HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	把持課題条件の違いによる到達運動と把持運動の時空的協調関係
Author(s)	後藤, 美奈子; 阿部, 匡樹; 山田, 憲政
Citation	認知科学, 9(4), 516-531
Issue Date	2002-12-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44180
Type	journal article
File Information	NK9-4_516-531.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Cognitive Studies, **9**(4), 516-531. (Dec. 2002)

●研究論文●

把持課題条件の違いによる到達運動と把持運動の時空的協調関係

後藤 美奈子・阿部 匡樹・山田 憲政

Human prehensile movements consist of two motor components: a transport component and a grasp component. The purpose of this study was to determine how the transport component is related to the grasp component in terms of spatiotemporal aspects such as the time series of a hand transport trajectory.

Seven subjects were asked to point to a target (a circle of 2 cm in diameter) by using the right index finger or to grasp a disc (2, 4, 6, or 8 cm in diameter and 2 cm in length) between the thumb and index finger of the right hand. Both the target and disk were placed 30 cm directly in front of the starting position of the right hand.

The results showed that: (1) As the size of the disk increased, the inclination of the hand in its final shape became larger; (2) As the inclination of the hand when grasping the disk became larger, both the peak and final heights of the wrist position during the hand transport movement increased; and (3) the hand aperture was related spatiotemporally to the change in the hand transport trajectory. These results suggest that transport and grasp components are coordinated spatiotemporally during human prehension movements.

Keywords: transport component (到達運動), grasp component (把持運動), coordination (協調), spatiotemporal characteristic (時空的特性)

1. はじめに

“ものをつかむ動作”はヒトの基本的な運動であり，その運動制御メカニズム解明のために古くから多くの研究が行われてきた．その中でも，今日まで重要な影響を及ぼしている研究に Jeannerod (1981, 1984) の研究がある．“ものをつかむ動作”に対する Jeannerod の重要なアプローチの仕方は，その動作を，transport（以下，到達運動）と，grasp(grip)（以下，把持運動）の２つのコンポーネントに分類して解析・検討した点にある．彼はこの２つのコンポーネントには２つの独立した視覚運動チャンネルが存在し，情報がここで処理されるという説を提唱した（視覚・運動チャンネル説：the Visuomotor Channel Theory）．この説によると，１つのチャンネルで対象物の位置，方向，距離など（対象物の定位に関する特徴）についての情報が処理され，到達運動はこの情報に基づいている．さらに，もう１つのチャンネルでは対象物の大きさ，形，手触りなど (対象物の属性に関する特徴) についての情報が処理され，これにより把持運動が規定される．このように情報伝達の視点からは２つのコンポーネントは独立していると考えられた．しかし，同時に彼は，２つのチャンネルに共通する時間的枠組みが存在し，この枠組みの中で運動全体がプログラミングされると考え，その結果，２つのコンポーネント間に時間的協調関係が認められる，と報告した．

この Jeannerod が提起した説に対する研究として今日では，到達運動はもっぱら対象物の定位に関す

Spatiotemporal Coordination Between Transport and Grasp Components during Prehension Movements, by Minako Goto (Department of Occupational Therapy, School of Health Sciences, Sapporo Medical University), Masaki Abe (Motor Dysfunction Division, Research institute, National Rehabilitation Center for Disabled) and Norimasa Yamada (Laboratory of Human Movement Sciences, Graduate School of Education, Hokkaido University).

る特徴についての視覚情報にだけ頼っているわけではなく，属性に関する特徴についての視覚情報も到達運動に関与しているという結果 (Bootsma et al., 1994; Fikes et al., 1994; Gentilucci et al., 1991; Kudoh et al., 1997; Marteniuk et al., 1987, 1990a; Pryde et al., 1998; Savelsbergh et al., 1996; Weir et al., 1991; Zaal et al., 1993) や，さらには，定位に関する特徴も把持運動に関与しているという結果 (Haggard & Wing, 1998; Kudoh et al., 1997; Marteniuk et al., 1987; Saling et al., 1998; Wallace, 1988; Wing et al., 1986) など，Jeannerod の説に対立した結果も多数報告され，この2つのコンポーネントが処理する情報についてはいまだ明らかにされていない．

このように，2つのコンポーネントが扱う情報処理についての見解が対立していることもあり，“ものをつかむ動作”についてのモデルがいまだ確立されていない．現在のところ，“ものをつかむ動作”を到達運動と把持運動の2つのコンポーネントに分けてモデル化した代表的なものに，Arbib (1981) の「協応制御プログラム」(the Coordinated Control Program) と，Hoff & Arbib (1993) の「運動スキーマモデル」(the Model of Motor Schemas) がある．協応制御プログラムは，到達運動も把持運動も，ともに2つの制御段階（フィードフォワード，フィードバック）から成るというモデルであり，運動スキーマモデルは，到達運動は単一のフィードバック制御から成るが，把持運動はフィードフォワード制御（プレシェープの段階）とフィードバック制御（握り込みの段階）から成るというモデルである．

一方，Kudoh (1997) は，運動中の経時的な手関節座標に関する被験者内標準偏差 (SD) と，手指口径に関する被験者内標準偏差 (SD) についての時空的な解析から，各コンポーネントの運動制御機構について検討した．その結果，到達運動の軌跡は比較的粗大であることから，到達運動は対象物の大きさや距離についての視覚情報によってあらかじめ計画されていると考え，単一のフィードフォワード制御からなると解釈した．一方，到達運動の最終的な誤差は，手指口径の増大によって補われているのではないかという考えから，把持運動は他の研究者らの報告と同様2つの制御機構からなると解釈し，Hoff & Arbib らのモデルと異なる仮説を展開した．

このように，2つのコンポーネントの制御機構に関して統一した見解が出ていない原因として，2つのコンポーネント間の関係について検討した研究が，統一した見解に達していないことが考えられる．たとえば，Jeannerod (1981, 1984) が「手関節速度の減速が最大に達するまでの時間（＝到達運動）」と「手指口径が最大に達するまでの時間（＝把持運動）」の間に有意な相関関係を報告して以来，Kudoh (1997) や Chieffi & Gentilucci (1993), Jacobson & Goodale (1991) の研究においても，2つのコンポーネント間に同様の結果が認められ時間的な依存関係が報告されているが，Marteniuk (1990b) の実験では，2つのコンポーネント間の時間的協調について，被験者内相関係数にばらつきが大きかったことから，コンポーネントに時間的協調はないと結論づけている．

このような中，Smeet & Brenner (1999) は，そもそも情報伝達面においても解剖学的構造面においても，“ものをつかむ動作”はコンポーネントに分類し得ないとし，これまでのコンポーネントに分類して運動をとらえる方法を否定し，独自の新しいモデルを提起した．彼は，把持における手指の最適ポジションの決定と，これに引き続いて生じるこれらのポジションへ向かう個々の手指の運動とからなる新しい解釈で，躍度最小モデルに基づき“物をつかむ動作”をモデル化した．さらに彼は，このモデルから，先行の実験結果を量的に予測することが可能であることも示した．

これに対し，Wang & Stelmach (1999) は，このモデルでは様々な先行研究で報告された把持運動と到達運動の間にみられる依存関係については十分に説明しきれないという点を指摘し，改善の余地があると報告している．

しかし，把持運動と到達運動の間に認められる関係について明らかにされていない以上，Wang & Stelmach の報告も Smeet & Brenner (1999) のモデルを否定する確固たる指摘にはなりえない．したがって，“ものをつかむ動作”をモデル化し解明するためには，この到達運動と把持運動の関係について明らかにすることが必要不可欠であると考える．

以上のことより，これまで到達運動と把持運動の関係が十分明らかにされてこなかったのは，これまでの研究がこれらの関係について，時間的側面を中心に検討してきた (Chieffi & Gentilucci, 1993; Gentilucci et al., 1992; Hoff & Arbib, 1993; Jakobson

