

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析*

田口博丈^{*1}，長谷和徳^{*2}，前野隆司^{*3}

Analysis of the Motion Pattern and the Learning Mechanism for Manipulating Objects by Human Fingers

Hirotake TAGUCHI, Kazunori HASE and Takashi MAENO^{*4}

^{*4}Department of Mechanical Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522, Japan

It is important to clarify the motion pattern and learning mechanisms for manipulating objects by human fingers in order to develop a hardware of multi-fingered robot hand and a redundant-multi-DOF learning control system. We measured the trajectory of five fingertips of human hand. The task was to rotate a circular cylinder as a simple example. Then, we analyzed the trajectory. The analyzing methods were based on statistics analysis, first Fourier transformation, spectrum analysis and chaos analysis. As a result, coordinated movement pattern of five fingers were measured. It is found that thumb and forefinger stick whereas other fingers slip during contact period. It is also found that the movement changes to a specific pattern when the task is learned. We imply that the motion control method changes from feedback control to feedforward control after learning.

Key Words: Measurement, Learning, Human Engineering, Pattern Recognition, Spectrum Analysis, Chaos

1. 緒 言

ヒトや生物の運動は複雑かつ巧みである。この機構や制御法を解明するために、あるいはその特徴をロボットなどの人工物の設計に反映するために、これまでに様々な研究が行われてきた。特に、ヒト腕のリーチング動作や眼球運動の制御法のように、単一の器官を複数の筋により制御する機構に関しては詳しい研究が行われている。その結果、フィードバック誤差信号を用いた小脳のフィードフォワード制御器の学習機構が解明されている⁽¹⁾。一方、ヒトや生物の運動には、複数の要素が協調運動することにより目標動作を達成する運動も多い。たとえば、ヒトの多指による操り動作や柔軟生物の移動運動などは、生物の多数の部分と環境との相互作用が不可欠な例である。柔軟生物の移動運動などは、CPG (Central Pattern Generator, 中央パターン発生器) に基づくリズム運動^{(2),(3)}として研究されている。本研究では、多指による操り動作に着目する。ヒトは多くの関節自由度を有する複数の指を協調運

動させ、対象物を多様な接触状態で把持することによって、巧みかつ安定な操り動作を実現することができる。このため、これまでに、把持動作の指関節の角度計測など、いくつかの研究が行われている^{(4),(5)}。しかし、ヒトの操り動作における各指の役割、物体との接触機構、協調動作の習熟機構・制御機構は明らかにされていない。

一方、ロボットハンドに器用な操り動作を実現させるために、様々な研究が行われている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。しかし、多くは把持時の接触状態の理論解析に基づいており、ロボットの手指を多自由度冗長協調系とみなす立場とは異なる。ヒト手指の多自由度冗長協調機構が明らかにされれば、ヒトのように巧みな操り動作を行える多指ロボットハンドのハードウェアや冗長多自由度学習制御系の設計といった工学的な応用面においても有用である。

本研究では、手指で自由円筒を回転させる動作を例に、ヒトの操り動作における各指の役割、物体との接触機構および協調動作の習熟機構を明らかにすることを試みる。自由円筒回転動作は、結果としての運動は単純であるものの、5指を協調運動させ、把持と運指を同時に行わなければ達成できない動作であるため、協調動作パターンおよびその習熟機構の解析のための例題として適当である。本研究では、非

*原稿受付平成13年11月16日

*1 慶應義塾大学大学院(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

*2 正員，産業技術総合研究所(〒305-8566 つくば市東 1-1-1 つくば中央第六)。

*3 正員，慶應義塾大学理工学部機械工学科。

E-mail : maeno@mech.keio.ac.jp

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析

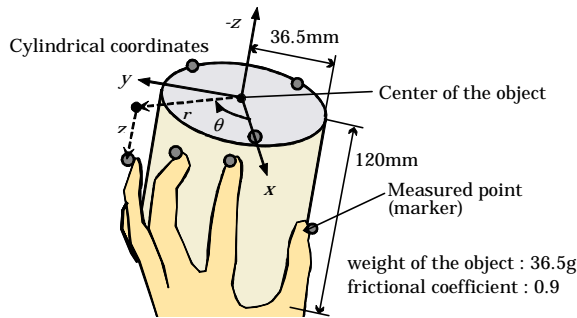


Fig. 1 Object and fingers

利き手における自由円筒回転タスク習熟前後の各指の指先軌道を計測する。そして、5指の動作パターンの特徴を明らかにするとともに、その習熟機構はフィードバック制御からフィードフォワード制御への移行に特徴付けられることを示す。

