姿勢を考慮したロボットマニピュレータの軌道計画法[†]

田 中 敏 幸*・佐久間 聡*・溝 口 哲*

Path Planning of Robot Manipulator with Quaternion[†]

Toshiyuki TANAKA*, Satoshi SAKUMA* and Satoru MIZOGUCHI*

This paper deals with path planning of robot manipulator using spline method and quaternion. Calculations of trajectory and orientation are done independently. In calculating the trajectory, some regions are appointed instead of some points which the endeffector goes through. The trajectory under consideration includes a part of straight line. A curve of the trajectory is assumed as linear term and Fourier series. On the boundary of the curve and straight line, the first derivative of function characterizing the curve has the same value of slope of the straight line. Fourier coefficients are obtained by linear programming so that value of cost function is minimal under those conditions. The pose of the endeffector on the trajectory is calculated by using quaternion. The poses of some points are given by Euler angles; roll, pitch, yaw. Euler angles are converted to quaternions. The poses of other points on the trajectory are obtained by interpolating the given quaternions, using Bezier interpolation method. An example is shown by using skeleton model of robot manipulator.

Key Words: path planning, spline method, quaternion, Fourier series, linear programming

1. はじめに

ロボットマニピュレータの軌道を計画する際に、エンドエフェクタが通過すべき主要な点を与え、それらを滑らかな曲線で補間する方法が知られている。このような軌道計画にはスプライン関数がよく用いられる。Bスプラインや多項式スプラインなど一般的なスプライン法を軌道計画に用いる場合には、軌道上の各座標を表す式をパラメトリックに表現しなければならない。しかし、そのような方法では3次元空間における通過点を指定するだけでなく、その通過点における時間パラメータの値も指定する必要がある。軌道全体の形状は、通過点とその点の時間パラメータの値の組み合わせによって決定する。マニピュレータの軌道計画では、必ずしも所望の軌道曲線をあらかじめ決めておいてそれを実現するための通過点とパラメータを選ぶ必要はなく、コンピュータと人間が対話的に軌道を決定することが望ましい。その際に各通過点を1点で指定し、かつその点の時間パラメータも指定するという従来のスプライン法では自由度が少なすぎるように思われる。そこで軌道を求める際には、通過点あるいは時間パラメータのいずれかの値に自由度をもたせて軌道計画を容易にするスプライン法が望まれる。

その様なスプライン関数への要望を満たす方法として、途中点を領域で指定してその中で最適な軌道を求める方法^{1), 2)}と途中の通過時刻を修正して最適軌道を求める方法^{3)~5)}がある。さらに途中を領域で指定する方法には、主要な領域のみを指定する方法¹⁾と軌道全体が含まれなければならない領域を指定する方法²⁾がある。軌道が含まれるべき空間を指定する方法は軌道に対する制約条件が複雑なため最適化法を用いて軌道を求める際に多くの計算を必要とする。ここでは、主要な領域を指定する方法について考えることにする。文献1では、軌道の始点から終点までをフーリエ級数を用いた一つの関数で表現している。そのため途中の通過領域を指定する数の増加に比例して、関数を構成するフーリエ級数の項数が増加していく。指定する通過領域の数が多いときには軌道全体をいくつかの部分に分けて、それぞれの軌道を滑らかに接続する方が軌道を表現する上で望ましいと思われる。また文献の手法では、途中通過点が直線的に並んだときに、不必要な振動軌道になってしまう。マニピュレータが狭い直線的な通路を移動する場合に、軌道が揺れることは好ましくない。そこで直線的な軌道をフーリエ級数軌道とは別に扱ったほうがよいと思われる。軌道をいくつかの部分に分ける場合に軌道と軌道の接続点における滑らかさも重要になる。接続点での軌道の滑らかさを向上させるために、先の文献で非線形計画法であった軌道計算手法を線形計算のみで行うことが必要となる。

マニピュレータの動作を考える時に、台座からエンドエフェクタまでつながっているので障害物回避の際にエンドエフェ

[†] 第32回SICE学術講演会で発表(1993・8)

* 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

* Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

(Received May 20, 1997)

(Revised December 21, 1998)

