

## 健康成人の上肢位置感覚

— 指示運動による誤差発現とその影響因子 —

宮本重範

札幌医科大学保健医療学部理学療法学科 (主任 武田秀勝 教授)  
札幌医科大学医学部生理学第2講座 (指導 青木 藩 教授)

The Position Sense of the Upper Extremities in Healthy Subjects  
— The Pattern of Errors Induced by Pointing Tasks and the Influencing Factors —

Shigenori MIYAMOTO

*Department of Physical Therapy, School of Health Sciences, Sapporo Medical University  
(Chief : Prof. H. TAKEDA)*

*Department of Physiology (Section 2), School of Medicine, Sapporo Medical University  
(Director : Prof. M. AOKI)*

**ABSTRACT** The goal of this study was to obtain values on the accuracy of the position sense of the upper extremities in non-disabled adults, both conditions under normal and under vibratory and anesthetic disturbance. The subject was blindfolded and seated. One of the subject's arms was positioned at the horizontal reference line by the tester and the subject raised the other arm to what he/she perceived as the horizontal.

The arms were prevented from touching each other by a transparent barrier with a protractor printed on it. 1) The subject placed one hand at the perceived horizontal, then raised the other to match the position. This was repeated 30 times, then re-performed moving the arms in the opposite order. 2) The subject placed both hands at the perceived horizontal simultaneously. 3) Task 1) was repeated at two speeds; the subjects were given 1 second and 2 seconds to point. 4) Task 1) was repeated with reference lines 30 degrees above and below the horizontal. 5) The subjects raised one arm to the horizontal reference line. 6) Task 1) was repeated while the tester applied a vibrator at 100 Hz to the deltoid muscle and at 30, 60 and 100 Hz to the most sensitive portion of the lateral to the scapular spine (determined in a pilot study) on the pointing side. 7) Task 1) was repeated after the tester anesthetized the shoulder the subject was using. The subjects were given about 2 seconds to perform the tasks besides task 3).

The error magnitudes were assessed in terms of angular displacements from the reference line in task 1) and between finger tips in task 2). The error direction was expressed depending on the directions of indicated finger points above (plus) or below (minus) the reference line, or the direction of points from the reference of nondominant hand.

The error magnitudes in the pointing tasks in healthy adults and the factors influencing them are summarized as follows.

1. The dominant hand pointed significantly below the horizontal in the task with either hand:  $-0.7^{\circ} \pm 1.3^{\circ}$  (M $\pm$ SE) in male and  $-1.5^{\circ} \pm 1.8^{\circ}$  in female subjects, while the nondominant hand pointed close to the horizontal:  $-0.1^{\circ} \pm 2.1^{\circ}$  in male and  $-0.1^{\circ} \pm 1.6^{\circ}$  in female subjects. The distribution of most of the errors were very close to zero in tasks 2),  $-0.05^{\circ} \pm 1.6^{\circ}$  in male and  $-0.1^{\circ} \pm 1.8^{\circ}$  in female subjects.

2. The dominant hand showed no significant difference in the pointing errors with speed in all 10 subjects, while 9 of the 10 showed significant difference in the nondominant hand.

3. The dominant and nondominant hands in all 10 subjects showed no significant difference in errors when the reference line was at 30 degrees.

4. Errors in tasks 5) showed significant difference in comparison with errors in task 1) in the dominant hand of 8 among 10 subjects and in the nondominant hand of 4 among 10 subjects.

5. Vibratory stimuli caused the pointing errors to significantly move upward or downward in either hand, as compared with the pointing without vibration.

6. The pointing errors moved significantly downward immediately after local anesthesia on the skin over the deltoid muscle of the pointing side in all 5 subjects.

In summary, these findings suggest that sensory information from the muscle, joint and skin receptors play important roles in the accuracy of the position sense of the upper extremities.

(Received June 10, 1996 and accepted July 3, 1996)

**Key words:** Position sense, Pointing task error, Dominant hand, Receptor, Human subject

## 1 緒 言

ヒトは運動時の体肢の相対的位置やその変化を知ることができる。この位置および運動の複合された感覚は深部感覚の一種 (modality) であり、運動感覚 (kinesthesia) と呼ばれている。その中で、動き要素の少ないものを位置感覚 (position sense) として狭義の運動感覚、即ち、動き感覚 (sense of movement) と区別することもあるが、ほぼ同義語として用いられることも多い<sup>1)</sup>。位置感覚は末梢情報源である関節受容器や筋紡錘からの感覚入力が必要であり、それら各種の受容器からの求心性入力が大脳皮質体性感覚野およびその連合野へ伝達され処理、統合されることにより関節の位置が認識される。

関節受容器と称されるものには関節包に分布するルフィニ型終末 (Ruffini type ending)、関節の靭帯に分布するゴルジ型終末 (Golgi type ending) および関節や靭帯付着部の線維性骨周囲組織に分布するパチニー様小体 (Paciform corpuscle) がある<sup>2)</sup>。これらの受容器の中で位置感覚の形成に寄与するものとして、遅順応型受容器であるルフィニ型終末やゴルジ型終末が挙げられている<sup>2,3)</sup>。これら関節受容器の働きに関しては、ネコを用いた動物実験によって膝角度変化に対応した膝関節包からの単一求心性線維の発射活動が生ずることが報告された<sup>3-5)</sup>。しかし、関節受容器が応答する膝関節の可動域は限定されており<sup>5,6)</sup>、膝屈曲、伸展の両方で発射が認められる<sup>2)</sup> ことから関節位置感覚における関節受容器の寄与については現在、否定的である。他方、ヒトの肘関節の屈筋、伸筋に振動刺激を加える

ことにより、肘関節の位置感覚において動き感覚の錯覚 (illusion) が生じる<sup>7)</sup> ことから、筋受容器の位置感覚に果たす役割の重要性も注目されてきている<sup>8-10)</sup>。これまでヒトの位置感覚に関して、手指<sup>11-15)</sup> や膝関節<sup>16-18)</sup> など主に一軸性関節について報告されており、位置感覚形成に果たす関節受容器<sup>11,13,14)</sup>、筋受容器<sup>9,17,19)</sup> あるいは関節・筋に加え皮膚受容器<sup>12,13,20)</sup> の重要性が指摘されている。一方、肩関節は上肢帯と上肢を連結する多軸性関節であり、上肢の運動に際し、その空間的位置の認識に重要な役割を果たすものと考えられる。肩関節の位置感覚の精度 (accuracy) に関しては、被験者の前方に前額面に平行に設定された目標点に対する片側上肢の指示運動における誤差<sup>21)</sup> あるいは肩関節回旋運動器 (shoulder-wheel apparatus)<sup>22)</sup> を利用した肩関節回旋角度の再現能力の障害側と健側の比較について報告されている。

しかし、上肢の位置感覚の誤差発現機序については未だ十分に解析されていない。そこで、著者は本研究において、健康成人を対象に、まず上肢の指示運動によって生じる誤差を測定し、ヒトの肩関節の位置感覚の精度を調べることを目的とした。誤差の測定は、肩関節における多軸性の運動を単純化するために、上肢の運動を主として上下方向のみに限定して行った。次に、その成績をもとに、異なった条件下で指示運動を行わせ、指示誤差の発現に影響を及ぼす因子を調べた。さらに、筋紡錘および皮膚受容器の寄与の程度についても検討を加えた。

## 2 実験方法

### 2.1 被験者

被験者は本学教職員ならびに学生のボランティアで、上肢の感覚、運動系に異常の認められない健康な成人男女32名(男17名:19-42歳,平均年齢24.5歳,女15名:18-32歳,平均年齢23.0歳)を対象に実施した。そのうち右利きの者は26名(男15名,女11名),左利きの者は2名(男1名,女1名),左右どちらでもない者(両手利き)は4名(男1名,女3名)であった。実験に先立ち、被験者全員に対して実験内容について説明を行い、十分な理解および了承を得た上で実験を行った。