2. 計測内容と解析手法

図1に示すように、円筒上面3点と非利き手の各指爪先上5点に反射マーカを取り付け、非利き手で円筒中心軸時計回り方向に回転させるタスクを被験者7名に行わせた。被験者は健常者とし、男性5名、女性2名、年齢 27.5 ± 5.5 歳、手の大きさ（手首から中指先端まで） 18.5 ± 1.5 cm であった。把持と運指の協調動作を生成するために、円筒の6自由度は拘束しない。タスクを行う際には手首を固定し、不要な運動を抑制した。また、被験者には閉眼させ、視覚によるフィードバックを無視した。タスクは、円筒を可能なかぎり速く回すように指示した。円筒をなるべく速度変動のないように回転させる、軸のぶれが最小になるように回転させる、といったタスクも考えられる。しかし、本研究では、フィードバック制御による安定な操りよりもフィードフォワード制御によるリズムカルで高速な操りに着目するので、速く回すタスクとした。まず、円筒操り動作に習熟していない通常の状態での非利き手による操り動作中の各指先の運動軌道を30秒間計測した。非利き手としたのは、動作習熟による動作の健著な差異を解析するためには、最初からある程度巧みに円筒を回転させることができる利き手よりも、非利き手の方が良いと判断したからである。また、接触感覚のフィードバック情報の有無と運動制御との関係を知るため触覚フィードバック情報がない場合の仮想円筒操り動作の計測も行った。これらの計測の後、円筒を可能なかぎり速く回転させることを目指して、1日最低10分以上の練習を1週間行わせた。練習の後、前回と同様

に円筒を持った通常の操り動作と円筒を持たない仮想円筒操り動作とを再び計測した。計測には、反射マーカ方式の運動計測装置 VICON370 (Oxford Metrics 社製) を用いた。

運動の習熟過程を定量的に分析するために運動のばらつきに注目した。すなわち、運動軌道の再現性の向上、操り動作における各指の協調・役割の明確化によって運動の習熟が特徴付けられると考えた。本研究では以下のようなデータ処理を行って、ばらつきあるいは運動の再現性、協調性の定量的評価を行った。まず、計測したデータを図1に示すような円筒に固定された円筒座標系に変換した。つまり、各指の円筒中心からの距離 r と円筒との角度 θ の履歴を求めた。次に、定量的に動作の特徴、ばらつきを評価するために、円筒中心からの距離のパワースペクトル、各指の円筒からの距離の極大値と周期の変動係数を算出した。算出した値を習熟前後で比較することにより、習熟による動作の変化を解析した。また、円筒を持たない場合に関しても、仮想的に円筒中心を決定し、円筒中心からの距離の極大値と周期の変動係数を算出した。なお、その方法は以下の通りである。まず、時系列上で連続する2点の各 (x, y) データから直線を求め、その傾きと切片の平均値を算出し、その値から直線を描いた。指の動きは円筒をなぞるような動きであることから、その直線を仮想円の接線とした。次に、円の接線の垂線方向に円筒の中心が存在することから、全 (x, y) データの平均値を通り、先に求めた仮想円の接線の垂線を求めた。そして、全 (x, y) データの平均値から円筒半径 + 指の厚み = 45mm だけ離れ、垂線上にある点を仮想円筒中心点とした。この処理を各指において行った。さらに、各指の運動を支配する力学系のアトラクタ軌道と等価な軌道を、時系列データから Takens の方法⁽⁹⁾により再構成した。更に Wolf の方法⁽¹⁰⁾により、各アトラクタに対する第一リアプノフ指数を求めた。リアプノフ指数は力学系の不安定さを示す数値であり、系が不安定であればあるほど高い数値になる。ここで不安定とは状態が変化しやすいことを意味する。

3. 解析結果と考察

3.1 各指の役割と動作パターン

(a) 全員のパターン 図2に、円筒上部に固定された x - y 平面に投影した5指の運動軌道を、全被験者について示す。指先の円筒中心からの距離 r が、円筒の半径 35mm より大きい値を示しているが、これは、計測した標点が爪先についていることにより、指の