クタの軌道を考えただけでは不十分である。実際には各関節の位置や、マニピュレータの姿勢に関する情報が必要となる。物体をつかんだり移動させたりする場合にマニピュレータは6自由度あればよいことは既に知られている。エンドエフェクタの位置を決めるのに3自由度、姿勢を決めるのに3自由度が必要となる。エンドエフェクタの位置と姿勢が決まればマニピュレータ全体の姿勢が決まることになる。エンドエフェクタの姿勢を表現する一つの方法として四元数^{6),7)}がある。姿勢を同次変換行列などを用いて計算する場合と異なり冗長がなく効率的な計算ができる。

本論文では、エンドエフェクタの軌道と軌道上の各点における姿勢を求める軌道計画法を示す。本手法ではエンドエフェクタの軌道と姿勢は独立に計算することができる。軌道の計算法としては、途中の通過点を一点で指定する代わりに任意の領域で指定するスプライン法を用いる。軌道上の各座標が直線とフーリエ級数の和であると仮定して^{1),8)}、与えられた条件下で最適なフーリエ係数を線形計画法を用いて求める。姿勢については四元数を用いて計算を行う。主要な通過領域における姿勢は有用性を考慮してオイラー角であらかじめ与える。オイラー角で与えられたいくつかの点における姿勢を四元数に変換し、それらをベジエ補間することによって軌道上の全ての姿勢を計算する。エンドエフェクタの姿勢が決定した後、マニピュレータの関節角を幾何学的に求め、全体としての姿勢を求める。シミュレーションにはマニピュレータのスケルトンモデルを用いて、数値計算例を示している。

2. 軌道計算法

2.1 問題の記述

ここでは、エンドエフェクタの軌道計算法について説明する。軌道計算の基本原則を Fig. 1 に示す。図に示されるように軌道は始点 $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ を出発し、領域 Ω_i ($i = 1, 2, \dots$) を通り、終点 $P_N = (x_N, y_N, z_N)$ に向かう。軌道の途中 $P_{N-1} = (x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1})$ から P_N までは直線的に移動する。実際には直線部分はどこでもかまわないが説明上一ヶ所とする。軌道上の座標は、時間パラメータ t を用いて独立に表すことができるとする。すなわち時刻 t における座標は $(x(t), y(t), z(t))$ となる。制約条件が簡単になるように、軌道が通る主要な領域を次のように与える。

$$m_i \leq x_i \leq M_i \quad (1)$$

上式で、 $m_i = (m_{xi}, m_{yi}, m_{zi})$, $M_i = (M_{xi}, M_{yi}, M_{zi})$ ($i = 1, 2, \dots$) であり、それぞれの境界値を表す。本手法では軌道の通過点に自由度をもたせ、ある時刻 t_i において領域 Ω_i のどこか1点を通過すると考える。領域を通過する時刻は、領域間の距離や通過順序を考慮して決定しておかなければならない。始点 P_0 から点 P_{N-1} までは軌道は曲線であり、任意回微分可能であること始点、終点を必ず通過することなどの理由から次式のように仮定する。

$$x(t) = x_0 + \frac{x_{N-1} - x_0}{t_{N-1} - t_0} t + \sum_{j=1}^{N-1} a_{xj} \sin j\omega t \quad (2)$$

$$t_0 \leq t \leq t_{N-1}, \quad \omega = \frac{\pi}{t_{N-1} - t_0}$$

途中の通過点のいくつかが直線的に並んだときにフーリエ級数で軌道を表現すると、直線部分が振動軌道となってしまうので、直線軌道になるとわかっている部分については別の式で表現する。Fig. 1 の点 P_{N-1} から終点 P_N までの軌道については次式のように表すことができる。

$$x(t) = x_0 + \frac{x_N - x_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} (t - t_{N-1}) \quad (3)$$

$$t_{N-1} \leq t \leq t_N$$

y 座標、z 座標についても同様の式で仮定する。フーリエ級数の次数については途中通過点の数より1次高い $(N-1)$ 次とする。

軌道が曲線から直線に移る時、その接点で滑らかに変化していかなければならない。各軌道を独立に計算しただけではその接続点で不都合が生じてしまう。いま、図の点 P_{N-1} について考える。滑らかな接続を考えて点 P_{N-1} で曲線の微分係数と直線の傾きが一致していると考え、この条件は次式で表すことができる。

$$\frac{d}{dt} x(t_{N-1}) = \frac{x_{N-1} - x_0}{t_{N-1} - t_0} + \sum_{j=1}^{N-1} j\omega a_{xj} \cos j\omega t_{N-1} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} x(t_{N-1}) = \frac{x_N - x_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \quad (5)$$

