

パラレルリンク機構を用いた力覚提示装置 DELTA-4 の開発

荒田 純平* 近藤 寛之* 坂口 正道* 藤本 英雄*

Development of Haptic Device “DELTA-4” using Parallel Mechanism

Jumpei Arata*, Hiroyuki Kondo*, Masamichi Sakaguchi* and Hideo Fujimoto*

In this paper, a new haptic device “DELTA-4” within a high force feedback capability and operability is proposed. DELTA-4 realizes 3 degrees of freedom of translational motions by a novel redundant parallel link mechanism. These benefits can be obtained by DELTA-4 comparing with conventional parallel mechanisms: wider working area, smaller footprint and easier access to the wide range of working area from operators. In this paper, kinematics and its analysis of DELTA-4 are introduced. In addition, an evaluation experiment of force display is presented.

Key Words: Parallel Mechanism, Haptic Device, Force Feedback

1. はじめに

ハプティックデバイスとは、操作者が物体に「触れた感覚」を提示する装置である。この「触れた感覚」には、力覚、振動覚、温覚、摩擦などがあり、これらの感覚を提示する装置のなかでも特に力覚提示装置については、広く研究開発が行われている。

力覚提示装置において、やわらかい・かたい物体の異なる力覚を実現することは重要である。また、力覚を提示するためには、無負荷時における動作の滑らかさ、低い慣性質量などの性能が要求される。これらの高品質な力覚提示装置のために要求される性能をまとめると、力覚提示装置の構造に関して、以下のような特徴を有することが望ましい。

- やわらかい対象物を提示する場合、高い位置分解能、高い力分解能が要求される。
- 一方、かたい対象物を提示する場合、高い剛性、高い出力が要求される。
- また、滑らかで低慣性な動作の実現において、高いバックドライバビリティ、軽量の機構（低慣性）が要求される。

これらの性能を有する力覚提示装置の開発においては、おもにインピーダンス型力覚提示装置、アドミッタンス型力覚提示装置の二つのアプローチから研究開発が行われている。

インピーダンス型力覚提示装置では、位置入力-力出力として動作を行うため、構造そのものに滑らかな入力動作が可能な高いバックドライバビリティを有する機構が求められる。一方、力入力-位置出力とするアドミッタンス型力覚提示装置では、機

構的な制限は少ないものの、力センサによるフィードバック制御を行う必要がある。

2. 研究目的

力覚を伴う訓練用シミュレーション等の研究分野では近年、広くデスクトップで扱うことが可能な比較的小型のインピーダンス型力覚提示装置が利用されている。この理由として、インピーダンス型力覚提示装置は、力センサを必要としないため比較的安価であり、安定した動作が行いやすいことなどが挙げられる。

一般に、力覚提示装置の機構としてシリアルリンク（マニピュレータ型）機構を用いると、大きな動作域を実現することができる。しかし一方で、品質の高い力覚提示を行うには、十分な出力を有するアクチュエータを備える必要があり、シリアルリンク機構では自重が大きくなることから力覚提示装置への実装には不利が生ずる。

この問題を解決するため、インピーダンス型力覚提示装置にパラレルリンク機構の適用することは有用である。一般にパラレルリンクマニピュレータは次のように定義される。“A *generalized parallel link manipulator is a closed-loop kinematic chain mechanism whose end-effector is linked to the base by several independent kinematic chain* [1].”

パラレルリンク機構は、重量の大きいアクチュエータを根元に配置可能であるため、先に述べたインピーダンス型力覚提示装置の実装に要求される高バックドライバビリティ、高剛性、高出力等の実現に有利である。しかしながらパラレルリンク機構の多くは、従来のシリアルリンク機構と比較して同等の機構サイズでも動作域が小さいという問題を有する。そこで本稿では、これらの問題を解決するため、新しいパラレルリンク機構として DELTA-4 を提案する。

原稿受付 2008 年 12 月 20 日

*名古屋工業大学

*Nagoya Institute of Technology

■ 本論文は有用性で評価されました。

3. 関連研究

インピーダンス型力覚提示装置として、Phantom (SensAble Technologies) [2] は、広く利用されている。Phantom はワイヤ減速機構を用いた 6 自由度シリアルリンク機構を有している。また、6 自由度シリアルリンク機構を用いた力覚提示装置として、Freedom 6 (MPB Technologies) [3], Virtuoso 6D (Haption) [4] が開発されている。CyberGrasp, CyberForce は、Immersion により開発されたエグゾスケルトン型の力覚提示装置であり、指先に力覚を提示することが可能である [5]。Clavel は並進 3 自由度を有するパラレルリンク機構 DELTA を開発した [6]。OMEGA (Force Dimension) [7] は、この DELTA を力覚提示装置に適用したものである。また、DELTA は Noviot Technologies の Noviot Falcon へも応用されている [8]。また、Clavel らは RCM (Remote center of motion) を有する 2 自由度パラレルリンク機構である Panto Scope を開発した [12]。Panto Scope は、サージカルシミュレータ Xitact IHP/ITP [13] へ応用されている。岩田らは、広い動作域を有する 6 自由度の冗長パラレルリンク機構を開発し [9], ペン型の力覚提示装置を開発した [10]。SPIDAR (CyVerse) [14], Mimic Mantri (Mimic Technology) [16] は、複数のワイヤをエンドエフェクタに取り付け、モータによりワイヤの張力を制御し力覚を提示する機構である。Adelstein らは、機構内に一つの平面ループと二つの球面ループを有するパラレルリンク機構を用いた 3 自由度のジョイスティック型力覚提示装置を開発した [29]。Wenger らは、並進 3 自由度を有する Orthoglide と、回転 2 自由度を有する Agile eye の二つのパラレルリンク機構を用い、すべてのアクチュエータをベースに設置したハイブリット型の 6 自由度力覚提示装置を開発した [31]。

アドミッタンス型力覚提示装置として、HapticMASTER (Moog FCS Robotics) [17], Ueberle らの開発した VISHARD10 [18] がある。これらは装置にシリアルリンク機構を用いている。パラレルリンク機構を用いたものには、内山らの開発した、改良型 DELTA 機構と 5 リンクパラレルジンバルメカニズムを組み合わせた 6 自由度の力覚提示装置がある [19]。

