

研究用プラットフォームをめざした 分布型触覚センサを有する人間型ロボットハンド*

川崎 晴久*¹, 内山 和直*², 小松 恒夫*³

Anthropomorphic Robot Hand with Distributed Tactile Sensor Aiming at Platform of Robotics Researchs

Haruhisa KAWASAKI*⁴, Kazunao UCHIYAMA and Tuneo KOMATSU

*⁴ Gifu University, Dept. of Mechanical and Systems Engineering,
1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193 Japan

This paper presents an anthropomorphic robot hand called Gifu Hand II to be used as a platform of robot hand for robotics researches. The Gifu Hand II has 5 fingers driven by servomotors built in hand. The thumb has 4 joints with 4 degrees of freedom (DOF), the other fingers have 4 joints with 3 DOF, and two axes of joints near the palm cross orthogonally at one point like the human finger. It can equip 6 axes force sensor at each fingertip and a developed distributed tactile sensor with 624 detecting points on its surface. The design concepts and the specifications of the Gifu Hand II and the basic characteristics of the hand with force sensor and tactile sensor are shown. These show that the Gifu Hand II has a high potential to perform the dexterous object manipulation like the human hand.

Key Words: Robot Hand, Tactile Sensor, Humanoid, Multi-Finger, Force Sensor, Grasp

1. 結 論

宇宙や医療の分野で利用されるロボットには人間とコミュニケーションを図りながら複雑で多様な作業を行うことが要求され、こうしたロボットには人間の手に類似した人間型ロボットハンドが求められる。人間型ロボットハンドは医療分野では手の損傷者に物理的な機能の回復手段を提供するなど期待できる。しかし、従来の人間型ロボットハンドの研究の多くは Utah/MIT ハンド^[1]や Anthrobot Dextrous ハンド^[2]のように関節を駆動するアクチュエータがハンド機構と離れて設置され、アクチュエータの運動はワイヤロープを通して関節に伝達される。このため伝達系の剛性が低く、ロボットアームに取付けて使用するとき、アームの運動を大きく制限していた。また、このようなハンドは機構が複雑となり、製造と保守、また制御に関しても多くの問題を抱えている。これらの問題を解決するために、関節を駆動するサーボモータを

指や掌に内蔵した Omni ハンド^[3]や NTU ハンド^[4]、早稲田ハンド^[5]、DLR ハンド^[6]がある。しかしこれらは人間の手と比較し自由度の数が少ないことや、人間の手と異なる動きをするといった問題がある。また、触覚センサの研究^{[7]-[9]}も多くあるが、研究用ツールとして利用できる分布型触覚センサを有する実用的な人間型ロボットハンドはいまだ開発されていないといえる。著者らのグループも、柔軟な物体操作研究のプラットフォームとして幅広く利用可能なサーボモータ内蔵方式の人間型ロボットハンドの開発を目的として Gifu Hand I^[10]を試作してきた。しかし、機構部のガタ等の改善すべき課題もあり、今回 Gifu Hand II を試作した。試作したハンドは、5指 20 関節 16 自由度機構で、サーボモータをハンド機構に全て内蔵し、指先に 6 軸力覚センサを、指腹部や掌に分布型触覚センサを装備できることを特徴とする。本論文は、Gifu Hand II の設計コンセプト、ハンド機構とその諸特性、分布型触覚センサの基本特性及び物体把握時における圧力分布等を示し、器用な物体操作のための研究開発ツールとしての有用性を示す。