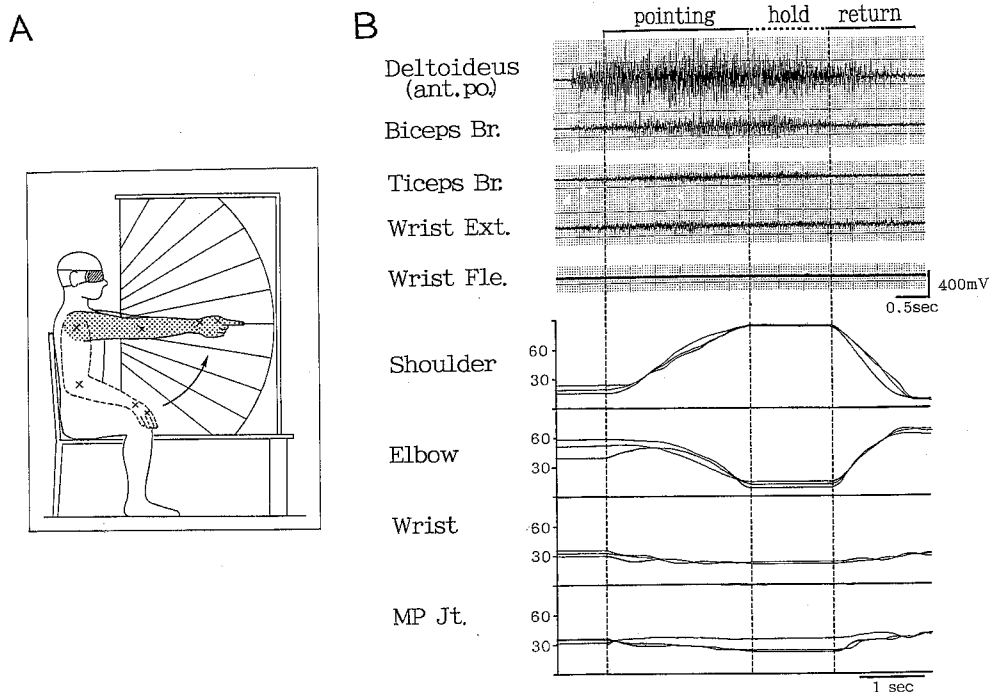
### 2.2 指示運動の誤差測定装置

指示運動における誤差測定には特製の装置を用いて

行った。透明なアクリルボード(縦110cm,横60cm,厚さ3mm)の面上に、被験者が上肢を伸展して上下運動をした場合に、示指の運動軌跡に一致するように、肩関節を中心として半円弧状(半径約80cm)に1度刻みで角度を目盛りした。そのアクリルボードのスケールは周辺部を木枠で補強し、台に垂直に固定した(Fig. 1A)。

### 2.3 指示運動の運動学的解析

位置感覚にもとづくと考えられる指示運動の際に、どんな上肢筋が働くのかを調べる目的で、被験者3名について指示運動時の上肢の筋活動を筋電図で記録して調べた。表面記録電極(双極)を指示側上肢の三角筋前部(the anterior portion of M. deltoideus),上腕二頭筋(M. biceps brachii),上腕三頭筋長頭(the long head of M. triceps brachii),手関節伸筋群(wrist extensors),手関節屈筋群(wrist flexors)の



**Fig. 1** Apparatus for error measurements in finger pointing tasks. A: During the experiment, the subjects was seated in a chair in front of a semicircular plastic protractor. He/she extended an arm to match the position of the index finger on the other hand placed at the horizontal reference line ( $0^\circ$ ), without visual guidance. Cross marks represent the locations of joints of the upper extremity for the angular measurements. B: The top figure shows the electromyographic activities of the upper extremity during the pointing tasks. The lower figure shows the angular changes of the shoulder, elbow and wrist joints, and metacarpophalangeal (MP) joint of the index finger measured with a VTR in pointing tasks which were performed 3 times by a subject. Dashed vertical lines denote the beginning and the end of pointing tasks and the beginning of return to the starting position.

筋腹上に2~3 cmの間隔で装着し、ポリグラフ（日本光電三栄，361）にて筋電図を導出，記録した（Fig. 1B）。また，同時に，肩峰，上腕骨外側上顆，橈骨茎状突起，示指の中手骨骨頭および示指先にマーカーを貼り付け，ビデオカメラにて上肢の指示運動を撮影した。関節の角度変化について，肩関節は，外側面において肩峰から降ろした垂線に対して肩峰と上腕骨外側上顆を結ぶ線が作る角度，肘関節は外側上顆を軸として，肩峰と橈骨茎状突起とのなす角度，手関節は橈骨茎状突起を軸として，外側上顆と示指の中手骨骨頭とのなす角度，示指は中手骨骨頭を軸として，橈骨茎状突起と示指の先端とのなす角度をそれぞれ測定した。

## 2.4 指示運動の誤差の測定

### 2.4.1 実験1

指示運動の誤差測定に先立ち，次の準備を行った。1) 被験者の肩峰端から示指の先端までの長さを計測すると同時に，椅子の高さを調節し，肩峰端とスケールの軸心が一致するようにした。2) 被験者の両手を合わせて両示指の先端正中部にサインペンで印をつけ，測定用スケール上での誤差を読み取りやすくした。次に，被験者は前方正中線上に垂直に置かれた測定用スケールに対し，両肘を曲げ両腕を体側に置いた楽な姿勢で座り，閉眼にて次の3項目について各々30回ずつ指示運動を行った。

被験者の指示運動は検者の口頭による合図で，次の順序で行われた。1) 非利き手側の手を前方に伸ばしながら水平位（基準位）まで挙上する。その時，検者はその非利き手側の示指の先端を水平線上（0°）に軽く触れるように置く。次に，被験者はゆっくりした速度（約2秒/回）で利き腕を伸展して挙上し，示指の先端を非利き手指の示指の先端に合致させるようにする。2) 非利き手指示の場合も同様の方法で，非利き手側の示指の先端を水平線上に置かれている利き手側の示指の先端に合わせる。3) 両手指示の場合には，検者の口頭による合図で両上肢を同時にゆっくり挙上し，水平位と思われる位置で両手指の先端を合わせる。

指示運動の誤差は，矢状面にて基準位に対し，上下方向について測定した。示指の先端正中部の示す位置で，目測にて0.1°の精度で読み取り，その後，口頭による合図で被験者の両上肢を開始肢位まで戻させた。上記の指示運動において示指先を合わせるまでの1回の試行時間は，測定時間も含めて4~5秒間とし，各指示運動の間に5秒間の休止時間を設け，30回の試行を終えるのに4.5~5分を要した。なお実験中の室温は24~26°Cの範囲に保たれるようにした。

### 2.4.2 実験2

異なった条件下で指示運動を行わせ，指示運動の誤差に影響する因子を調べた。1) 指示運動の誤差の再現性を確かめるために，被験者の中から4名を無作為に選び，同一被験者について30回の試行を2日毎に4回行い，指示運動の誤差を測定した。2) 指示運動時の速度が指示誤差の精度に影響を及ぼすかどうかを調べるために，被験者10名（男7名，女3名）について無理のないゆっくりした指示運動（約2秒/回）と速い指示運動（約1秒/回）を行わせ，指示運動の誤差の大きさを比較した。3) 指示基準位の位置を変えることにより指示運動の誤差に違いがでるか否かを調べるために，被験者10名（男7名，女3名）について基準位を肩水平位より30°上方あるいは30°下方に置いて指示運動を行わせた。4) 対側の固定肢からの感覚入力の指示運動に及ぼす影響を調べるために，被験者10名（男7名，女3名）について，対側上肢を基準位に固定せず，指示側の示指の先端のみを直接，基準位（0°）に合わせる指示運動で生じる誤差と，予め基準位に置いた示指の先端に他方の示指の先端を合わせる指示運動で生じる誤差を比較した。

