

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：32610

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23570283

研究課題名(和文) 道具使用に伴う感覚・運動・認知機能の統合

研究課題名(英文) SENSORIMOTOR AND COGNITIVE INTEGRATION FOR TOOL USE

研究代表者

平井 直樹 (HIRAI, Naoki)

杏林大学・医学部・名誉教授

研究者番号：40086583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：道具使用時の感覚と運動の統合作用を解明するため、動物実験ガイドラインに沿って行った3頭のニホンザルのピンセット(P)使用の学習過程の動作解析を行った。Pの先端を、左に置いた餌に向けて取り易い位置に置くとPを右手に取って餌を摘まめるまで訓練されている。新しい課題(Pの先端を逆方向に向ける等)に直面するとサルは対応を拒否する。しかし、3頭ともにPの向きに拘わらず個々に独創的な解決方法を創出し自由に使うようになった。Pを初めて提示された時に遡り四方向からの映像をフレーム毎に精査した結果、各個の解決は単に反復によるのではなく、独自の経験を積極的に活かし独創的な解決法に結びつけている事が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We aimed to determine how Japanese monkeys acquire the motor-movement for tool (forceps) use after kinematic analysis under the Guide for the Care and Use of Laboratory Animals by the National Research Council. Three monkeys had already learned to use forceps to pick up food using the right hand when the forceps were presented in their front-right side facing food placed on their left (Hirai et al., 2010). When we presented the same forceps with opposite orientation of the original, they refused to act on the forceps. However, they learned to handle the forceps at any orientation in 10-12 days through their active and, importantly, individual learning processes of forceps use reflecting different experience. We can draw out the latent abilities of the monkeys to use a pair of forceps as a "tool"; they had the ability to do the following: 1) conduct advance planning and 2) possess potential knowledge of the causal relationship between their own action on the forceps and its result.

研究分野：神経生理学

キーワード：tool use primate sensorimotor integration motor plan creativity similarity rule

1. 研究開始当初の背景

申請者は、2頭の日本サルで、右手を使わせ、一定条件下ではピンセットを使って餌を摘み口に入れて食べるように学習させることが出来ることを報告した(文献)。その学習経過は、まず、はじめから手にピンセットを持たせ、それを使って餌を摂り、口へもっていくという一連の運動を習得させた。初期の段階では、実験者の補助が必要であった。その後、餌を左側、ピンセットを水平に餌のほうに向けて(9時方向)右側に、別々に置いた。手を伸ばしそのままピンセットを掴んで、餌の方に運び挟めば餌がとれる配置である。初めは、サルは、手を伸ばすことを拒否し、強制しても手でピンセットを握らせることが出来なかったが訓練により、自分からピンセットをとりあげ餌を掴むことが出来るようになった。

解析する中で、1つの結論を得た。二ホンサルがピンセットを使えるようになるまでの最大の難関は、ピンセットを「使うために握る」過程である。すなわち、単にピンセットを持ち上げることは何でも無く出来る。また実験者がサルの手にはピンセットを持たせればそれを使って物を掴むことは出来る。

しかし、いざ置いてあるピンセットを、物を掴むために自分で手に取るように仕向けると、握ることができないのである。

道具使用の観点から、サルやチンパンジーに熊手様の物を使わせ餌をとらせる実験報告がある(文献)。一見、ヒトと同じように熊手を、物をたくり寄せるために使っている様に見える。しかし、柄の方向を逆に提示すると、熊手の方向を変えることをせず、結局物をたくり寄せることが出来ない。熊手を、物を取り寄せるための仲介物として使っているようにみえるが、熊手の機能を理解した上で使っているのではない。どのような要素が障害となっているか、明らかにされていない。

一方、私たちヒトが、道具を使うとき、それがどのように置かれていても、意識せず正しく使うことができる。ヒト以外の霊長類ではこのようなことが出来ないは、どのような制約によるものかを検証することで、ヒトの特質を明らかにできると考えた。

2. 研究の目的

道具使用は他の霊長類では日常見られないヒトに特有な活動である。本研究課題では、サルが訓練により獲得した“水平においたピンセットで餌をとる運動スキームが、“どのような方向に置かれたピンセット”であっても実行可能になるまでの運動形成過程をビデオ撮影した映像をもとに解析し、道具使用に伴う感覚・運動さらに認知機能の相互作用を解明することである。

ヒトは物を手にする時、一番持ち易い様に

手を伸ばし、手指を使って摘んだり、握ったりする。しかしもしその物が“道具”であれば、どのように使うかその機能を考え、持ち方を変える。たとえアプローチが難しくとも、目的に適った、最終的に使い易いような取り方をする(文献)。そこで、道具使用の課題を課すことにより、二ホンサルが“物”をどのように理解し先々を見通した運動プランをどのように生成するか、さらに学習過程での運動・感覚・認知の統合を明らかにしようとするものである。