* 原稿受付 2000年3月6日。

*¹ 正員, 岐阜大学(☎501-1193 岐阜市柳戸1-1)。

*² 学生会員, 岐阜大学大学院。

*³ 三菱電機(株)(☎461-8670 名古屋市東区矢田南5-1-14)
(元: 岐阜大学大学院)。

E-mail: kawasaki@mech.gifu-u.ac.jp

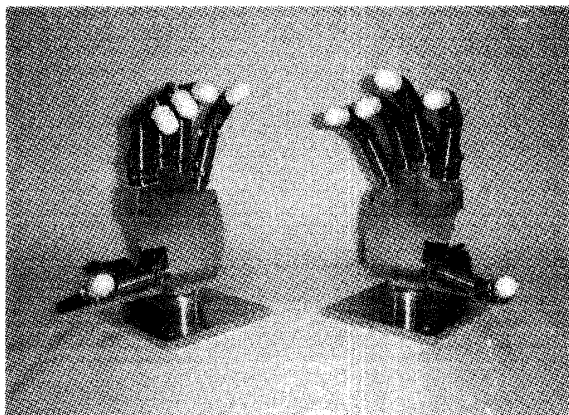


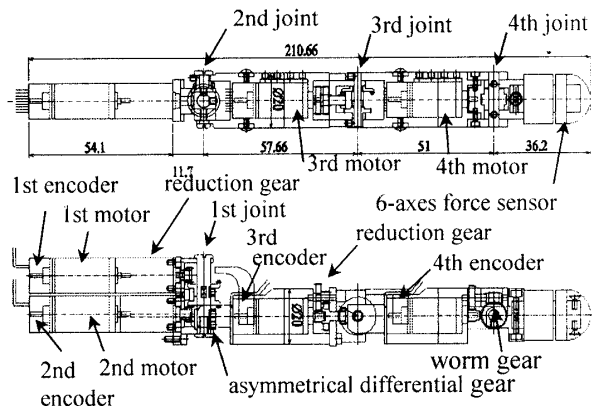
Fig.1 Developed Gifu hand II

Table 1 Specifications of the Gifu Hand II

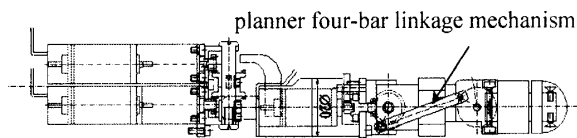
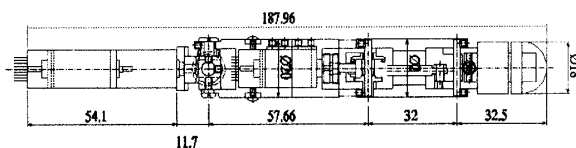
weight	finger	0.19 [kgf]
	thumb	0.24 [kgf]
	total	1.4 [kgf]
operating angle of joints	1st joint	-15 ~ 15 [deg]
	2nd joint	0 ~ 90 [deg]
	3rd joint	0 ~ 90 [deg]
	4th joint	0 ~ 90 [deg]
output force at the fingertip	thumb	4.9 [N]
	finger	2.7 [N]
output torque of the thumb	1st joint	3.46 [Nm]
	2nd joint	3.46 [Nm]
	3rd joint	0.23 [Nm]
	4th joint	0.03 [Nm]
gear ratio of the thumb	1st joint	549.56:1
	2nd joint	384.69:1
	3rd joint	73.43:1
	4th joint	64.62:1
band width of the thumb	1st joint	8.6 [Hz]
	2nd joint	7.5 [Hz]
	3rd joint	9.8 [Hz]
	4th joint	9.3 [Hz]

2. ハンド機構設計

開発した左右の Gifu Hand II の概観を図 1 に示す。左右のハンドは対称であり、各ハンドは 5 本指である。拇指は 4 関節 4 自由度機構、拇指以外の指（以降、指と呼ぶ）は 4 関節 3 自由度であり、それらのメカニズムを図 2 に示す。関節やモータの番号は掌側から指先へ順に番号を



(1) The thumb



(2) The finger

Fig.2 Mechanism of the thumb and the finger

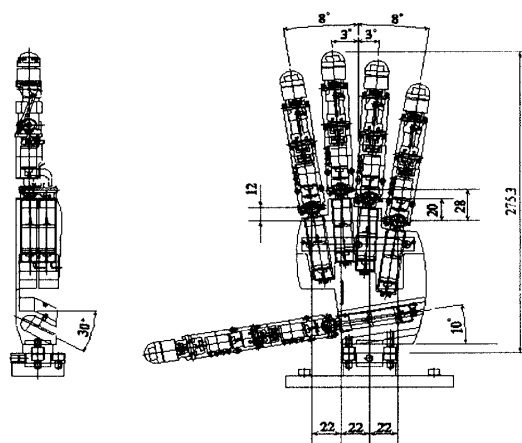


Fig. 3 Structure of the left hand

付与している。指の第 1 関節は、内転・外転、第 2 から第 4 の関節は前屈・後屈の運動を可能としている。拇指と指の相違点は、第 4 関節を拇指では第 4 モータとウオーム減速機構で駆動し、指では第 3 モータと 4 節リンク機構で駆動している点である。ハンドの諸特性を表 1 に示す。Gifu Hand II は、人間のように物体の把握と操作を実現できるように、幾何学的にも運動機能的にも人間の手に近い形としている。その設計概念を以下に示す。