& Goodale, 1991; Jeannerod, 1981, 1984; Kudoh et al., 1997; Marteniuk et al., 1987; Pryde et al., 1998) ことと，さらにその時間的協調関係にも対立した見解があることに原因があると判断する．Marteniuk (1990b) はその研究の中で，2つのコンポーネント間の関係を評価するためには運動の時間的側面だけでなく，軌跡などの空間的側面についても検討を加えなければ不十分であることを指摘している．筆者も，運動は時空間において遂行されるものであり，運動の特性を時空的に把握するためには運動の時間的側面のみならず空間的側面にも着目すべきであると考える．つまり従来の時間的側面からの研究では運動時間やタイミングの一致などの運動の時間的特徴しかとらえられておらず，運動軌跡や関節角度などその運動の空間的特徴についての検討が欠けているのである．運動の軌跡そのものを考慮して解析を行った研究に Haggard & Wing(1998) の研究がある．彼らは，直線軌跡を描いて手を伸ばしものをつかむ動作と曲線軌跡を描いて手を伸ばしものをつかむ動作において到達運動と把持運動の関係を解析し比較したのであるが，仮に，時間的側面からだけで解析を行っていれば，この2つの運動の違いは単に運動時間や速度の相違でしかとらえられなかったはずである．手の位置や経路を解析することによって始めて直線運動と曲線運動の違いを比較できたのである．つまり筆者は，運動の特性を把握するためには運動軌跡などの空間的側面の検討によって身体運動を三次元空間座標や関節まわりの相対座標で記述する必要があり，こういった空間的側面からの解析を加えることによって，より詳細に2つのコンポーネント間の関係を時空的に検討することができると考える．

近年では筆者と同様の問題意識から運動の空間的側面を考慮して2つのコンポーネントの関係について検討する研究 (Haggard & Wing, 1995, 1998; Wang & Stelmach, 1998) も始められてきている．しかしそれらはいずれも，運動軌跡などの到達運動の条件を操作しており，その結果，把持運動の出現するタイミングや特徴がどう変化するかを解析することによって2つのコンポーネントに空間的な協調関係を見出したものであった．仮に到達運動と把持運動が空間的に協調しているのであれば，逆に把持運動の条件を操作した場合にも到達運動に軌跡の変化などの空間的変化が生じることが予測される．また，軌跡について扱った研究では，近年，ポインティング運動などの到達運動課題における軌道生成について，躍度最小モデル (minimum-jerk model) やトルク変化最小モデル (minimum-torque-change model) といった様々な理論が展開されているが，把持運動を目的とした到達運動（複合運動課題における到達運動）がどのように軌道を生成しているのかについては明らかにしていない (Kawato, 1994; Uno et al., 1989)．しかし本来，対象物を把持することを目的として“腕を伸ばす”というのがヒトの運動として自然であり，把持運動と到達運動を切り離して考えることはできない．したがって把持運動と到達運動の協調関係を明らかにするためには，到達運動は把持運動の条件によらず常に一定に遂行されるのか，条件に応じて変化するのか空間的側面からも明らかにする必要があると考える．

把持課題条件を変えた場合の到達運動や把持運動の変化について時間的な側面から検討したこれまでの研究では，対象物の大きさ・重さ・形・手触りなどを変化させている (Bootsma et al., 1994; Fikes et al., 1994; Gentilucci et al., 1991; Jeannerod, 1981; Kudoh et al., 1997; Marteniuk et al., 1990a; Paulignan et al., 1997; Pryde et al., 1998; Savelsbergh et al., 1996; Weir et al., 1991; Zaal et al., 1993)．なかでも“対象物の大きさ”を変化させた実験は一般的であり，対象物の大きさの変化にともなう時間的パラメータの変化に統一した結果が多く報告されており (Jeannerod, 1981; Kudoh et al., 1997; Paulignan et al., 1997; Pryde et al., 1998)，今回，空間的側面から運動を検討する際に採用する条件パラメータとしても“大きさ”は妥当であると判断された．

そこで本研究では，把持運動を変化させる条件パラメータとして，“対象物の大きさ”を取り上げ，対象物の大きさを変化させた場合の把持運動および到達運動の変化について，経時的な軌跡をはじめとする時空的観点から解析し，到達運動と把持運動の協調関係について検討した．

2. 方　法

2.1 対象者

手に運動機能障害をもたない健常な女子大学生7名（平均年齢 21.1±1.3 歳）を対象者とした．被験者は全員，右利きだった．手掌面の大きさ（手関節

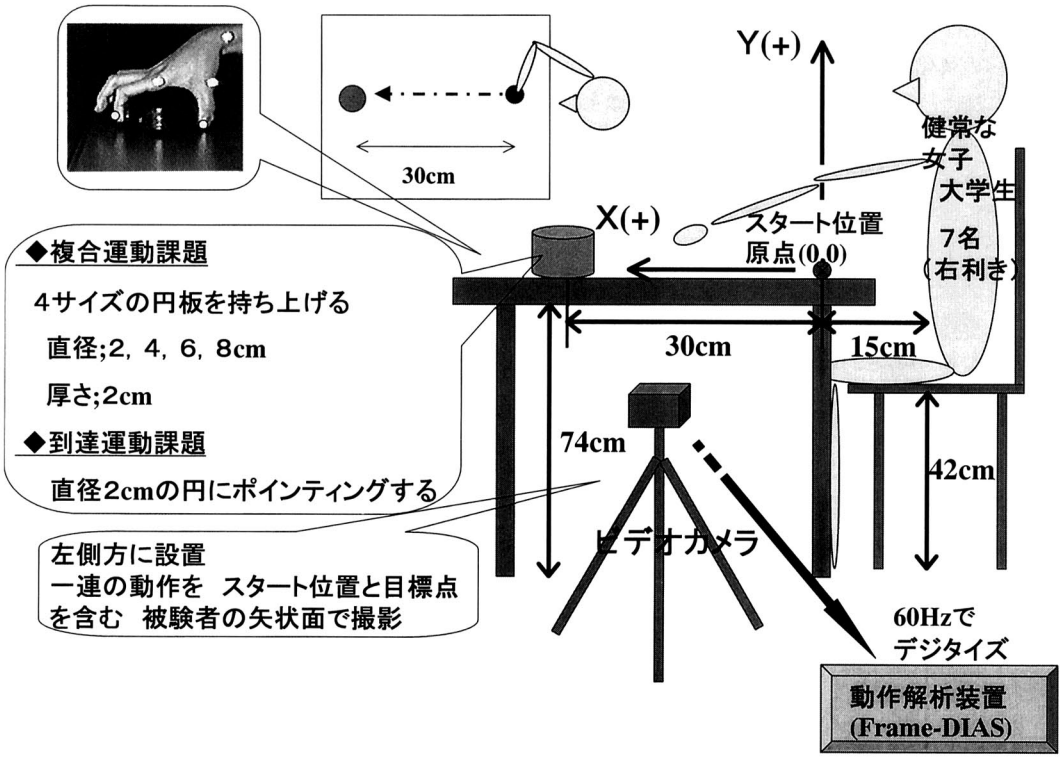

図 1　実験設定

から中指の中手指節間関節（metacarpophalangeal j.；以下，MP 関節）までの長さ），母指の長さ（母指 MP 関節から母指指尖までの長さ），示指の長さ（示指 MP 関節から示指指尖までの長さ）は，それぞれ 8.64±0.48cm，5.93±0.53cm，7.14±0.38cm であった．

2.2　実験手順

測定動作は右手を用いた「異なる大きさの把持対象物を用いた到達運動と把持運動の複合運動課題（以下，複合運動課題）」と，比較課題としての「把持運動を含まない到達運動課題（以下，到達運動課題）」である．前者の課題は，30cm 前方に置かれた 4 サイズの円板（直径 2，4，6，8cm．厚さ 2cm）を把持し持ち上げる運動であり，把持形態は，母指—示指間での 2 指つまみとした．後者は，スタート位置から 30cm 前方にある目標点（机上に記された直径 2cm の円）に向かうポインティング運動である．

動作の開始肢位は，椅子座位で，肘関節 90 度屈曲，前腕 90 度回内，手関節掌背屈中間位で，手関節から末梢部を机上に軽くのせることとし，到達運動課題では示指の指尖部をスタート位置に設置した状態，複合運動課題では全指屈曲しスタート位置で母指指尖部と示指指尖部を合わせた状態から運動を開始した．

