 끝 부분 링크에 속한 관절의 구동으로 만들어지는 작업범위이다. 예를 들면 $P_x-P_y-P_xR$ (Type 1-1-2)의 손가락(Fig. 12(a))에서 전체적 작업범위는



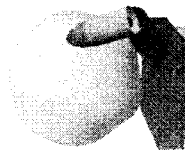
(a) Object rotation



(b) Trajectory of joint angles



(c) Initial



(d) Final

$$r_{w_i} = r_{w_f} = (20.0, -35.0, 30.0)^T$$

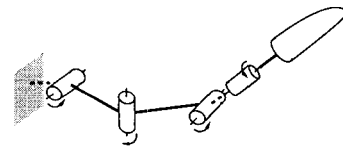
Fig. 11 Simulation example of twist-rolling

$P_x-P_y-P_xR$ 로 만들어지는 작업범위이고, 부분적 작업범위는 $-P_xR$ 로 만들어지는 작업범위이다. 부분적 작업범위를 Table 8에 정리했다.

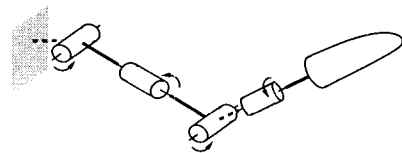
Pure rolling 운동은 손가락으로 물체에 비틀림도 가하면서 물체를 임의의 위치 및 방향으로 조작한다. 손가락 끝 부분의 관절로 물체에 비틀림도 가할 수 있다면 다른 관절은 조금만 구동해도 좋고, 손가락의 전체적 자세를 흐뜨리지 않고 주로 손가락 끝 부분의 관절을 사용하여 물체를 조작할 수 있다. Pure rolling 운동으로 물체를 조작하는 것은 손가락 끝 부분의 많은 방향 변화를 동반하고 손가락 끝 부분의 관절일수록 많이 움직인다. 이것은 로봇 팔에서 손목 관절의 역할과 같은 의미이다. 그리고 R 관절이 물체에 비틀림도 쉽게 가할 수 있다. 따라서 Pure rolling 운동에는 전체적 작업범위보다 부분적 작업범위가 넓은 관절구조의 손가락이 잘 대응했다. 예를 들면 $P_yP_x-P_x-P_x$ (Type 2-1-1)의 손가락은 물체에 비틀림도 가하기 위해 제1 관절인 P_y 까지 움직이지 않으면 안되고, 전체적 작업범위는 넓지만 부분적 작업범위가 좁은 관절구조이다. 이에 반해 P_x-R-P_xR (Type 1-1-2)인 손가락(Fig. 12(b))은 제4 관절인 R로 물체에 비틀림도 가하며, 다른 관절은 손가락의 전

Table 8 Types of partial workspace

1-DOF	-R	Rotational 1-dimension
	$-P_x, -P_y$	Translational 2-dimension
2-DOF	$-P_xR, -P_yR$	Rotational 2-dimension
	$-P_xP_y, -P_yP_x$	Translational 3-dimension



(a) $P_x-P_y-P_xR$ (Type 1-1-2)



(b) P_x-R-P_xR (Type 1-1-2)

Fig. 12 Robotic fingers for pure rolling

체적 자세를 안정적으로 유지하면서 물체의 위치 및 방향을 바꾸고, 부분적 작업범위가 넓은 관절구조이다. 즉 관절구조가 Type 1-1-2인 손가락이 적합했다. 그리고 Table 6에서 4개의 회전관절 중에서 P_x 가 2개인 손가락이 적합했다. $P_x-R P_y-R$ (Type 1-2-1)인 손가락(Fig. 7)과 같이 P_x 가 1개인 관절구조는 손가락 전체를 조작의 시작점에서 물체를 향해 자연스러운 자세로 구부리기 힘들고, 손가락이 일시적으로 뺨은 상태이므로 조작운동의 방향에 따른 편차가 크다. 그리고 $P_x-P_x P_y-P_x$ (Type 1-2-1)인 손가락과 같이 P_x 가 3개인 관절구조는 물체에 비틀림도 가하기 힘들다. 그러므로 Pure rolling 운동에는 P_x 가 2개인 손가락이 적합했다. Fig. 12는 Pure rolling 운동에 최적인 손가락의 예이다. 그리고 Table 9에 Utah/MIT 로봇 손의 손가락인 $P_y P_x-P_x-P_x$ (Type 2-1-1)⁽²¹⁾의 조작공간을 나타냈다. 3개의 P_x 관절 때문에 손가락의 조작공간이 좁았다.

