

# 消滅を伴うトラッキング課題における運動制御と学習

龍谷大学工学部電子情報学科

小堀 聡 阿部 陽祐

トラッキング動作の学習において更新される内部モデルについて考察するため、ターゲットもしくはカーソルが消滅する課題を用いて被験者実験を行い、制御誤差を測定し、学習過程を分析した。ターゲット消滅とカーソル消滅とでは、制御成績や学習において差異が示され、また、ターゲット消滅とカーソル消滅の間の非対称な学習の転移も示された。これらの結果はそれぞれの条件での異なる内部モデルの存在とそれらの内部モデルの階層的な関係を示唆している。

## 1. はじめに

人間が運動を行い、学習する過程においては、運動系や感覚・知覚系などのいくつかの認知系が関わっていると考えられる。そうした運動の制御や学習の研究には、古くからトラッキング課題の実験がよく用いられてきた (Poulton, 1974)。

トラッキング動作において、被験者は操作器を動かして、ディスプレイ上のカーソルをターゲットに合わせてようとする。被験者は、ターゲットとカーソルが離れると、その距離が小さくなるように操作する。つまり、視覚フィードバックによる誤差修正に頼ることになる。

しかし、トラッキング動作は純粹にフィードバック制御だけではなく、予測が関わること示されている。ターゲットの動きが予測可能な場合には制御成績が良くなる (Poulton, 1974) のは当然であるし、さらには、ターゲットやカーソルが表示されず、誤差が検出できないときでさえ、正確な制御ができることもある (Beppu et al., 1987)。

### 1.1 トラッキング課題における内部モデル

こうしたトラッキング動作での予測の問題については、内部モデルの獲得と関連づけられることが多い。内部モデルが存在することを示す研究例はいくつもあるが、近年の研究では、トラッキング課題の学習の前後での脳活動が比較され、その差異は内部モデルの学習の結果として解釈されている。たとえば、今水らは、回転マウスという課題を用いて、新規の感覚運動変換を学習するときの小脳活動を調べる実験を行い、内部モデルを反映すると考えられる脳活動を捉えた (Imamizu et al., 2000)。しかし、彼らの実験方法では、内部モデルの働きと視覚フィードバックの役割を区別

することができない。また、そのような内部モデルが表しているものは何か、どれだけの数のモデルが関わっているのかなどは不明確である。

計算論的に考えるならば、正確なトラッキングには、現在のターゲットの位置とカーソル(手)の位置の表現が必要となる。一般的に、与えられた入力からシステムの出力を推測するモデルを順モデルという。本研究では、トラッキング動作には2種類の順モデルが関わると考えることにした。1つはそれまでの運動の情報に基づいてターゲットの位置を推測するモデルであり、もう1つは運動命令や自己受容感覚フィードバックに基づいて手やカーソルの位置を推測するモデルである。ここでは仮に、前者を視標モデル、後者を運動モデルと呼ぶことにする。

学習はすべての内部モデルにとって、重要な機能である。トラッキング動作における被験者の学習目標は、視標モデルの出力と運動モデルの出力とを一致させることにある。計算論によれば、視覚フィードバックによる誤差は内部モデルを修正するのに使われる重要な学習信号となる (Kawato & Gomi, 1992)。

近年の計算論的研究の例では、モデル学習のためのモジュール構造が示されている (Wolpert & Kawato, 1998; Wolpert et al., 1998)。ところが、それらの構造では、脳は同一で一般的な型のモデルでの多重な信号を学習していると仮定している。しかし、トラッキング動作では、視標モデルと運動モデルでは性質上異なる情報を用いている。それらのモデルは、異なった情報処理の機能を実行している。たとえば、運動モデルは手の位置についての運動命令の結果を参照するのに対して、視標モデルは外部環境の視覚的対象だけを参照する。

## 1.2 消滅を伴うトラッキング課題

トラッキングにおける視標モデルと運動モデルの違いを検討するのに有効な方法として、ターゲット消滅とカーソル消滅の効果を比較するというのが考えられる。ターゲット消滅では、カーソルは見え続けるが、ターゲットが試行途中のある時点で見えなくなるので、被験者はターゲットの動きを予測しながら操作する。逆に、カーソル消滅では、ターゲットは見え続けるが、カーソルは見えなくなる。ターゲットもしくはカーソルが消滅している間も、被験者はしばらくの間は制御を続けることになるが、やがてターゲットもしくはカーソルが再出現する。