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析

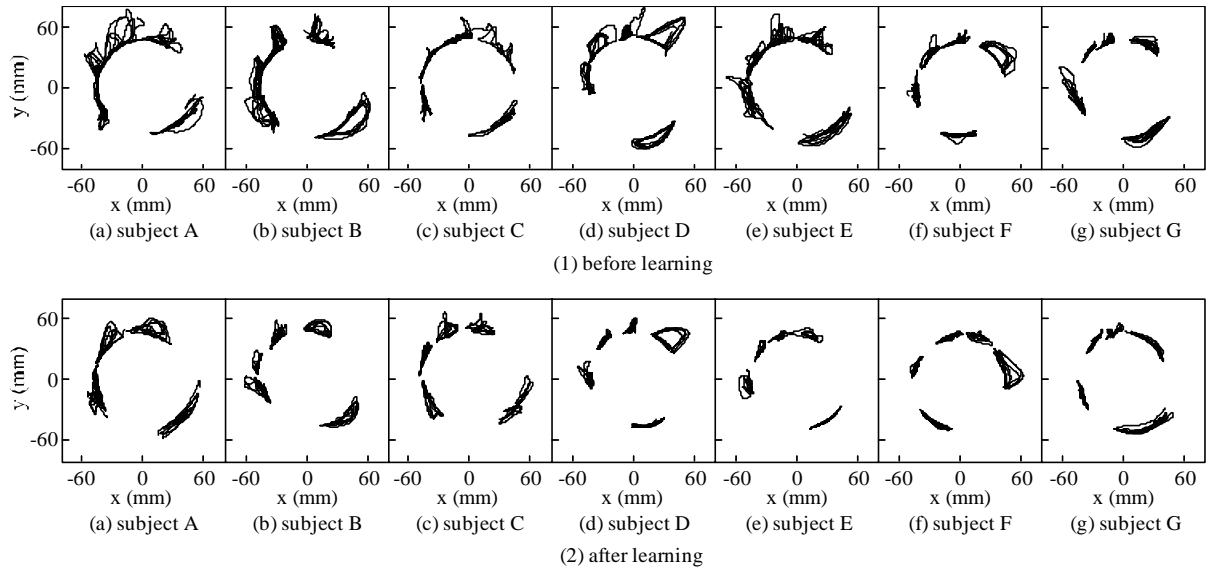


Fig. 2 Trajectory of five fingertips

直径から指の変形量を引いた分だけ大きく計測されるからである．図 2 (1)を見ると，動作習熟前の各指の動作は規則性が低く，指先軌道がばらついている傾向があることがわかる．これに対し，習熟後の図 2 (2)を見ると，周期性が大きくなっている．7名の被験者の軌道の大きさや習熟の度合いには差があるものの，基本的な動作パターンはほぼ一致していた．すなわち，いずれも後で示す被験者 G の場合と同様に，周期的なパターンを呈していた．また，7名の被験者の習熟前後における円筒中心からの距離 r ，周期 T の平均値と変動係数，円筒の回転の角速度 ω ，円筒中心軸の絶対座標系 z 軸からの傾きの角度 θ_z の平均値と標準偏差を表 1, 2 に示す． r と T では，習熟前後で平均値の値が大きく違うため，ばらつきの程度を比較するのに変動係数を用いた． θ_z では，ばらつきの大きさそのものを比較するために標準偏差を用いた．表より，被験者 A, C, F, G は習熟後に親指の r の平均値が増加し，他指の r の平均値は減少することがわかる．また， r の変動係数は全被験者の全指で減少していることがわかる． T の平均値は被験者 B の小指，被験者 F の中指・小指を除いて小さくなることわかる．また， T の変動係数は，被験者 B の示指・中指，被験者 D の母指・示指，被験者 E の示指，被験者 F の母指，被験者 G の小指を除いて減少することがわかる． ω の平均値は被験者 B, E を除いて大きくなっていることがわかる． θ_z の平均値は，被験者 C 以外で大きくなり，その標準偏差は被験者 B, D 以外で大きくなることわかる．以上より，被験者 G は全被験者の特徴的傾向を最も良く表していた．よって，

以下では，周期性が大きく，代表的な特徴を有していた被験者 G のデータを取り上げ，これについての解析と考察を行う．

(b) 被験者 G のパターンの履歴 図 3 に，5 指の円筒中心からの距離 r の履歴を，約 5 周期分について示す．習熟前後とも，周期や振幅に変動はあるものの，指ごとの特定なパターンで運指されている様子わかる．よって，習熟後のほうが規則性の高いパターンであることがわかる．また，習熟することにより，全体的に r の値が減少している．これは，無駄な動作が減少したためと考えられる．また，習熟後では，指の円筒との接触時間が短くなっている．これは，巧みな円筒回転動作パターンを獲得したことにより，円筒を安定支持する必要性が低下したためと考えられる．

次いで，円筒と指の間の空間パターンを調べるため，円筒に固定された円筒座標系における角度 θ と距離 r (図 1 参照) の関係を求めた (図 4)．図 4 (1) の習熟前の図において，(a) 親指，(b) 示指を見ると，軌道曲線は r を横に連ねたようなパターンを呈している．

の最下点は $r=45 \sim 50$ mm 程度であり，円筒に接触していると考えられる．円筒と接触していると考えられる区間において r の値が一定値にならずにばらつくのは指と円筒との接触状態の違いに起因する指の変形の影響であると考えられる．さて，図 3 (1) の (a) と (b) をみると，山と山の間には $r=45 \sim 50$ mm 程度の平らな部分があり，この期間が，円筒と指が接触している期間であると考えられる．つまり，図 4 (1) の極小点において，軌跡は一点に一定時間とどまってい

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析

Table 1 Analyzed data of five fingers (part 1)