Twist-rolling 운동은 손가락으로 물체에 비틀림도 가할 필요가 없고, 자연적으로 발생하는 비틀림을 허용하면 된다. 손가락은 물체의 운동을 각 관절에 분산하여 담당하고, 모든 관절을 동등하게 사용하여 물체를 조

Table 9 Workspace of anthropomorphic fingers

Joint configuration	T^3	R^3	I_W
$P_y P_x-P_x-P_x$ (2-1-1)	40,053	905	0.126
$P_y-P_x-P_x$ (1-1-1)	111,249	55,911	0.616

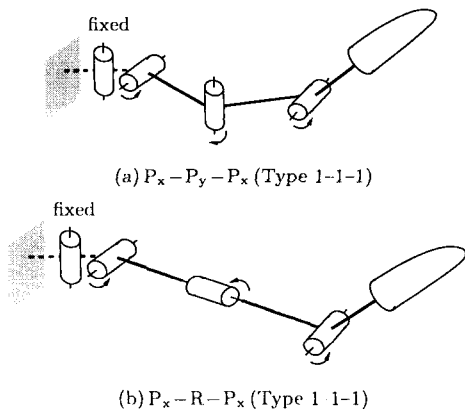


Fig. 13 Robotic fingers for twist-rolling

작한다. 따라서 Twist-rolling 운동에는 부분적 작업범위보다 전체적 작업범위가 넓은 관절구조의 손가락이 잘 대응했다. 예를 들면 손가락 링크가 3개인 $P_x-P_y-P_x$ (Type 1-1-1)의 관절구조(Fig. 13(a))는 손가락 링크가 2개인 $P_x-R P_x$ (Type 1-2)의 관절구조(Fig. 8)보다 부분적 작업범위가 좁지만 전체적 작업범위가 넓으므로 손가락의 조작공간도 넓은 관절구조이다. 즉 관절구조가 Type 1-1-1인 손가락이 적합했다. 그리고 Table 7에서 3개의 회전관절 중에서 P_x 가 2개인 손가락이 적합했다. P_x-R-P_y (Type 1-1-1)인 손가락과 같이 P_x 가 1개인 관절구조는 조작운동의 방향에 따른 편차가 크다. 그러므로 Twist-rolling 운동에도 P_x 가 2개인 손가락이 적합했다. Fig. 13은 Twist-rolling 운동에 최적인 손가락의 예이다. 그리고 Table 9에 Stanford-JPL 로봇 손의 손가락인 $P_y-P_x-P_x$ (Type 1-1-1)⁽¹⁵⁾의 조작공간을 나타냈다. 3개의 링크 때문에 손가락의 조작공간이 넓은 편이다.

Slide-twist-rolling 운동(미끄러짐과 비틀림을 허용하는 굴림)은 손가락과 물체가 비틀림 1 자유도, 굴림 2 자유도, 미끄러짐 2 자유도인 합계 5 자유도의 대우이므로 손가락에 1 자유도가 있으면 물체의 6 자유도 운동이 가능하다.⁽¹²⁾ 즉 1 자유도의 P_x 손가락으로 물체를 임의의 위치 및 방향으로 조작하는 것이 충분히 가능하고, 손가락은 Slide-twist-rolling 운동의 조건에 따라서 움직인다.