### 2.4.3 実験3

筋受容器である筋紡錘，特に位置感覚に重要と思われる<sup>7,23)</sup>1次終末からのIa群求心線維の入力の影響を調べるために，被験者10名（男7名，女3名）に対し，円筒形の刺激導子を有する振動刺激装置（平和電子，TMT-18）を用いて，指示運動中，筋紡錘1次終末に対する至適周波数である100 Hzの振動刺激（振幅約1 mm）を指示側の肩関節の屈筋として作用する三角筋前部の筋腹に加え，指示誤差へ及ぼす影響を調べた。

次に，被験者13名（男9名，女4名）に対し，緊張性振動反射（TVR）による影響が少なく，しかも関節や筋受容器への刺激効果が大きいと思われる指示側の肩甲棘外側部に100 Hzの振動刺激を加え，指示運動の誤差への影響を調べた。また，30あるいは60 Hzの振動刺激により速順応性受容器（マイスネル小体あるいはパチニー様小体）からの感覚入力の指示運動の誤差発現に果たす寄与の程度を調べた。

さらに，肩関節周囲の皮膚受容器からの感覚入力が指示運動の誤差に及ぼす影響を調べるために被験者5名に対し，指示側（利き手側）の三角筋部の皮下に局所麻酔薬（キシロカイン，濃度1%）20 mlを5~6か所に分けて注入した。注入にはカテラン針（0.65径×60 mm）を用い，予めマークした周辺部から注入し，中央部は縦と横方向の4箇所から注入し，三角筋部全領域

にわたり皮膚麻酔を行った。指示運動に先立ち、キシロカイン注入領域において刺激針による痛覚テストおよび von Frey 刺激毛による触圧覚テストを行い、皮膚麻酔の効果を確認した。触圧覚の閾値は von Frey 刺激毛を用いて三角筋部の皮膚の任意の3点に対し各10回ずつ刺激を加え、3点について各々知覚率-刺激強度曲線を求め、知覚率50%の点と曲線との交点により閾値を求めた。これらのテストには約20分を要した。

## 2.5 記録およびデータ処理

指示運動の誤差は、利き手あるいは非利き手指示の実験では、基準位(0°)からの示指の先端のずれの角度の大きさを測定し、上方の誤差を(+), 下方の誤差を(-)として区別し、記録した。両測同時指示の実験では、非利き手を基準位として誤差の角度と方向を読み取り、記録した。各項目における指示運動の誤差は試行30回の平均値および標準偏差値(Mean±SD)で表した。その平均値をもとに各実験における平均値および標準誤差(Mean±SE)を求めた。各平均値間の有意差の検定には Student の t-test を用い、危険率5%以下を有意な差があるものとした。

## 3 成績

### 3.1 指示運動時の上肢筋活動および関節運動

被験者(n=3)が両腕を体側に置いた閉眼、安静座位から腕をのばして挙上する指示運動では、三角筋前部の筋活動が著明であり、上腕二頭筋、上腕三頭筋および手関節伸筋・屈筋群の活動は少なかった。その代表例の筋電図、関節の角度変化を Fig. 1B に示す。

また、指示運動における上肢の関節の角度変化は肩関節が7°~83°、肘関節が7°~70°、手関節が22°~35°、示指の中手指節関節(MP 関節)が20°~42°の範囲で生じ、その中で、手関節および示指の運動は小さかった。指示運動の初期においては肘の伸展運動が大きく、これに肩関節の屈曲運動が伴い、それらの関節の動きは指示運動の終期まで一貫して増加し続けた。しかし、両手の示指を合わせようとする基準位近くでは、肘関節、手関節および示指のMP 関節における角度変化は殆ど認められなかった。従って、基準位近くにおける指示運動の指先の微調節は主として肩関節で行われていると推測された。

### 3.2 上肢指示運動の誤差発現

#### 3.2.1 上肢指示運動の誤差発現パターン

被験者全員(n=32)における指示運動30回試行の指示誤差は、利き手側は非利き手側比べて基準位より下方を示し、両側同時指示の場合には基準位(0°)近

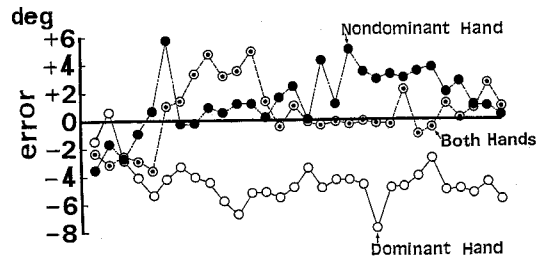


Fig. 2 The pattern of errors in 30 trials in one subject. Horizontal lines indicate the zero degree reference. Open circles, filled circles and open circles with dots denote the errors occurring in tasks with the dominant hand, the nondominant hand and simultaneously with both hands, respectively.

くを示す傾向が認められた。30回の指示運動の試行過程を示す代表的な1例(Fig. 2)において、利き手(左手)側の指示点は3回目の指示以降、基準位より大きく下方へ偏位し、その偏位した位置を新たな基準位とした指示運動パターンが認められた。非利き手(右手)側での指示点は4回目の指示以降、基準位の上方に偏位して変動する傾向を示した。

両側同時指示の場合には指示点の大半は基準位(0°)を境に上下し、利き手(左手)側および非利き手(右手)側比べて指示運動誤差は小さかった。他の被験者においても類似した誤差発現パターンを示した。