	\bar{F}_{\max}		$Cv\bar{F}_{\max}$		\bar{T}		CvT	
	before learning	after learning	before learning	after learning	before learning	after learning	before learning	after learning
A thumb	54.0522	55.3935	7.5164	6.9645	0.4321	0.2743	38.0236	23.5691
A forefinger	53.9480	54.6454	10.6250	8.7744	0.3973	0.2599	45.9602	19.8384
A middle finger	63.5036	58.2576	10.4745	9.6024	0.4157	0.2694	29.2278	17.0230
A ring finger	54.0157	51.7064	9.9827	8.7380	0.4041	0.2414	47.2903	42.5021
A little finger	52.9915	57.6264	11.1076	7.9755	0.3269	0.2765	45.4267	24.7089
B thumb	60.7200	55.7534	10.2589	5.4515	0.3589	0.2274	43.0482	31.7282
B forefinger	62.5540	54.0353	12.0352	6.2839	0.2705	0.2268	33.0166	34.2945
B middle finger	64.4460	54.2787	10.4307	6.8196	0.3012	0.2204	19.5651	22.4501
B ring finger	52.2811	52.0182	7.0701	5.0190	0.2602	0.2358	51.4988	37.5912
B little finger	51.5087	47.7954	9.4330	10.4774	0.2808	0.3420	36.6809	33.8889
C thumb	50.2616	55.5996	7.9363	4.5135	0.4917	0.3681	53.5896	30.2092
C forefinger	59.2452	56.7944	10.4846	8.5292	0.5535	0.2960	53.1346	33.7838
C middle finger	56.8813	56.8484	8.3449	7.7622	0.6934	0.3301	45.2408	27.9430
C ring finger	54.8257	51.9886	8.5527	4.3962	0.6709	0.3194	34.8040	34.1265
C little finger	50.8892	50.4155	10.4020	8.0061	0.4016	0.3069	47.6096	33.2030
D thumb	54.2826	47.9367	5.9223	4.7164	0.6370	0.4437	32.8100	41.3342
D forefinger	67.5976	63.0565	13.8864	9.3055	0.7187	0.6754	25.8661	37.8146
D middle finger	56.7149	56.6244	9.7719	6.6906	0.3904	0.3296	48.1045	27.3908
D ring finger	56.0200	53.6950	9.6526	6.8952	0.5566	0.4720	53.3058	37.6695
D little finger	54.5681	47.8012	12.8674	9.0945	0.6003	0.5052	36.3318	36.2233
E thumb	56.9774	52.0075	5.9248	4.7061	0.5593	0.2909	43.6260	41.9732
E forefinger	56.4255	51.5309	9.3718	10.1972	0.3265	0.2595	31.5161	31.8189
E middle finger	60.4723	53.9397	10.1690	10.2828	0.3884	0.2415	33.4449	30.4389
E ring finger	53.8912	51.1096	7.3973	6.6449	0.4231	0.2215	41.7159	23.0293
E little finger	56.6472	50.1060	13.0361	7.9468	0.5202	0.2250	37.3318	28.6578
F thumb	48.5839	48.6134	6.2685	2.0692	0.5660	0.3204	45.9187	51.1860
F forefinger	59.0845	53.0876	9.2892	8.6574	0.6968	0.5400	29.4346	33.1296
F middle finger	51.0139	49.3934	7.3896	7.3523	0.4475	0.4885	43.5531	28.0860
F ring finger	49.7124	45.9484	9.1148	4.1684	0.4628	0.3768	48.1417	46.9480
F little finger	47.6528	47.4833	5.9105	5.3846	0.3576	0.4027	49.6924	39.3842
G thumb	52.7283	55.5330	4.7125	4.5425	0.4087	0.3534	46.6846	38.7946
G forefinger	53.7102	51.0897	7.4196	6.4649	0.4523	0.3959	37.8289	13.8646
G middle finger	53.2983	52.2282	5.9576	5.6856	0.3442	0.2169	32.1615	27.5012
G ring finger	51.0910	49.2803	3.0238	2.4722	0.4490	0.3536	48.6192	26.0238
G little finger	53.0478	44.6810	8.4876	4.6736	0.4822	0.2341	32.2273	39.5557

Table 2 Analyzed data of five fingers (part 2)

	$\bar{\omega}$		$\bar{\theta}_z$		$\bar{\sigma}_{\theta}$	
	before learning	after learning	before learning	after learning	before learning	after learning
A	0.6647	0.7448	1.1085	1.2992	0.1103	0.1151
B	1.5924	1.3392	1.0843	1.1183	0.0843	0.06238
C	0.5608	0.5887	1.184	1.1832	0.07996	0.08794
D	0.8556	0.8937	1.0655	1.128	0.08288	0.06895
E	1.279	0.7306	1.1106	1.1972	0.08755	0.0918
F	0.8141	1.1886	1.1076	1.3522	0.06419	0.1149
G	0.9042	2.067	0.9441	1.1033	0.04758	0.07911

る。これは、母指と示指が円筒上の一点と接触し、固着していることを示している。しかし、図 3 の(2)、図 4 の(2)をみると、親指も示指も円筒に固着している時間が非常に短くなっている。これを馬の移動運動の様式と対比させて議論する。馬は移動速度が遅いとき、walk と呼ばれる脚の運びを行い、速度が速くなるに連れて trot と呼ばれる別の脚位相の運動パターンに自律的に変化する⁽¹¹⁾。本実験結果もこれと同様と考えることができる。すなわち、運動習熟に伴う回転速度上昇の際に、単に相似的に各運動パター

ンが速くなったのではなく、習熟前とは異なる運動パターンを持つ運動様式が獲得され、それに自律的に移行できるようになったものと考えられる。

一方、図 4 (1)および(2)の(c) 中指および(d) 環指を見ると、(a)、(b)とは逆に、を横に連ねたようなパターンを呈している。すなわち、円筒中心からの距離が小さいままに保たれかつ円筒との角度が増加している箇所が存在する。これは、中指と環指が円筒と接触する際に滑っていることを示している。これらの指が滑っているのは、円筒を弾いて回した後は