Table 6과 Table 7에서 4 자유도의 손가락에 의한 Pure rolling 운동의 조작공간의 평균치가 3 자유도의 손가락에 의한 Twist-rolling 운동의 조작공간의 평균치보다 크다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 접촉운동의 상대적 자유도가 증가하면 동작공간(workspace)은 넓어진다.⁽¹⁸⁾ 본 논문에서 각 접촉운동을 유지하기 위한 필요최소한의 관절을 사용하여 물체를 조작했고, Pure rolling 운동은 4 자유도, Twist-rolling 운동은 3 자유도, Slide-twist-rolling 운동은 1 자유도이다.⁽¹²⁾ 일반적인 조작운동은 필요최소한의 관절을 사용하지 않으며, 예를 들면 4 자유도의 손가락으로 Pure rolling 운동, Twist-rolling 운동, Slide-twist-rolling 운동을 행한다. 이런 경우에 Twist-rolling 운동과 Slide-twist-rolling 운동은 손가락의 여유 자유도를 이용하는 것이 된다. 6

자유도의 로봇 팔보다 7 자유도의 로봇 팔로 더욱 다양한 작업이 가능하듯이 손가락의 여유 자유도를 이용한 물체의 조작, 예를 들면 4 자유도의 손가락으로 Twist-rolling 운동을 행하면 손가락의 조작공간은 더욱 넓어진다. 따라서 Table 6과 Table 7은 3 자유도의 손가락으로 Twist-rolling 운동을 행하는 것보다 4 자유도의 손가락으로 Pure rolling 운동을 행하는 것이 손가락의 조작공간은 넓어진다는 것을 의미하며, Pure rolling 운동에서 손가락의 조작공간이 넓으므로 상대적 접촉운동을 Pure rolling 운동으로 행해야 한다는 것을 의미하지 않는다. 그리고 손가락이 조작 능력의 한계에 도달한 경우, 물체를 재파지하여 새로운 손가락의 자세에서 조작운동을 계속하면 물체의 운동에 더욱 대응할 수 있고 손가락의 조작공간도 넓어진다.

6. 결 론

손가락의 표면을 사용하여 B-스플라인 곡면으로 표현된 자유형상의 물체를 다양하게 조작할 수 있는 최적의 손가락 관절구조를 결정하기 위해 다양한 관절구조의 손가락을 대상으로 조작운동의 시뮬레이션을 행하여, 손가락 조작공간의 종합적인 비교에 근거하여 평가하고 판단했다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- (1) Pure rolling 운동에 있어서는, 인간의 손가락에 없는 R 관절을 가지고 있는 부분적 작업범위가 넓은 Type 1-1-2의 손가락이 최적이었다. 또한 4개의 회전관절 중에서 P_x 관절이 2개인 손가락이 적합했다.
- (2) Twist-rolling 운동에 있어서는, 전체적 작업범위가 넓은 Type 1-1-1의 손가락이 최적이었다. 또한 3개의 회전관절 중에서 P_x 관절이 2개인 손가락이 적합했다.

앞으로의 전망으로는 물체의 형상, 물체의 위치 및 방향, 물체의 운동, 손가락의 관절구조 및 관절각의 변화, 손가락 조작 능력의 한계 등을 종합적으로 고려하여 물체를 효과적으로 재파지하기 위한 동작의 결정, 즉 재파지 동작의 최적화에 관해 연구할 필요가 있다.

후 기

본 논문에서 손가락의 관절구조에 대한 설계 문제를 고찰했다. 동일한 내용을 다룬 저자의 학술대회 논문⁽²²⁾이 있지만, 본 논문은 학술잡지 논문으로 다시 투고한 것이다.

