学術論文

指の腹による B-スプライン曲面物体の把握と操りの運動学 およびそのシミュレーションシステムの開発

黄 昶 淳^{*1} 高 野 政 晴^{*2} 佐々木 健^{*1} 高 橋 英 樹^{*1}

Kinematics of Grasping and Manipulation of B-spline Surface Object by Multi-fingersurfaces and Development of Its Simulation System

Chang-Soon Hwang^{*1}, Masaharu Takano^{*2}, Ken Sasaki^{*1} and Hideki Takahashi^{*1}

Kinematics of Grasping and Manipulation by multi-fingered robotic hands where Multi-Finger-Surfaces are in contact with an object (GMMFS problem) is a problem to obtain finger joint displacements q and the position of contact points r of two curved surfaces of the fingersurface and the object for the given object position and orientation r_w (inverse kinematics), and to obtain r_w and r for the given q (direct kinematics). In the previous paper, fundamental contact equation and three contact motions (i.e., pure rolling, twist rolling and slide rolling) in manipulation were formulated. Some examples of analytical solution for object dealing with simple shapes such as block, sphere, cylinder, etc. were shown. In this paper, a new method for solving the GMMFS problem of object with complicated shape is proposed. Assuming that finger has cylindrical links and ellipsoidal tip, and object is composed of B-spline surfaces, the contact equation of the finger and the object is solved by numerical recursive calculation, where six cases of the contact solution are used. The new method gives all possible solutions for the contact of the finger and the object. Simulation system of the GMMFS with a B-spline surface object is developed. Some examples of simulation of the GMMFS with the B-spline surface object are illustrated.

Key Words: Multifingered Robotic Hands, Fingersurface Grasping, Fingersurface Manipulation, B-spline Surface Object, Inverse Kinematics

1. 序 論

近年ロボットハンドに関する研究が盛んになされているが、人間の手のような器用さ、柔軟性を持つ汎用的なロボットハンドは未だ実現していない。その遅れの理由としては、アクチュエータやその駆動機構の小型化の困難等のハンド自体のハードウェア面の問題と、触覚や力覚等の各種センサから得た情報を用いて感覚系と制御系の連携や各指間の協調動作を行うための制御技術が完成していないことなどのソフトウェア面の問題が考えられる。人間の手と同じような器用な機能を持つ汎用的な多指ロボットハンドは宇宙、深海、原子炉のように人間の手で直接作業ができないような場所で必要とされるようになってきているが、製作と使い方が難しく、まだ開発途上にある。現在、このようなハンドを実現するための多指ハンドの研究のなかでも特に把握・操りに関する研究が重要であり、今までに数多くの研究がなされ、少なくとも指先の1点での物体の把握・操りに関する運動学や力学の課題とその取扱法はほとんど解明され

ている[1]~[10]。しかし、人間の指は物体を把握する場合、指の腹を使うケースがほとんどであり、物体を操る場合、指の腹を使い、物体との接触点が指の腹上および物体上を移動するケースが普通である。人間の手のような汎用的な多指ロボットハンドを開発するためには、指の腹による把握と、接触点が移動する指の腹による操りで物体を取扱う方が適していると考えられる。前報の指の腹による物体の把握と操りの運動学[11]では、把握と操りの運動学の分類と必要な指数、必要な自由度等の一般論と、立方体、円筒、球等の比較的簡単な形状の物体との接触問題の解析解について述べた。現在は自由形状の物体との接触をどう解くかが問題である。この問題は、自由形状の物体を自由曲面でどのように表現するかということがポイントとなる。

本論文の目的は、複雑な形状の物体の取り扱い方を論じることとし、指の腹による B-スプライン曲面物体の把握・操りの逆運動学を解析し、そのシミュレーションシステムを開発し、逆運動学的解析のシミュレーションを行うことである。

本論文において把握・操りを考察するにあたり、指と物体の接触は常に指の腹において起こり、接触面は微小で1点で点接触し、多指ハンドを構成する各指の関節はすべて独立に駆動することができ、物体の形状・寸法、さらに操り開始時および終

原稿受付 1997年5月9日

^{*1}東京大学大学院工学系研究科

^{*2}関西大学大学院工学研究科

^{*1}Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

^{*2}Graduate School of Engineering, The Kansai University

了時の位置・姿勢は既知であると仮定する。また把握では、指と物体の接触はできる限りすべての指リンクで接触するようにすることと、操りでは運動は準静的であり、指と物体の接触は常に一番先端の指リンクで起こり、操りの途中で指と物体が離れないことを仮定する。

2. 多指ハンドと B-スプライン曲面物体の表現

2.1 多指ハンドの表現

シミュレータで用いる多指ハンドは Fig. 1 のように人間の指に似た形状で、第 1, 2 の指リンクは円筒、指先となる第 3 の指リンクは半分は円筒、半分は回転楕円体の指を持っている。回転楕円体の指先によって円筒の指先より物体を操る部分が広くなる。関節はすべて回転関節である。各指の自由度はあらゆる種類の接触運動ができるように 4 自由度である [11]。各指は第 1 の指リンクの根元に 2 自由度、第 2 の指リンクの根元に 1 自由度、第 3 の指リンクの根元に 1 自由度がある。指の本数は確実な安定性を得るために 4 本である [11]。また、多指ハンドの形状はすべて B-スプライン曲面で表される。

2.2 B-スプライン曲面物体の表現

把握・操りの汎用性を向上させるためにはあらゆる形状の物体に対して把握・操りを行わなければならない。実際にある複雑な形状の物体を自由曲面と考えると、自由曲面を表す方法は以下のような条件を満たす必要がある。

- 意図する曲面が簡単に表現できること。
- 曲面形状の局所的な変形と全体的な変形が容易なこと。

4 fingers
3 links per finger (total 12 links)
4 DOF per finger (total 16 DOF)
Fig. 1 Shape of multifingered robotic hand and finger tip