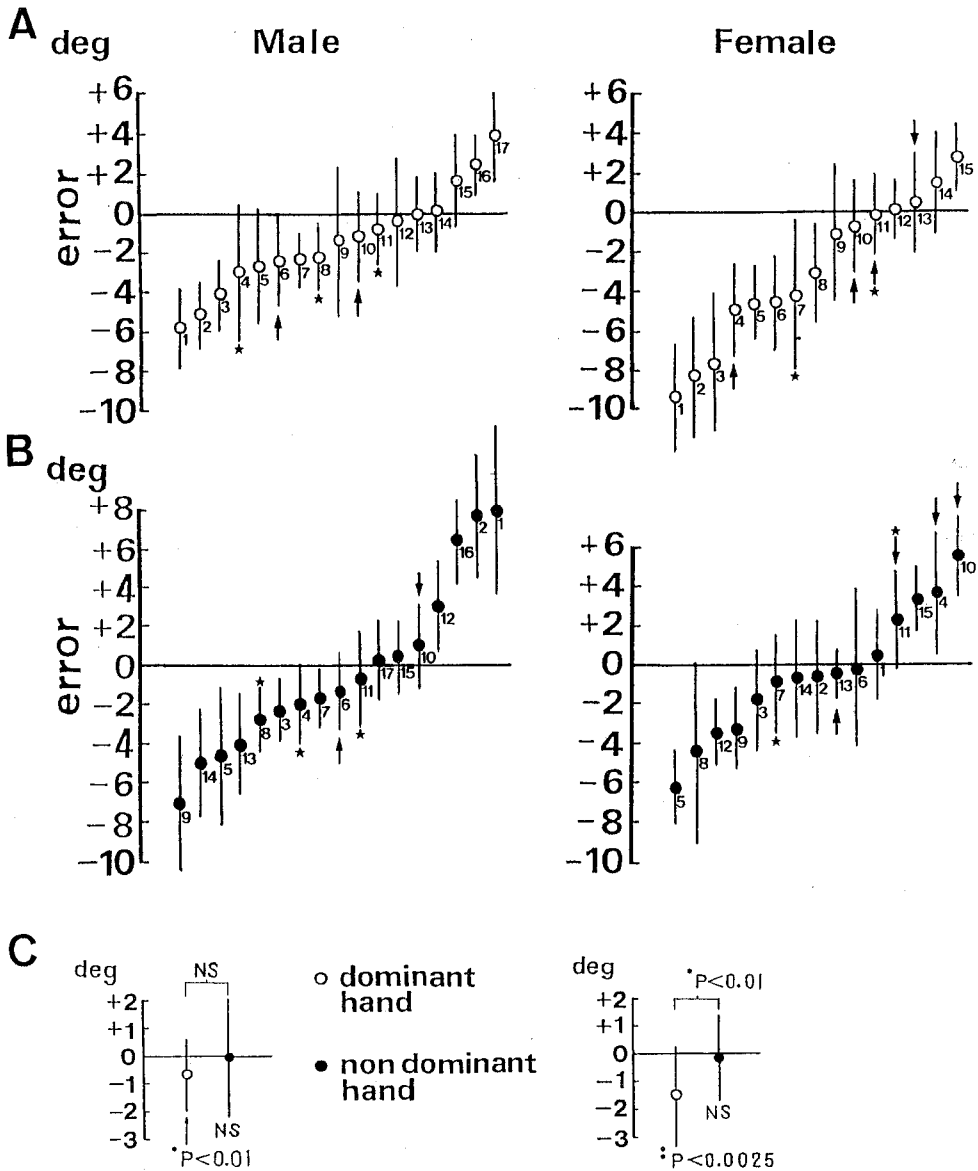
#### 3.2.2 指示運動誤差の大きさと方向性

男性の指示運動誤差の方向と大きさ(平均値と標準誤差, n=17)は、利き手側では-5.8°から+3.8°に分布し、平均値は-0.7°±1.3°であった。非利き手側では-6.9°から+7.9°に分布し、平均値は-0.1°±2.1°であり、利き手側の指示運動誤差は基準位より有意(P<0.01)に下方を示した。しかし、非利き手側については指示運動誤差の大きさに有意差は認められなかった。女性の指示誤差の方向と大きさ(平均値と標準誤差, n=15)は、利き手側では-9.4°から+2.6°に分布し、平均値は-1.5°±1.8°であった。一方、非利き手側では-6.2°から+5.6°に分布し、平均値は-0.1°±1.6°であり、男性と同様に利き手側では基準位より有意(P<0.0025)に下方を示したが、非利き手側では指示運動誤差の大きさに有意差は認められなかった。また、利き手と非利き手による指示運動誤差を比較すると、女性では利き手が非利き手より有意(P<0.01)に下方を示したが、男性では両者間に有意差は認められ

なかった (Fig. 3).

両側同時指示における指示運動誤差の方向と大きさは、男性 (n=17) では、 $-6.8^{\circ}$  から  $+6.8^{\circ}$  に分布し、

平均値は  $-0.05^{\circ} \pm 1.6^{\circ}$  であった。女性 (n=15) では  $-7.2^{\circ}$  から  $+9.1^{\circ}$  に分布し、平均値は  $-0.1^{\circ} \pm 1.8^{\circ}$  であり、指示運動誤差の大きさは利き手、非利き手指示に



**Fig. 3** The magnitude and direction of errors in the pointing tasks with the dominant hand (A) and non-dominant hand (B) in 17 male and 15 female subjects. Open circles and filled circles denote the mean errors and SD (standard deviation) on the dominant and nondominant hand tasks, respectively. The order of the mean errors on the dominant and nondominant hands are matched by the same subjects. Arrows indicate the mean errors in the left dominant or bilaterally handed subjects. 5 subjects aged 32 to 42 are represented by filled stars. Fig. C shows the statistical difference between the dominant hand or the nondominant hand in male and female subjects, and between the dominant and nondominant hands in male and female subjects. \*\*:  $P < 0.0025$ , \*:  $P < 0.01$

比べて小さかった (Fig. 4).

### 3・2・3 指示運動誤差の大きさの分布

被験者全員 (n=32) について利き手, 非利き手, 両側同時指示運動時の誤差の大きさを比較すると, 男性 (n=17) および女性 (n=15) における指示運動の誤差は, それぞれ $-7^{\circ}\sim+9^{\circ}$  および $-8^{\circ}\sim+8^{\circ}$  の範囲に分布していた. 男性における両側同時指示運動の誤差の高頻度分布域はほぼ基準位近くにあり, 利き手, 非利き手による指示運動誤差は基準位の約 $2^{\circ}$  下方を示した (Fig. 5). 他方, 女性では, 両側同時指示運動の誤差の高頻度分布域は男性と同じく, ほぼ基準位近くにあったが, 利き手指示では, 指示運動誤差の高頻度分布域は基準位に対して $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$  下方を示し, 非利き手指示においても約 $2^{\circ}$  下方寄りの傾向が認められた.

## 3・3 指示運動誤差に影響を及ぼす諸因子

### 3・3・1 日 差

無作為に選んだ4名 (男2名, 女2名) の被験者について2日間隔で測定日を変えて行なった4回の指示

運動の誤差の平均値を比較した. 全被験者の4回の試行における指示誤差の平均値の日差は最小値が $0.1^{\circ}$ , 最大値が $1.5^{\circ}$  であり, 各被験者において異なった測定日における指示誤差の平均値は近似した値を示した (Fig. 6).

### 3・3・2 指示運動速度の違い

基準位に対し, ゆっくりした指示運動 (約2秒/回) と早い指示運動 (約1秒/回) を行わせ, 指示運動の速度により誤差に違いが生じるかどうかを被験者10名について調べた. 全被験者の利き手側における指示運動の誤差の方向と大きさは, ゆっくりした指示運動速度では $-1.1^{\circ}\pm 1.8^{\circ}$ , 速い指示運動速度では $-1.1^{\circ}\pm 1.6^{\circ}$  であり, ほぼ同じ値を示した. 全被験者の非利き手側における指示運動の誤差の方向と大きさも, ゆっくりした指示運動速度では $-0.2^{\circ}\pm 2.0^{\circ}$ , 速い指示運動速度では $+0.2^{\circ}\pm 2.4^{\circ}$  と誤差の大きさは同じ値を示した. 同一被験者においては, 利き手側では2例を除き, 指示運動速度の違いによる指示運動の誤差に有意差は認

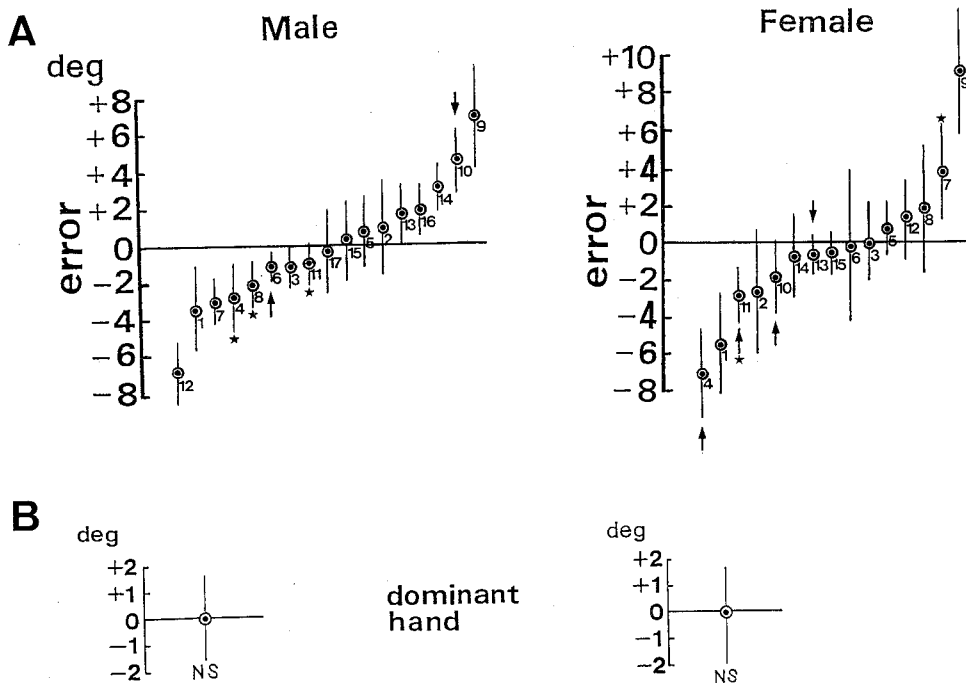


Fig. 4 A: The magnitude and direction of the pointing errors in tasks simultaneously by both hands. Open circles with dots denote the mean errors and SD of the tasks in 17 male and 15 female subjects. The order of the mean errors on the dominant and nondominant hands are matched by the same subjects. Arrows indicate the mean error of the left dominant or bilaterally handed subjects. 5 subjects aged 32 to 42 are represented by filled stars. B: There was no statistical differences between the mean errors in the tasks in male and female subjects.