これらの条件のもとでフーリエ係数を求める際に、軌道全体にわたって加速度の変化ができるだけ少なくなるように、そして高調波成分は不必要な振動を起こす可能性がある、できるだけ振幅を小さくする必要がある。また、計算の取り扱いやすさから評価関数が線形の式になることが望ましい。それらのことを考慮して次のような評価関数を考え、評価関

Fig. 1 Trajectory of endeffector

数の値が最少となるフーリエ係数を決定する。

$$f = \sum_{p=x,y,z} \sum_{j=1}^{N-1} |k_{pj} a_{pj}| \quad (6)$$

上式において、 k_{pj} は a_{pj} の重み係数を表し、フーリエ級数の高調波を軽減したい時には高調波に対応する重み係数を大きくする。与えられた各領域の中心点を通る軌道から得られるフーリエ係数の符号を評価関数の対応する項の係数の符号として決定する。中心点を通る軌道のフーリエ係数を初期値として軌道計算を行った時、得られた軌道のフーリエ係数の値が零になる場合がある。この場合には、反対符号のパラメータ空間で最適軌道が存在する可能性があるため、零になったフーリエ係数に対応する評価関数の項を逆符号にして再計算し、この2回の計算によって得られた軌道を比較して、より良いほうを最適軌道とする。ここで述べた問題は、(1),(4),(5) 式に対応する制約条件のもとで (6) 式の値を最小にするフーリエ係数を見つける線形計画問題であり、シンプレックス法などによって解くことができる。この問題は (6) 式を非線形とすることで非線形計画法を用いて解くこともできる。非線形計画法を用いた場合のほうが曲線軌道におけるフーリエ係数の値が小さくなり、結果として軌道のふくらみも小さくなるが、二つの軌道の接点における計算精度を考えると、ここでは問題を線形計画問題として記述した。始点と終点の間に二つ以上の曲線部分がある場合には、それぞれの曲線について同様の線形計画問題を考え、それを解くことによって軌道を表す式を求めなければならない。そして、曲線部分の両端が直線部分と接続している時は、フーリエ級数の次数を通過領域の数より2次高くする必要があり、等式制約条件は二つになる。

エンドエフェクタの姿勢計算については、軌道計算と独立に取り扱う。始点、終点および各通過領域におけるエンドエフェクタの姿勢をオイラー角で与えておく。通過領域については、各領域の中心点を代表点と考え、時刻 t_i に領域 Ω_i の中心点を通ったものとして姿勢を与える。マニピュレータ全体の姿勢は手先の位置から逆運動学によって求められる。マニピュレータの周りに十分な空間があるときは手先の位置だけの指定でもよいが、途中で障害物がある場合には、マニピュレータの姿勢が拘束を受けることを考慮しなければならない。ここではマニピュレータのエンドエフェクタが障害物に囲まれた通路を通過する場合を考慮して通過領域における姿勢を考える。障害物間の隙間に通過領域を指定するとき、同一領域内では姿勢は変化しないほうが望ましい。先に記述した方法で軌道計算を行うと、時刻 t_i における領域内の通過位置は変化するが、この場合でもその通過点における姿勢は変化しないものと仮定する。このような条件のもとで、与えられた点以外の軌道上の姿勢を補間計算する。姿勢の計算方法としては四元数を用いる。まず、始点、終点、通過領域に与えられた姿勢のオイラー角を四元数に変換する。隣り合う四元数間をベジェ補間することによって軌道上の任意の

点における四元数を計算する。補間によって得られた四元数を回転行列に変換し、回転行列とマニピュレータの幾何学的形状からマニピュレータ全体の姿勢を計算する。四元数を用いた姿勢計算法の詳細については後の章で記述する。