참고문헌

- (1) Montana, D.J., 1995, "The Kinematics of Multi-fingered Manipulation," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 11, No. 4, pp. 491~503.
- (2) Cherif, M. and Gupta, K.K., 2001, "Global Planning for Dexterous Reorientation of Rigid Objects: Finger Tracking with Rolling and Sliding," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 20, No. 1, pp. 57~84.
- (3) Kiss, B., Levine, J. and Lantos, B., 2002, "On Motion Planning for Robotic Manipulation with Permanent Rolling Contacts," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 21, No. 5~6, pp. 443~461.
- (4) Jia, Y.-B. and Erdmann, M., 1999, "Pose and Motion from Contact," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 18, No. 5, pp. 466~490.
- (5) Cherif, M. and Gupta, K.K., 1999, "Planning Quasi-static Fingertip Manipulations for Reconfiguring Objects," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 15, No. 5, pp. 837~848.
- (6) Zheng, X.-Z., Nakashima, R. and Yoshikawa, T., 2000, "On Dynamic Control of Finger Sliding and Object Motion in Manipulation with Multifingered Hands," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 16, No. 5, pp. 469~481.
- (7) Arimoto, S., Yoshida, M., Bae, J.-H. and Tahara, K., 2003, "Dynamic Force/torque Balance of 2D Polygonal Objects by a Pair of Rolling Contacts and Sensory-motor Coordination," *J. Robotic Systems*, Vol. 20, No. 9, pp. 517~537.
- (8) Hirzinger, G., Brunner, B., Landzettel, K., Sporer, N., Butterfaß, J. and Schedl, M., 2003, "Space Robotics-DLR's Telerobotic

- Concepts, Lightweight Arms and Articulated Hands," *Autonomous Robots*, Vol. 14, No. 2~3, pp. 127~145.
- (9) Carrozza, M.C., Dario, P., Vecchi, F., Roccella, S., Zecca, M. and Sebastiani, F., 2003, "The CyberHand: on the Design of a Cybernetic Prosthetic Hand Intended to be Interfaced to the Peripheral Nervous System," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robot. and Syst.*, pp. 2642~2647.
- (10) Xydas, N. and Kao., I., 1999, "Modeling of Contact Mechanics and Friction Limit Surfaces for Soft Fingers in Robotics, with Experimental Results," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 18, No. 8, pp. 941~950.
- (11) Erkmén, I., Erkmén, A.M. and Günver, H., 2000, "Robot Hand Preshaping and Regrasping Using Genetic Algorithms," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 19, No. 9, pp. 857~874.
- (12) Nagashima, T., Seki, H. and Takano, M., 1997, "Analysis and Simulation of Grasping/manipulation by Multi-fingersurface," *Mech. Mach. Theory*, Vol. 32, No. 2, pp. 175~191.
- (13) Takahashi, H., Takano, M., Sasaki, K. and Seki, H., 1996, "Grasping/manipulation of an Object with Any Shape by Multi-fingersurfaces," *Proc. of 2nd ECPD Int. Conf. Advanced Robot., Intelligent Automat. and Active Syst.*, pp. 498~503.
- (14) Hwang, C.-S., 2005, "Kinematics of Grasping and Manipulation of Curved Surface Object with Robotic Hand," *Trans. Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 29, No. 1, pp. 1~13.
- (15) Salisbury, J.K. and Craig, J.J., 1982, "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 1, No. 1, pp. 4~17.
- (16) Bicchi, A. and Marigo, A., 2002, "Dexterous Grippers: Putting Nonholonomy to Work for Fine Manipulation," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 21, No. 5~6, pp. 427~442.
- (17) Harada, K., Kawashima, T. and Kaneko, M., 2002, "Rolling Based Manipulation under Neighborhood Equilibrium," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 21, No. 5~6, pp. 463~474.
- (18) Kerr, J. and Roth, B., 1985, "Analysis of Multifingered Hands," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 4, No. 4, pp. 3~17.
- (19) Wang, L.-C.T. and Hsieh, J.-H., 1998, "Extreme Reaches and Reachable Workspace Analysis of General Parallel Robotic Manipulators," *J. Robotic Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 145~159.
- (20) Michelman, P., 1998, "Precision Object Manipulation with a Multifingered Robot Hand," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 14, No. 1, pp. 105~113.
- (21) Jacobsen, S.C., Iversen, E.K., Knutti, D.F., Johnson, R.T. and Biggers, K.B., 1986, "Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 1520~1532.
- (22) Hwang, C.-S. and Sasaki, K., 2003, "Evaluation of Robotic Fingers Based on Kinematic Analysis," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robot. and Syst.*, pp. 3318~3324.