動作はいずれも出来るだけ速く行うよう指示し，十分な練習の後，各試行 3 回ずつの本実験を行った．

2.3　データ処理と解析

全ての被験者の実験試技は，スタート位置と目標点を含む被験者の矢状軸に沿ってほぼ行われたので，ビデオカメラを被験者の左側方に設置し，一連の動作を矢状面内で撮影した．各被験者の右手の橈骨茎状突起（以下，手関節），母指 MP 関節，示指 MP 関節，母指指尖，示指指尖に解析用の標点として反射マーカーを取り付け，得られた画像から，各マーカーの座標をサンプリング周波数 60Hz で動作解析装置（Frame-DIAS；ディケイエイチ）を用いてデジタイズした．デジタイズ後のデータは，スタート位置における手関節マーカーの座標を原点 (0,0) とし被験者の正中線前方方向を X 軸正方向に，垂直上方向を Y 軸正方向に規定した座標系で表した（図 1）．

以上をもとに，到達運動に関しては従来の時間的側面からの研究においても解析されてきた「手関節速度」に加え，運動の空間的側面をみる指標として「手関節軌跡」についての解析を行い，手の運動を被験者の矢状面における 2 次元空間座標に表した．把持運動に関しては，従来の研究においても解析されてきた「手指口径」の他に「手の把持形態」を新たにパラメータに加えた．

また，到達運動と把持運動の関係をみるためのパラメータとしては，「手指最大口径までの時間と手関節最高高度までの時間の関係」，「手の把持形態と手関節最高高度の関係」について解析した．さらに，到達運動と把持運動の空間的側面に関するパラメータが時間軸に沿ってどのように変化しているのかを調べる指標として，Wang & Stelmach (1998) の先行研究を参考に 3 次元空間座標を近似的に 2 次元空間に投影した座標系を用い，「手関節の総軌跡長を 100%として標準化した相対軌跡長 (%) に対する手指最大口径を 100%として標準化した手指相対口径 (%) の経時的変化」についても解析を行った．データ解析では，各試行 3 回ずつ測定したパラメータの平均値をその円板サイズに関する各被験者の代表値として用い，回帰分析および分散分析 (ANOVA) を行った．

3. 結　果

3.1 到達運動

3.1.1 手関節軌跡

手関節軌跡の代表例を図 2 に示す．図 2 に示すように，全ての被験者において到達運動課題での手関節軌跡は凸型の曲線を描いた．しかし，その曲線軌跡は水平方向に 30cm 進むのに対し垂直方向へはわずか数 cm しか進んでおらず直線に近いものであった．一方，複合運動課題での手関節軌跡は，滑らかに上昇し，水平方向に 1/2 以上進んだ地点で頂点をもち，その後比較的急なカーブで下降する曲線を描いた．最高高度はいずれも到達運動課題に比べ，3 倍から 5 倍高いものとなった．

さらに，複合運動課題では円板の大きさによって手関節の軌跡が変化した．手関節の最高高度および最終高度は，円板の大きさと高い相関関係を示し，円板の大きさの増大にともない有意に上昇した ($r = 0.489$, $p < 0.01$; $r = 0.690$, $p < 0.001$) (図 3)．また，手関節高度が最高に達するまでの

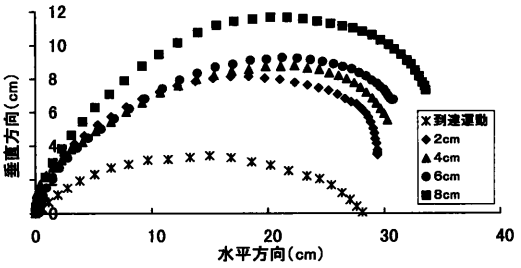

図 2　手関節軌跡（代表例）

到達運動課題と複合運動課題 (2cm, 4cm, 6cm, 8cm) における手関節軌跡の代表例を示す．グラフは横軸に水平方向への移動距離 (cm)，縦軸に垂直方向への移動距離 (cm) を示し，スターと位置と目標点を含む被験者の矢状面における手関節軌跡を表している．各手関節軌跡は，示指の指尖をスタート位置に設置した状態での手関節座標を原点 (0,0) にとり，その後の手関節座標を 60Hz 間隔でプロット表示したものである．

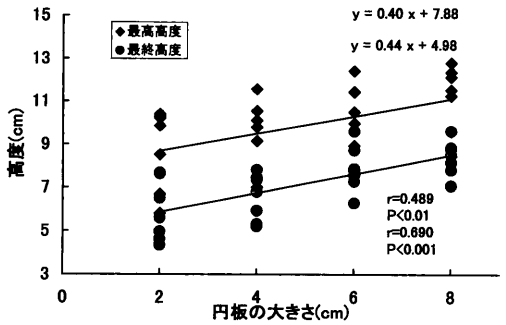

図 3　手関節の最高高度と最終高度

複合運動課題における手関節の最高高度 (cm) と最終高度 (cm) を示す．最高高度・最終高度ともに，円板が大きくなるにともない有意に上昇した．

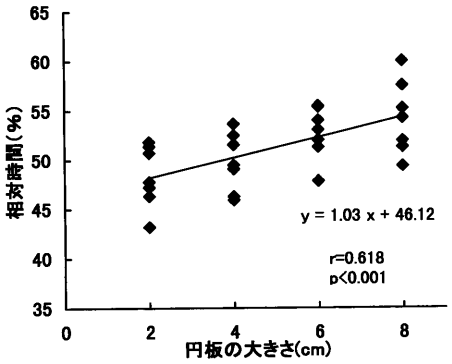

図 4　手関節最高高度までの時間 (%)

複合運動課題における，手関節軌跡が最高高度に達するまでの時間を，全運動時間に対する相対時間 (%) で示す．円板が大きくなるにともない最高高度に達するまでの時間 (%) は有意に延長した．

全運動時間に対する相対時間は，円板の大きさの違いによって有意に異なっており ($F_{3,24} = 5.11$, $p < 0.01$)，最高高度に達するまでの相対時間と円板の大きさとは高い相関関係を示し，円板の大きさが大きくなるにつれて高度が最高に達するまでの時間は有意に遅延した ($r = 0.618$, $p < 0.001$) (図 4)．

3.1.2 手関節速度

手関節の速度変化の代表例を図 5 に示す．速度変化のグラフは，到達運動課題では全運動時間の 50%付近で最高速度に達する対称的なベル型となった．一方，複合運動課題では，全運動時間の 35〜40%付近で最高速度となる非対称的なベル型を示したが，最高速度が出現するタイミングに円板の大きさによる有意差は認められなかった．

また，複合運動課題では円板の大きさによる手関節最高速度に有意な差が認められた ($F_{3,24} = 8.97$, $p < 0.001$)．手関節の最高速度は，全被験者において 2cm の円板を把持する場合に最も遅くなり，8cm の円板を把持する場合に最高となっており，手関節の最高速度は円板の大きさの増大にともない直線的に増加した ($r = 0.724$, $p < 0.001$) (図 6)．

3.2 把持運動

3.2.1 手指口径

複合運動課題における手指口径（母指指尖と示指指尖の間の距離 (cm)）の経時的変化を図 7 に示す．手指口径は，円板の大きさにかかわらず，運動開始後から連続的に増大し運動の後半で最大に達した後に円板の直径に合わせて減少する，という一定の傾向を示した．

図 8 は，円板の大きさと手指最大口径の関係を示したものである．手指最大口径は円板の大きさによって有意に異なり ($F_{3,24} = 123.83$, $p < 0.001$)，円板の増大にともない最大口径も直線的に増大した ($r = 0.967$, $p < 0.001$)．

3.2.2 手の把持形態

複合運動課題における最終的な手の把持形態を図 9 に示す．円板把持時の手の形は，円板が大きくなるにともない，手関節がより高い位置からつかむような形へと変化している．手の傾き（手関節と MP 関節とを結ぶ直線が机上面に平行な面となす角度）と円板の大きさとの関係を図 10 に示すが，手の傾きは円板の大きさによって有意に異なり ($F_{3,24} = 27.58$, $p < 0.001$)，円板が大きくなるにつれて手の傾きは有意に増加した ($r = 0.871$, $p < 0.001$)．