2.2 軌道計算アルゴリズム

軌道計算法のフローチャートを Fig. 2 に示す。アルゴリズムの詳細を以下に示す。姿勢計算のアルゴリズムについては後で述べる。

step 1: 始点 $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$, 点 $P_{N-1} = (x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1})$, 終点 $P_N = (x_N, y_N, z_N)$ 及び所要時間 T を定める。ここでは $T = N$ とする。

step 2: 軌道が通る主要な領域 Ω_i ($i = 1, 2, \dots, N-2$) を (1) 式のように任意の範囲で指定する。また、各領域 Ω_i の通過時刻 t_i を与える。ここでは $t_i = i$ とする。

step 3: 始点 $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ から点 $P_{N-1} = (x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1})$ まで

Fig. 2 Flowchart of path planning

y_{N-1}, z_{N-1} までの軌道を表す式を (2) 式のように仮定する。フーリエ級数の奇関数項の数は通過領域数より 1 だけ大きくする。各座標について独立に式を仮定する。

step 4: 各領域の中心点を通る曲線を求め、そのフーリエ係数の符号を用いて評価関数を定める。

step 5: step 4 で決定した評価関数を用いて、評価関数の値が最少になるようにフーリエ級数の各係数を決定する。このフーリエ係数決定問題をシンプレックス法を用いて解く。

step 6: 得られたフーリエ係数を調べ、全ての項が非零であれば step 8 に進む。フーリエ係数の中で零のものがある場合には、その係数に対応する評価関数の係数の符号を反転させて、もう 1 度シンプレックス法によりフーリエ係数を求める。

step 7: step 4 と step 6 で得られた結果を比較して、より良いほうを最適解として選択する。

step 8: 点 $P_{N-1} = (x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1})$ から終点 $P_N = (x_N, y_N, z_N)$ までの直線軌道を計算する。

step 9: 得られたフーリエ係数と (2) 式及び step 8 で得られた直線軌道を用いて、始点から終点までの軌道を描く。この手順によって始点から終点までの最適経路を求めることができる。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーションの構成

ここでは、前述の軌道計算法及び姿勢計算法を統合してシミュレーションを行う。シミュレーションでは Fig. 3 に示すスケルトンモデルを考察の対象とした。Fig. 3 ののは 6 つの関節をもつ 6 自由度のマニピュレータで、リンク AB、リンク BC、リンク CD の長さはすべて等しいものとする。図の中に回転軸及び回転角の変数名を記した。回転軸 y_1, y_2, y_3 は平行になっている。シミュレーションは次の手順によって行う。

- (i) 始点 P_0 、終点 P_N 、通過点 P_{N-1} 及び通過領域 Ω_i を与える。通過領域の中心点における姿勢を考え、そのロール、ピッチ、ヨー角を与える。
- (ii) 始点、終点、通過点及び通過領域をもとにして最適軌道のフーリエ係数を求める。
- (iii) ロール、ピッチ、ヨー角を四元数に変換する。最適軌道を求めたことによって、時刻 t_i における通過領域内の通過位置は変化するが、変化後の点における姿勢は領域の中心点における姿勢と変化がないと考える。
- (iv) 軌道の 2 つの制御点間のパラメータ及び 2 つの四元数を補間するためのパラメータをそれぞれ同じ区分数で等間隔に分割し、各パラメータの対応を考える。
- (v) 内挿四元数を計算し、新たな四元数列を作る。
- (vi) 一組の軌道パラメータと姿勢パラメータを選び軌道上の点とその点におけるエンドエフェクタの姿勢を計算する。姿勢が決定した後、マニピュレータの各関節角を幾何学的方法 (付録) により計算し、スケルトンモデルを描く。
- (vii) 軌道パラメータ、姿勢パラメータをそれぞれ始点から終

Table 1 Given data for simulation

i	t_i		x_i	y_i	z_i	ψ_i	θ_i	ϕ_i
1	0.0	—	50.0	-40.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.0	m	40.0	-20.0	10.0	10.0	30.0	10.0
		M	50.0	-10.0	20.0			
3	2.0	m	10.0	30.0	30.0	80.0	10.0	80.0
		M	20.0	40.0	40.0			
4	3.0	—	-55.0	15.0	15.0	0.0	80.0	0.0
5	4.0	—	-50.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0