3. 研究の方法

(1) 使用動物：三頭の二ホンサルを使用した。このうちの2頭での一定条件下でのピンセット(先端が9時方向に向いている時：図1A)使用時の学習過程は報告した(文献)。今回は、さらに一頭を加えた。この一頭についても、前二頭と同じように、9時方向に向いているピンセットについては使用出来るように訓練した。すなわち、三頭とも、ピンセットを手にとれば、それを使って餌を摘めるような状況である。

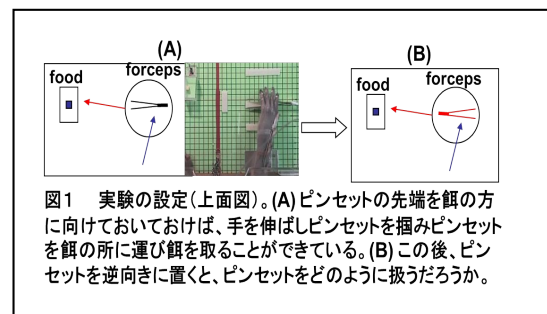


図1 実験の設定(上面図)。(A)ピンセットの先端を餌のほうに向けておいておけば、手を伸ばしピンセットを掴みピンセットを餌の所に運び餌を取ることができている。(B)この後、ピンセットを逆向きに置くと、ピンセットをどのように扱うだろうか。

(2) 設定と課題：サルをテーブルに向かって座らせ、右手を支持台(加重センサー付き)に載せる。頭、体幹の回転運動、前腕、手の運動は無拘束とする。右前方約10cmのところにピンセット、左前方10cmに餌を載せた台を圧センサー付プレートの上に置く(図1左参照)。課題はブザー音を合図に、サルは右手を伸ばして、ピンセットを左方の餌の方向へ持っていき、餌をはさみ、口へ持って行き食べるという一連の動作を遂行することである。まず、既習済みの9時の課題を行わせた後、ピンセットを逆向きにおく。後述するように、三頭すべてこの課題は初め失敗する。そこで、2つの異なった課題を課した。二頭では、既習9時の課題から30度ずつ、逆向きになるまでピンセットを傾けて提示する。三頭目は、作業台を広くし、ピンセットの傾きをランダムにして提示した。

(3) 記録：サルの四方(前、上、左、右)にビデオカメラを配置し、腕、手指の運動、ピンセットと餌の位置をモニターし、課題遂行中の動作記録を行った。Off-lineでフレーム毎の映像を解析した。手を伸ばす、ピンセットを掴む、餌を採る等の、時点は圧センサーからも計測した。二頭では眼球運動と頭部運動

は電磁誘導法でも記録した。

4. 研究成果

ピンセットを、学習した向き(9時)とは逆(3時)向きに置くと(図1右参照)今までに学習したピンセットの取り方のままでは逆に持つ事になりピンセットは機能しない。そのためそれまでの経験から道具としてピンセットを理解したのなら、手首の内転あるいは置き方を変えても使えるようにして取るはずである。一方、もしピンセットの機能を理解していなければ生来の「物を取る」時に使う、最もとり易い方法(逆向きの場合は逆のまま)でとることが予想される。

このように向きを初期学習時から180度回転させて設置した課題に対して、約10日の練習で、3頭ともにピンセットの先端を餌の法に向け正確に挟みとることができた。以下に、3頭のサルが解決するまでの経緯を記す。

(1) ピンセット先端の機能の理解：一日目の反応をみると、一頭目は、はじめはピンセットから目を背け、ピンセットを取りに行くことを拒否し、動作を継続するように促すと、声をあげて怒る。2頭目は手を逆のままピンセットに伸ばす。しかし、9時方向での試行は600ミリ秒以内でピンセットを握っていたのが、9時の向きにすると初めの20回では全て600ミリ秒以上から数秒かかり、さらには手を伸ばすが途中で止めてしまう試行があり課題遂行を躊躇しているものと思われる。三頭目も同じ傾向が見られた。もしピンセットを単に物として見ているならこのような事は起こらず勝手に握ってしまうはずである。これらのことを考えると、9時方向での学習の段階で、ピンセットの先端をどのようにつかうか、機能を理解し始めた可能性が考えられる。

(2) 類似性の法則と効率性の法則：学習の途中経過は異なっているが、3頭とも解決に至るまでに2つの規則性があった。すなわち、similarity rule 類似性の法則 と efficiency rule 効率性の法則にまとめることができる。前者では、一度修得した課題に近い状況のとき(置く向きの変位が小さい時) 既得の運動を修正して使うやり方である。一方、後者では、類似性の法則では解決出来ない事を確認すると、まるで突然のように、今までに見せたことの無いやり方で対処する。このことは、本課題に入る前の予備段階の解析でこれらの傾向を把握しており、すでに一部報告してきた。本課題では、その成因を映像のフレーム毎の解析で明らかにした。