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析

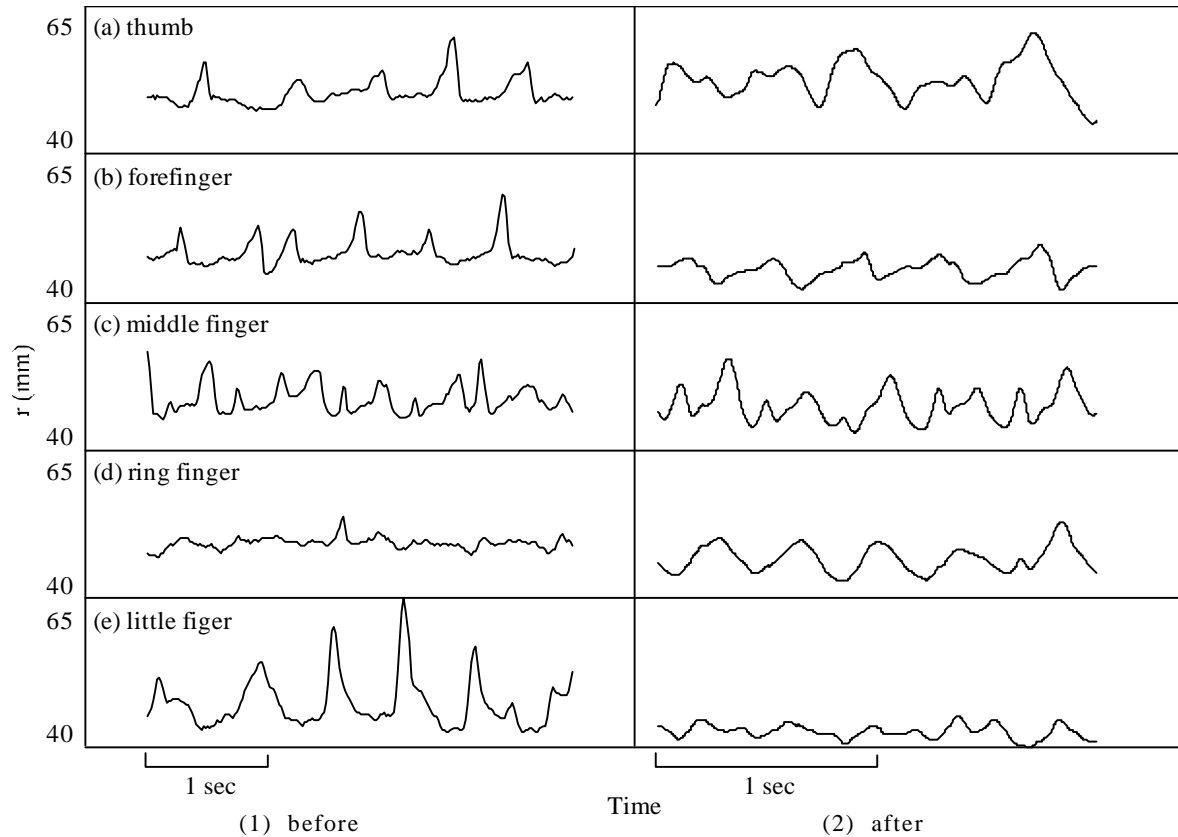


Fig. 3 Change in distance between fingers and cylinder

円筒を法線方向に支えているからだと考えられる。つまり、母指と示指は円筒との接触時に固着して円筒を送っているのに対し、中指と環指は円筒を支える役割を担っている。また、(e) 小指の軌跡はかなり複雑な図形を描いているが、滑りの状態が起きているといえる。

(c) 運指パターンの模式図化 運指パターンの説明を明確化するため、図 3 (2)の円筒中心からの距離 r の時系列から指と円筒との接触時間を推定した。前述のように指と円筒が接触していると考えられる場合においても、指と円筒の接触状態の違いにより、各指の円筒からの距離 r の値が異なっている。よって、このことを考慮し、 r の値が極小値よりも 2 mm 大きい場合を接触の閾値と判断した。以上のようにして求めた接触時間の推移より、各指の周期性を読み取り、図 5 のような動作パターンの履歴を求めた。これは、運指の 1 周期に相当する区間を図に示したものである。また、3・1 (b) で述べた固着と滑りの接触パターンも一緒に示した。習熟によって獲得した図 5 (2) のような動作パターンは、基本的に全被験者において共通の動作パターンであった。その特徴は、

- ・ 中指と環指の接触時間はほぼ等しく、同期してい

る。

- ・ 示指の接触時間が最も長い。

- ・ 全指が円筒から離れる瞬間がある。

という点であった。また、図 5 からわかるように、動作習熟前は常に 2 指から 5 指が接触して円筒を支えているのに対して、動作習熟後は全指が円筒に接触していない状態さえある。その状態の持続時間は、約 0.07s という非常に短い時間である。しかし、円筒に全指が接触していない状態があるにも関わらず、安定に円筒を回転させることができていた。ここで、3・1 (b) と同様に馬の歩行⁽¹⁾を取り上げる。walk (遅い動作) のときは常に 2, 3 本の脚で体を支えているのに対して、trot (速い動作) のときは全脚が離地している場合がある。つまり、運動の速度によって体を支えるモードを静的から動的に変えているのである。円筒回転動作においても同様な現象が生じていると考えられる。つまり、動作習熟前は静的な円筒の支え方をし、円筒は静的に安定であったが、動作習熟後は動的な円筒の支え方をし、円筒は動的に安定していると考えられる。これは、動作習熟により運指の協調動作パターンを獲得したからだと考えられる。