点まで順次変化させていき、マニピュレータの動作をシミュレートする。

3.2 数値計算例

エンドエフェクタの通過領域およびその領域における姿勢を実際の数値で与えてシミュレーションを行う。シミュレーションに用いた数値を Table 1 に示す。表中で t_i は領域あるいは通過点の通過時刻、 (x_i, y_i, z_i) はエンドエフェクタの 3 次元空間における座標を表し、 $(\psi_i, \theta_i, \phi_i)$ はその点における姿勢のオイラー角を表す。軌道上の各座標を表す曲線の式を仮定する時、途中通過データが三つ、点 P_4 と点 P_5 の間が直線であることから、軌道は一つの曲線部分と一つの直線部分を含み、曲線部分はフーリエ級数の 3 次の項まで考える必要がある。フーリエ係数を求める際的评价関数の重みについては $k_{pi} = 1$ ($p = x, y, z, i = 1, 2, 3$) とする。フーリエ係数の最適値を求めるための計算方法としてシンプレックス法を用いる。おのおのの通過領域の中心点を通る曲線は、連立方程式の求解法を用いて容易に求めることができ、その時のフーリエ係数の値をシンプレックス法の初期値とする。評

Fig. 3 Skeleton model of robot manipulator

価関数(6)には絶対値がついているが、初期値の符号を評価関数の符号として決めておく。この数値計算例では最初の計算で得られたフーリエ係数の中に零になるものがなかったため、1回のシンプレックス計算で最適解が得られた。各座標について独立に軌道を与える式を求めたところ、 x 座標、 y 座標、 z 座標それぞれの評価関数の値は初期値 67.581, 73.601, 35.011 から最適値 58.920, 63.978, 25.388 に変化した。その結果、軌道上の各座標を表す式は次のようになった。

$$x = 50 - 100t + 34.641 \sin \pi t - 24.279 \sin 3\pi t \quad (7)$$

$$y = -40 + 100t + 25.981 \sin \pi t - 12.509 \sin 2\pi t - 25.488 \sin 3\pi t \quad (8)$$

$$z = 20.207 \sin \pi t - 2.887 \sin 2\pi t - 2.294 \sin 3\pi t \quad (9)$$

上記の軌道を表す式と幾何学的な関係式よりシミュレーションを行った結果を Fig. 4 に示す。図中の立方体は軌道が通る主要な通過領域を示している。エンドエフェクタに沿った曲線は本手法によって得られた軌道を表す。点線は直線部分を表す。図に示されるように、軌道、姿勢ともに無理のない滑らかな変化をしていることが判る。

軌道において、二つの直線部分に曲線が挟まれている場合、曲線と直線の1次の微分係数が等しいという境界条件がもう一つ必要になる。そのためにフーリエ級数の次数を更に1次上げる必要がある。本手法は、軌道中に複数の曲線部分が含まれる場合であっても、各曲線軌道を別々のフーリエ級数で仮定することによって所望の軌道を求めることができる。文献1ではエンドエフェクタの軌道を非線形計画法によって求めているが、軌道の直線部分については考慮されていないので、直線部分も曲線として得られてしまう。また、エンドエフェクタの姿勢についても考慮されていないために軌道のみを求めるに留まっている。本手法によってマニピュレータの姿勢も含めた動作全体をシミュレーションすることができた。

Fig. 4 Robot arm trajectory in 3D space. Broad line shows curve trajectory and dotted line shows straight line trajectory. Two cubes mean given regions which end-effector goes through.