類似性の法則：9時方向から30度変化させてピンセットを傾けたとき、サルはピンセットを取ろうとしないだけで無く、手を引っ込めて課題に対して拒否反応を示した。そこで、9時の課題に戻しそこから数度ずつ変化させると30度の変化まで対応出来る。しか

し、そこからさらに30度ステップの角度の変化をもたせて提示すると、再び拒否をした。そこでまた、数度の変化に戻すと対応が可能となった。

ここで明らかになったことは、既習の9時の方向に向けたピンセットを取る運動プログラムでは、そこから30度傾けた時のピンセットをとる運動は生起せず、学習初期では別のプログラムで形成されている可能性である。少しの変化に対応出来るのは手首の回転可動範囲内に限られるので、個体によりその角度は異なる。しかし、初めに試した180度回転した3時の課題は、三頭ともこのシリーズ期間内では類似性では解決できない大きな変化である。

効率性の法則：手首の回転可動範囲を超えた時の対応の仕方には個体差が出る。運動のプログラムの観点からみると、類似性の法則は手首の回転を変えてはいるがワンステップでピンセットを取る運動で対処している。この範囲を超えると、類似性では解決出来ず、ピンセットをその範囲にまでおさまるように動かす運動を導入する必要がある。二例で説明する。一頭目は、ピンセットを指で回転させ既存の運動パターンで解決出来る範囲まで動かす。二頭目では、ピンセットを逆向きにもち、それを取りやすい向きに一度台の上に置き、角度を換えている(図2A, B)。この方法が出現すると、ピンセットをとるまでに掛かる時間が有意に短縮され効率が上がっている(図2C)。

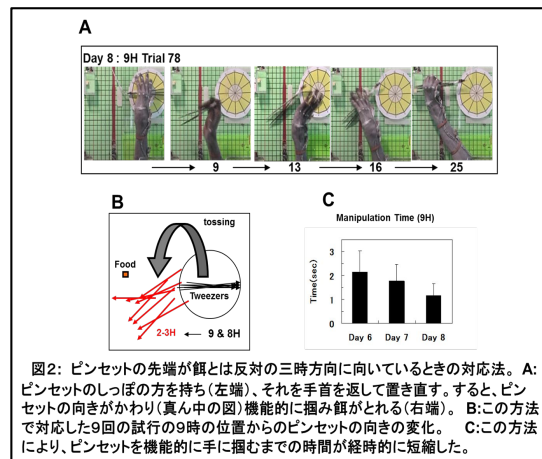


図2: ピンセットの先端が餌とは反対の三時方向に向いているときの対応法。A: ピンセットのしっぽの方を持ち(左端)、それを手首を返して置き直す。すると、ピンセットの向きが変わり(真ん中の図)機能的に掴み餌がとれる(右端)。B: この方法で対応した9回の試行の9時の位置からのピンセットの向きの変化。C: この方法により、ピンセットを機能的に手に掴むまでの時間が経時的に短縮した。

これら試行は、突然解決策を発見したかのように出現する。しかし、学習過程をビデオ映像で精査すると、それまでにヒントとなる試行が何度か見られている。一頭目の例では、数日前から、ピンセットに手が触れピンセットが少し回転することがある。初めは無視するが、出現確率は低いが、それでも繰り返し同じ事がおきている。初めて指で回転するときの動きをみると、このことがヒントとなっているように思われる。すなわち、軽く手がピンセットに触れ回転する。すると次にその回転とは反対方向に動くようにゆっくりと指でピンセットを動かし、自分の取れる範囲

にまで回転させている。そして、ピンセットを機能的に取れるようになった。次の試行から、ピンセットの角度を変える運動とピンセットを掴む運動の連続運動がスムーズになった。

二頭目の例では、類似性では解決できない角度にピンセットが繰り返し提示されると、試行を拒否するだけで無く、ピンセットを実験台から放り投げることがある。しかし、台から落ちずに台上にとどまるときピンセットの角度が変わっている。その角度が既習の角度になれば、図2のように、効率良くピンセットを機能的にとるようになった。

補助運動の成因：上記は、初めに学習した9時の課題から、実験者が少しずつ角度を変えて行って解決させたときに出現した運動であった。では、この様に人為的な操作を加えなかったとき、このような補助運動はどのように発生するのだろうか。