Fig. 2 Examples of B-spline surface object

- 複数の曲面の滑らかな接続が容易に行えること。

このような機能を実現するために CAD システムにおいてよく用いられる自由曲面の表現法には、Coons 曲面、Bezier 曲面、B-スプライン曲面がある。特に、B-スプライン曲面はこの条件をよく満たすから、CAD システムでよく用いられている。本論文で取扱う物体の表面は、Fig. 2 のように B-スプライン関数で表された曲面である。

B-スプライン曲面の表現は、制御点からの表現、すなわち制御点を与えて B-スプライン曲面を生成することと、データ点からの表現、すなわち曲面上の点を与えて B-スプライン曲面を生成することの二つの方法がある。データ点からの表現は与えられたデータ点の座標から B-スプライン曲面の制御点の座標、ノットベクトルを決めることであるが、どちらの方法でも制御点からの表現になり、以下のような曲面表現式で表される [12]~[16]。

$$R(u, v) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{i,k}(u) N_{j,l}(v) P_{i,j} \quad (1)$$

ここで、 u, v はパラメータ、 $M_{i,k}(u), N_{j,l}(v)$ は u, v パラメータ方向の B-スプライン基底関数、 k, l は u, v パラメータ方向の位数、 $P_{i,j}$ は B-スプライン曲面の制御点の座標であり、その数は $m \times n$ である。

3. 指の腹による物体把握の逆運動学

自由度 m の指の関節角ベクトルを $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$ 、 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を接触している指リンクの根元固定の 3 単位ベクトル、 $\mathbf{r}_f$ を接触している指リンクの根元の位置ベクトル、B-スプライン曲線を $\mathbf{r}(u)$ 、B-スプライン曲面を $\mathbf{r}(u, v)$ 、物体の代表点を $\mathbf{r}_w$ 、接触点を $\mathbf{r}$ とする。ここで、 u, v はパラメータである。ベクトル等は静止座標系を基準にする。また、 θ_1, θ_2 は指の円筒部分を表すパラメータであり、 θ_3 は指の楕円体部分を表すパラメータである。 $\cos \theta_i, \sin \theta_i, \tan \theta_i$ を C_i, S_i, T_i と表す。

3.1 把握の概略

指の腹による把握問題は、指のリンク構造が分かっていると物体の形状・寸法が既知の場合、2 種類の順運動学問題と 2 種類の逆運動学問題に分類できる [11]。本論文では「物体の位置・姿勢」から「指の関節角、接触点」を求める把握の逆運動学の問題を取り扱う。

3.2 指の腹と物体の接触条件と接触種類

指の腹と物体が接触する条件は、指の表面と物体の表面が共有点を持つことと、その共有点上における指の法線と物体の法線が一致することの二つである [11]。

本論文でのハンドの指の形状は Fig. 3 のように円筒と楕円

Fig. 3 Shape of finger

Fig. 4 Cases of contact with B-spline surface

Fig. 5 Procedures of grasping

体の 2 種類から成る. このハンドと B-スプライン曲面物体に起こり得る接触は Fig. 4 のように 6 種類に限定される.

- 1) 円筒と点の接触 (頂点)
- 2) 円筒と B-スプライン曲線の接触 (稜)
- 3) 円筒と B-スプライン曲面の接触 (面)
- 4) 楕円体と点の接触 (頂点)
- 5) 楕円体と B-スプライン曲線の接触 (稜)
- 6) 楕円体と B-スプライン曲面の接触 (面)

それぞれについて接触問題を解く.

与えられた物体に対して次のような手順で把握を行う (Fig. 5).

- 1) 指の屈伸方向以外の関節は固定して置き, 指をまっすぐ伸ばす.
- 2) 指の根元側の関節から曲げる.
- 3) 指が物体に接触したらその関節を止め, 一つ先の関節を曲げて行く.
- 4) この動作を 1 番先端の関節まで順次行う.

この手順により物体の形状・寸法, 位置・姿勢が与えられたとき, 指の関節角, 接触点の位置を求めることができる.

Fig. 6 Contact of cylinder and B-spline surface

3.3 把握の逆運動学

把握の逆運動学とは「物体の位置・姿勢」から「指の関節角, 接触点」を求めることである.

Fig. 6 から円筒と B-スプライン曲面が接する条件は

$$I-1. \mathbf{r} = \mathbf{r}_{finger} = \mathbf{r}_{object}$$

$$I-2. (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{n}) = 0$$

$$I-3. (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{n}) = 0$$

である. ただし, $\mathbf{r}_{finger}$ は指上の接触点で l, θ_1, θ_2 の関数であり (式 (23)), $\mathbf{r}_{object}$ は物体上の接触点で u, v の関数であり, $\mathbf{t}_u, \mathbf{t}_v$ は u, v パラメータ方向の B-スプライン曲面の接線ベクトルで

$$\mathbf{t}_u = \frac{\partial \mathbf{r}(u, v)}{\partial u}, \quad \mathbf{t}_v = \frac{\partial \mathbf{r}(u, v)}{\partial v} \quad (2)$$

の u, v の関数であり, θ_1 は $\mathbf{e}_3$ 回りの回転角, $\mathbf{g}$ は円筒軸の方向ベクトルで θ_1 の関数であり (式 (22)), θ_2 は $\mathbf{g}$ 回りの回転角であり, $\mathbf{n}$ は円筒の法線ベクトルで θ_1, θ_2 の関数であり (式 (18)), l は接触点から $\mathbf{g}$ に下ろした垂線の足から指の根元 ($\mathbf{r}_f$) までの距離である. 接する条件 2 と 3 から

$$\theta_1(u, v) = \tan^{-1} \frac{P_1}{Q_1} \quad (3)$$

$$\theta_2(u, v) = \tan^{-1} \frac{P_2}{Q_2} \quad (4)$$

$$P_1 = (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3)$$

$$Q_1 = (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3)$$

$$P_2 = (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)S_1 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)C_1$$

$$Q_2 = (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)$$

の u, v の関数を得る (付録 A). 接する条件 1 を整理すると

$$\mathbf{F}(u, v) = (\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) \times (\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_{object}) + c((\mathbf{e}_1 S_1 - \mathbf{e}_2 C_1)S_2 + \mathbf{e}_3 C_2) = \mathbf{0} \quad (5)$$