4. 機構

Fig. 1 に本研究で開発した力覚提示装置 DELTA-4 を示す。DELTA-4 は、エンドエフェクタを二つの平行四節リンクから構成される 2 本のアームによって支持する従来にないパラレルリンク機構であり、並進 3 自由度を有する。DELTA-4 は、四つのアクチュエータで 3 自由度を構成する冗長機構であり、従来より小さい設置面積で大きな動作域を実現すること、また側方へアームを集中して配置することで操作者がアクセス可能な動作域を広く確保可能である等の特徴を有している。

4.1 概要

Fig. 2 に DELTA-4 の構造を示す。DELTA-4 は全 16 リンク、20 関節で構成され、機構内に五つの閉ループを有する。各リンクを連結するすべての関節は 1 自由度回転対偶である。DELTA-4 は、ベースプレート (リンク 0) とエンドエフェクタ (リンク 3) の間を 2 本のアームによって支える構造である。ここで、添

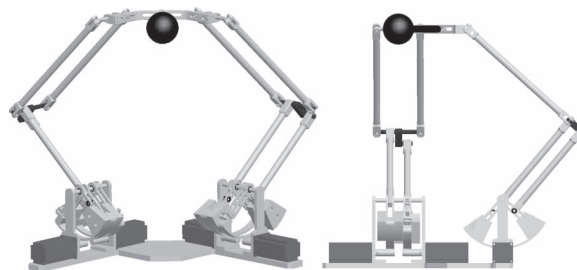


Fig. 1 Overview of DELTA-4

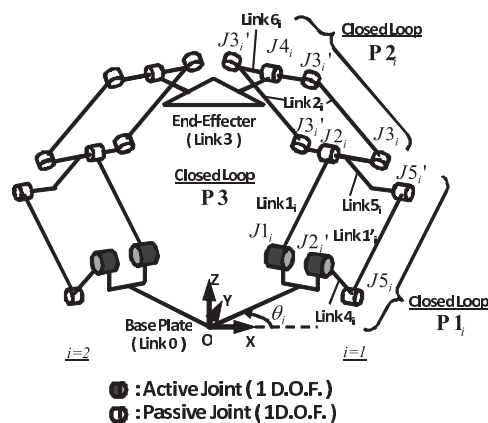


Fig. 2 Structure of DELTA-4

え字 $i(i=1, 2)$ はそれぞれのアームを示す。各アームは、リンク 0, リンク 1, リンク 1', リンク 4, リンク 5 によって構成する平行四節リンク $P1_i$ と、リンク 2, リンク 5, リンク 6 によって構成する平行四節リンク $P2_i$ を有する。平行四節リンク $P1_i$ 内の関節 $J1_i, J2'_i$ は能動関節であり、ベースプレート (リンク 0) に連結される。また関節 $J1_i, J2'_i$ の回転軸は同軸上に存在する。各平行四節リンクに共通するリンクであるリンク 5 は T 字形状であり、平行四節リンク $P1_i, P2_i$ のなす平面が直角となるよう連結する。各アームは、原点を O とする基準座標 X 軸から、 Z 軸周りに設置角度 θ_i でベースプレートに固定される。(ただし、 $\theta_2 - \theta_1 < \pi$ ($\theta_2 > \theta_1$) である。) エンドエフェクタは、各アーム先端部の関節 $J4_i$ によって連結する。関節 $J4_i$ は、各アームの関節 $J1_i, J2_i, J2'_i, J5_i, J5'_i$ と平行である。

以上のようにエンドエフェクタをベースに平行かつ、互いに平行でない二つの回転軸により拘束することで、ベースプレートとエンドエフェクタは平行を保ちながら移動し、並進 3 自由度を実現する。アクチュエータはすべてベースプレートに設置可能であり、計四つのアクチュエータの駆動によって、並進 3 自由度を得る。

本機構の名称である DELTA-4 は、従来の並進 3 自由度を有するパラレルリンク機構である DELTA と、エンドエフェクタの拘束形態に共通点があることに由来する。しかしながら DELTA-4 では、従来にない冗長機構により小さな設置面積、大きな動作域に加えて、操作者がよりエンドエフェクタにアクセスしやすい機構配置が可能であること等の特徴を有している。DELTA-4 の「-4」は拡張された冗長自由度である 4 自由度を示すものである。

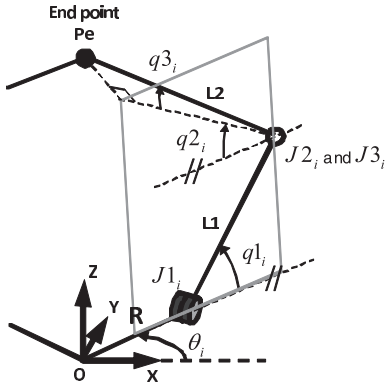


Fig. 3 Kinematic model

4.2 幾何学条件定義

本機構の運動学で、順運動学・逆運動学の両者に関して、幾何学解を得ることが可能である。Fig. 2 におけるリンク 0~3 の寸法を、それぞれ L_0, L_1, L_2, L_3 とする。このとき、 L_0 は基準座標原点から関節 J_{1i} の回転軸までの距離、 L_3 は関節 J_{4i} の回転軸からエンドポイント P_e までの距離である。リンク 0 は基準座標 XY 平面上に、 X 軸方向から Z 軸周りに設置角度 θ_i 傾けて配置される。また、リンク 1 の関節 J_{1i} 回りの回転角を q_{1i} 、平行四節リンク P_{2i} 内の関節 J_{2i} 回りの回転角を q_{2i} 、関節 J_{3i} 周りの回転角を q_{3i} とする。なお、関節 J_{2i}, J_{2i}' の回転角度は、平行四節リンク P_{1i} により同じ値をとる。これらのうち、 q_{1i}, q_{2i} については能動関節であるため、光学式エンコーダ等により角度が取得可能である。本機構の運動学モデルは、リンク 0 とリンク 3 がつねに平行であるため、Fig. 3 の機構モデルと等価である。このとき Fig. 3 の R と、 L_0, L_3 に次式が成り立つ。

$$R = L_0 - L_3 \tag{1}$$

4.3 順運動学

DELTA-4 において、関節 J_{1i}, J_{2i} の関節角度 q_{1i}, q_{2i} が与えられた場合の、エンドエフェクタの終端座標 $Pe_i = (px_i \ py_i \ pz_i)^T$ を求める順運動学について述べる。終端座標 Pe_i は、各アーム ($i = 1, 2$) について同次変換行列 ${}^0T_{ei}$ により与えられる。このとき、 Rot はそれぞれの軸についての回転、 $Trans$ は平行移動を示す。

$${}^0T_{ei} = Rot(Z, \theta_i) Trans(R, 0, 0) Rot(Y, -q_{1i}) Trans(L_1, 0, 0) Rot(Y, q_{1i} + q_{2i}) Trans(-L_2 \cos(q_{3i}), L_2 \sin(q_{3i}), 0) \tag{2}$$