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析

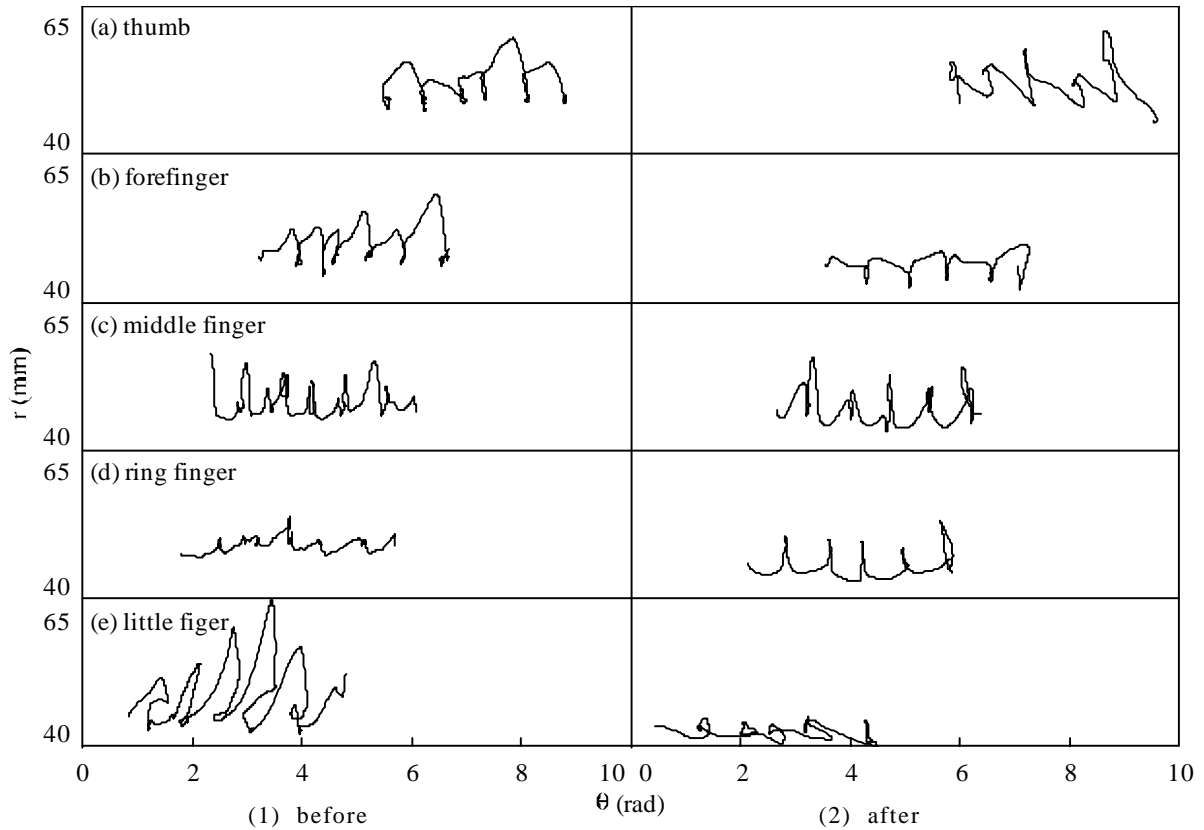


Fig. 4 Relationship between angle θ and radius r of fingers

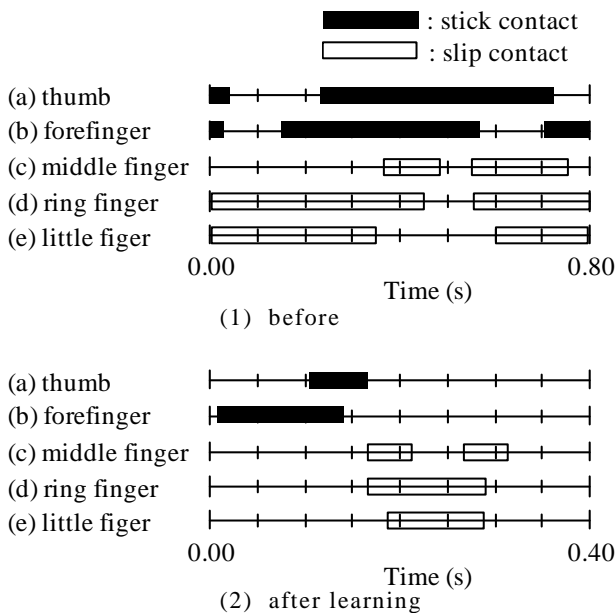


Fig. 5 Motion pattern of five fingers and states of contact

3.2 習熟機構

(a) パワースペクトルの変化 図 3 に示した習熟前後の円筒中心からの距離 r のデータをフーリエ変換することにより、パワースペクトルを算出した。結果を図 6 に示す。パワースペクトルのピークの分布を見ると、習熟前には広い周波数範囲に分布していた