(1) 大きさ

人間の手に近い大きさに近づけ、指のリンク長さの比率は人間とほぼ同じにした。人間の指と掌との配置の測定にもとづき、Gifu Hand IIはこの配置にほぼ近似させるとともに人間によるバラツキや機構設計の制約を考慮して図3に示す指の配置とした。

(2) 自由度

人間の各指は4関節ある。拇指は、全ての関節が独立に動き、その他の指は、第1から第3の関節は独立に動くが第3関節と第4関節がほぼ連動して動く。Gifu Hand IIは人間の指関節と同様の関節数と自由度を設定し、拇指以外の指の第4関節は4節リンク機構^[10]により第3関節とほぼ線形に連動するようにした。

(3) 可動域

人間の指とほぼ同程度の可動域を確保するために、Gifu Hand IIの関節の可動域は人間の正常可動範囲^[11]にほぼ一致させている。さらに、各指の第1関節軸と第2関節軸は非対称型差動減速機構により直交するようにした。これにより、人間の指と類似の作業空間で可動することを可能とした。

(4) 拇指対向性

人間の拇指は、他の指と対向できる。この拇指対向性^[12]により、人間は小物を摘む等ができ、類人猿より器用な操作が可能となっている。Gifu Hand IIも拇指対向性を確保する指配置とした。

(5) サーボモータ内蔵方式

ロボットハンドを市販のロボットアームに容易に装着できるように、サーボモータ内蔵方式とした。サーボモータにはエンコーダを直結し、伝達系の高剛性化のためワイヤロープやハーモニックギヤ等の弾性部材を用いることなく小型衛星歯車減速機等を通して各関節を駆動することとした。

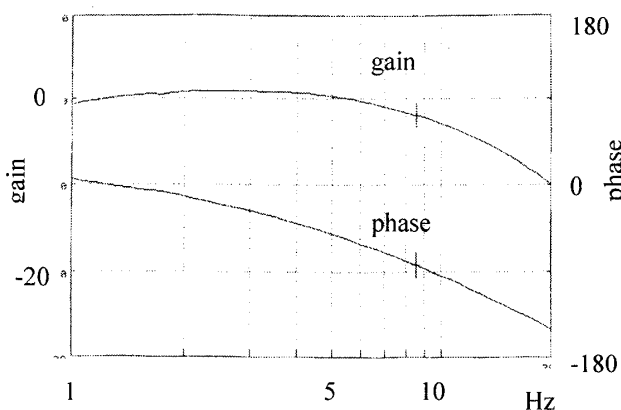


Fig. 4 Frequency characteristics of the 1st joint of Thumb

(6) ユニット化

関節単位でモジュール化し、指単位でユニット化し、製造と保守の安易化を図った。また、ユニット化により、2本指から4本指のハンドも容易に製作できるようにした。

(7) 力覚センサ

各指先に市販の6軸力覚センサ(ビー・エル・オートテック(株) NANO センサ^[13])を装着することができ、指先による柔軟な物体操作やコンプライアンス制御を可能にした。

(8) 触覚センサ

本ハンド用に試作した624点の計測点をもつ分布型触覚センサを装着できるようにした。これにより、各指の腹部や掌を使う、より確実に柔軟な把握・操作を可能とした。

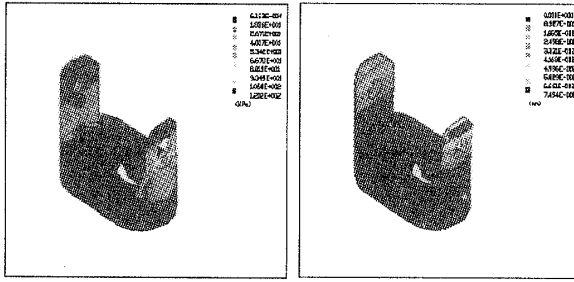
3 ハンド機構改良

(1) バックラッシュの低減

Gifu Hand I^[10]は、第1, 2関節に非対称型差動減速機を組込んでいた。この減速機構では傘歯車を採用していたが、軸方向に生ずる力のためにフレームが変形し軸が移動してガタが生じていた。また、フレームはアルミ材のため軸部の磨耗によってもガタが生じていた。これらの問題の解決のため、傘歯車の代わりに軸方向の力が生じないフェースギヤを採用し、フレーム材は磨耗と強度に優れるチタン合金材とした。この結果、Gifu Hand Iのガタは最大8度程と大きかったが、Gifu Hand IIでのガタは最大1度程となり1/8程に低減した。