上記の手順により求められる終端座標 Pe_i は式 (3) で表される。

$$\begin{pmatrix} px_i \\ py_i \\ pz_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_i - C_i C_{3i} - L_2 S_{3i} S_{\theta_i} \\ B_i - D_i C_{3i} + L_2 S_{3i} C_{\theta_i} \\ L_1 S_i + L_2 C_{3i} S_{2i} \end{pmatrix} \tag{3}$$

ここで、 $C_{ji} = \cos(q_{ji}), S_{ji} = \sin(q_{ji}), j = 1, 2, 3, C_{\theta_i} = \cos(\theta_i), S_{\theta_i} = \sin(\theta_i)$ を表し、

$$\begin{aligned} A_i &= (R + L_1 C_{1i}) C_{\theta_i} \\ B_i &= (R + L_1 C_{1i}) S_{\theta_i} \\ C_i &= L_2 C_{2i} C_{\theta_i} \\ D_i &= L_2 C_{2i} S_{\theta_i} \end{aligned}$$

である。ただし、 q_{3i} は受動関節角度であるため、能動関節の角度から演算する必要がある。式 (3) より、 $Pe_1 = Pe_2$ として得られる連立式から得られる、式 (4) (5) より q_{3i} を求めることができる。

$$q_{3i} = 2 \arctan(u_i) \tag{4}$$

$$u_i = \frac{-G_i \pm \sqrt{G_i^2 - 4H_i I_i}}{2H_i} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} E_i &= L_1 S_{11} - L_1 S_{12} - L_2 C_{2i} \\ F_i &= L_1 S_{11} - L_1 S_{12} + L_2 C_{2i} \\ G_1 &= -2L_2^2 (C_{\theta_1} S_{\theta_2} - S_{\theta_1} C_{\theta_2}) S_{22} \\ G_2 &= -2L_2^2 (C_{\theta_1} S_{\theta_2} - S_{\theta_1} C_{\theta_2}) S_{21} \\ H_1 &= ((B_1 - B_2 + D_1) L_2 S_{22} + D_2 E_1) S_{\theta_2} \\ &\quad + ((A_1 - A_2 + C_1) L_2 S_{22} + C_2 E_1) C_{\theta_2} \\ H_2 &= ((B_1 - B_2 - D_2) L_2 S_{21} + D_1 F_2) S_{\theta_1} \\ &\quad + ((A_1 - A_2 - C_2) L_2 S_{21} + C_1 F_2) C_{\theta_1} \\ I_1 &= ((B_1 - B_2 - D_1) L_2 S_{22} + D_2 F_1) S_{\theta_2} \\ &\quad + ((A_1 - A_2 - C_1) L_2 S_{22} + C_2 F_1) C_{\theta_2} \\ I_2 &= ((B_1 - B_2 + D_2) L_2 S_{21} + D_1 E_2) S_{\theta_1} \\ &\quad + ((A_1 - A_2 + C_2) L_2 S_{21} + C_1 E_2) C_{\theta_1} \end{aligned}$$

ここで、式 (5) u_i の解について、幾何条件により符号が負の場合を選択する。以上により求められる受動関節角 q_{3i} を、式 (3) に代入し、終端座標 Pe を得る。

4.4 逆運動学

終端座標 Pe から、関節 J_{1i}, J_{2i} の関節角度 q_{1i}, q_{2i} を求める逆運動学について述べる。まず、関節 J_{2i} の空間座標を、 $(Jx_i \ Jy_i \ Jz_i)^T$ とおく。関節 J_{2i} は、終端座標 Pe から半径 L_2 の球面上にあると考えられるため、次式が成り立つ。

$$(Jx_i - px)^2 + (Jy_i - py)^2 + (Jz_i - pz)^2 = L_2^2 \tag{6}$$

式 (6) を展開し、媒介変数 s_i を用いて q_{1i} について解くと、次式が得られる。

$$q_{1i} = 2 \operatorname{atan}(s_i) \tag{7}$$

$$s_i = \frac{2pz \pm \sqrt{4p^2 z^2 - M_i N_i}}{M_i} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} K_i &= 2C_{\theta_i} px + 2S_{\theta_i} py \\ L &= \frac{1}{L_1} (L_1^2 - L_2^2 + R^2 + px^2 + py^2 + pz^2) \\ M_i &= L - 2R + \left(1 - \frac{R}{L_1}\right) K_i \\ N_i &= L + 2R - \left(1 - \frac{R}{L_1}\right) K_i \end{aligned}$$

ここで、式 (8) s_i の解について、幾何学条件より符号が負の場合を選択する。

次に q_{2i} について、リンク 2 を XY 平面上に投影したとき、リンク 2 の先端部が描く長径 L_2 、短径 L_2C_{2i} の楕円軌道上に終端座標 Pe があるとすると、式 (9) より q_{2i} が得られる。

$$\begin{aligned} px'_i &= px C_{\theta_i} + py S_{\theta_i} \\ py'_i &= py C_{\theta_i} - px S_{\theta_i} \\ q_{2i} &= \arccos \sqrt{\frac{(px'_i - (R + L_1 C_{1i}))^2}{L_2^2 - py'_i}} \end{aligned} \quad (9)$$

以上により、関節 J_{1i} 、 J_{2i} の角度が得られる。なお、関節 J_{2i} の角度 q_{2i} は、平行四節リンク P_{1i} により、関節 J_{2i}' の角度と同一である。

4.5 特異点

DELTA-4 における特異点に関して、平行四節リンク P_{1i} 、 P_{2i} が一直線となる状態、または P_{2i} が同一平面内に存在する状態において劣可動となる。DELTA-4 では、メカニカルストップパを関節 J_{1i} 、 J_{2i}' に設け、これらの特異点への侵入を容易に防止することが可能である。また、DELTA-4 では 2 本のアーム配置を $\theta_2 - \theta_1$ の値が 0 または 180 [deg] のとき特異点となるが、設計上この特異点は回避可能である。また、 $\theta_2 - \theta_1 = 90$ [deg] のとき最も特異点からの距離が長くなるため、動作域が広がる。従来の機構である DELTA では、アームの平行四節リンク (P_{2i} に相当) がすべて平行となるときに、過可動となる特異点が存在するが、DELTA-4 では 2 本のアームが 2 自由度を有し、並進 3 自由度とする冗長機構のため、この特異点は存在しない。