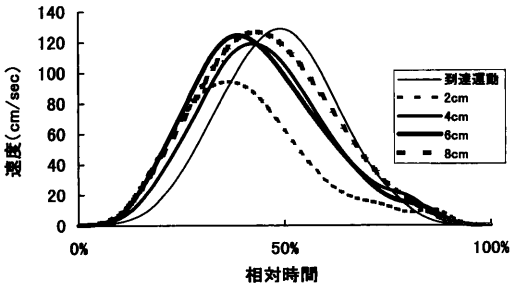

図 5　手関節速度（代表例）

到達運動課題と複合運動課題 (2cm, 4cm, 6cm, 8cm) における手関節の速度変化の代表例を示す．到達運動課題では全運動時間の 50%付近で最高速度に達するが，複合運動課題では全運動時間の 35〜40%付近で最高速度に達した．

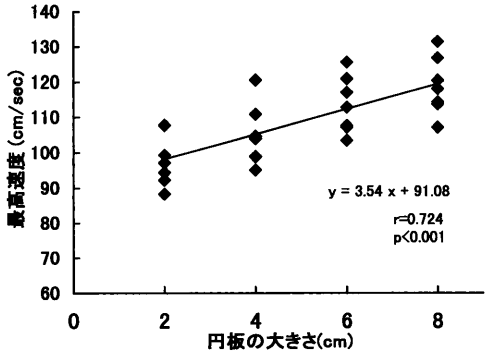

図 6　手関節最高速度

複合運動課題における手関節の最高速度を示す．円板が大きくなるにともない手関節最高速度は直線的に増加した．

3.3 到達運動と把持運動の関係

3.3.1 時間的関係

手関節最高高度までの時間と手指最大口径までの時間の関係について，試行された全試技の結果を図 11 に示す．その結果，手関節最高高度に達するタイミングと手指最大口径に達するタイミングとの間には有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.652$, $p < 0.001$)．

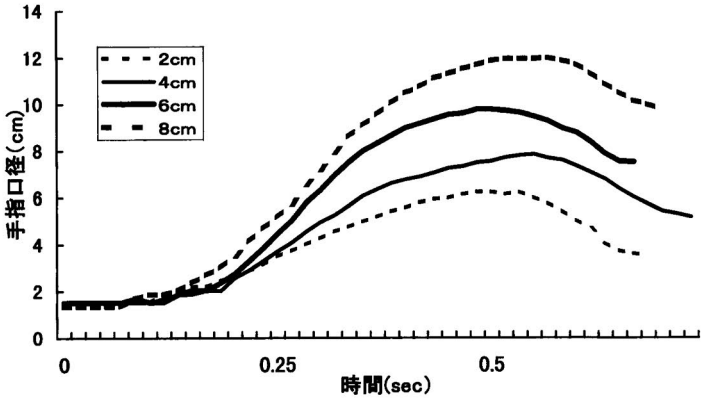

図 7　手指口径の経時的変化（代表例）

複合運動課題における手指口径の経時的変化の代表例を示す．手指口径は運動開始後から徐々に増大し最大口径に達した後に円板の直径に合わせて減少しており，円板の大きさによらず同様の経時的傾向を示した．

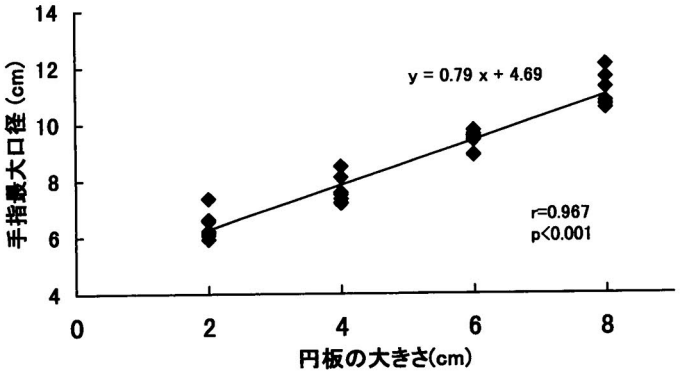

図 8　手指最大口径

複合運動課題における手指最大口径 (cm) を示す．最大口径は，円板の大きさにともない直線的に増大した．

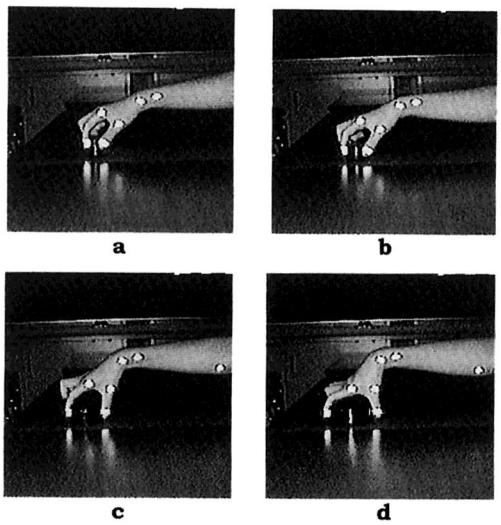

図 9　最終的な手の把持形態

a; 2cm, b; 4cm, c; 6cm, d; 8cm. 円板把持時の最終的な手の形を示す．円板が大きくなるにつれて，手関節がより高い位置からつかむような形へと変化している．

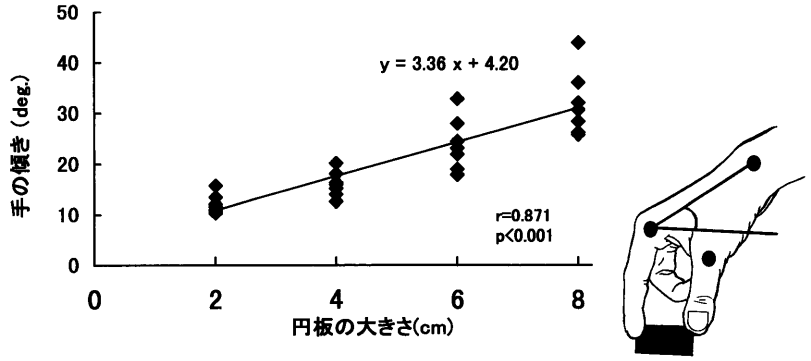

図 10　最終的な手の傾き

複合運動課題における円板把持時の手の傾きを示す．手の傾きは，円板の大きさにともない有意に増加した．

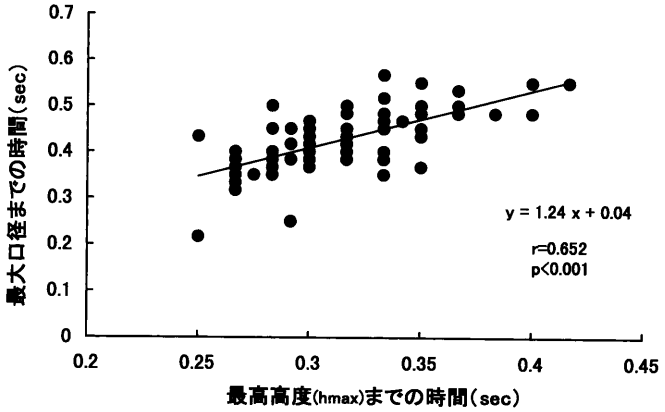

図 11　手関節最高高度までの時間と手指最大口径までの時間

手関節最高高度までの時間 (sec) と手指最大口径までの時間 (sec) との関係について，試行された全被験者，全試技の結果を示す．最高高度までの時間と最大口径までの時間との間に有意な正の相関関係が認められた．