の u, v のベクトル式を得る (付録 A). ただし, c は円筒の半径である. 式 (5) はベクトル式 (三つの式) であるが, 未知数が二つであるから, そのうち 2 式が独立であり, この 2 式から数値解析的に u, v が求められ, θ_1, θ_2 , 接触点 $\mathbf{r}$ が得られる. 円筒と B-スプライン曲線の接触も同じように求められる.

Fig. 7 から楕円体と B-スプライン曲面が接する条件は

Fig. 7 Contact of ellipsoid and B-spline surface

Fig. 8 Parts of B-spline surface

$$\text{II-1. } \mathbf{r} = \mathbf{r}_{\text{finger}} = \mathbf{r}_{\text{object}}$$

$$\text{II-2. } (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{n}) = 0$$

$$\text{II-3. } (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{n}) = 0$$

である。ただし、 $\mathbf{r}_{\text{finger}}$ は指上の接触点で $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の関数であり (式 (27)), $\mathbf{n}$ は楕円体の法線ベクトルで $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の関数である (式 (19)). ここで、 θ_3 は楕円体を表すパラメータである。接する条件 2 と 3 から

$$\theta_2(u, v, \theta_1) = \tan^{-1} \frac{P_3}{Q_3} \quad (6)$$

$$\theta_3(u, v, \theta_1) = \tan^{-1} \frac{P_4}{Q_4} \quad (7)$$

$$P_3 = (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1)$$

$$Q_3 = ((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3))C_1 \\ + ((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2) - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)(\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3))S_1$$

$$P_4 = b((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)C_1 + (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)S_1)$$

$$Q_4 = a(((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)S_1 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)C_1)C_2 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)S_2)$$

の u, v, θ_1 の関数を得る (付録 B)。接する条件 1 を整理すると

$$\mathbf{F} = a(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1)C_3 + b((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1)C_2 + \mathbf{e}_3 S_2)S_3 \\ + d(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) + \mathbf{r}_f - \mathbf{r}_{\text{object}} = \mathbf{0} \quad (8)$$

の u, v, θ_1 のベクトル式を得る (付録 B)。ただし、 a, b は楕円体の長軸・短軸の半径であり、 d は円筒部分の長さである。式 (8) はベクトル式 (三つの式) であるから、この 3 式から数値解析的に u, v, θ_1 が求められ、 θ_2, θ_3 、接触点 $\mathbf{r}$ が得られる。楕円体と B-スプライン曲線の接触も同じように求められる。

円筒と点の接触は、点を半径が零の球と考えて円筒と球の接触から求められる。楕円体と点の接触も同じように求められる。

Fig. 9 Polyhedron approximation of B-spline surface

Fig. 10 True value of contact of cylinder and straight line

Fig. 11 True contact point of cylinder and B-spline surface

Fig. 12 True contact point of ellipsoid and B-spline surface

3.4 把握の逆運動学の実現手順

B-スプライン曲面は Fig. 8 の 1 のような非多重化ノットの部分と Fig. 8 の 2 のような多重化ノットの部分の二つに分かれる。ノットベクトルが $\{0, 0, 0, 1, 2, 2, 3, 4, 4, 4\}$ のとき、要素 1, 3 のように多重化されていないノット、すなわち非多重化ノットの辺には B-スプライン曲面の微分連続性が保証でき、要素 0, 2, 4 のように多重化されているノット、すなわち多重化ノットの辺には B-スプライン曲面の微分連続性が保証できない [17]。一般的に、B-スプライン曲面の非多重化ノットの部分は接線ベクトルが連続的に変化し、形状が滑らかであり、B-スプライン曲面の多重化ノットの部分は接線ベクトルが不連続的に変化し、形状が凹凸である。B-スプライン曲面を非多重化ノットの部分と多重化ノットの部分に分けて考える。

B-スプライン曲面の非多重化ノットの部分は各パラメータ方向で位数 -2 階までの微分連続性が保証される。円筒と B-スプライン曲面の接触の式 (5) と楕円体と B-スプライン曲面の接触の式 (8) の非線形連立方程式は一般的に Newton-Raphson 法のような数値解析的な方法で解けるが、どんな方法でも実際の解から遠い初期値で計算を始めると発散する可能性がある。この問題を避けるために次の手順で解を求める (Fig. 9~Fig. 12)。

Step 1. B-スプライン曲面を曲面上の点で表された多面体近

似に変える (Fig. 9).

Step 2. 多面体近似は直線から成っているから円筒と直線の接触式を解き, パラメータ u, v の初期値を決める. 円筒と多面体近似の接触の解が多数存在することが有り得るが, 円筒が初期位置から回転して初めに多面体近似の直線に交わった所が接触点であるから, 初期位置の円筒と成す回転角度が最も小さいものが接触点, 接触角度となり, 接触点からパラメータ u, v の初期値を決める (Fig. 10).

Step 3. 決められた u, v の初期値は u, v の解にかなり近い値であるから円筒と B-スプライン曲面の接触式から数値解析で u, v の解を求めることができる (Fig. 11).

Step 4. B-スプライン曲面が指の円筒部分と接触していると計算されたが, 接触点が指の楕円体の領域にある場合, 求められた u, v と θ_1 を初期値として楕円体と B-スプライン曲面の接触式から数値解析で u, v, θ_1 の解を求める (Fig. 12).