(2) 高出力化と高応答性化

指先力の高出力化を図るため、減速比を高め、より高出力なモータに変更した。この結果、拇指の出力は、Gifu Hand Iの8倍となった。また、拇指第一関節の速度フィードバック制御時の周波数ゲイン特性を図4に示す。バンド幅は8.6Hzである。測定は、重力の影響を打ち消すため関節軸を鉛直方向に設置して行った。速度ゲインは、目標角度15度のPD制御において振動が生じないようゲイン調整したときの値を用いた。重力は指の運動に影響するが、そのときの応答性は重力にほぼ釣り合う直流成分を加えることで重力のないときと同じと考えられる。その他の関節も同様に測定し、それらの結果は表1に示めされている。各関節の応答周波数は7.5Hz以上ある。人間の応答性は5.5Hz程とされているので、人間より早い動作が可能である。



(1) Equivalent stress distribution (2) Deformation
Fig. 5 Finite element analysis of No.1 gear head housing

Table 2 Examples of safety factor

	No.1	No.2	No.3
Gifu Hand I			
equivalent stress	7.6	62.8	7.7
shearing stress	7.5	60.8	6.8
Gifu Hand II			
equivalent stress	12.5	35.5	11.9
shearing stress	18.3	31.8	10.8

No.1 : gear head housing of first and second joints
No.2 : force sensor bracket
No.3 : gear head housing of the third joint

Table 3 Characteristics of distributed tactile sensor

number of detecting points	total 624
palm	312
thumb	72
finger	60
maximum load	7.4×10^{-4} [N/m ²]
electrode width	2 [mm]
column pitch	4 [mm]
row pitch	6 [mm]
sampling cycle	10 [ms/frame]
resolution	8 [bit]
thickness of sensor sheet	0.1 [mm]
weight	12.5 [gf]

(3) 高剛性化

機構の軽量化と高剛性化を図るため、有限要素法による応力解析によって、機構の安全率の均質化を図った。ここで、安全率は最大応力と応力限界の比として定義される。安全率が1以下では降伏が生じると予測される。一例として、図5にNo.1ギヤヘッドハウジング部品の相当応力分布図と変形図を示す。表2に解析結果の例を示す。Gifu Hand IIでは相当応力とせん断応力の安全率は10を目安とした。安全率の均質化が実現され、高剛性化されたといえる。