DELTA では、エンドエフェクタが 3 本のアームにより支持され、各アームは一つの平行四節リンクを有している。一方、DELTA-4 では 2 本のアームでエンドエフェクタを支持することに大きな特徴があり、各アームは二つの平行四節リンクを有している。ここで、機構を構成する閉ループの数 L_p は、以下の式で与えられる。

$$L_p = -(l - n - 1) \quad (10)$$

ここで、 l はベースを含むリンクの数、 n は関節の数とする。この式により与えられる閉ループの数 L_p は、それぞれ DELTA の場合 6、DELTA-4 の場合で 5 である。アームの数が少ない DELTA-4 はアームに冗長自由度を加えることにより並進 3 自由度を実現している一方、閉ループ数 L_p ではアームを 3 本有する DELTA の方が大きな値をとる。結果として、各アームのリンク節で生ずる特異点による動作域の制限は、アームの数が少ない DELTA-4 が有利である。

5. プロトタイプ実装

Fig. 4 に、プロトタイプとして製作した DELTA-4 を示す。DELTA-4 の各リンクパラメータについて、 $L_0 \sim L_3$ の値をそれぞれ 300, 300, 400, 200 [mm] とし、各関節の可動域は q_{1i} を $0 \sim 90$ [deg]、 q_{2i} を $5 \sim 90$ [deg]、 q_{3i} を $-70 \sim 70$ [deg] とした。アームの設置角度は、設置の容易性と動作域を考慮し、 $\theta_1 = 0$ [deg]、 $\theta_2 = 90$ [deg] とした。本実装における DELTA-4

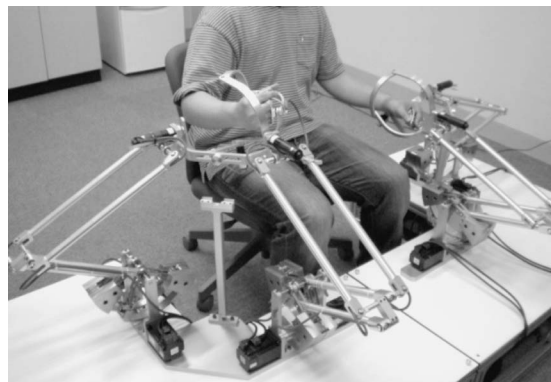


Fig. 4 Overview of the prototype

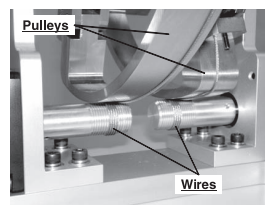


Fig. 5 Wire reduction mechanism

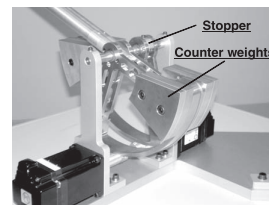


Fig. 6 Counter weights and stopper

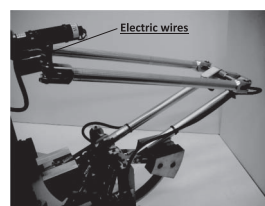


Fig. 7 Linkages by hollow tubes

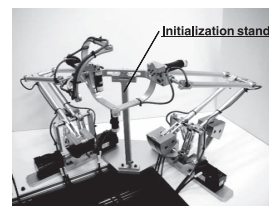


Fig. 8 Folding initial position stand

は、提示力として最大 50 [N] を発生可能である。高バックドライバビリティを実現するため、高出力の AC サーボモータをダイレクトドライブで使用した。減速機構には、高伝達効率で高いバックドライバビリティを有し、バックラッシュのないワイヤ減速機構 (減速比 14 : 1) を用いた (Fig. 5)。ワイヤ減速機構のプーリには、重力補償のためのカウンターウェイトと、特異点への侵入を防ぐためのメカニカルストップパを実装した (Fig. 6)。本プロトタイプにおいては、リンクに中空パイプを使用することで、機構を軽量化し、リンク内部に配線処理を施した (Fig. 7)。また、装置の起動時にモータ位置の初期化を行うために、エンドエフェクタを特定の位置に固定するための折りたたみ式スタンドを設けた (Fig. 8)。

本プロトタイプでは、操作者の手首関節に機構の回転中心を有する 3 自由度回転機構および、1 自由度把持機構をエンドエフェクタに実装し、全 7 自由度として実装を行った (Fig. 9)。開発した姿勢機構を Fig. 10 に示す。姿勢機構は、全 6 リンク、6 関節で構成されており、各リンクの回転中心は一点で交わる構成を有する。関節 J_6 、 J_{10} 、 J_{11} は能動関節であり、関節 J_6 、 J_{10} は姿勢機構ベースに固定される。エンドエフェクタとなるリンク 10 は回転中心を基点として 3 自由度の回転動作 α 、 β 、

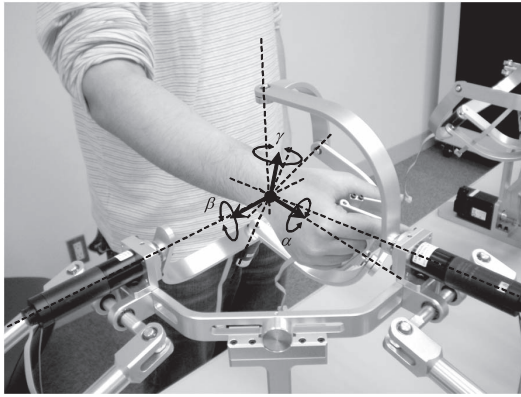


Fig. 9 3 DOF rotation and 1 DOF grasping mechanism

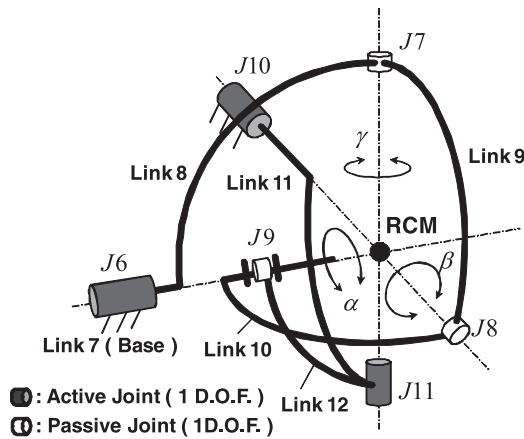


Fig. 10 Structure of 3 DOF rotation mechanism

Table 1 Motor specification of the prototype

Joint	$J1_i, J2_i^{(a)}$	$J6, J10^{(b)}$	$J11, \text{Grasping}^{(c)}$
Rated Power [W]	400	47.9	8.68
Rated Torque [Nm]	1.27	44×10^{-3}	10×10^{-3}
Rated Rev [rpm]	3,000	6,000	8,000
Gear ratio	—	16:1	28:1
Resolution	2^{20}	512	512