B-スプライン曲面は多重化ノットの辺にはそのパラメータ方向の微分連続性が保証できない. したがって, B-スプライン曲面の微分連続性に基づく円筒と B-スプライン曲面の接触の式 (5), 楕円体と B-スプライン曲面の接触の式 (8) では解を求めることが不可能である. B-スプライン曲面の多重化ノットの部分との接触は Fig. 13 のアルゴリズムで実際解を求める.

- 1) B-スプライン曲面の各ノットベクトルから微分不連続の多重化ノットを取る. 多重化ノットのなかに微分連続のものもあるから多重化ノットの辺の B-スプライン曲面の接線ベクトルと B-スプライン曲面上の座標を比べて微分連続の多重化ノットか, 微分不連続の多重化ノットかを定める. これから微分不連続の多重化ノットを多重化ノットとする.
- 2) B-スプライン曲面を多面体近似に変え, 円筒と直線の接触を解き, パラメータ u, v と θ_1 の初期値を求める.
- 3) 求められた u, v の初期値と B-スプライン曲面の多重化ノットを比べ, 円筒と B-スプライン曲面の接触か, 円筒と B-スプライン曲線の接触か, 円筒と点の接触かを定める.
- 4) 円筒と B-スプライン曲面の接触の場合は, u, v の初期値

が多重化ノットに遠い値を持っているときであり, u, v の初期値から円筒と B-スプライン曲面の接触式を解いてパラメータ u, v と θ_1 , 接触点 r の解を求める.

- 5) 円筒と B-スプライン曲線の接触の場合は, u, v の初期値のなかに一つは多重化ノットにかなり近い値を, 一つは多重化ノットに遠い値を持っているときであり, 前者パラメータの値を多重化ノットの値に固定し, B-スプライン曲面を B-スプライン曲線と考えて計算する. 後者パラメータ, θ_1 の初期値から円筒と B-スプライン曲線の接触式を解いて後者パラメータ, θ_1 , 接触点 r の解を求める.
- 6) 円筒と点の接触の場合は, u, v の初期値が多重化ノットにかなり近い値を持っているときであり, u, v の多重化ノットに当たる B-スプライン曲面上の点を求め, 円筒と点の接触式を解いて θ_1 の解を求める.
- 7) 求められた解から指の円筒部分と接触しているか, 指の楕円体部分と接触しているかを指の根元から接触点までの距離で再び判断する.
- 8) 指の楕円体部分との接触の場合, それぞれ楕円体との接触式を解いて実際解を求める. 計算の初期値は円筒との接触式から求められたものを用いる.

4. 指の腹による物体操りの逆運動学

4.1 操りの概略

操りは常に一番先端の指リンクの 1 点で行う. 指の腹による操り問題の分類は, 指のリンク構造が分かっているとして物体の形状・寸法が既知の場合, 把握問題と類似の分類ができ, それぞれの問題に対して, 物体の操り運動を維持するために必要な指の数と必要な各指の関節数 (自由度) がある [11]. 本論文では「物体の位置・姿勢の微小変位」から「指の関節角の微小変位, 接触点の微小変位」を求める操りの逆運動学の問題を取り扱う.

4.2 指と物体の微小変位の運動学

物体の操りの逆運動学を解くために物体の位置・姿勢の時間的変化, すなわち物体の位置・姿勢の微小変位 $\delta r_w, \delta \Theta_w$ が必要である. 操り開始点の物体の位置・姿勢 $r_{w_o}, E_{w_o} = (e_{w_{ox}}, e_{w_{oy}}, e_{w_{oz}})$ と操り終了点の物体の位置・姿勢 $r_{w_f}, E_{w_f} = (e_{w_{fx}}, e_{w_{fy}}, e_{w_{fz}})$ を与えてその間の軌道を線形補間して生成する [18].

指の腹が物体を操っているとき, 指の関節角が変わると指リンク上の接触点が移動し, 物体の位置・姿勢が変わると物体上の接触点が移動する. Fig. 14 に示すように接触している指リ

Fig. 13 Algorithm for grasping

Fig. 14 Velocities of contact point on finger and object

リンクの根元の直進速度を $\mathbf{r}_f$, 接触している指リンクの関節の回転角速度を ω_f , 物体の代表点の直進速度を $\mathbf{r}_w$, 物体の代表点の回転角速度を ω_w とすると, 指リンク上の接触点の移動速度 $\mathbf{v}_{cf}$, 物体上の接触点の移動速度 $\mathbf{v}_{cw}$ はそれぞれ

$$\mathbf{v}_{cf} = \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{r}_f + \omega_f \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_f) = J_a \dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_{cw} = \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{r}_w + \omega_w \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_w) \quad (10)$$

である. ここで, 指の関節角速度 $\dot{\mathbf{q}} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_m)^T$,

$$J_a = (\mathbf{s}_1 \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1), \mathbf{s}_2 \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_2), \dots, \mathbf{s}_m \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_f)) \quad (11)$$

で, $J_a \in \mathbb{R}^{3 \times m}$ である. ただし, $\mathbf{s}_i$ は第 i の関節回転軸の方向ベクトル, $\mathbf{r}_i$ は第 i の指リンクの根元, $i = 1, 2, \dots, m$ である.