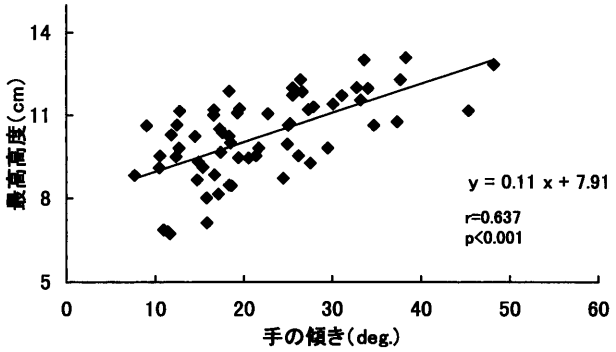

図 12　最終的な手の傾きと手関節最高高度の関係

円板把持時の最終的な手の傾きと手関節最高高度の関係について，試行された全被験者，全試技の結果を示す．円板把持時の手の傾きが大きいほど，手関節の最高高度も有意に上昇した．

3.3.2　空間的関係

円板把持時の最終的な手の傾きと手関節軌跡の最高高度の関係について，試行された全試技の結果を図 12 に示す．その結果，手の傾きと軌跡の最高高

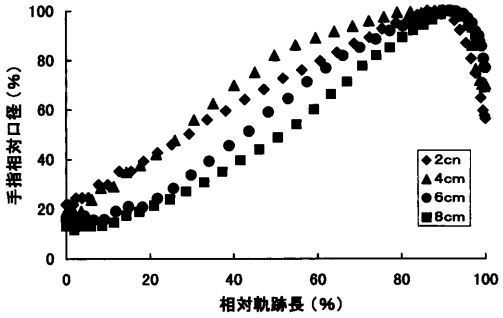

図 13-A 相対軌跡長と手指相対口径の変化（代表例）

手関節相対軌跡長 (%) に対する手指相対口径 (%) の変化の関係を示す（代表例）．横軸に相対軌跡長 (%) を，縦軸に手指相対口径 (%) を示し，それぞれ総軌跡長，最大口径を 100%とした標準化した値で表し，相対軌跡長 (%) と手指相対口径 (%) の関係を 60Hz 間隔でプロット表示している．

度の間には正の相関関係が認められ，把持時の最終的な手の傾きが増加するにともない，軌跡の最高高度も有意に上昇した ($r = 0.637$, $p < 0.001$)．

3.3.3 時空的変化

到達運動（手関節軌跡）に対する把持運動（手指口径）の時空的変化の関係 (代表例) を図 13-A に示す．縦軸，横軸ともに標準化された値で示してある．代表例に示されるように，手関節が円板方向へ移動するにともない手指の相対口径も連続的に増大し，手関節が総軌跡長の約 89 %進んだ地点で手指相対口径は最大に達し，その後円板の直径に合わせて減少する，という時空的変化が円板の大きさに関係なく，全ての被験者において認められた．

さらに，手指最大口径時の手関節軌跡長と総軌跡長との関係について，試行された全試技の結果を図 13-B に示す．手指口径が最大に達する時の手関節の軌跡長は，総軌跡長の延長にともない有意に延長していた ($r = 0.953$, $p < 0.001$)．さらに，最大口径に達する時の手関節の相対軌跡長は 89.35±2.43% (2cm; 88.67±7.80%，4cm; 89.04±6.48%，6cm; 89.54±4.33%，8cm; 90.21±4.20%) で，円板の大きさの違いによる差は認められなかった（図 13-C）($F_{3,80} = 1.51$, $p > 0.05$)．

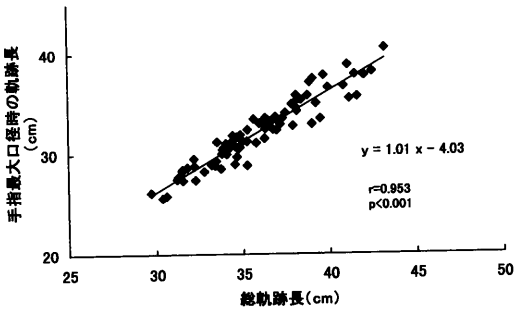

図 13-B 総軌跡長と手指最大口径時の軌跡長の関係

総軌跡長 (cm) と手指最大口径時の軌跡長 (cm) との関係について，試行された全被験者，全試技の結果を示す．手指口径が最大に達する時の手関節軌跡長は，総軌跡長の延長にともない有意に延長した．

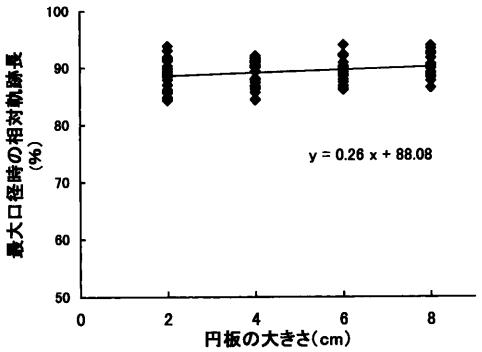

図 13-C 手指最大口径時の相対軌跡長 (%)

手指最大口径に達するときの手関節の相対軌跡長 (%) について，試行された全被験者，全試技の結果を示す．手指最大口径時の相対軌跡長には円板の大きさの違いによる差は認められなかった．

4. 考 察

4.1 把持運動の変化

今回の研究から，図 7 に示したように，手指口径は，運動開始後から連続的に徐々に増大し運動の後半で最大に達した後に円板の大きさに合わせて減少するという，経時的変化のパターンを示すことが明らかとなり，この経時的パターンはいずれの大きさの円板を把持する際にも認められた．同様の結果が，これまでの多くの研究者たちによっても報告されてきている (Jeannerod, 1981; Kudoh et al., 1997; Marteniuk et al., 1987, 1990a; Tresilian & Stelmach, 1997; Wang & Stelmach, 1998; Wing et al., 1986).

一方，図 8 に示したように，手指最大口径の大きさには円板の大きさの違いによる変化が生じることが示された．Jeannerod (1981) の視覚運動チャンネル説においても，対象物の大きさや形，重さといった属性に関する特徴は把持運動に関与しており，これら属性に関する特徴の変化は把持運動に変化をもたらすとされている．対象物の属性に関する特徴を変化させたこれまでの先行研究においても，手指最大口径の大きさや手指最大口径に達するまでの時間といった把持運動に関わるパラメータに変化が生じることが報告されてきており (Gentilucci et al., 1991; Jeannerod, 1981, 1984; Kudoh et al., 1997; Marteniuk et al., 1990a; Pryde et al., 1998; Smeets & Brenner, 1999)，今回の我々の研究結果を支持するものである．

さらに今回我々は，これまでの研究では，把持運動のパラメータに手指口径が用いられているが，これは対象物にアプローチする過程における手の形状の変化をみているものであり，最終的な把持形態を示すものではないと考え，最終的な手の把持形態を表すパラメータとして「手の傾き」についての解析を加えた．その結果，円板の大きさの違いによって，円板把持時の最終的な手の形態に違いが生じることが明らかとなった．具体的には図 10 に示したように，円板の大きさが大きくなるにともない，最終的な手の傾きは有意に増大することが明らかとなり，円板の大きさに応じて把持時の手の形態が規定されることが推察された．

これまでの研究は，対象物の大きさの違いによる把持運動パラメータの変化については報告しているものの，その変化がなぜ生じたのかについて考察を加えていない．Smeet & Brenner(1999) は，対象物の大きさと手指最大口径との関係は，対象物の表面への垂直アプローチ理論によるものであると報告しているが，我々はヒトの運動メカニズムを解明するには，人体の解剖学的構造も含めた検討を加える必要があると考える．

Tresilian & Stelmach (1997) は，片手の母指と示指による把持運動課題と両手の示指による把持運動課題とを比較し，解剖学的構造が到達運動と把持運動のパラメータに影響するか検討した．その結果，両試行において対象物の大きさに応じて最大口径が増大すること，および最大口径に達するまでの時間と到達運動の減速相の時間が延長することが示され，解剖学的構造が到達運動や把持運動のパラメータに影響しないことが報告された．しかし，この研究では，最大口径の大きさ (cm) や手指口径の経時的変化には，片手試行と両手試行とで差が認められている．さらに，把持時に手指が対象物に接触する位置や互いの手指の位置関係についてなど，最終的な把持形態が解剖学的構造による影響を受けるかいなかについては言及していない．