- (a) SGMJV-ADA (安川電機社製)
- (b) 2657W024CR (FAULHABER 社製)
- (c) 2232A024SR (FAULHABER 社製)

γ を行う。よって、 $J6, J10, J11$ のモータを駆動することにより、各軸への力覚提示が可能である。本機構は Ouerfelli らの提案した 2 自由度 5 リンク球面パラレルリンク機構 [4] にさらなる多自由度化を施したものである。また、エンドエフェクタにはグリップおよび、力提示可能な 1 自由度把持機構が実装される。操作者が把持部を握ったとき、本機構では回転中心が操作者の回転中心とほぼ一致するように人体標準値を参考にリンク長さ等を設定しており、操作者の自然な動作入力、また力覚提示が可能である。Table 1 に本プロトタイプに実装したすべてのモータの仕様を示す。

5.1 設置面積と動作域

提案する DELTA-4 と従来の DELTA との比較を行うため、リンク長さ、関節可動域等の条件を等しくした場合についての

Table 2 Comparison between DELTA-4 and DELTA

	DELTA-4	DELTA
Footprint	146,250 [mm] ²	242,000 [mm] ²
Working Area	114.0×10^6 [mm] ³	98.0×10^6 [mm] ³

比較を設置面積および動作域について行った。これらのパラメータは DELTA-4 のプロトタイプを基準に設定した。

Fig. 11 に DELTA-4 と DELTA の機構概要と設置面積を示す。リンク長さなどの機構パラメータを同等とした場合について、設置面積の比較から DELTA-4 では DELTA と比較して 40% の設置面積が減少することが確認された。また、Fig. 12 に DELTA-4 と DELTA の動作域を示す。動作域の分布形状は類似しているが、DELTA-4 では DELTA の 15% 程度大きな動作域を実現可能であることが確認された (Table 2)。加えて、DELTA-4 は 2 本のアームが V 字状に配置される構造であるため、操作者側に機構が張り出さず、特に操作者が機構正面から機構を操作するような本実装では、DELTA ではアームが占有するスペースへのアクセスが可能であり、動作域を有効に活用可能である。また、機構を 90° 傾けて設置するような実装でも、DELTA では 3 本のアームのため操作部下部にアーム動作のスペースが必要であるのに対し、DELTA-4 では下部へのアーム張り出しがない実装が可能であり、小型化が可能である。

5.2 操作力楕円体

DELTA-4 の静力学特性を、操作力楕円体 [28] を用いて解析する。DELTA-4 の静力学は関節駆動トルクベクトル τ 、提示力ベクトル F 、ヤコビ行列 J を用いて、仮想仕事の原理より、

$$\tau = J^T F \tag{11}$$

で表される。これより、ユークリッドノルム $\|\tau\| < 1$ を満足する τ を用いて実現できるすべての F の集合は、式 (12) で表される楕円体となる。

$$F^T J J^T F \leq 1 \tag{12}$$

この楕円体は操作力楕円体と呼ばれ、楕円体の半径の長さは力の出しやすさを表す。

Fig. 13 に DELTA-4, DELTA それぞれの動作域の中央付近における操作力楕円体を示す。DELTA と比較して、DELTA-4 の操作力楕円体は Z 軸方向に細長い扁平形状をしていることが分かる。この要因として、DELTA が 3 本のアームを 120 [deg] ごとに等分に配置するのに対し、DELTA-4 では 2 本のアームを $\theta_2 - \theta_1$ [deg] (プロトタイプにおいて 90 [deg]) で配置するため、空間的に偏った配置といえる。また、DELTA-4 の一対のアームはそれぞれ能動 2 自由度、計 4 自由度の冗長機構を有しており、エンドエフェクタの拘束により Z 軸方向の自由度を 1 軸に統合するため、X, Y 軸方向と比較して Z 軸方向に出力できる力が大きい特徴がある。また、この傾向は、動作域の中央付近以外でも傾向として現れることが確認されている。Fig. 14 に動作域における代表点での DELTA-4, DELTA の操作力楕円体を示す。操作力楕円体の解析においては、空間的に対称構造を有する DELTA は良好な結果が得られる。これに対して DELTA-4 ではアームの空間的に偏って配置されているため、姿勢によ