接触しながらの2物体の相対運動は我々が経験する実際の運動から

- 1) 純転がり (Pure Rolling) 運動
- 2) 捻り転がり (Twist Rolling) 運動
- 3) 滑り転がり (Slide Rolling) 運動

と単純化することができる [11]. 純転がり (PR) 運動は接触点における両物体の速度と接触点における法線回りの回転速度が等しいことが条件であり, 相対自由度は転がりの2自由度であるから指は4以上の自由度を持つ必要がある. 捻り転がり (TR) 運動は接触点における両物体の速度が等しいことが条件であり, 相対自由度は捻りの1自由度, 転がりの2自由度の合わせて3自由度であるから指は3以上の自由度を持つ必要がある. 滑り転がり (SR) 運動は接触点における法線方向の速度が等しいことが条件であり, 相対自由度が捻りの1自由度, 転がりの2自由度, 滑りの2自由度の合わせて5自由度であるから指は1以上の自由度を持つ必要がある.

4.3 操りの逆運動学

操りの逆運動学とは純転がり運動, 捻り転がり運動, 滑り転がり運動のそれぞれについて, 物体の位置・姿勢の微小変位 $\delta \mathbf{r}_w, \delta \Theta_w$ を与えて各指について指関節の微小変位 $\delta \mathbf{q}$ を求めることである. ここで変位前の接触点や関節角, 物体の位置・姿勢等 (把握問題) は分かっているものとする. $J_s = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_m)$, 指の法線ベクトルを $\mathbf{n}$ とすると, 純転がり運動の条件から

$$\delta \mathbf{q} = \begin{pmatrix} J_a \\ \mathbf{n}^T J_s \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \delta \mathbf{r}_w + \delta \Theta_w \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_w) \\ (\delta \Theta_w \cdot \mathbf{n}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

の $\delta \mathbf{q} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ を得る. また, 捻り転がり運動の条件から

$$\delta \mathbf{q} = J_a^{-1} (\delta \mathbf{r}_w + \delta \Theta_w \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_w)) \quad (13)$$

の $\delta \mathbf{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ を得る. また, 滑り転がり運動の条件から

$$\delta \mathbf{q} = \frac{((\delta \mathbf{r}_w + \delta \Theta_w \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_w)) \cdot \mathbf{n})}{(J_a \cdot \mathbf{n})} \quad (14)$$

の $\delta \mathbf{q} \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ を得る [11]. それぞれの運動条件から決まる微小変位 $\delta \mathbf{q}, \delta \mathbf{r}_w, \delta \Theta_w$ を加えて新しい指と物体の位置・姿勢が

$$\mathbf{q}_{new} = \mathbf{q}_{old} + \delta \mathbf{q} \quad (15)$$

Fig. 15 Normal vectors

Fig. 16 Object regrasping by finger

$$\mathbf{r}_{w_{new}} = \mathbf{r}_{w_{old}} + \delta \mathbf{r}_w \quad (16)$$

$$E_{w_{new}} = E_{w_{old}} + \delta \Theta_w \times E_w \quad (17)$$

となる. この計算を繰り返すことで, 一連の操りを表すことができる. 新しい接触点は新しい $\mathbf{q}, \mathbf{r}_w, \Theta_w$ をもとに把握の逆運動学から求める方が精度が高い [11].

指は円筒と楕円体から成っているから, Fig. 15 のように指の円筒部分による操りには円筒の法線ベクトル $\mathbf{n}_c$ (式 (18)) を使い, 指の楕円体部分による操りには楕円体の法線ベクトル $\mathbf{n}_e$ (式 (19)) を使う.

$$\mathbf{n}_c = A_c((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1) C_2 + \mathbf{e}_3 S_2) \quad (18)$$

$$\mathbf{n}_e = A_e(b(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) C_3 + a((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1) C_2 + \mathbf{e}_3 S_2) S_3) \quad (19)$$

$$A_c = |(\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1) C_2 + \mathbf{e}_3 S_2|^{-1}$$

$$A_e = |b(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) C_3 + a((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1) C_2 + \mathbf{e}_3 S_2) S_3|^{-1}$$

4.4 操りにおける指関節の使い方

本シミュレータで用いる多指ハンドは1本の指に付き4自由度を仮定しており, 接触運動の種類に応じて使用する関節を選択し, 接触運動を唯一に決定できるようにする. 純転がり運動はすべての関節を使用し, 捻り転がり運動は第1の関節を固定し, 滑り転がり運動は第4の関節のみ使用する. また, 指が特異姿勢, 例えば指が伸び切った状態 (Fig. 16 (a)) になった場合は指定した接触運動ができなくなるので, 物体の持ち替えにより指の姿勢を変更し, 操りを続ける. 新たな指の姿勢 (Fig. 16 (b)) は人間が画面を見て決定する.

5. シミュレータの開発とシミュレーションの例

5.1 シミュレータの概要

開発したシミュレータは, B-スプライン曲面の物体を造り, 多指ハンドの指の腹の部分を用いる把握・操りの逆運動学問題を解析し, その結果をディスプレイ上に三次元画像の表示で確

かめることができるものである。シミュレータでの単位は、角度が度[deg]、距離がミリメートル[mm]である。

多指ハンドは、第1, 2の指リンクは長さが35[mm]、半径が10[mm]の円筒であり、指先となる第3の指リンクは、半分が長さが25[mm]、半径が10[mm]の円筒であり、半分が長軸の半径が25[mm]、短軸の半径が10[mm]の楕円体である。手の平は幅が55[mm]、高さが55[mm]、太さが20[mm]の直方体である。各指の根元 $r_{f_1}, r_{f_2}, r_{f_3}, r_{f_4}$ は

$$\begin{aligned} r_{f_1} &= (27.5, 27.5, -50.0)^T & r_{f_2} &= (-27.5, 27.5, -50.0)^T \\ r_{f_3} &= (-27.5, -27.5, -50.0)^T & r_{f_4} &= (27.5, -27.5, -50.0)^T \end{aligned}$$

である。また、各指の各関節の回転軸の方向ベクトルの組み合わせによっていろいろな関節構造の多指ハンドが考えられる。回転軸の方向によって関節は P_x, P_y, R に分類できる。 P_x は回転軸の方向が i , P_y は回転軸の方向が j , R は回転軸の方向が k である。