められなかったが、非利き手側では、大部分の例（10例中9例）で指示速度の違いによる指示誤差に有意差 ( $P < 0.001$ ) が認められた (Fig. 7).

これら利き手側あるいは非利き手側上肢における指示速度による誤差発現の違いは、各上肢で深部感覚情報の働きによる位置感覚に差があることを示唆している。

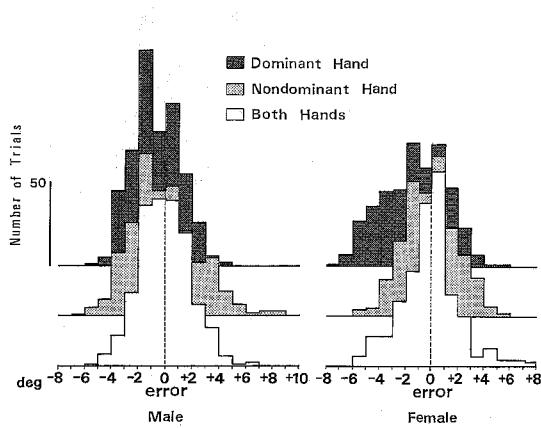


Fig. 5 Error distribution of the pointing tasks of 17 male and 15 female subjects. Dashed vertical lines indicate the zero degree reference lines. Densely striped, striped and open histograms denote the errors on the dominant and nondominant hand, and simultaneously by both hands, respectively.

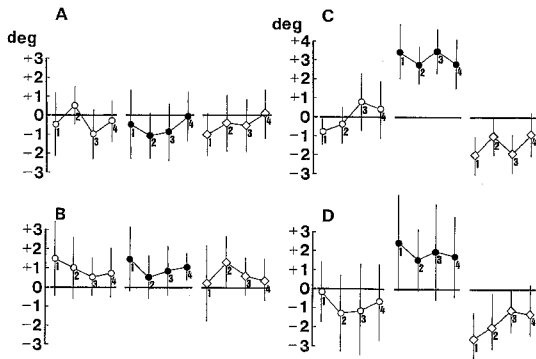


Fig. 6 The changes of the mean errors occurring in pointing tasks on 4 different days by randomly selected 4 subjects (A and B: male, C and D: female). Open circles, filled circles and open squares denote the mean errors and SD on the dominant hand, nondominant hand, and simultaneously by both hands, respectively. Numbers indicate 4 different days.

### 3.3.3 指示基準位の違い

指示運動の基準位を上方あるいは下方にかえた場合に指示運動の誤差に変動が生じるかどうかを調べるために、被験者10名について水平位 ( $0^\circ$ ) より  $30^\circ$  上方あるいは  $30^\circ$  下方に変えて指示運動を行わせた。指示基準位を肩水平位より  $30^\circ$  上方に置いた場合、指示運動の誤差の方向と大きさ (平均値と標準誤差,  $n=10$ ) は利き手側で  $-0.7^\circ \pm 2.8^\circ$ , 非利き手側では  $+0.1^\circ \pm 1.3^\circ$  であった (Fig. 8).

一方、基準点を  $30^\circ$  下方に置いた場合でも利き手側

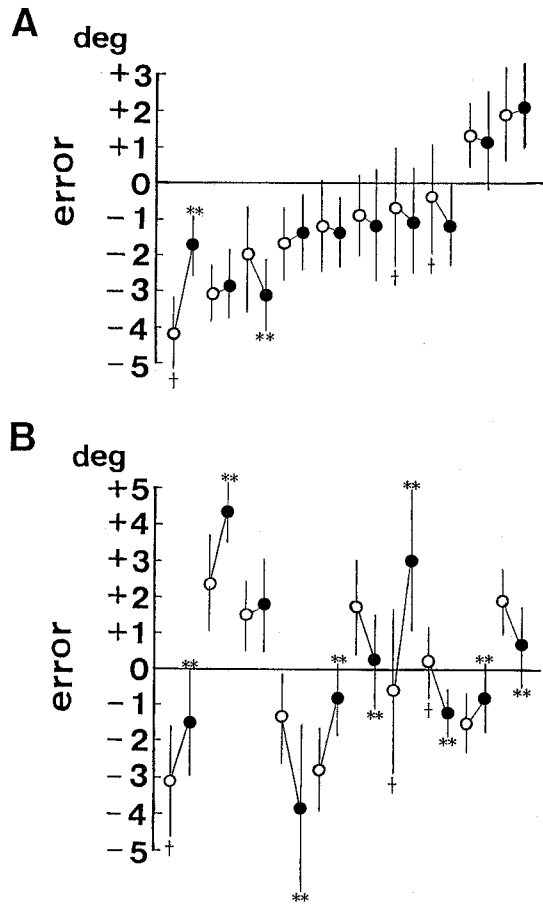


Fig. 7 Effects of the pointing movement speeds on the errors in the tasks with the dominant hand (A) and the nondominant hand (B) in 7 male and 3 female (cross marks) subjects. Open circles and filled circles denote the mean errors and SD in the tasks with slow speed (2 sec./trial) and with faster speed (1 sec./trial), respectively. The order of the mean errors on the dominant and nondominant hands are matched by the same subjects. \*\*:  $P < 0.001$ .



で $+0.3 \pm 1.3$ °, 非利き手側で $+0.7 \pm 1.3$ °を示し, 利き手, 非利き手のいずれ側においても, 指示基準位の位置を変えることによって指示運動誤差が基準位より有意に下方あるいは上方を示すことはなかった。

### 3.3.4 固定肢からの位置感覚入力の影響

基準位(0°)に置いた片側上肢の示指の先端に他方の示指の先端を合わせる指示運動により生じる誤差と, 片側の上肢のみを基準位(0°)に合わせる指示運動により生じる誤差の大きさについて比較した。利き手では10例中8例に, 非利き手側では10例中4例に, 両者間で指示運動誤差に有意差 (\*\* $P < 0.001$ , \* $P < 0.01$ ) が認

められた (Fig. 9)。

### 3.3.5 肩関節への振動刺激の影響

被験者10名について指示側の三角筋前部(肩関節の屈筋)の筋腹に100 Hzの振動刺激を加えると, 指示運動の誤差は無刺激時に比べ, 利き手側では上方に変動した1例を除き, 下方へ著明に変動した。非利き手側では指示運動の誤差の変動方向は上方あるいは下方を示し, 一定した傾向を示さなかった<sup>24)</sup>。

指示側の肩甲棘外側部に100 Hzの振動刺激を加え,

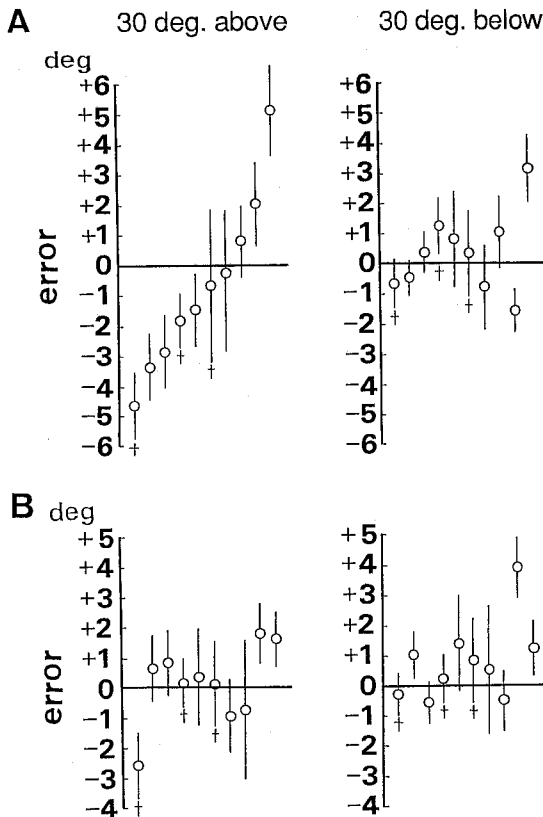


Fig. 8 The magnitude and direction of the pointing errors in the tasks to the 30 degrees reference lines above and below the horizontal reference line in 7 males and 3 female (cross marks) subjects. Horizontal lines in the figure indicate the 30 degrees reference lines above or below the horizontal reference line. Open circles denote the mean errors and SD on the dominant hand (A) and the nondominant hand (B). The order of the mean errors on the dominant and nondominant hands are matched by same subjects.