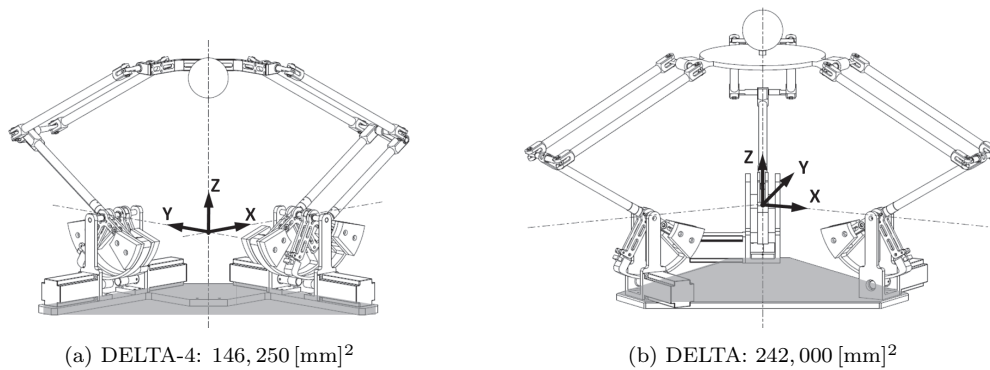


Fig. 11 Comparison of mechanisms and footprints

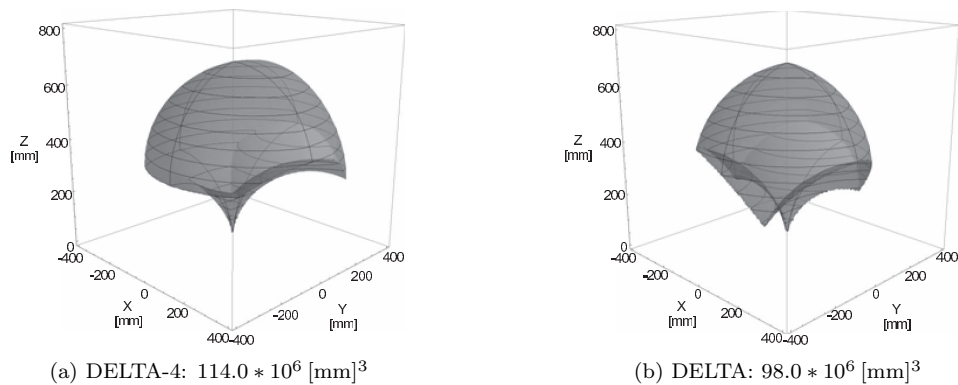


Fig. 12 Comparison of working area

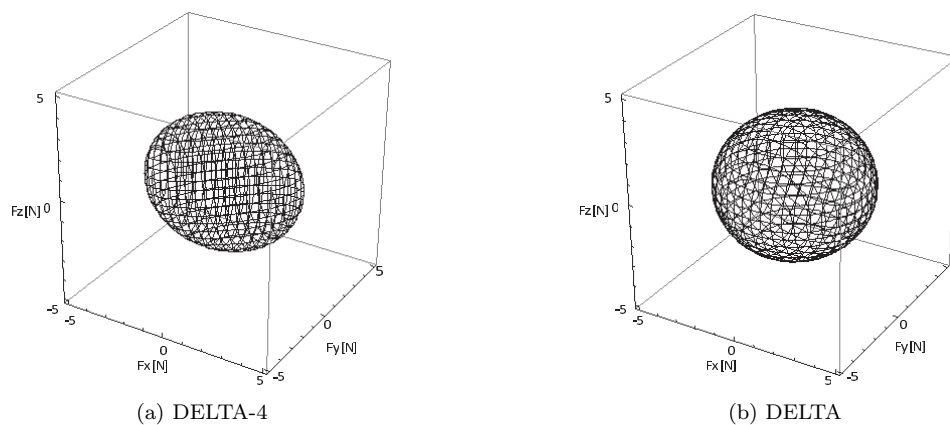


Fig. 13 Manipulating-force ellipsoid

て出力しにくい方向成分が存在する．しかしながら，提案する平行リンク機構 DELTA-4 では，アクチュエータがすべてベースに固定されるため，この解析結果を踏まえ十分な出力を有するアクチュエータを選択することにより，各軸への良好な出力を得ることが可能となる．

6. 力提示実験

インピーダンス型力覚提示装置において，力センサのフィードバック制御を用いずに目的の力が提示できることは重要であ

る．本実験では力センサを用いて力覚提示装置の出力を測定し，提示力精度を検証することを目的に行った．力覚提示装置で各モータに発生させる関節駆動トルク τ は，式 (11) で表される静力学モデルにより算出した．モータの制御は VxWorks 5.5.1 を用いて 1 [kHz] の制御周期で行った．なお，本実験では静力学モデルのみを用いて力提示を行い，測定した力のデータは，コントローラへのフィードバックに用いなかった．

6.1 実験方法

出力として，基準座標に対して 5 箇所の測定点 (1(0, 0, 400),

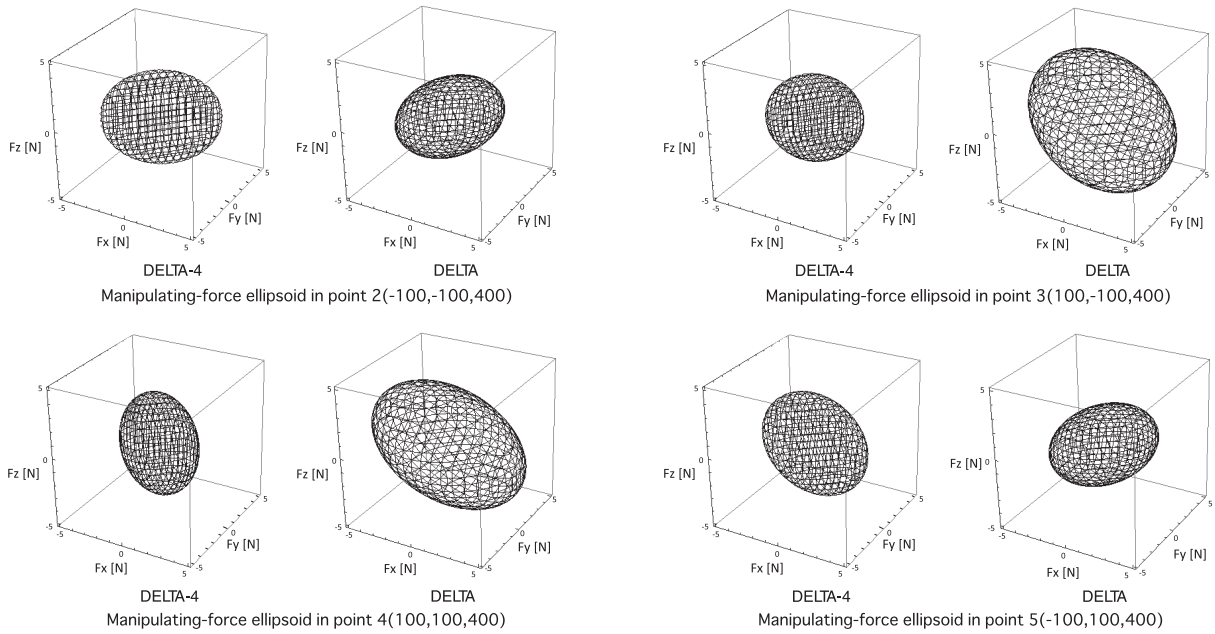


Fig. 14 Manipulating-force ellipsoid in representing points of the working area (left (DELTA-4) and right(DELTA) in each point)

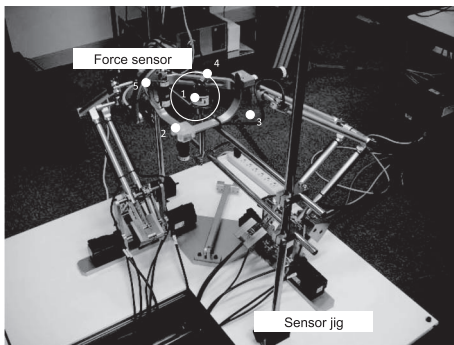


Fig. 15 Experimental setup

2(-100, -100, 400), 3(100, -100, 400), 4(100, 100, 400), 5(-100, 100, 400)) について, 出力を 0~10 [N] まで, 2 [N] ごとに変化させたときの出力を治具に固定した 6 軸力センサ (ニッタ株式会社製, IFS-50M31A25-I25) により測定した (Fig. 15). なお, 各測定点につき 15 秒間の計測で 1,000 点のデータを記録した.