把握のシミュレーションは、座標変換された物体を把握し、各指リンクの関節角と接触点の座標を求めることである。物体を先に姿勢変換し、後に位置変換する。位置変換 $T_o(t_x, t_y, t_z)$ は原点を中心に x_o, y_o, z_o 軸方向にそれぞれ t_x, t_y, t_z 移動することであり、姿勢変換 $R_o(r_x, r_y, r_z)$ は原点を中心に x_o, y_o, z_o 軸にそれぞれ r_x, r_y, r_z 回転することである。ただし、 x_o, y_o, z_o 軸は原点固定の座標軸である。シミュレーションは各指の関節構造が $P_y P_x P_x P_x$ (人間の指と同じ構造) の多指ハンドで行う。

操りのシミュレーションは、開始点の位置・姿勢から終了点の位置・姿勢まで物体を操ったときの各指リンクの関節角の推移と接触点の推移を求めることである。物体の位置・姿勢の変化は、パラメータ u, v の値が零である物体上の代表点を中心に行われ、位置変化 $T_w(t_x, t_y, t_z)$ は代表点を中心に x_w, y_w, z_w 軸方向にそれぞれ t_x, t_y, t_z 移動することであり、姿勢変化 $R_w(r_x, r_y, r_z)$ は代表点を中心に x_w, y_w, z_w 軸にそれぞれ r_x, r_y, r_z 回転することである。ただし、 x_w, y_w, z_w 軸は物体の代表点固定の座標軸である。シミュレーションは11種類の関節構造の指 $R P_x R P_x, R P_x P_x P_x, R P_x P_y P_x, P_x R P_x P_x, P_x R P_y P_x, P_x P_y R P_x, P_x P_y P_x P_x, P_x P_y P_y P_x, P_y P_x R P_x, P_y P_x P_x P_x, P_y P_x P_y P_x$ が用意されている。

Orientation [deg]: $R_o(-15.0, 0.0, 25.0)$
Position [mm]: $T_o(-7.0, 5.0, 7.0)$
Solution [deg]:
 $q_1 = (10.0, 82.5, 0.0, 31.3)$ $q_2 = (-46.0, 61.9, 0.0, 80.6)$
 $q_3 = (-15.0, 62.2, 0.0, 50.4)$ $q_4 = (-30.0, 55.0, 0.0, 45.8)$

Fig. 17 Grasping of vase

5.2 把握のシミュレーション

Fig. 17 は、断面が円の花瓶形状の物体を挟み動作で把握した例を示す。これは円筒と B-スプライン曲面、円筒と B-スプライン曲線、楕円体と B-スプライン曲面の接触を解いた例である。各指は第2, 3の指リンクを使って把握している。ここで、第1, 2, 3, 4指はそれぞれ図中の右上, 左上, 左下, 右下の指である。

Fig. 18 は、液体洗剤のボトルの物体を握り動作で把握した例を示す。これは円筒と B-スプライン曲面、楕円体と B-スプライン曲面の接触を解いた例である。第1, 4指は第2, 3の指リンクを、第2, 3指はすべての指リンクを使って把握している。

5.3 操りのシミュレーション

Fig. 19 は、花瓶形状の物体を操った例を示す。第1指は $R P_x P_y P_x$, 純転がり (PR) 運動であり、第2指は $R P_x P_y P_x$,

Orientation [deg]: $R_o(4.0, 0.0, 10.0)$
Position [mm]: $T_o(-2.0, 0.0, 25.0)$
Solution [deg]:
 $q_1 = (-20.0, 5.0, 73.1, 61.1)$ $q_2 = (15.0, 47.6, 39.6, 78.5)$
 $q_3 = (-15.0, 30.3, 19.4, 87.5)$ $q_4 = (20.0, 30.0, 80.6, 35.8)$

Fig. 18 Grasping of bottle

Initial/final position [mm]:
 $T_o(-10.0, -10.0, 40.0) \rightarrow T_w(-5.0, 5.0, -5.0)$
Initial/final orientation [deg]:
 $R_o(-10.0, 30.0, 15.0) \rightarrow R_w(10.0, 10.0, -10.0)$
Initial/final joint displacements [deg]:
 $q_1 = (-30.0, 125.0, 50.0, -59.7)$ $q_2 = (-50.0, 100.0, 60.0, -38.8)$
 $q_3 = (0.0, 70.0, 0.0, 15.8)$ $q_4 = (0.0, 70.0, 0.0, 22.9)$
↓
 $q_1 = (-46.2, 115.2, 73.8, -36.5)$ $q_2 = (-31.3, 87.0, 54.9, -14.7)$
 $q_3 = (0.0, 81.6, 17.3, 1.3)$ $q_4 = (0.0, 64.7, 1.4, 44.6)$

Fig. 19 Manipulation of vase

Initial/final position [mm]:
 $T_o(0.0, 0.0, 20.0) \rightarrow T_w(0.0, 0.0, 20.0)$
 Initial/final orientation [deg]:
 $R_o(0.0, 0.0, 0.0) \rightarrow R_w(0.0, 0.0, 10.0)$
 Initial/final joint displacements [deg]:
 $q_1 = (55.0, 0.0, 50.0, -10.4)$ $q_2 = (55.0, 0.0, 50.0, -10.4)$
 $q_3 = (45.0, 0.0, 35.0, 51.8)$ $q_4 = (40.0, 0.0, 35.0, 62.6)$
 ↓
 Regrasping(new joint displacements):
 $q_3 = (50.0, -1.2, 30.0, 39.0)$ $q_4 = (50.0, -1.3, 30.0, 48.0)$
 ↓
 $q_1 = (55.0, 0.0, 50.0, -0.4)$ $q_2 = (55.0, 0.0, 50.0, -24.9)$
 $q_3 = (50.0, -1.8, 43.2, 8.9)$ $q_4 = (50.0, -1.5, 40.5, 28.5)$