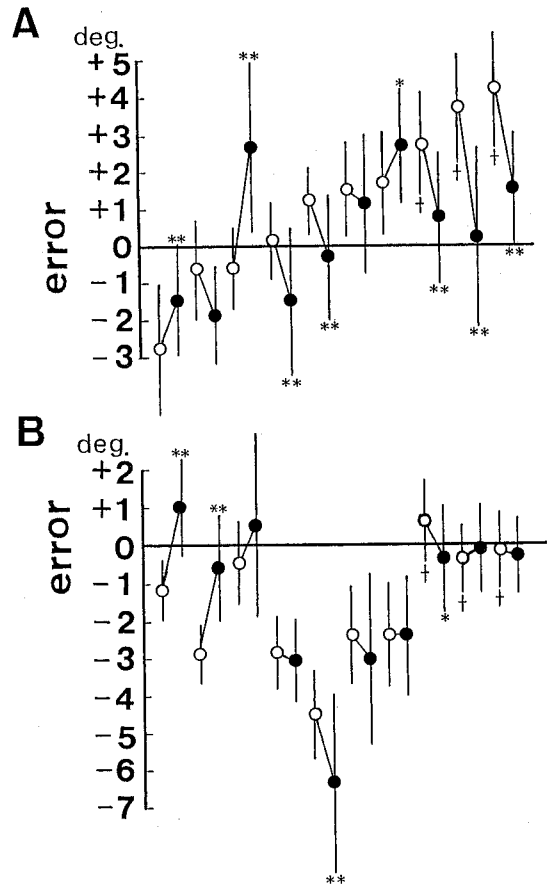


Fig. 9 Effects of the sensory input from the opposite arm on the error in the pointing tasks with the dominant hand (A) and the nondominant hand (B) in 7 male and 3 female (cross marks) subjects. Open circles and filled circles denote the mean errors and SD in the tasks with and without the sensory input from the opposite arm, respectively. The order of the mean errors on the dominant and nondominant hands are matched by the same subjects \*\* :  $P < 0.001$ , \* :  $P < 0.01$

肩関節周辺の皮膚および深部に分布する遅順応性受容器の指示誤差に及ぼす効果を調べた。利き手側では、刺激により有意差のない3例を除き、13例中10例が有意 (\*\* $P<0.001$ , \* $P<0.05$ ) に平均 $2.6^\circ$  下方への変動を示した。非利き手側では、逆に13例中7例が有意 (\*\* $P<0.001$ ) に上方へ、5例が下方への変動を示し、指示誤差の変動方向には一定の傾向は認められなかった (Fig. 10)。

次に、周波数の異なった振動刺激 30, 60 Hz を選択的に指示側の肩甲棘外側部に加え、周波数の違いから速順応性受容器の指示誤差に及ぼす効果を調べた<sup>25)</sup>。

30 Hz の刺激に対し、被験者の大半は刺激部位に局限した“ふるえ感覚 (flutter)”を覚え、報告した。利き手側では、振動刺激による指示誤差の変動の大きさは平均 $1.7^\circ$  で、刺激効果を示さなかった4例を除き、13例中6例は無刺激時の指示誤差に比べ、有意 ( $P<0.005$ ) に下方を示し、3例は上方を示した。非利き手側では、指示誤差の変動の大きさは平均 $1.9^\circ$  で、指示誤差の方向は、3例は有意 ( $P<0.005$ ) に下方、4例は上方を示した。

60 Hz の振動刺激による指示誤差の変動の大きさは、利き手側で平均 $1.7^\circ$ 、非利き手側で平均 $0.8^\circ$  であり、いずれの側においても一定した指示誤差の方向は示さなかった。

### 3・3・6 皮膚局所麻酔の影響

被験者5名に対して指示側 (利き手側) の三角筋部の皮下にキシロカインを注入し、皮膚受容器からの感覚入力を遮断し、指示運動誤差への影響を調べた。指示運動に先だつて行ったキシロカイン注入領域の痛覚テストにおいて、表在性の痛覚麻痺が認められた。von Frey 法による触圧覚閾値測定においても注入領域の触圧覚鈍麻が認められ、触圧覚の閾値は注入前の平均 $410\text{ mg}$  から注入直後には平均 $2,270\text{ mg}$  まで増大した。注入1時間後には被験者全員の触圧覚閾値は注入部位を除いて注入前に回復し、注入後6時間までには、被験者全員が注入部を含む全領域の痛覚、触圧覚とも注入前の状態に回復した。皮膚麻酔により全被験者 ( $n=5$ ) の指示運動の誤差は、麻酔施行前に比べて平均 $1.9^\circ$  有意 ( $P<0.001$ ) に下方への変動を示した (Fig. 11)。1時間後および6時間後に測定した指示運動誤差は全員、麻酔施行の値近くまで回復した。これらの成績により、皮膚受容器も指示誤差の発現に影響を与えていることが示唆された。

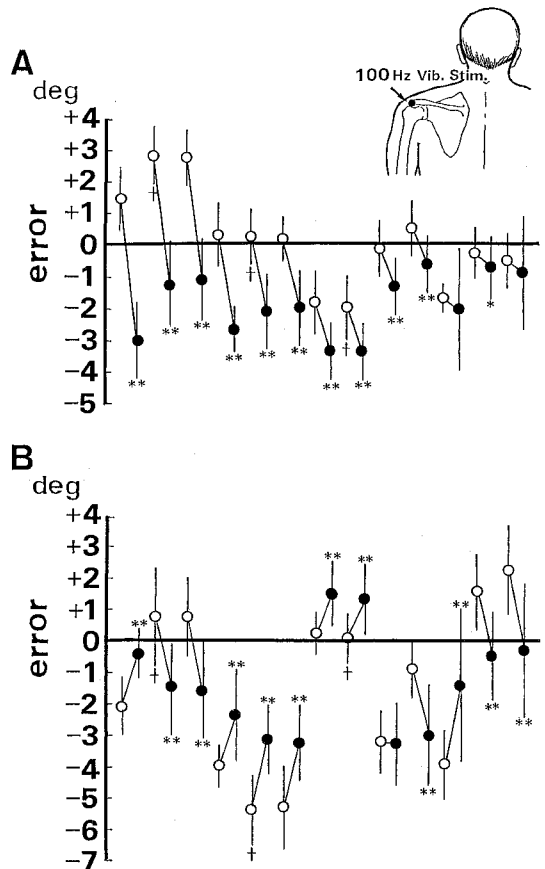


Fig. 10 Effects of vibratory stimulation on the errors in the pointing tasks with the dominant hand (A) and nondominant hand (B) in 10 male and 3 female (cross marks) subjects. Open circles and filled circles denote the mean errors and SD in the tasks without and with the vibratory stimuli at 100 Hz to the lateral portion to the spine of scapula of the pointing arm, respectively. The order of the mean errors on the dominant and nondominant hands are matched by the same subjects. \*\*:  $P<0.001$ , \*:  $P<0.05$ .