6.2 実験結果

Fig. 16 に, 測定点 1 の代表的な実験結果 (平均値) を示す. また, すべての測定点について, 10 [N] を提示したときの実験結果を Table 3 に示す. 実験結果より, 10 [N] までの力覚提示が力センサによるフィードバックを行わなくとも平均して 0.3 [N] 程度の誤差内で行えることが確認された. 一方で, 力提示を行う場合に出力が他の軸へ影響する干渉が最大で 0.5 [N] 程度発生することが確認された. この傾向は X と Y 軸についてのみ表れており, Z 軸に関しては強い影響は確認されなかった. この現象は, DELTA-4 の機構の特徴が関係しているものと考えられる. DELTA-4 において XY 平面での提示力は, 2 本のアー

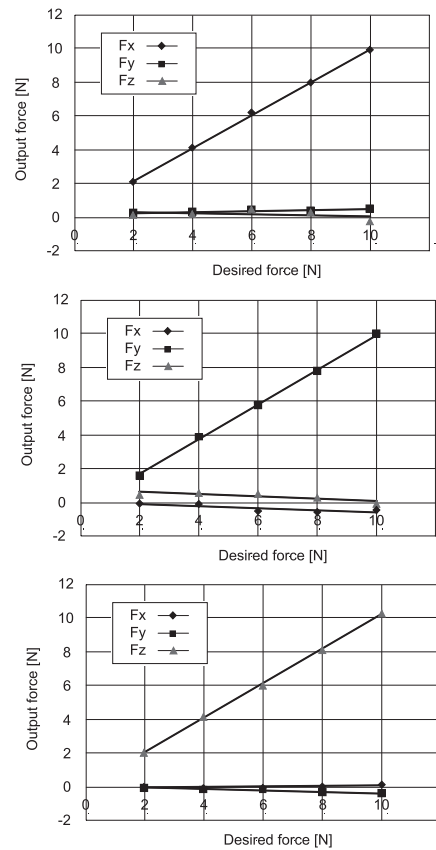
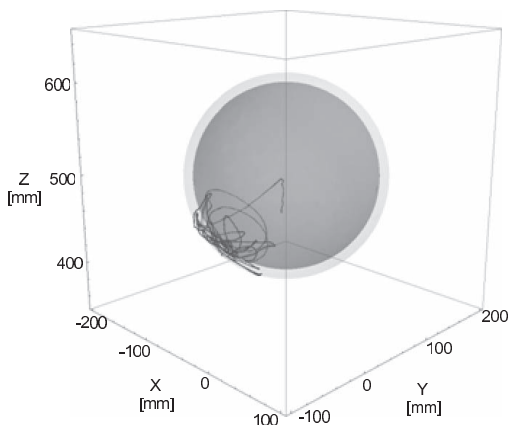


Fig. 16 Experimental result (upper: X axis, middle: Y axis, lower: Z axis)

ムが発生する力の合力となる. 2 本のアームは相互に力を発生し, 拮抗しあうため, 相互に受動的な曲げが働き, 結果として

Table 3 Experimental result in each point in 10 [N] of force display

Position	X	Y	Z
Output force in Point 1 [N]	9.921	10.069	10.348
Output force in Point 2 [N]	10.242	10.119	9.669
Output force in Point 3 [N]	9.936	9.720	9.889
Output force in Point 4 [N]	10.235	9.534	9.490
Output force in Point 5 [N]	10.319	9.804	9.422

**Fig. 17** Trajectory of operation with a virtual sphere

歪みの影響が現れる。2本のアームはZ軸に関しては解放であるため、干渉の影響が小さくなったと考えられる。

6.3 考察

パラレルリンク機構の機構設計において、最適な関節数や機構を求める手段として、式(13)で表されるGrüblerの公式[1]が知られている。

$$m = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n d_i \quad (13)$$

ここで、 m は機構の自由度、 l はベースを含むリンクの数、 n は関節の数、 d_i は関節 i の自由度の数を表す。Grüblerの公式によれば、DELTA-4の必要とされる関節数は33である。しかしながら、DELTA-4のプロトタイプにおいては、すべての関節を1自由度回転対偶で実装し、プロトタイプでは20の関節での実装とした。よって、試作したDELTA-4プロトタイプは過拘束機構といえる。

一方では、1自由度回転対偶を用いた実装では、ボールジョイントを用いた場合の関節角度の制限等を受けず、また重量の軽減、実装コスト等において有利である。本実験結果により、1自由度回転対偶を用いた過拘束での実装においてもフィードバック制御なしでも実用的に力提示が可能であることが明らかになった。

そこで、本装置の力提示性能を実質的に調べるため、空間上に仮想球を提示し、触れたときの反力を操作者へ提示する実験を行った。Fig. 17に、仮想球を提示した際のエンドエフェクタ軌道の実験結果を示す。この実験では仮想球を単純なばねモデル(ばね定数を1[Nm]とする)で構成し、操作者が球の外側に出ないように力を提示している。結果、滑らかな球面を提示することが確認された。このことから、パラレルリンク機構の実装においては、関節の実装様式と設計要素には先に述べたよう

なトレード・オフの関係が生ずる。本稿で実装したDELTA-4プロトタイプでは、すべての関節を1自由度回転対偶で実装した過拘束機構でも十分な力覚提示性能を得られることが明らかになった。

7. おわりに

並進3自由度を有する新しい冗長駆動パラレルリンク機構を用いた力覚提示装置であるDELTA-4を提案した。DELTA-4は、従来にない冗長機構により小さな設置面積、従来機構と比較して大きな動作域に加えて、操作者がエンドエフェクタにアクセスしやすい機構配置が可能であること等の特徴を有している。本報告では、提案した機構に関して、順・逆運動学、特異点について解析し、機構の有する特徴について検討を行った。また、DELTA-4のプロトタイプとして、並進3自由度に加え、操作者の手首関節の回転中心を有する3自由度の回転機構、1自由度の把持機構、計7自由度での実装を行った。実験から、実用的な範囲で力覚の提示が可能であることが確認された。力覚提示装置としての評価は、さらに動的応答などに関する解析が重要であり、今後の課題である。