Fig. 20 Manipulation of closed surface

Initial/final position [mm]:
 $T_o(10.0, 10.0, 40.0) \rightarrow T_w(-20.0, -20.0, -20.0)$
 Initial/final orientation [deg]:
 $R_o(10.0, 0.0, 70.0) \rightarrow R_w(-10.0, 0.0, 20.0)$
 Initial/final joint displacements [deg]:
 $q_1 = (75.0, 15.0, 0.0, 8.9)$ $q_2 = (15.0, 80.0, 15.0, 10.9)$
 $q_3 = (0.0, 70.0, 0.0, 15.4)$ $q_4 = (0.0, 20.0, 70.0, 38.5)$
 ↓
 $q_1 = (71.1, 43.2, -44.2, 26.3)$ $q_2 = (15.0, 70.3, 2.7, 79.6)$
 $q_3 = (0.0, 63.9, -64.3, 64.1)$ $q_4 = (0.0, 20.0, 70.0, -12.5)$

Fig. 21 Manipulation of curved pipe

純転がり (PR) 運動であり、第3指は $R P_x P_y P_x$, 捻り転がり (TR) 運動であり、第4指は $R P_x P_y P_x$, 捻り転がり (TR) 運動である。物体を持ち替えずに操った。

Fig. 20 は、閉曲面形状の物体を操った例を示す。第1指は $P_x P_y P_x P_x$, 滑り転がり (SR) 運動、第2指は $P_x P_y P_x P_x$, 滑り転がり (SR) 運動、第3指は $P_x P_y P_x P_x$, 捻り転がり (TR) 運動、第4指は $P_x P_y P_x P_x$, 捻り転がり (TR) 運動である。操りの途中、第3、4指が伸び切ったために物体を持ち替えて操った。

Fig. 21 は、曲った管の物体を操った例を示す。第1指は $P_x P_y P_y P_x$, 純転がり (PR) 運動、第2指は $P_y P_x P_y P_x$, 捻り転がり (TR) 運動、第3指は $P_y P_x R P_x$, 捻り転がり (TR) 運動、第4指は $P_y P_x P_x P_x$, 滑り転がり (SR) 運動である。物体を持ち替えずに操った。

6. 結 論

本論文における結論は以下の通りである。

- 1) 複雑な形状の物体を表現する手段として B-スプライン曲面で表す方法を導入し、円筒と楕円体から成る指が B-スプライン曲面を把握・操りをする際に起こり得る接触の種類を分類し、円筒と点、円筒と B-スプライン曲線、円筒と B-スプライン曲面、楕円体と点、楕円体と B-スプライン曲線、楕円体と B-スプライン曲面の接触問題を解析した。
- 2) 指の腹による B-スプライン曲面物体の把握・操りの逆運動学問題を解析するシミュレーションシステムを開発した。
- 3) 開発したシミュレーションシステムで花瓶形状、閉曲面形状、管形状、液体洗剤ボトル形状等の B-スプライン曲面で表現された様々な物体の把握・操りを実際に解析してそのシミュレーションシステムの有効性を示した。

今後の展望として、物体の位置・姿勢、指の関節角に基づく効率的な持ち替え動作の決定、つまり、持ち替え動作の最適化に関する研究や、指の腹による B-スプライン曲面物体の把握と操りの力学の研究や、物体を器用に操るため、どんな関節構造の多指ロボットハンドが一番よいか、すなわちハンドが持つ器用さに関する研究等が必要である。また、本論文でのシミュレーションの結果に基づいて実際に多指ロボットハンドを製作し、多指ハンドとシミュレーションシステムを結び付け、物体を操ることができる汎用的なロボットハンドシステムを実現する必要があると考えられる。

参 考 文 献

- [1] J. Napier: "The prehensile movements of the human hand," J. Bone Joint Surg., vol.38b, no.4, pp.902-913, 1956.
- [2] J. Kerr and B. Roth: "Analysis of multifingered hands," Int. J. Robot. Res., vol.4, no.4, pp.3-17, 1985.
- [3] M.R. Cutkosky: "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," IEEE Trans. Robot. Automat., vol.5, no.3, pp.269-279, 1989.
- [4] J.C. Trinkle, J.M. Abel and R.P. Paul: "An investigation of frictionless enveloping grasping in the plane," Int. J. Robot. Res., vol.7, no.3, pp.33-51, 1988.
- [5] R.C. Brost: "Automatic grasp planning in the presence of uncertainty," Int. J. Robot. Res., vol.7, no.1, pp.3-17, 1988.
- [6] J.K. Salisbury and J.J. Craig: "Articulated hands: force control and kinematic issues," Int. J. Robot. Res., vol.1, no.1, pp.4-17, 1982.
- [7] D.J. Montana: "The kinematics of contact and grasp," Int. J. Robot. Res., vol.7, no.3, pp.17-32, 1988.
- [8] H. Kobayashi: "Control and geometrical considerations for an articulated robot hand," Int. J. Robot. Res., vol.4, no.1, pp.3-12, 1985.
- [9] T. Yoshikawa and K. Nagai: "Manipulating and grasping forces in manipulation by multifingered hands," IEEE Trans. Robot. Automat., vol.7, no.1, pp.67-77, 1991.
- [10] 金子, 谷江: "自己姿勢変形性を利用した多指ロボットハンドと未知対象物との接触点検出," 日本ロボット学会誌, vol.8, no.6, pp.652-661,

1990.