図 14 に，今回の実験における円板把持時の各被験者の母指中手骨と示指中手骨のなす角度（以下，母指外転角度）を示す．全被験者の平均母指外転角度は，2cm の時に 32.96±6.50 度，4cm では 33.66±7.34 度，6cm で 37.78±8.35 度，8cm で 39.85±8.00 度と，円板の大きさにともない増加する傾向は認められたものの，母指外転角度に円板の大きさによる有意な差は認められなかった ($F_{3,24} = 1.33$, $p > 0.05$)．さらに，各被験者の最大母指外転角度は，平均 40.71 (±8.00) 度で，円板把持時の母指外転角度との間に有意な差は認められなかった ($F_{1,33} = 2.01$, $p > 0.05$)．これらのことより，円板を把持する際の母指外転角度は円板の大きさに関わらず一定であり，さらにこの角度は常に解剖学的な可動域制限による影響を受けていることが確認された．図 15 に，机上面に置かれた直径 2cm と 8cm の円板を把持している時の手の形状 (b, d) と手の傾き角度 0 度で直径 2cm と 8cm の円板を把持している時の手の形状 (a, c) を示す．2cm の円板を把持する場合には示指の MP 関節は屈曲位にあり，手の傾き角度が 0 度の場合でも示指の先は MP 関節より低い位置にある（図 15-a）．したがって円板が机上面にのっている状態でも小さい手の傾き角度で把持することができる（図 15-b）．一方，8cm の円板を把持する場合には 2cm の円板を把持する場合よりも手指の開きが必要となるのだが，前述したように，既に母指外転角度は最大可動域近くに達しており，それ以上の手指の開きを確保するには図 15-c, d に示されるように，示指 MP 関節の過伸展が要求される．示指 MP 関節が過伸展すると，手の傾き角度が 0 度で円板を把持した場合に示指の指先は MP 関節の高さより高い位置あるいは同等の高さにくることになり，円板は机上面にのらない (図 15-c)．つまり示指の先を MP 関節の高さより低くし円板を机上面にのせるには手の傾きを増大せざるをえない（図 15-d）．以上のことから円板把持時の

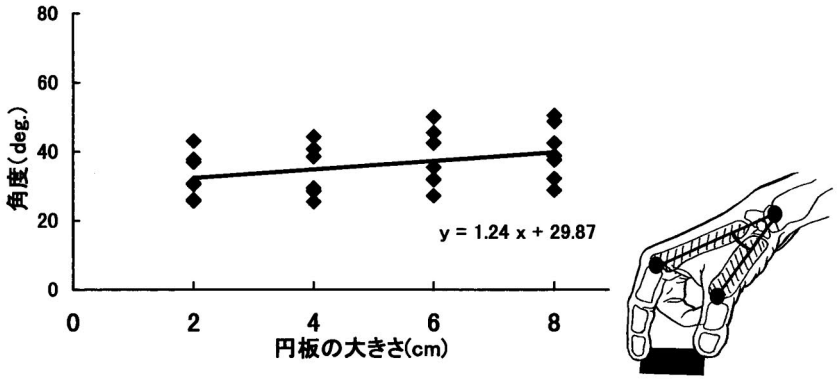

図 14 母指外転角度

各被験者の円板把持時の母指中手骨と示指中手骨のなす角度（母指外転角度）を示す．母指外転角度には，円板の大きさの違いによる有意な差は認められなかった．

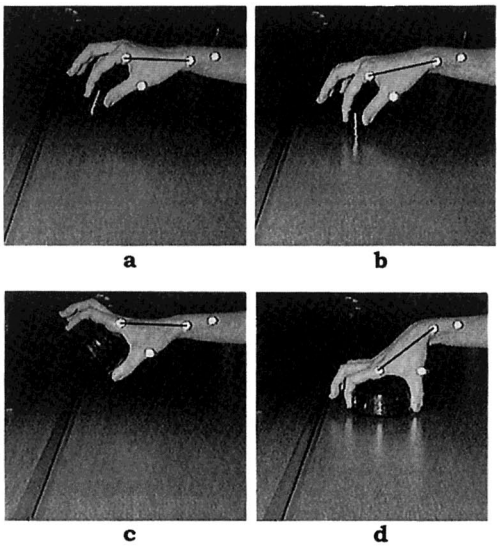

図 15 手の傾きと円板の関係

a; 手の傾き 0 度で 2cm の円板を把持した場合，b; 机上に置かれた 2cm の円板を把持した場合，c; 手の傾き 0 度で 8cm の円板を把持した場合，d; 机上に置かれた 8cm の円板を把持した場合．
2cm の円板を把持する場合には，示指 MP 関節は屈曲位にあるため (a)，手の傾きが小さい場合でも机上面の円板を把持することができる (b)．
8cm の円板を把持する場合には，示指 MP 関節は過伸展しており，示指の指先は MP 関節と同等の高さに位置するので (c)，手の傾き角度を増大させなければ机上に置かれた円板を把持することはできない (d)．

手の形状が，円板の大きさの増大にともない手関節がより高い位置から把持する形態，つまり手の傾きがより大きな把持形態へと変化した原因には，母指外転の解剖学的構造が影響していると考えられた．

4.2 到達運動の変化

Jeannerod (1981) の視覚運動チャンネル説によると，対象物の属性に関する特徴は把持運動に関与しており到達運動には影響しないとされるが，Jeannerod の研究以後，多くの研究結果が対象物の属性に関する特徴が把持運動のみならず到達運動にも影響していると報告してきた (Bootsma et al., 1994; Fikes et al., 1994; Gentilucci et al., 1991; Kudoh et al., 1997; Marteniuk et al., 1987, 1990a; Pryde et al., 1998; Savelsbergh et al., 1996; Weir et al., 1991; Zaal et al., 1993)．具体的には，全体の運動

時間の変化，到達運動の減速時間の変化，手関節最高速度の変化などであるが，今回の我々の結果からも，図6に見られるように，手関節最高速度と円板の大きさの間に有意な相関関係が認められ先行研究を支持する結果となった．

また，把持対象物の属性に関する特徴による比較の他に，Marteniuk(1987) の研究ではポインティング運動と把持到達複合運動における到達運動との違いを比較している．その結果，複合運動において全体の運動時間の延長に加え，到達運動の減速相の延長を認めたと報告しており，我々が到達運動課題での手関節速度グラフは対照的なベル型となるのに対し複合運動課題では非対照的なベル型になると示した図5の結果と一致した．

このように，運動の終点課題の違いにより到達運動の速度様式に変化が生じることが確認された．このことから到達運動は要求された終点課題に応じて運動を適合させることが可能である，ということが推察された．

しかし，到達運動と把持運動の時空的関係について解明するには，複合運動課題における到達運動についての空間的側面からの解析が不足していると考えられる．これまでポインティング運動の軌跡についての研究 (Pollick & Ishimura, 1996) は行われてきたが，複合運動課題における到達運動の軌跡そのものを解析した研究は見当たらず，そのことが到達運動と把持運動の時空的関係を明らかにする決定的根拠を欠く原因になっていたと考えられる．したがって今回は，空間的側面についての解析として，複合運動における到達運動の軌跡についての解析を加えた．

その結果，図2に示したように到達運動と複合運動では異なる手関節軌跡を描くことが確認された．これまでに行われてきた目標物まで手を伸ばすときの手先運動の軌道生成理論に関する研究から，到達運動の指先（示指）軌跡はほぼ直線的であることが知られている．今回の実験では軌跡を手関節で測定しているにも関わらず，水平方向に30cm移動するのに対し垂直方向へは数cmの移動しか認められず，ほぼ直線的な軌跡であることが確認された．ポインティング運動における示指の運動軌跡について解析したPollick & Ishimura (1996) の研究では，軌跡は直線軌道から逸脱すると報告しているものの，その変位の大きさは24cm離れたターゲットまでのポインティング運動で最大平均1〜3.5cmであり，今回の結果とほぼ一致していること，さらに経時的な軌跡の形も放物線様となっており今回の結果と同様であることが確認された．これに対し，複合運動における手関節軌跡は曲線を描いた．Tresilian & Stelmach (1997) は前述したように把持運動課題の片手試行と両手試行とを比較したが，その研究の中で彼らは母指と示指，および手関節の運動軌跡を提示している．それによると，軌跡には両試行ともターゲットの大きさの違いによる明確な差は認められなかったとしている．彼らの研究で軌跡の違いを検討するにあたり具体的にどのような解析が行われたのかは明らかではないが，今回の我々の結果では図3と図4に示したように複合運動課題における軌跡の最高高度，最高高度までの時間および最終高度のいずれも円板の大きさと有意な相関関係を示すことが確認された．