## 4 考 察

### 4・1 指示運動誤差の大きさと方向

肩、肘および手指の関節の運動感覚の閾値を比較すると、手指の関節は肩や肘関節に比べて大きな角度変化を必要とし、手指関節よりも体幹に近い肩、肘関節の方が深部感覚に基づく運動遂行に優れていると報告されている<sup>26)</sup>。本実験でも、大脳皮質感覚中枢の位置感覚に基づく指示運動には肩関節の受容器の果たす役割

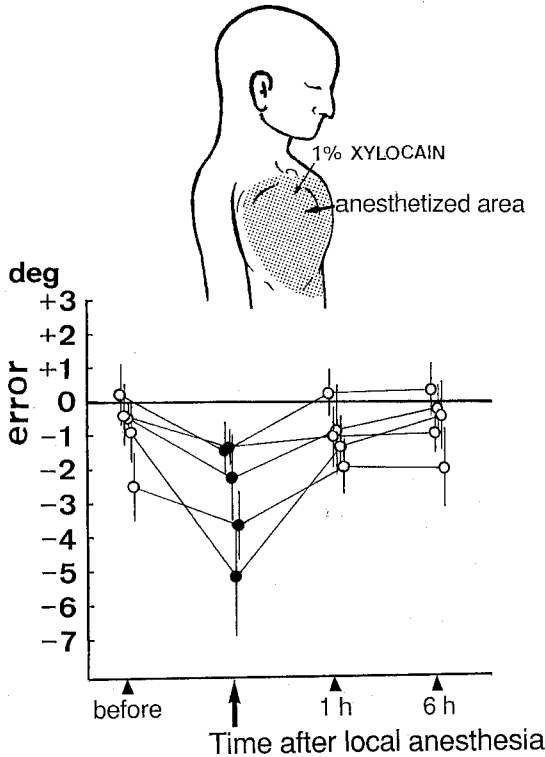


Fig. 11 Effects of application of the local anesthesia with 1% xylocain (20 ml) to the skin over the deltoid muscle of the pointing arm in 5 subjects. Open circles denote the mean errors and SD in the pointing tasks before the anesthesia, at one hour and six hours after anesthesia, and filled circles denote the ones immediately after the anesthesia. There were significant differences ( $P < 0.01$ ) in pointing errors between local anesthesia and anesthesia free in all subjects.

が大きいことが示された。Smithら<sup>22)</sup>による仰臥位で肩関節回旋運動器を応用した肩関節回旋角度の再現能力テストにおける誤差は、利き手側で $1.5^\circ \pm 0.63^\circ$ 、非利き手側で $1.4^\circ \pm 0.60^\circ$ であり、著者の成績と近似した値を示している。

#### 4.2 指示運動速度の影響

今回の実験で行うような速さの指示運動において指示点(基準位)近くでの関節角度の決定は、筋・関節受容器からの感覚情報のフィードバックによって微調節されるものと考えられる。

本実験では、ゆっくりとした指示運動(2秒/回)と速い指示運動(1秒/回)による誤差への影響は、利き手側と非利き手側では異なり、これは利き手側と非利

き手では感覚情報のフィードバックに基づく位置感覚に差があることを示唆している。

#### 4.3 上肢の基準位の違いによる影響

空間における上肢の位置の違いによって位置感覚の精度が変化することが推測されるが、本実験の成績から、水平位より $30^\circ$ 上方および $30^\circ$ 下方の基準位においても指示運動の誤差は比較的小さく、各々の基準点に対する誤差の方向、大きさに有意差は認められなかった。

#### 4.4 対側固定肢からの感覚入力の影響

指示運動を行う上肢の対側の示指の先端をスケールの基準位( $0^\circ$ )に置き、これを固定肢として、この示指に合致させるように指示運動を行う場合、固定肢からの感覚情報は対側の大脳皮質の体性感覚野およびその頭頂連合野において処理、統合され、その位置感覚に基づき、最終的に運動野からの運動司令により運動肢による指示運動が遂行される。従って、運動肢による上肢位置感覚の精度には固定肢からの感覚情報も影響を及ぼすものと推測される。

基準位においた対側上肢に合わせる指示運動による誤差と、対側上肢からの感覚情報のない片側上肢のみを基準位に合わせる指示運動による誤差とを比較してみると、両者間に有意差が認められた。特に、利き手側において著明(10例中8例)であり、指示運動の誤差発現には固定肢からの感覚入力の寄与も示唆している。両上肢を位置感覚テストに用いる場合は、対側からの感覚情報の有無が重要であることが臨床例でも示されている<sup>27)</sup>。しかし、利き手側、非利き手側による違いについてはまだ明らかではない。

#### 4.5 深部および皮膚受容器の役割

今回の実験において、健康成人の指示側上肢の肩甲棘外側部に対し100 Hzの振動刺激を加えることにより指示誤差の著明な変動を認めた。これは刺激部位下にある関節包あるいは関節の靭帯に分布する遅順応性関節受容器が位置感覚に寄与することを示している。また、特に300 Hzの振動刺激によっても指示誤差の発現に有意な効果を示すことから、パチニー様小体のような速順応性関節受容器からの入力の影響も加わると考えられる。これは指示運動が随意運動であるために動き感覚(sense of movement)の影響も受けているといえる。従って、指示運動の遂行に関与する受容器であるルフィニ終末、ゴルジ型終末、パチニー様小体あるいはマイスネル小体も位置感覚の末梢情報源として関わっていることが推測される。

ヒトの肘関節の屈筋腱部に100 Hzの振動刺激を加え

ると、肘が静止しているにもかかわらず刺激された筋が伸ばされるような肘の角度変化の錯覚 (illusion) を生じる<sup>7)</sup>。今回行った三角筋前部に対する 100 Hz の振動刺激実験でも指示運動誤差における刺激効果が認められ、振動刺激に基づく多量の GIa インパルス発射が中枢処理に影響を与えており、筋紡錘の位置感覚への寄与を示唆している。

ヒトの膝関節周囲の皮膚の局所麻酔実験では位置感覚への影響は認められなかったが<sup>38)</sup> 中指の遠位指節関節<sup>11)</sup>、示指の近位指節関節<sup>10)</sup>、手指の再構築術後の実験<sup>12)</sup> では皮膚受容器の位置感覚への寄与が示された。今回の実験では、指示側肩関節周囲の皮膚の局所麻酔によって指示運動誤差が無麻酔時に比べ有意に下方へ変動し、位置感覚に及ぼす皮膚受容器の影響があると考えられる。

振動刺激実験から、位置感覚の末梢性機序として筋紡錘の果たす役割の重要性<sup>7,28,29)</sup> も考えられるが、位置感覚における関節あるいは皮膚受容器の寄与の程度は正常状態と障害例では相違が認められ<sup>8,14,20,30-32)</sup>、四肢の運動様式や各関節に分布する受容器によっても寄与の程度が異なるものと推測される。

#### 4・6 位置感覚と指示運動の中枢機序

ある目的に向って上肢を伸ばす reaching 運動において、動物実験<sup>33)</sup> では、サルの頭頂連合野の上頭頂小葉に 2 つ以上の関節の特定方向の組合せが最適刺激となる関節組合せニューロン (joint combination neurons) および関節と皮膚刺激の組み合わせで最適な反応が得られる関節・皮膚組合せニューロン (joint and skin units) などの存在が確認されており、後者の中には、手と手あるいは手と足を擦り合わせた時に強く反応するマッチング細胞 (matching cells) があることが報告されている。

本研究におけるヒトの指示運動では、前記の報告も考慮すると、対側固定肢および運動肢の筋・関節受容器からの感覚情報は後索一内側毛帯系および脊髄視床路を介して上位中枢へ伝達され、大脳皮質頭頂葉の 1 次体性感覚野およびその連合野のニューロンで処理、統合され、固定肢は位置感覚、運動肢においては運動および位置感覚が認識されると考えられる。

また、両手の示指の先端を同時に合わせる matching 運動では、指示運動を通して空間における右および左上肢の位置が、各々の上肢の感覚系を介して継時的に上位中枢へ伝達され、皮質の体性感覚野およびその頭頂連合野にて左右の上肢の位置を比較・判断しながら前運動野、補足運動野の運動プログラムおよび運動野