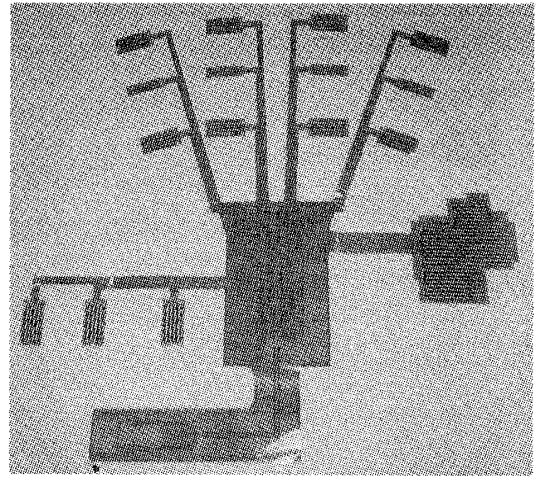


Fig. 6 Distributed tactile sensor

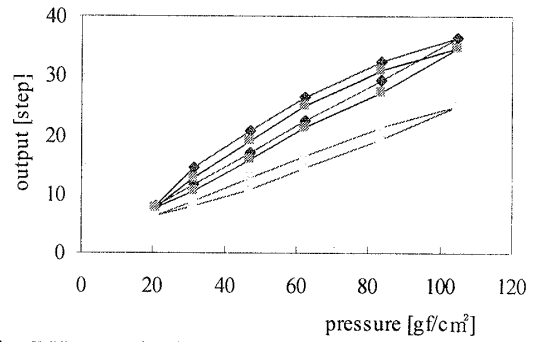


Fig. 7 Hysteresis characteristic curve of tactile sensor

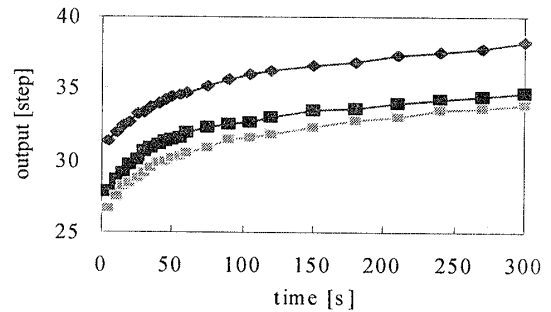


Fig. 8 Creep characteristic curve of tactile sensor

4. 分布型触覚センサ

Gifu Hand IIには、本ハンド用に試作した分布型触覚センサ(ニッタ(株)協力)^[14]が取付けられる。その形状を図6に示す。触覚センサは、導電性インクにより薄膜の上下に格子状に電極を配置している。表3に触覚センサの諸特性を示す。計測点数は624点である。センサシート上の圧力情報は、専用のインターフェースボードを介してPCに最大加重に対し256階調の分解能で入力される。本センサは、図7に示すヒステリシス特性、図8に示すクリープ特性があり、計測感度のバラツキもある。このような非線形特性を

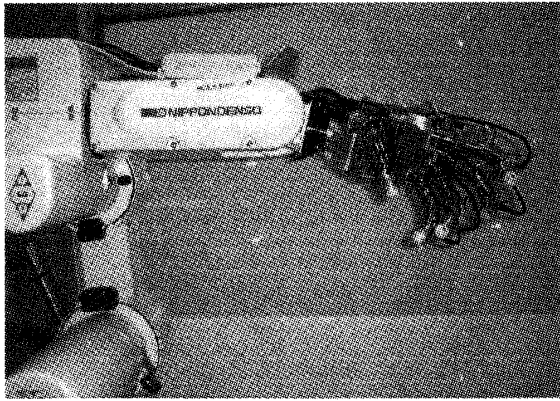


Fig. 9 The Gifu hand II with five 6-axes force sensors and the tactile sensor

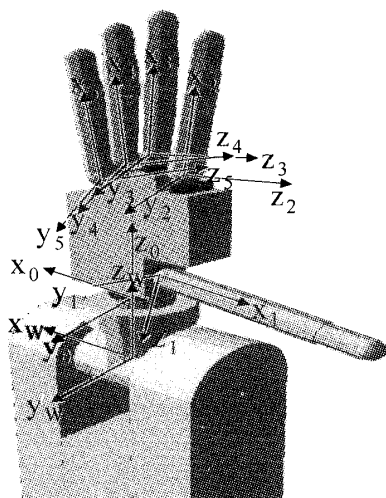


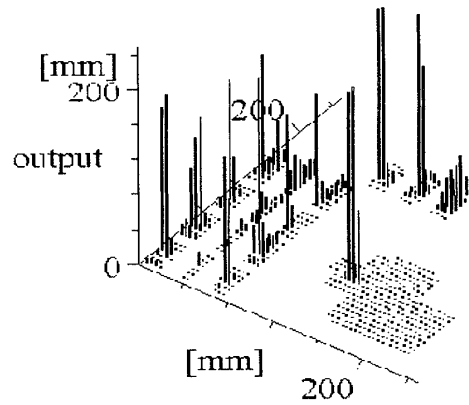
Fig. 10 Wrist and hand coordinate systems