これらのことから，対象物の大きさの違いが到達運動の軌跡にも変化を与えることが確認され，運動の終点課題の違いに応じて到達運動の空間的様式も制御されていることが示唆された．

4.3 把持運動と到達運動の協調関係

図11の結果から，手関節軌跡の高度が最高に達するタイミングと手指口径が最大に達するタイミングの間に，有意な相関関係が認められ，到達運動と把持運動の時間的協調関係が示唆された．これらの時間的協調関係を示唆する研究は，これまでも多数報告されてきた (Chieffi & Gentilucci, 1993; Gentilucci & Chieffi, 1992; Hoff & Arbib, 1993; Jakobson & Goodale, 1991; Jeannerod, 1981, 1984; Kudoh et al., 1997)．これらの研究では，手関節の減速が最大に達するタイミングと手指最大口径に達するタイミングとの間，また，それらの相対時間の間に有意な相関関係が示されており，Hoff & Arbib (1993) は，到達運動と把持運動は最適な運動遂行を保つために時間領域に関して互いに依存していると示唆した．

さらに今回，到達運動と把持運動の空間的側面についての解析を行った結果，図12に示したように，円板把持時の手の傾きと手関節軌跡の最高高度の間に有意な相関が認められ，把持時の手の傾きが増大するにつれて手関節軌跡の最高高度も上昇するという到達運動と把持運動の空間的協調関係を示唆する

結果が示された．Marteniuk (1987) は，到達運動の最終課題を「ターゲットにポイントする」,「対象物を把持する」,「把持する対象物の素材を変える」,「把持した後に対象物を小さい箱に入れる，あるいは大きい箱に投げ入れる」，など操作した実験を行い，その結果，運動の終点課題が到達運動（手関節速度変化様式）に影響を及ぼすことを示した．したがって我々は，今回の実験で求められた手関節軌跡の最高高度の変化とそれにともなう軌跡の経時的変化も，円板の大きさによる最終的な把持時の手の形状の違いから生じているのではないかと考えた．つまり，前述したように，円板把持時の手の形状は円板の大きさに応じて解剖学的に規定されていると考えられ，円板が大きくなるにつれ把持時の手の形状は手関節がより高い位置からつかむような形に規定される．したがって，到達運動では，この最終的な手の傾きを確保するのに十分な手関節高度を確保しなければならず，把持時の手の傾きの増大にともない手関節軌跡の最高高度も上昇する．実際，今回の結果からも手の傾きと軌跡の最高高度の間には有意な相関が認められており，こうして最終的に，円板の大きさの違いによって手関節軌跡に変化が生じたのではないかと考えられた．

しかし今回の実験は，3 次元空間での自然な運動を矢状面での 2 次元空間でしかとらえていないという制約があった．実験試技を遂行するにあたって，被験者に運動を矢状面内で行うよう明示はしなかったが，結果として運動を矢状面に拘束した形になったことは否定できない．そのような運動面の拘束が把持形態（手の傾き）に影響したのではないかという可能性も生じる．つまり，円板が大きくなるにともない手指と円板の接触位置を変化させる，具体的には，手関節の回旋を利用して手指の接触位置を母指は円板の左側へ，示指は右側へと移動させることにより，手の傾きを増大させなくても大きい円板を把持することができるのではないか，という疑問である．実際，著者の一人が最近行った実験では運動を被験者の水平面で解析（上方から運動を撮影）したが (後藤ら, 2001)，その結果対象物が大きくなるにともない，手指と円板の接触位置が上述のように左右方向へ移動していく様子が測定された．しかし，ここで最も大切な結果は，水平面で解析したこの実験でも，このような把持形態の変化にともない水平面における到達運動軌跡が変化しており，左側（橈側）に凸の到達運動軌跡は円板が大きくなるにつれてより湾曲（カーブ）のきつい曲線へと変化した，ということである．

つまり，運動を矢状面で記録・解析した結果からも，水平面で記録・解析した結果からも，対象物の大きさの変化にともない把持形態が変化し，それに応じて到達運動軌跡も変化するということが示されたのである．以上のことから，今回の実験で観察された軌跡は矢状面に限定されていたが，本研究目的である到達運動と把持運動の時空的な協調関係を検討するには問題ないデータであったといえる．

さらにこれらの解析に加え，今回我々は，到達運動に対して把持運動がどのように行われているかを示す時空的なプロットとして，標準化した軌跡長に対する標準化した手指口径の経時的変化を用いた．その結果，図 13-A にみられるように，到達運動の経過とともに把持運動が円滑に連続的に行われていることが示された．さらに図 13-B から，円板の大きさに応じて軌跡が変化し手関節の総軌跡長が延長するにともない手指最大口径に達する時の手関節軌跡長も有意に延長することが確認され，その結果，図 13-C に示されるように，円板の大きさや，それにともなう軌跡の相違，さらには被験者の違いにも関わらず，手指口径が最大に達する時の手関節の相対軌跡長は約 89%と，常に一定に保たれることが明らかとなった．このことから，手指最大口径の発生は，手関節軌跡の空間的様式において精密に制御されていることが示唆された．

Wang & Stelmach (1998) の研究では，今回の実験設定とは逆に，到達運動の実験条件に変化を与え（到達運動を“腕の動きのみ”“体幹の動きのみ”“腕と体幹の動きのコンビネーション”の異なる 3 パターンで行う），その時の到達運動と把持運動の関係を同様の時空的プロットを用いて解析している．その結果からも，手指最大口径に達する時の手関節の相対軌跡長は不変であることが示されており，移動中の手と対象物の間の距離が，到達運動と把持運動の最適な協調関係を維持するための神経システムによって制御された重要な変数の一つであることが示唆されている．

最後に，到達運動と把持運動に関して認知的観点から考察を加える．到達運動課題の軌道生成理論の一つである躍度変化最小モデルでは，運動の始点と終点に関する視覚情報（外部座標）から軌道が計画

され，筋骨格系のダイナミクスで決められた評価関数に照らして決定された軌道が運動指令として制御対象に伝えられる，とされており，今回の手関節軌跡もこのように生成されたのではないかと推察される．

しかし，到達運動課題と把持到達複合運動課題のいずれにおいても，さらに複合運動課題に関してはいずれの大きさの対象物 (2cm, 4cm, 6cm, 8cm) を把持する場合にも，目標物は開始位置から 30cm 前方の所定の位置に提示されたので，始点と終点の外部座標は同じであるはずにもかかわらず運動軌道は異なっていた．つまり，このことから，目標が提示された外部座標にのみ基づいて軌道が計画されているのではなく，最終的な把持形態（手の形）を見越して軌道が計画されているのではないか，と推察された．しかしその場合にも，Smeet & Brenner (1999) のモデルのように「計算理論的に算出された把持における個々の手指の最適ポジション（対象物と個々の手指との接点）」という外部座標ではなく，最終的な手の形態と手関節軌跡との間に時間的空間的関係が見出された今回の結果から我々は，「解剖学的構造に基づいて算出された手の各セグメントの最適ポジション」に基づいて軌道が生成されたと考える．

したがって，軌道を計画するためには，実際にその大きさの対象物を把持した時の手の形状が内部モデルとしてインプットされていないと，軌道を計画することはできない．今回は，課題が単純な円板把持であったこと，本実験前に十分な練習試行を実施したことから，本実験の段階ではインプットされた把持時の手の形状に基づいて課題に応じた運動軌道を生成することができたと考えられる．

このように運動の終点に課題がある場合の到達運動の軌道（軌跡）生成については未知であり，どのように運動が制御されているのかについては今後も研究の余地がある．

5. 結　論

今回の研究では対象物の属性に関する特徴として“対象物の大きさ”を取り上げたが，以上の結果から，対象物の大きさの違いは把持運動にも到達運動にも影響を与えることが示された．具体的には，対象物が大きくなるにつれ最終的な把持時の手の形状は，手関節がより高い位置から把持する形態へ，つまり，手の傾きがより大きな把持形態へと変化することが確認された．さらに把持時の手の傾きの増大にともない到達運動軌跡の最高高度や最終高度が上昇し，その結果，対象物の大きさに応じた到達運動軌跡が生成されることも確認され，到達運動と把持運動はともに対象物の大きさに応じて時間的にも空間的にも変化することが明らかとなった．さらに手指口径も手関節軌跡の変化と協調しながら時空的に変化しており，到達運動と把持運動は時空的な協調関係にあると考えられた．

文　献

Arbib, M. A. (1981). Perceptual structures and distributed motor control. In Brooks, V.B. (Ed.), *Motor control: Handbook of physiology*, sect.1, vol.2, The nervous system, American Physiological Society, Bethesda, Md, 1449–1480.