からの運動指令の形成がなされると考えられる。また、最終的な示指の先端の matching 運動を円滑に遂行するために、小脳が関与していると推測される。

## 5 要 約

ヒトの上肢位置感覚の精度について正常値を求めるために、健康成人を対象に指示運動における誤差を、自作した測定装置を用いて調べた。更に、位置感覚に影響を及ぼす諸因子ならびに末梢受容器からの感覚入力の影響に及ぼす寄与の程度についても検討し、以下の成績を得た。

1. 指示誤差の平均値と標準誤差は、利き手側では男性が  $-0.7 \pm 1.3^\circ$ 、女性が  $-1.5 \pm 1.8^\circ$  で、基準位より有意に下方を示した。非利き手側では男性が  $-0.1 \pm 2.1^\circ$ 、女性が  $-0.1 \pm 1.6^\circ$  で、基準位近くを示した。両側同時に合わせる指示運動では、男性が  $-0.05 \pm 1.6^\circ$ 、女性が  $-0.1 \pm 1.8^\circ$  で、指示誤差の高頻度分布域はほぼ基準位近くにあった。

2. ゆっくりした速度の指示運動と速い速度の指示運動において、運動速度の違いによる指示誤差の影響は、利き手側では認められなかったが、非利き手側では有意差が認められた。

3. 指示運動の基準点を  $30^\circ$  上方あるいは下方に変えても、利き手、非利き手による指示点は基準位より有意に上方あるいは下方を示すことはなかった。

4. 基準位に置いた対側上肢からの感覚入力の影響に及ぼす影響は、利き手側で著明に認められた。

5. 指示側の三角筋に 100 Hz および肩甲棘外側部に 30, 60, 100 Hz の振動刺激を加えた結果、いずれも指示誤差は無刺激時に比べ、利き手側あるいは非利き手側において、有意に上方あるいは下方への変動を示した。

6. 指示側上肢の三角筋部の皮膚における局所麻酔により、指示誤差は有意に下方への変動を示した。

以上の成績から、筋、関節および皮膚受容器からの感覚情報は上肢の位置感覚に重要な役割を果たすことが示唆される。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究の御指導ならびに本論文の御校閲を賜りました青木 藩教授に深謝いたします。また研究遂行に際し、貴重な御助言をいただいた生理学第 2 講座の諸先生ならびに御協力いただいた作業療法学科の澤田雄二助教授および理学療法学科教員各位に感謝致します。

## 参考文献

1. 河原剛一, 青木 藩. 運動感覚. 田崎京二, 小川哲朗編. 新生理学体系第9巻: 感覚の生理学. 東京, 医学書院, 1989, 308-319.
2. Skoglund S. Anatomical and physiological studies of knee-joint innervation in the cat. *Acta Physiol Scand* 1956, 36, Suppl 124: 1-101.
3. Boyd IA, Roberts TDM. Proprioceptive discharges from stretch receptors in the knee-joint of the cat. *J Physiol (Lond)* 1953, 122: 38-58.
4. Skoglund S. Joint receptors and kinaesthesia. In: Iggo A, editor. *Handbook of sensory physiology Vol 2*. Berlin, Springer 1973, 111-136.
5. Ferrell WR. The adequacy of stretch receptors in the cat knee joint for signalling joint angle throughout a full range of movement. *J Physiol (Lond)* 1980, 229: 85-99.
6. Grigg P. Mechanical factors influencing response of joint afferent neurons from cat knee. *J Neurophysiol* 1975, 38: 1473-1484.
7. Goodwin GM, McCloskey DI, Mathews PBC. The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain* 1972, 95: 705-748.
8. Clark FJ, Horch KW, Bach SM, Larson GF. Contribution of cutaneous and joint receptors to static knee-position sense in man. *J Neurophysiol* 1979, 42: 877-888.
9. Barrack RI, Skinner HB, Cook SD, Haddad RJ Jr. Effect of articular disease and total knee arthroplasty on knee joint-position sense. *J Neurophysiol* 1983, 50: 684-687.
10. Clark FJ, Burgess RC, Chapin W. Proprioception with the proximal interphalangeal joint of the index finger. *Brain* 1986, 109: 1195-1208.
11. Gandevia SC, McCloskey DI. Joint sense, muscle, and their combination as position sense, measured at the distal interphalangeal joint of the middle finger. *J Physiol (Lond)* 1976, 260: 387-407.
12. Moberg E. The role of cutaneous afferents in position sense, kinaesthesia and motor function of the hand. *Brain* 1983, 106: 1-19.
13. Ferrell WR, Smith A. The effect of digital nerve block on position sense at the proximal interphalangeal joint of the human index finger. *Brain Res* 1987, 425: 369-371.
14. Macefield G, Gandevia SC, Burke D. Perceptual responses to microstimulation of single afferents innervating joints, muscles and skin of the human hand. *J Physiol (Lond)* 1990, 429: 113-129.
15. Taylor JI, McCloskey DI. Ability to detect angular displacements of the fingers made at an imperceptibly slow speed. *Brain* 1990, 113: 157-166.
16. Horch KW, Clark FJ, Burgess PR. Awareness of knee joint angle under static conditions. *J Neurophysiol* 1975, 38: 1436-1447.
17. Dvir Z, Koren E, Halperin N. Knee joint position sense following reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Orthop Sports Phys Ther* 1988, 10: 117-120.
18. Marks R. The reliability of knee position sense measurements in healthy women. *Physiother Can* 1994, 46: 37-41.
19. McCloskey DI. Kinaesthesia sensitivity. *Physiol Rev* 1978, 58: 763-820.
20. Hulliger M, Thelin NAE, Valbo AB. Afferent fibres from the glabrous skin of the hand during voluntary finger movements in man. *J Physiol (Lond)* 1979, 291: 233-249.
21. Cohen IA. Analysis of position sense in human shoulder. *J Neurophysiol* 1958, 21: 550-562.
22. Smith RI, Brunolli J. Shoulder kinaesthesia after anterior glenohumeral joint dislocation. *Phys Ther* 1989, 69: 106-112.
23. Craske B. Perception of impossible limb position induced by tendon vibration. *Science* 1977, 196: 71-73.
24. Miyamoto S, Sawada Y, Aoki M. The effects of vibratory stimulation and weight loading on the error magnitude in forearm position sense. *Jpn J Physiol* 1986, 48: 419.
25. Miyamoto S, Sawada Y, Aoki M. The influences of vibratory stimulation on the error magnitude in position sense of the upper extremity. *Jpn J Physiol* 1988, 50: 630.
26. Hall LA, McCloskey DI. Detections of movements imposed on finger, elbow and shoulder joints. *J Physiol (Lond)* 1983, 335: 519-533.
27. 平山恵造, 福武敏夫, 河村 満. 母指さかし試験: 関節定位感覚障害の検査. *臨床神経学*, 1986, 26: 448-454.
28. Matthews PBC. Where does Sherrington's "muscular sense" originate? muscle, joints, corollary discharges? *Annu Rev Neurosci* 1982, 5: 189-218.
29. Inglis JT, Frank JS, Inglis B. The effect of muscle vibration on human position sense during

- movements controlled by lengthening muscle contraction. *Exp Brain Res* 1991, 84: 631-634.
30. Gandevia SC, Hall IA, McCloskey DI. Proprioceptive sensation at the terminal joint of the middle finger. *J Physiol (Lond)* 1983, 335: 507-517.
31. Ferrell WR, Gandevia SC, McCloskey DI. The role of joint receptors in human kinaesthesia when intramuscular receptors cannot contribute. *J Physiol (Lond)* 1987, 386: 63-71.
32. Clark FJ, Grigg P, Chapin W. The contribution articular receptors to proprioception with the fingers in humans. *J Neurophysiol* 1989, 61: 186-193.
33. Sakata H, Takaoka Y, Kawarasaki A, Shibutani H. Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (aria 5) of the rhesus monkey. *Brain Res* 1973, 64: 85-102.

---

別刷請求先:

(〒060) 札幌市中央区南3条西17丁目

札幌医科大学保健医療学部理学療法学科 宮本重範