Table 4 Position and orientation between hand-base and finger-base coordinates

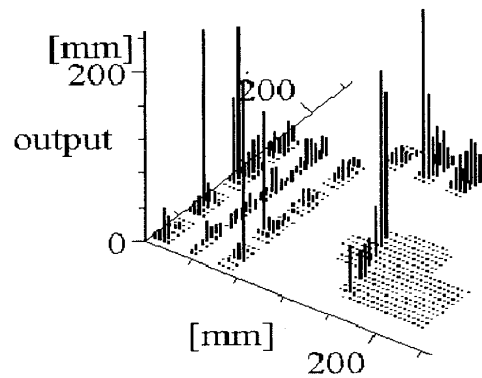
No.	p_i (m)	α_i (degree)	β_i (degree)
1 st (Thumb)	$(-30.86, 0, 8.24)^T$	190	30
2 nd	$(-44, 0, 133)^T$	98	0
3 rd	$(-22, 0, 149)^T$	93	0
4 th	$(0, 0, 141)^T$	87	0
5 th	$(22, 0, 121)^T$	82	0

考慮した信号処理が必要となる。

図9は指先に6軸力センサと指腹部と掌に触覚センサを装着したGifu Hand IIを6関節ロボットアーム(株デンソー製V S 6354B)に取り付けた概観である。図10に示すように、アームの



(1) Spherical object



(2) Cylindrical object

Fig. 11 Output patterns of tactail sensor by thr Gifu Hand II

手首座標系 $o_w-x_wy_wz_w$ と右ハンドのベース座標系 $o_0-x_0y_0z_0$ との幾何学的関係は、 z_w に沿う平行移動の関係にあり、その平行移動量は 65mm である。ハンドベース座標系で表した各指のベース座標系 $o_i-x_iy_iz_i$ ($i=1, \dots, 5$) 原点への位置ベクトル p_i と y_0 軸回りの z_0 軸から z_i 軸へのなす角度 α_i 及び x_0 軸回りの y_0 軸から y_i 軸へのなす角度 β_i は表4に示される。市販ロボットアームの多くがそうであるように、手首座標系原点からアーム先端まで距離があるため、ハンドの根元に手首関節がある構成とはなっていないが、ハンドの姿勢はアームの手先3関節で制御できる。

ハンドの基部部品の交換により、容易に他の市販ロボットアームに装着が可能である。

分布型触覚センサを付けて球と円柱を把持したときの出力を図11に示す。掌は、球のとき集中して圧力が高く円柱のとき直線状に圧力が高くなっている。また、指の把持力は、球のとき各指ほぼ均等で円柱のときは親指と中指が大きく表れている。物体の形状と把持力に応じた出力パターンを得ている。