4. おわりに

本論文では、エンドエフェクタの姿勢を考慮したロボットマニピュレータの軌道計画法を示した。この軌道計画法ではエンドエフェクタの3次元空間における軌道と、その軌道上の各位置における姿勢を独立に扱っている。軌道は曲線的な部分と直線的な部分を含むとして、それぞれの部分の軌道を表現する式を分けて考えた。曲線部分の軌道を求めるために、主要な通過点を領域で指定したスプライン法を用いた。軌道上の各座標を特徴づける式が線形項とフーリエ級数の和で表されると仮定した。直線と曲線の境界では、曲線軌道の1次の微分係数と直線の傾きが一致すること、および指定領域を通過することを考慮してフーリエ級数を最適にする問題は線形計画問題となり、シンプレックス法によって解くことができた。フーリエ係数を用いることで軌道計算に必要なデータを少なくすることができた。また、途中に直線部分が含まれる場合にその部分で望ましくない振動が残るというフーリエ級数の欠点を曲線部分と直線部分を分けることで改善し、所望の軌道を求めることができた。

次に軌道上の各点の姿勢は四元数を用いて表し、主要な点の姿勢を与えて、それらの間を内挿補間することによって軌道上の各点の姿勢を求めた。四元数の補間は2つの四元数の間の補間公式によって求められるが、各区間ごとのつながりが滑らかでなくなる場合がある。そこで3次のベジェ補間の考え方をを用いて全体としての補間を行った。姿勢の計算に四元数を用いることによって、位置と姿勢をそれぞれ独立に計算することができ、軌道計画が容易になった。

本研究を行うに当たり多くの貴重なご意見をいただいた本塾大学名誉教授佐藤力氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 田中, 川口, 佐藤: 非線形計画法に基づく軌道計画のためのスプライン法, 計測自動制御学会論文集, **28-11**, 1321/1326 (1992)
- 2) Suk-Hwan Suh and Albert B. Bishop: Collision Avoidance Trajectory Planning Using Tube Concept: Analysis and Simulation, Journal of Robotic Systems, **5-6**, 497/525 (1988)
- 3) E. T. Y. Lee: Choosing nodes in parametric curve interpolation, computer-aided design, **21-6**, 363/370 (1989)
- 4) P. J. Hartley and C. J. Judd: Parametrization and shape of B-splines for CAD, computer-aided design, **12-5**, 235/238 (1980)
- 5) Samuel P. Marin: An Approach to Data Parametrization in Parametric Cubic Spline Interpolation Problems, Journal of Approximation Theory, **41**, 64/86 (1984)
- 6) K. Shoemake: Animating Rotation with Quaternion Curves, SIGGRAPH'85, **19-3**, 245/254
- 7) M. Brooks, B. Lillekjendlie: Generation of Curve-Approximating Polygons in 3-D Path Programming, 20th ISIR, 1019/1022
- 8) 丁全鋼, 湯浅, 伊藤: 関節空間における障害物回避パス探索の一方法, 計測自動制御学会論文集, **26-2**, 219/224 (1990)
- 9) 相吉, 志水: 数値計画法演習, 朝倉書店 (1985)
- 10) 遠山茂樹: 機械系のためのロボティクス, 総合電子出版社

(1989)

11) 菅野, 吉村, 高山: Cによるスプライン関数, 東京電機大学出版局 (1993)

12) Fu, Gonzalez, Lee: ロボティクス, 日刊工業新聞社 (1989)

《付 録》

幾何学的に求めたマニピュレータの回転角を表す式は次のようになる.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \quad (.1)$$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{l_1}{l_a}\right) + (\pi - \arcsin(\frac{l_2}{l_1})) \quad (.2)$$

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{l_1}{l_a}\right) \quad (.3)$$

$$\theta_5 = -(\theta_2 + \theta_3) \quad (.4)$$

$$\theta_6 = -\theta_1 \quad (.5)$$

エンドエフェクタの姿勢が決定すれば, 上式を用いてマニピュレータの関節角を計算することができる.

[著 者 紹 介]

田 中 敏 幸 (正会員)

1982年慶應義塾大学工学部計測工学科卒業. 89年同大学大学院博士課程修了. 同年同大理工学部助手. 93年同大専任講師. 95, 96年ドイツ・アーヘン工科大学客員研究員. 96年より同大物理情報工学科専任講師. 現在に至る. 画像処理, 非線形振動論などの研究に従事 (工学博士).

佐久間 聡

1993年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業. 95年同大学院修士課程修了. 同年NTTに入社. 大学院在学中ロボット工学, パターン認識の研究に従事.

溝 口 哲

1993年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業. 95年同大学院修士課程修了. 同年NTT DoCoMoに入社. 大学院在学中スペクトル拡散通信の研究に従事.