謝辞 本研究の一部はNEDOインテリジェント手術機器研究開発事業により実施された。著者らは、本研究におけるスイス・ローザンヌ連邦工科大学(EPFL)レイモンド・クラベル教授の助力について深く謝意を表す。

参考文献

- [1] J.P. Merlet: *Parallel Robots (Second Edition)*. pp.12–17, Springer, 2006.
- [2] SensAble Technologies: <http://www.sensable.com/>
- [3] MPB Technologies: <http://www.mpb-technologies.ca/>
- [4] Haption: <http://www.haption.com/site/index.html>
- [5] Immersion: <http://www.immersion.com/>
- [6] R. Clavel: ‘*Conception d’un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté*,’ Ph.D. Thesis, EPFL, No.925, 1991.
- [7] Force Dimension: <http://www.forcedimension.com/>
- [8] Novint Technologies: <http://home.novint.com/>
- [9] HapticMaster: http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/vrlab-web/hapticmaster/hapticmaster_e.html
- [10] H. Iwata: “Pen-based Haptic Virtual Environment,” *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.287–292, 1993.
- [11] L. Birglen: “SHaDe, A New 3-DOF Haptic Device,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.18, no.2, pp.166–175, APRIL 2002.
- [12] R. Clavel et al.: “The Panto Scope: A Spherical Remote-Center-of-Motion Parallel Manipulator for Force Reflection,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1997*, pp.718–723, New Mexico, 1997.
- [13] Mentice: <http://www.mentice.com/>
- [14] CyVerse: <http://www.cyverse.co.jp/>
- [15] L. Buoguilu, Y. Cai and M. Sato: “New Haptic Device For Human Scale Virtual Environment Scaleable-SPIDAR,” *ICAT’97*, pp.93–98, 1997.
- [16] Mimic Technologies: <http://www.mimic.ws/>
- [17] Moog FCS Robotics: <http://www.moog.com/simulationand-testing/>
- [18] M. Ueberle and N. Mock: “VISHARD10, a Novel Hyper-Redundant Haptic Interface,” *Proc. of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp.58–65, 2004.

- [19] Y. Tsumaki, H. Naruse, D.N. Nenchev and M. Uchiyama: "Design of a Compact 6-DOF Haptic Interface," Proc. of ICRA, pp.2580-2585, 1998.
- [20] T. Yoshikawa: "Dynamic manipulability of robot manipulators," Journal of Robotics Systems, vol.2, no.1, pp113-124, 1989.
- [21] R. Clavel: "*Une Nouvelle Structure de manipuler Parallèle pour la Robotique Légère*," Apii, vol.23, pp.501-519, 1989.
- [22] H. Iwata: "Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator," Computer Graphics, vol.24, no.4, pp.165-170, 1990.
- [23] M. Ouerfelli and V. Kuma: "Optimization of a Spherical Five-Bar Parallel Drive Linkage," Trans. of the ASME, J. of Mechanical Design, vol.116, March, pp.166-173, 1994.
- [24] D. Stewart: "A Platform with Six Degrees of Freedom," Proc. of the Institution of Mechanical Engineers 1965-1966, vol.180, part 1, no.15, pp.371-386, 1965.
- [25] F. Pierrot, M. Uchiyama, P. Dauchez and A. Fournier: "A New Design of a 6-DOF Parallel Robot," J. of Robotics and Mechatronics, vol.2, no.4, pp.308-315, 1991.
- [26] T. Asano, H. Yano and H. Iwata: 'Basic Technology of Simulation System for Laparoscopic Surgery in Virtual Environment with Force Display,' Medicine Meets Virtual Reality: Global Healthcare Grid (Studies in Health Technology and Informatics, vol.39). pp.207-215, IOS Press, 1997.
- [27] L.W. Tsai: Multi-degree-of-freedom mechanisms for machine tools and like, U.S. Patent, no.5656905, 1995.
- [28] 吉川恒夫: ロボット制御基礎論. pp.109-117, コロナ社, 1988.
- [29] B.D. Adelstein, P. Ho and H. Kazerooni: "Kinematic Design of a Three Degree of Freedom Parallel Hand Controller Mechanism," ASME Dynamic System and Control Division, DSC-vol.58, pp.539-546, 1996.
- [30] A. Janot, C. Bidard, M. Gautier, F. Gosselin, D. Keller and Y. Perrot: "Modeling and Identification of a Haptic Device having a Double Parallelogram Loop," 12th IFToMM World Congress, 2007.
- [31] D. Chablet and P. Wenger: "A Six Degree-Of-Freedom Haptic Device Baced On The Orthoglide And A Hybrid Agile Eye," IDETC 2006, 30th Mechanism & Robotics Conference(MR), 2006.



荒田純平 (Jumpei Arata)

2000年芝浦工業大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。1998, 2000年スイス連邦工科大学 (EPFL) 助手。2004年東京大学大学院産業機械工学専攻博士課程修了。遠隔手術支援システム, 手術訓練システム, 力覚フィードバック, 遠隔操作等の研究に従事。山梨大学助手を経て2006年より

名古屋工業大学助手, 2007年より同大学助教。日本機械学会, 日本コンピュータ外科学会, IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)



坂口正道 (Masamichi Sakaguchi)

1995年3月電気通信大学大学院博士前期課程機械制御工学専攻修了, 1995年10月同大学大学院博士後期課程退学。電気通信大学助手, 大阪大学助手, 岩手大学講師を経て2003年より名古屋工業大学助教, 2007年同准教授。博士(工学)。力触覚ディスプレイ, バーチャル技能訓練システム等に関する

研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本コンピュータ外科学会, IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)



近藤寛之 (Hiroyuki Kondo)

2007年3月東海大学工学部機械工学科卒業。現在, 名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻博士前期課程。ロボティクスに興味を持ち, ハプティック・デバイスの研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)



藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1970年名古屋大学工学部機械工学科卒業。現在, 名古屋工業大学教授, 理化学研究所研究員(併任)。医学工学や感性の工学, ロボティクスなどに興味を持つ。工学博士。ASME最優秀論文賞など多数受賞。スケジューリング学会会長, SICE常務理事, 文科学省科学技術学術審議会文化資源委員会委員。愛知県

ものづくり人材育成協議会座長, SICE中部支部支部長など歴任。日本機械学会フェロー・評議員。(日本ロボット学会正会員)