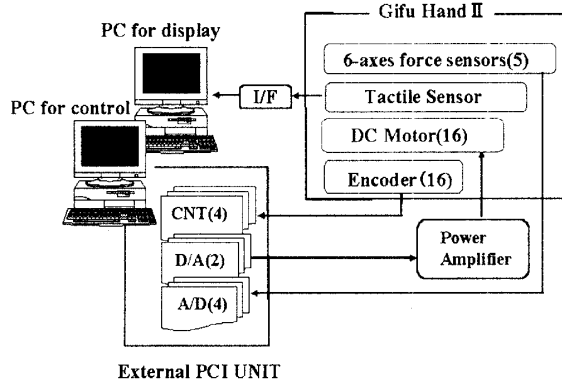


Fig.12 Hand control system

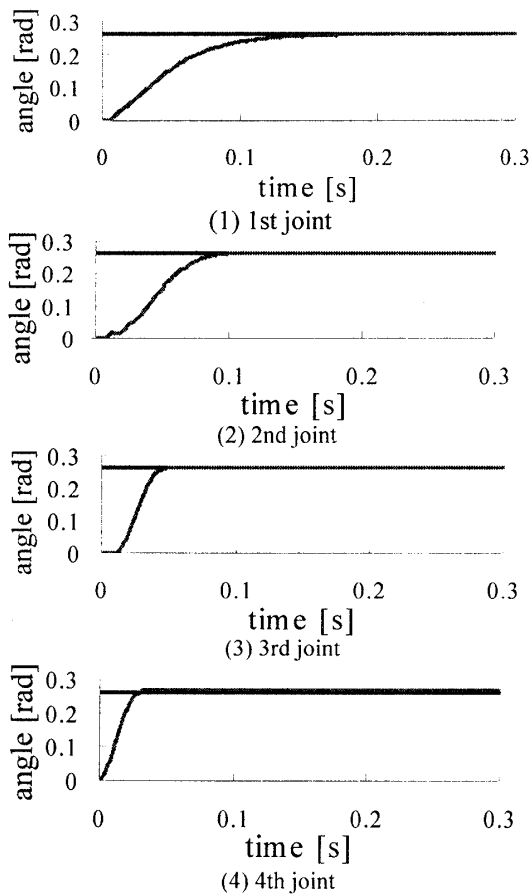


Fig.13 Step responses of the thumb

5. 物体把持実験

Gifu Hand IIを用いた実験を行なうため、図 12 に示すパソコンによるロボットハンド制御システムを構築した。制御用パソコンの PCI バスに 4 枚の 4ch カウンタボード、2 枚の 8ch D/A ボード、4 枚の 16ch A/D ボード及び 1 枚のタイマー

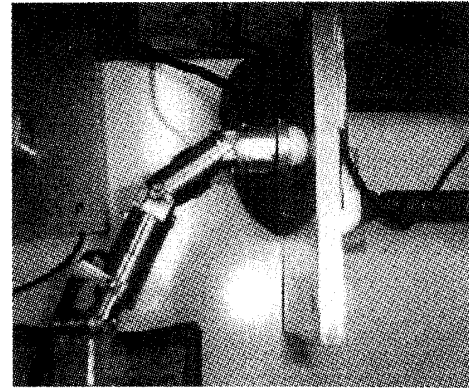


Fig. 14 Experimental system

ボードを接続した。D/A 出力信号は、16ch のリニアアンプを介してモータに印加される。制御用 PC の OS は Windows98、触覚センサの計測・表示用 PC の OS は MS-DOS、二つの PC の通信はメモリ結合の通信方式（メモリンク、(株)インターフェス製）を採用した。触覚センサは最大 100Hz のサンプリングサイクルで 624 点のデータが更新できる。制御用 PC のサンプリングサイクルは制御計算量に大きく依存するが、メモリ結合の通信方式により制御用 PC から触覚センサの情報が必要な時点で 2M バイト/秒の転送速度で取得できる。

図 13 にステップ位置指令を与えたときの拇指の各関節の応答波形を示す。0.26[rad]の目標角度に遅くとも 0.15[ms]程で到達している。関節 1, 2 の応答は、高減速のためにフィードバック入力飽和して立上がり時間が大きくなっている。人間の指の応答性は 5.5[Hz]程であるといわれており、それより高速応答しているといえる。

次に、拇指を用い、拘束面に対し 105[mm]離れた位置から目標位置まで到達し、到達後に拘束面の法線方向に目標指先力 0.49[N]で押す実験を行った。この実験環境を図 14 に示す。関節変位の目標軌道は、始点と終点の速度と加速度をゼロの条件で 2 点を 0.5 秒で結ぶ 5 次時間多項式で作成した。力の目標値は、接触後にステップ状に与えた。図 15 に各関節変位誤差の応答波形と指先力の波形を示す。非接触時には軌道の PID 制御、接触時は軌道の PID 入力と力の PI 入力を加算した制御とした。制御のサンプリングサイクルは 2[ms]である。図 15 は良好な応答が実現できていることを示している。

指先に力覚センサ、指腹部と掌に触覚センサを備えたサーボモータ内臓型の 5 本指ロボットハンドの開発例は著者らが知る限りでは NTU ハンド^[4]のみである。しかし、触覚センサは 18 点であり、ハンドの拇指第一関節のバンド幅は 0.15Hz である。また、4 本指ハンドであるが高

性能と評価される DLR ハンド^[6]における目標角度 20 度の位置決め時間はおよそ 0.3sec である。Gifu Hand II はこれまでのロボットハンドよりセンサ機能が豊富でかつ応答性も高く、また人間の指より高速に動作する。このことから、力感覚や触覚を用いた柔軟な物体操作が可能であり、研究用ツールとして有用であるといえる。