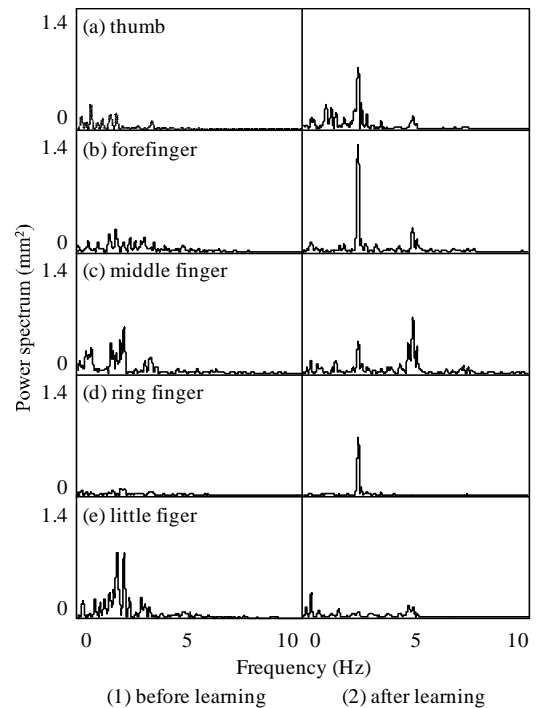


Fig. 6 Power spectrum of radius r

ものが、習熟後には特定の周波数域に特徴的に現れるようになることがわかる。ただし、全被験者を通して、母指では他指とは異なり習熟後もピークが低周波域に広がって分布する傾向が見られた。これは、

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析

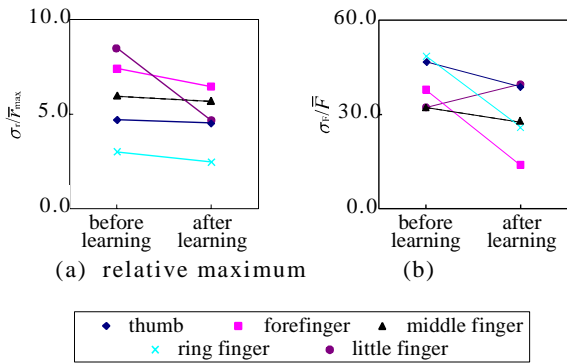


Fig. 7 Comparison of dispersion with subject holds the circular cylinder

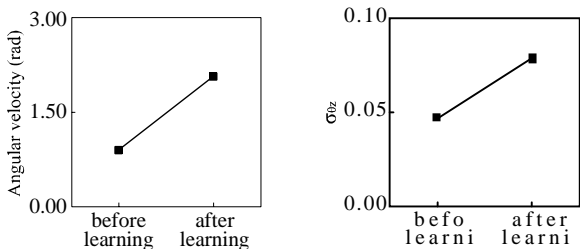


Fig. 8 Comparison of angular velocity

Fig. 9 Comparison of dispersion of inclination of z

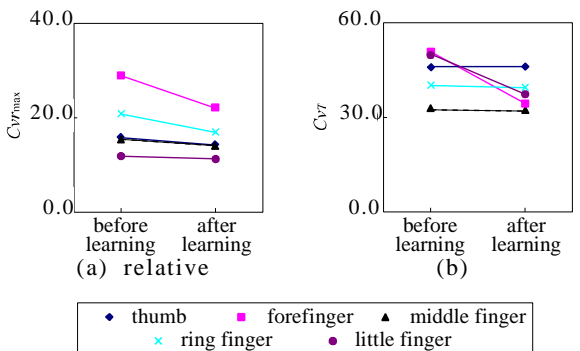


Fig. 10 Comparison of dispersion when subject doesn't hold the circular cylinder

母指の動作が他の指に比べて一定の動作になりにくいことを示していると考えられる。

(b) ばらつきの変化 図 7 には円筒を持っている場合のばらつき，すなわち，円筒中心からの指先距離 r の最大値と周期の変動係数を示す。図 7 より，円筒回転動作の習熟に伴い，円筒中心からの距離の極大値のばらつきおよび周期変動のばらつきが小さくなっていることがわかる。これらより，円筒回転動作の習熟に伴い，各指の動作が特徴的な一定の動作パターンに収斂していくということが出来る。

図 8 に円筒の角速度を，図 9 に円筒中心軸の傾き θ_z のばらつき，すなわち， θ_z の標準偏差 σ_{θ_z} を示す。図 8 および図 9 を見ると，円筒回転動作習熟後には，円筒の角速度は大きくなり，円筒中心軸の傾きの変

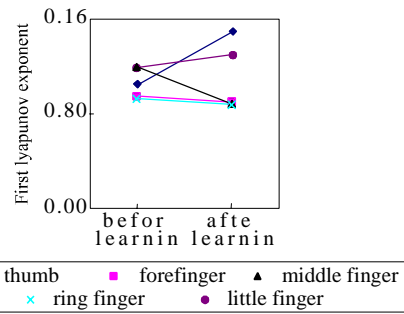


Fig. 11 First Lyapunov exponents of five fingers

動も大きくなることわかる。その一方で，上述したように円筒回転動作習熟後には指動作のばらつきが小さくなり，各指動作が一定のパターンになる。仮に，円筒回転動作がフィードバック制御されているとすると，フィードバック情報に対応するために各指動作の動作のばらつきは大きくなり，円筒中心軸の傾きの変動を小さくするように働くはずである。しかし，実際には逆の現象が起こっていることより，円筒回転タスク習熟前に比べ習熟後には，フィードバック制御よりもフィードフォワード制御が支配的な運動が行われていると考えられる。

(c) 仮想円筒回転動作の変化 実際には円筒を持たず，円筒を持っていると意識して指を動かした場合についても，仮想的に円筒中心を決定し，仮想円筒中心からの距離とその動作の周期を算出した。