そこで、ピンセットの角度を(段階的にではなく)ランダムに変えた場合の解決方法をもう一頭のサルで解析した。直接、一度のアプローチで機能的にピンセットをとろうとする範囲は、実験初日は9時から60度変化するまでであり、3日目にはそれが拡大し90度までの変化に対応できるようになっている。しかし、それ以上の変化には相変わらず対応できない。6日目になると、どの範囲でもピンセットを機能的に取れるようになった。ここで初めてピンセットを回転させる、あるいは持ち直すなどの補助的な運動が出現する。すなわち、最終目的(取る)のための直截的な手の運動ではない、補助的な運動をランダムに提示された場合にも出現しており、ピンセットで餌を取るために道具をどのように使うか順序運動のプログラムが新たに構成されたと考えた。

(3) 以上、ニホンサルの道具使用の運動学習過程を通して、ニホンサルが先を予見した運動プログラムを構築できること、さらに、ピンセットを単なる物では無く、物を挟む“道具”として使用している可能性が示唆された。この様なヒト以外の霊長類で道具を使わせた報告は、(1)の研究課題開始当初の背景のところ参照した論文以外にもある。その多くは、訓練の経過で、どの程度の頻度で使えるようになってきたか、あるいは使えない、とのレポートで終止しているものが多い様に思われる。使えないのなら、何が要因なのか、使えるようになったのは、どの点が改善されてきているのかなどを明確に分析した報告を期待したい。

ヒトで、運動機能は正常でも、脳の損傷で道具を巧みに扱えないという報告がある。その神経メカニズムを明らかにすることはヒトの社会生活を考えたとき重要と考える。しかし、道具を日常的に使うのはヒトの特徴であり、他の動物を使っての解析は難しい。本課題では使用した全てのニホンサルで、人為

的なピンセットを使って餌を取ることが可能となった。まだ少数例であるが、必ずしも特殊な例では無く、どのようなニホンサルでも今後道具を使わせることができるはずである。3時の方向に向けておかれたピンセットは当初、手を出さない。一見、ピンセットの機能など理解出来ていない様である。しかし、ピンセットを使うこと自体が全く初めてで有り、繰り返すと、ピンセットの先端を餌の方に持って行けば良いことは経験から解ってくる。その段階ではまだそれを具現する運動プログラム自体は無い。新しく形成していく過程の一端が本課題で明らかに出来たと考える。

現在、ピンセット以外の人工物を自発的に使うようになるまでの学習過程の映像を解析している。これによりヒト特有の道具使用に拘わる運動機能、感覚、認知の連繋作用などの情報を集積していきたい。

<引用文献>

Hirai N et al: The process of learning tool-use movements in monkeys: the initial process of picking up and using forceps. *Neurosci Res.* 2010;67(3):215-27. doi: 10.1016/j.neures.2010.04.001.

Povinelli DJ: Folk physics for apes: The chimpanzee's theory of how the world works. Oxford: Oxford University Press, 2000.

Ishibashi H et al: Acquisition and development of monkey tool-use: behavioral and kinematic analyses. *Can J Physiol & Pharmacol* 78: 958-966, 2000.

Weiss DJ et al: Monkey see, monkey plan, monkey do: The end-state comfort effect in cotton-top tamarins (*Saguinus Oedipus*). *Psychological Science*, 18, 1063-1068, 2007.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 6 件)

平井直樹、道具使用の学習過程：サルによる把持動作のための pre-shaping 動作形成過程、第 68 回日本人類学会、2014 年 11 月 2 日、「アクトシティ浜松コンgresセンター(静岡県・浜松市)」

平井直樹、道具使用の学習過程：ニホンサルのピンセット使用時の順序学習、第 30 回日本霊長類学会、2014 年 7 月 5 日、「大阪科学技術センター(大阪府・大阪市)」

平井直樹、ニホンサル *Macaca fuscata* の道具使用の学習過程 - 初めて道具を使う時の視覚情報の役割(第 2 報)、第 29 回日本霊長類学会、2013 年 9 月 7 日、「岡山大学(岡山県・岡山市)」

魚谷恭太郎、平井直樹、The process of learning tool-use movements in monkeys: The trajectory learning for target-reaching with hand-held forceps, 第 66 回日本人類学会、2012 年 11 月 4 日、「慶

應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県・横浜市)」

平井直樹、A comparison of grasping objects with the hand and a tool (forceps) in monkeys, 第34回日本神経科学大会、2011年9月17日、「パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)」

平井直樹、Learning process of grasping objects with a tool in monkeys, 第65回日本人類学会、2011年11月6日、「沖縄県立博物館(沖縄県・那覇市)」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平井直樹(HIRAI, Naoki)
杏林大学・医学部・名誉教授
研究者番号：40086583

(2) 研究協力者

本郷利憲(HONOGO Toshinori)
元東京都神経科学総合研究所・所長
研究者番号 60013843

佐々木成人(SASAKI Shigeto)
元東京都神経科学総合研究所・参事研究員
研究者番号：50110490

魚谷恭太郎(UOTANI Kyoutaro)
杏林大学非常勤講師

稲富貴美(INATOMI Takami)
杏林大学実験助手