6. おわりに

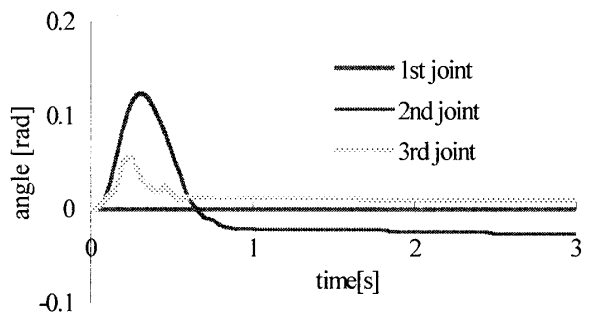
サーボモータを内蔵した 5 本指 20 関節 16 自由度の人間型ロボットハンド (Gifu Hand II) の構成と諸特性を示した。本ハンドは、指先に 6 軸力センサを、指腹部と掌には 624 点の分布型触覚センサを装着でき、指の運動範囲は人間と類似しており応答性は人間より優れている。このため、ロボットハンドによる器用な物体操作の研究開発ツールとして役立てることができる。本ハンド制御システムでは、OS に Windows98 を利用しているため、キーボード操作等があるとハンド制御のサンプリングサイクルは大きく変動し、その結果、動作も不安定なものとなる。今後、リアルタイム OS に変更し、安定な制御が実現できるようにシステムを変更し、ロボット

による器用な物体操作の研究に役立てる計画である。

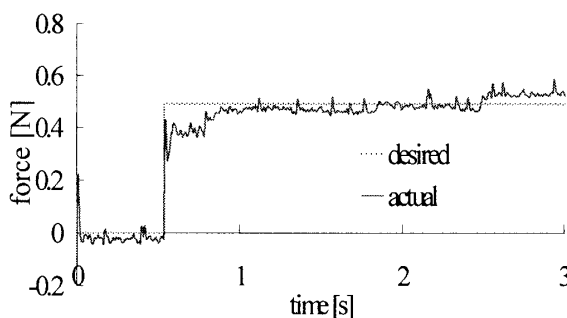
最後に、本研究は、(財) 岐阜県研究開発財団の支援と岐阜ロボットハンド研究会の協力を得ており、ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] S. C. Jacobsen, et al., "The Utah/MIT dexterous hand: Work in progress," Int. J. Robot. Res., Vol. 3, No. 4, pp.21-50, 1984.
- [2] K. J. Kyriakopoulos, et al., "Kinematic Analysis and Position/Force Control of the Anthrobot Dexterous Hand," IEEE Trans. SMC-Part B: Cybernetics, Vol. 27, No. 1, pp. 95-104, 1997.
- [3] M. Rosheim, "Robot Evolution," John Wiley & Sons, Inc., pp.216-224, 1994
- [4] L. R. Lin and H. P. Huang, "Integrating Fuzzy Control of the Dexterous National Taiwan University (NTU) Hand," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 1, No. 3, pp. 216-229, 1996.
- [5] 森田寿郎 他3名, 人間との物理的・情動的インタラクションを意識した多指ハンドの開発, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.417-418, 1996
- [6] H. Liu, J. Butterfass, S. Knoch, P. Meusel, and G. Hirzinger, "Multisensory Articulated Hand," IEEE Control Systems, April, pp.47-54, 1999.
- [7] D. Johnston, P.Zhang, J. Hollerbach, and S. Jacobsen, "A Full Tactile Sensing Suite for Dexterous Robot Hands and Use In Contact Force Control," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robo. And Automa., pp. 3222-3227, 1996
- [8] M. Shimojo, S. Sato, Y. Seki, and A. Takahashi, "A system for Simulating Measuring Grasping Posture and Pressure Distribution," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robo. and Automa., pp.831-836, 1995
- [9] J. Jockush, J. Walter and H. Ritter, "A Tactile Sensor System for a Tree-Fingered Robot Manipulator," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robo. and Auto., pp.3080-3086, 1997
- [10] H. Kawasaki and T. Komatsu, "Development of an Anthropomorphic Robot Hand Driven by Built-in Servo-motors" Proc. of the 3rd Int. Conf. on ICAM, Vol. 1, pp. 215-220, 1998
- [11] 日本整形外科学会身体障害委員会編, 関節可動域ならびに測定法, リハビリテーション医学, Vol.22, No.2, pp.127-132, 1974
- [12] 鈴木良次, 手の中の脳, 東京大学出版会, 1994
- [13] ビー・エル・オートテック(株), ビー・エル・センサー, BL-FTS-020,1997
- [14] ニッタ(株), タクタイルセンサシステム, 1997



(1) Errors of joint position



(2) Contact force

Fig. 15 Responses of contact task