仮想円筒中心からの距離とその周期のばらつき，すなわち，仮想円筒中心からの指先の距離 r の最大値と周期の変動係数を図 10 に示す。図 10 を見ると，円筒を持たない動作においても，各指の動作のばらつきが小さくなっていることがわかる。なお，定量的に評価していないが，習熟後の円筒を持っていないときの動作軌道は，円筒を持っているときの動作軌道に近づいていたことが見てとれた。これらの点から，習熟することにより触覚フィードバック情報の必要性が低下していることが推察される。よって，このことから，フィードフォワード制御のための内部モデルが習熟により獲得されたと考えることができる。

(d) カオス性 図 11 には，習熟前後の各指の第一リアプノフ指数を全被験者 7 名について平均した値を示す。図 11 を見ると，第一リアプノフ指数は，母指・小指では増加しており，他の指では減少していることがわかる。また，母指・小指では指数値が高い値を示し，他の指では低い値を示した。これらより，母指・小指は習熟することによりカオス性が高まる一方，示指・中指ではカオス性が低くなってい

ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析

ることが推測できる。つまり、第一リアブノフ指数の示すカオス性とは、状態の変化のしやすさであることから、習熟後の示指・中指の低カオス性は一定な動作への収斂を表し、それにより外乱へのロバスト性が低くなっていると考えられる。一方、母指・小指では、カオス性が高まることにより、環境変動に対する適応能力が強化されていると考えることができる。つまり、複雑系の議論で言われるところのカオスの縁に基づく多様性の発現である。ただし、計算した第一リアブノフ指数は、データの時間が短いこと、計算による誤差が大きいことなど、信頼性の問題が残されている。詳細なカオス解析は今後の課題である。

3.3 習熟機構の仮説

以上 3.1, 3.2 より、操り動作の習熟は以下のような機構であると考えられる。ヒトが手指で複雑な動作を行う場合、動作習熟前の運動は随意運動的であるが、動作情報が学習される結果、脳内に内部モデルが構築され、各指の機能が明確化し、各指に協調的かつ規則的な動作パターンが生成される。このため、各指の振幅や周期変動のばらつきが小さくなる。また、習熟後には習熟前とは異なる運指パターンを持つ運動様式が獲得され、静的に安定させていた円筒を動的に安定させることができるようになり、素早い運指が可能になる。この際に、運動制御はフィードバック制御からフィードフォワード制御に移行し、円筒回転動作がサイクリックな自動運動へと変化したと考えられる。このことは、習熟後の円筒回転動作は、触覚フィードバックが支配的な運動ではなく、歩行などのリズム運動と同様、脳内に生成された CPG (Central Pattern Generator, 中枢パターン発生器) を用いて制御される運動と捉えられることを示している。

4. 結 論

本報では、ヒトが円筒を回転させる動作を行なう際の各指の動作軌道を計測し、動作パターン、円筒との接触状態と習熟による動作の変化を解析した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 指の円筒との接触状態は、母指と示指は固着、

中指と環指は滑りになっている。

- (2) 円筒回転動作習熟前は円筒を静的に安定させているのに対し、動作習熟後は円筒を動的に安定させている。
- (3) 円筒回転タスクを習熟することにより動作が一定のパターンに収斂する。
- (4) 示指・中指は低カオス性を示し、母指・小指は高カオス性を示す。
- (5) 円筒回転タスクの習熟に伴い、円筒操り動作は、フィードバック制御からフィードフォワード制御が支配的な運動に移行していると考えられる。

文 献

- (1) 川人光男, 脳の計算理論, (1996) 産業図書。
- (2) S. Grillner, P. Zangger, On the initiation of swing phase of locomotion in chronic spinal cat, *Brain Res*, **146** (1979), 169-277.
- (3) G. S. Stent et al., Neuronal Generation of the Leech Swimming Movement, *Science*, **200** (1978), 1348-1357.
- (4) 酒井直隆, 腰野富久, 松倉陽一, 手指巧緻動作の三次元解析, 第 18 回バイオメカニズム学術講演会, (1997), 27-28.
- (5) 中谷隆文, 岩本剛, 薦紀夫, 五百井清, 筋駆動による複数指を組み合わせたマニピュレーションの多体動力学解析と実験, 日本機械学会第 10 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, **97-72** (1998), 167-168.
- (6) 黄昶淳, 高野政晴, 佐々木健, 高橋秀樹, 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, 日本ロボット学会誌, **16-2** (1998), 249-257.
- (7) 前川仁, 谷江和雄, 小森谷清, 指先での転がり接触を考慮した多指ハンドによる三次元把握の運動学・静力学および剛性効果, 日本ロボット学会誌, **16-2** (1998), 205-213.
- (8) J. C. Chan, Yun-hui Liu, Simulating Dexterous Manipulation of a Multi-fingered Robot Hand Based on a Unified Dynamic Model, *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, (1999), 3026-3031.
- (9) F. Takens, Detecting strange attractors in turbulence, *Lecture Notes in Mathematics*, **898** (1981), 366-381.
- (10) A. Wolf, J. B. Swift, Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica D*, **16** (1986), 285-317.
- (11) M. Hildebrand, Symmetrical Gaits of Horses, *Science*, **150** (1965), 701-708.