Bootsma, R. J., Marteniuk, R. G., MacKenzie, C. L., & Zaal, F. T. J. M. (1994). The speed-accuracy trade-of in manual prehension: Effects of movement amplitude,abject size and object width on kinematic characteristics. *Experimental Brain Research*, **98**, 535–541.

Chieffi, S. &Gentilucci, M. (1993). Coordination between the transport and the grasp components during prehension movements. *Experimental Brain Research*, **94**, 471–477.

Fikes, T. G., Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1994). Effects of object texture on precontact movement time in human prehension. *Journal of Motor Behavior*, **26**, 325–332.

Gentilucci, M., Castiello, U., Corradini, M. L., Scarpa. M., Umilta, C., & Rizzolatti, G. (1991). Influence of different types of grasping on the transport component of prehension movements. *Neuropsychologia*, **29**, 361–378.

Gentilucci, M., Chieffi, S., Scarpa, M., & Castiello, U. (1992). Temporal coupling between transport and grasp components during prehension movements:effects of visual perturbation. *Behavioural Brain Research*, **47**, 71–82.

後藤 美奈子・中村 眞理子・松下 登・石澤 光郎 (2001). 把持動作時の前腕・手・手指運動の解析. 『作業療法』, **21** (特別), 94.

Haggard, P. & Wing, A. (1995). Coordinated responeses following mechanical perturbation of the arm during prehension. *Experimental Brain Research*, **102**, 483–494.

Haggard, P. & Wing, A. (1998). Coordination of hand aperture with the spatial path of hand transport. *Experimental Brain Research*, **118**, 286–292.

Hoff, B. & Arbib, M. A. (1993). Models of trajectory formation and temporal interaction of reach and grasp. *Journal of Motor Behavior*, **25**, 175–192.

Jakobson, L. S. & Goodale, M. A. (1991). Factors affecting higher-order movement planning: A Kinematic analysis of human prehension. *Experimental Brain Research*, **86**, 199–208.

Jeannerod, M. (I981). Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and performance IX*, 153–168. Eribaum, Hilladale, NJ.

Jeanneord, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, **16**, 235–254.

Kawato, M. (1994). Unidirectional versus bidirectional theory for trajectory planning and control. *ATR Technical Reports*, TR-H-068.

Kudoh, N., Hattori, M., Numata, N., & Maruyama, K. (1997). An analysis of spatiotemporal variability during prehension movements: Effects of object size and distance. *Experimental Brain Research*, **117**, 457–262.

Marteniuk, R. G., MacKenzie, C. L., Jeannerod, M., Athenes, S., & Dugas, C. (1987). Constrains on human arm movement Trajectories. *Canadian Journal of Psychology*, **41**, 365–378.

Marteniuk, R. G., Leavitt, J. L., MacKenzie, C. L., & Athenes, S. (1990a). Functional relationship between grasp and transport components in a prehension task. *Human Movement Science*, **9**, 149–176.

Marteniuk, R. G. & MacKenzie, C. L. (1990b). Invariance and variability in human prehension: implications for theory development. In M.A. Goodale (Ed.), *Vision and action: the control of grasping*, 49–64. Ablex, Norwood, NJ.

Paulignan, Y., Frack, V. G., Toni, I., & Jeannerod, M. (1997). Influence of object position and size on human prehension movements. *Experiment Brain Research*, **114**, 226–234.

Pollick, F. E. & Ishimura, G. (1996). The three-dimensional curvature of straight-ahead movements. *Journal of Motor Behavior*, **28**, 271–279.

Pryde, K. M., Roy, E. A., Campbell, K. (1998). Prehension in children and adults:The effects of object size. *Human Movement Science*, **17**, 743–752.

Saling, M., Alberts, J., Stelmach, G. E., & Bloedel, J. R. (1998). Reach-to-grasp movements during obstacle avoidance. *Experimantal Brain Research*, **118**, 251–258.

Savelsbergh, G. J. P., Steenbergen, B., & van der Kamp, J. (1996). The role of fragility information in the guidance of the precision grip. *Human Movement Science*, **15**, 115–127.

Smeets, J. B. J. & Brenner, E. (1999). A New View on Grasping. *Motor Control*, **3**, 237–271.

Tresilian, J. R. & Stelmach, G. E. (1997). Common organization for unimanual and bimanual reach-to-grasp tasks. *Experimantal Brain Research*, **115**, 283–299.

Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human arm movement: Minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, **61**, 89–101.

Wallace, S. A. & Weeks, D. L. (1988). Temporal constraints on the control of prehensile movement. *Journal of Motor Behavior*, **20**, 81–105.

Wang, J. & Stelmach, G. E. (1998). Coordination among the body segments during reach-to-grasp action involving the trunk. *Experimental Brain Research*, **123**, 346–350.

Wang, J. & Stelmach, G. E. (1999). Temporal and Spatial Relationship Between Reaching and Grasping. Commentary on "A New View on Grasping". *Motor Control*, **3**, 307–311.

Weir, P. L., MacKenzie, C. L., Marteniuk, R. G., & Cargoe, S. L. (1991). Is object texture a constraint on human prehension? : Kinematic evidence. *Journal of Motor Behavior*, **23**, 205–210.

Wing, A. M., Turton, A., & Fraser, C. (1986).

Grasp size and accuracy of approach in reaching. *Journal of Motor Behavior*, **18**, 245–260.
Zaal, F. T. J. M. & Bootsma, R. J. (1993). Accuracy demandsnin natural prehension. *Human Movement Science*, **12**, 339–345.

(Received 24 May 2001)
(Accepted 9 May 2002)

阿部 匡樹 (正会員)

1972年生．1998年北海道大学大学院教育学研究科教育学専攻修士課程修了，2002年同大学同研究科博士後期課程単位取得退学．現在国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所運動機能系障害研究部流動研究員．身体において運動が生成される過程に興味を抱き，幅広い視野からこの現象を捉えようと模索している．日本体育学会，日本バイオメカニクス学会会員．

E-mail: abe_m@rehab.go.jp

後藤 美奈子 (正会員)

1974生．1997年札幌医科大学保健医療学部作業療法学科卒業．2002年北海道大学大学院教育学研究科修士課程修了．現在，札幌医科大学保健医療学部作業療法学科助手．上肢運動機能障害に対するリハビリテーションを専門としており，手の運動機能障害解明の一助とすべく巧緻動作中の上肢・手指の動きについて運動学・解剖学・認知心理学などの観点から研究を行っている．日本バイオメカニクス学会，日本作業療法士協会会員．

E-mail: gokumi@sapmed.ac.jp

山田 憲政 (正会員)

1960年生．1985年筑波大学大学院体育研究科修了．現在，北海道大学大学院教育学研究科身体運動科学研究グループ助教授．博士(教育学)．1998-1999年アムステルダム自由大学人間運動科学部客員研究員．2002年から国際日本文化研究センター共同研究員として学際的な視点から身体感の研究に従事している． Human Movement Science 誌 (Elsevier) 編集委員，日本体育学会，日本バイオメカニクス学会会員．

E-mail: yamada@edu.hokudai.ac.jp