- [11] 高野, 永島, 関: “指の腹による物体の把握と操りの運動学”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.83-90, 1996.
- [12] L. Piegl and W. Tiller: “Curve and surface constructions using rational B-splines,” Computer Aided Design, vol.19, no.9, pp.485-498, 1987.
- [13] W. Tiller: “Rational B-splines for curve and surface representation,” IEEE Computer Graphics and Applications, Sep., pp.61-69, 1983.
- [14] E. Cohen, T. Lyche and L.L. Schumaker: “Algorithms for degree-raising of splines,” ACM Trans. Graphics, vol.4, no.3, pp.171-181, 1985.
- [15] P.J. Hartley and C.J. Judd: “Parametrization and shape of B-spline curves for CAD,” Computer Aided Design, vol.12, no.5, pp.235-238, 1980.
- [16] E.T.Y. Lee: “Choosing nodes in parametric curve interpolation,” Computer Aided Design, vol.21, no.6, pp.363-370, 1989.
- [17] D.F. Rogers and J.A. Adams: “Mathematical elements for computer graphics,” pp.445-456, McGraw Hill, 1989.
- [18] P.J. McKerrow: “Introduction to robotics,” pp.131-174, Addison Wesley, 1993.

付録 A. 式 (3)～式 (5) の導出方法

円筒と B-スプライン曲面が接する条件 2, 3 は B-スプライン曲面の両接線ベクトルと円筒の法線ベクトルが直交する (内積が零) ことで, 円筒の法線ベクトル $\mathbf{n}$ が式 (18) であるからそれぞれ

$$((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)C_1 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)S_1)C_2 + (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)S_2 = 0 \quad (20)$$

$$((\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2)C_1 - (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1)S_1)C_2 + (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3)S_2 = 0 \quad (21)$$

になる. 式 (20), 式 (21) から θ_2 を消去して θ_1 について整理すると, 式 (3) を得る. また, 式 (20) から式 (4) を得る. 接する条件 1 は円筒と B-スプライン曲面が共有点を持つことで, Fig. 6 から

$$\mathbf{g} = \mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1 \quad (22)$$

$$\mathbf{r}_{finger} = \mathbf{r}_f + l\mathbf{g} + c\mathbf{n} \quad (23)$$

であるから

$$\begin{aligned} F(u, v, l) &= l(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) + \mathbf{r}_f - \mathbf{r}_{object} \\ &+ c((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1)C_2 + \mathbf{e}_3 S_2) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

になる. 式 (24) から l を消去するため, $(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) \times$ 式 (24) を整理すると, 式 (5) を得る.

付録 B. 式 (6)～式 (8) の導出方法

楕円体と B-スプライン曲面が接する条件 2, 3 は B-スプライン曲面の両接線ベクトルと楕円体の法線ベクトルが直交する (内積が零) ことで, 楕円体の法線ベクトル $\mathbf{n}$ が式 (19) であるからそれぞれ

$$\begin{aligned} a(((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)C_1 - (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)S_1)C_2 + (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_3)S_2)S_3 \\ + b((\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_1)C_1 + (\mathbf{t}_u \cdot \mathbf{e}_2)S_1)C_3 = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} a(((\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2)C_1 - (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1)S_1)C_2 + (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_3)S_2)S_3 \\ + b((\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_1)C_1 + (\mathbf{t}_v \cdot \mathbf{e}_2)S_1)C_3 = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

になる. 式 (25) (26) から θ_3 を消去して θ_2 について整理すると, 式 (6) を得る. また, 式 (25) から式 (7) を得る. 接する条件 1 は楕円体と B-スプライン曲面が共有点を持つことで, Fig. 7 から

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{finger} &= a(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1)C_3 \\ &+ b((\mathbf{e}_2 C_1 - \mathbf{e}_1 S_1)C_2 + \mathbf{e}_3 S_2)S_3 \\ &+ d(\mathbf{e}_1 C_1 + \mathbf{e}_2 S_1) + \mathbf{r}_f \end{aligned} \quad (27)$$

であるから, 式 (8) になる.

黄 昶淳 (Chang-Soon Hwang)

1967 年 10 月 11 日生. 1994 年韓国慶北大学校工科大学機械工学部機械工学卒業. 1997 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 同年同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程に進学, 現在に至る. 多指ロボットハンドのマニピュレーション, 指の運動制御などに興味を持つ. 精密工学会会員. (日本ロボット学会学生会員)

佐々木健 (Ken Sasaki)

1957 年 1 月 15 日生. 1980 年東京大学工学部精密機械工学科卒業. 1982 年同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 1982 年～1985 年日本電気 (株) に在職. 1987 年東京大学より工学博士の学位を取得. 同年同大学工学部精密機械工学科助教授. 1996 年米国スタンフォード大学客員研究員. ロボット用触覚センサ, 超音波センサとその信号処理, 移動ロボット用のセンサシステム, 力制御によるハンドリング, 多指ハンドのマニピュレーションなどの研究に従事. 精密工学会会員. (日本ロボット学会正会員)

高野政晴 (Masaharu Takano)

1936 年 11 月 25 日生. 1960 年東京大学工学部精密機械工学科卒業. 1963 年同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 1966 年同大学より工学博士の学位を取得. 1968 年同大学工学部精密機械工学科助教授. 1980 年同大学工学部精密機械工学科教授. 1997 年関西大学大学院工学研究科管理工学専攻教授. 専門分野は機構学, 振動学, ロボット工学, 機械運動の高速化, ロボットの機構・運動制御, 移動ロボットのナビゲーション, ロボットハンド, 福祉ロボットなどの研究に従事. 精密工学会, 日本機械学会, 日本騒音制御工学会などの会員.

(日本ロボット学会正会員)

高橋英樹 (Hideki Takahashi)

1972 年 9 月 22 日生. 1996 年東京大学工学部精密機械工学科卒業. 同年同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程に進学, 現在に至る. 指の力制御, 多指ハンドのマニピュレーションに興味を持つ. 精密工学会会員.

(日本ロボット学会学生会員)