ターゲット消滅やカーソル消滅の間はターゲットとカーソルが同時に表示されないので、誤差信号を視覚的に検出することができない。つまり、消滅の間のトラッキング動作は内部モデルのみに頼ることになる。ターゲットが消滅している場合は、ターゲットについての表現は、それまでの動きから現在の位置を予測する視標モデルから得られるものだけである。逆に、カーソルが消滅している場合は、カーソルについての表現は、現在の運動命令や自己受容感覚情報から現在のカーソルの位置を予測する運動モデルから得られるものだけである。

ターゲットもしくはカーソルが消滅していても、それらが再出現すれば、視覚フィードバックによる誤差信号が再び得られる。この誤差信号はターゲット消滅においては視標モデルの、カーソル消滅においては運動モデルの修正・更新に使われるに違いない。被験者が試行を繰り返し行えば、これらのモデルが修正・更新され、消滅を伴うトラッキング課題の制御成績が改善されると考えられる。

## 1.3 ターゲットやカーソルの動きの学習

Grafton et al. (2001) はターゲットの動きの予測を学習する過程を研究した。ターゲットの出現がランダムな順序の場合と予測可能な順序の場合があり、被験者はこれら2つの条件でのトラッキングを交互に実施する。トラッキング誤差の減少により、予測可能な順序で出現するターゲットを学習することが示された。また、PETのデータから、このターゲットの学習は、対側の感覚運動皮質での活動の増加と、同側の小脳皮質での活動の減少に関係していることが示された。しかし、こうした変化は、誤差信号によるものなのか、タ

ーゲットの動きのモデルを学習することに伴うものなのかが不明確である。

ターゲットについての予測と被験者自身の運動出力の予測を明確に区別した研究例は少ない。Beppu et al. (1987) は健常者と小脳疾患患者でのターゲット消滅およびカーソル消滅のトラッキング課題について報告している。彼らはターゲットやカーソルの表示をなくすことにより、視覚フィードバックによる断続的な誤差修正が抑制されることを示したが、ターゲット消滅とカーソル消滅との区別をしていない。一方、Haggard et al. (1995) は、視覚フィードバックによる誤差修正と、ターゲットと手の位置をそれぞれ推測するモデルに基づいて、この2つの誤差修正の過程を区別している。彼らは、ターゲット消滅とカーソル消滅の両方について、小脳患者では断続的なトラッキングが劇的に減少するが、健常者ではその効果が少ないことを示した。さらに興味深いことには、患者の場合では、カーソル消滅において誤差がどんどん蓄積していくことが分かった。彼らは現在の手の位置に関する順モデルという点からこの結果を解釈した。つまり、小脳に障害があると、この内部モデルの出力も障害され、効果的な制御ができなくなるとした。

## 1.4 本研究の目的

本研究では、トラッキング動作の学習において更新される内部モデルについて考察するため、ターゲットもしくはカーソルが消滅する課題を用いることにした。ここでは、特に、ターゲット消滅とカーソル消滅とのトラッキング制御の違いを明らかにすることに焦点を当てている。もしターゲット消滅とカーソル消滅が制御成績や学習において差異を示すならば、ターゲット消滅とカーソル消滅についての異なるモデルの存在を支持する証拠となる。それゆえ、本研究では、ターゲット消滅およびカーソル消滅でのトラッキング誤差を測定し、学習過程を分析する。ここでは、消滅課題は2つの異なる過程に関わると仮定している。すなわち、まず、ターゲットもしくはカーソルが消滅すると、被験者は内部モデルに頼ることになるということ、また、ターゲットもしくはカーソルが再出現すると、視覚フィードバックにより誤差を検出し、フィードバック制御による修正がなされるということ、である。本研究では、この2つの過程を区別したい。さらに、ここでは、学習の転移 (Adams, 1987) を調べることによって、ト

ラッキング動作の学習に関わる視標モデルと運動モデルの関係について考察する。

## 2. 方法

### 2.1 実験システム

図 1 に示した実験システムは、市販のパーソナルコンピュータ (デル : Dimension 4100, PentiumIII 1GHz, 128MB, 40GB, Windows 98SE) とディスプレイ (エプソン : 15 型 TFT 液晶ディスプレイ LCV-15MAT, 1024×768 画素), ジョイスティック (サンワサプライ : トラックボール TB-350PS), トラッキング動作測定ソフトウェアで構成されている。これらのうち, ジョイスティックは, 市販のトラックボールにスティックを取り付けたものを用いた。また, トラッキング動作測定ソフトウェアは, 独自に開発したものであり, 制御値データとしてディスプレイの座標値 (x 軸方向および y 軸方向, 単位は画素数) がサンプリング周波数 30Hz で得られる。

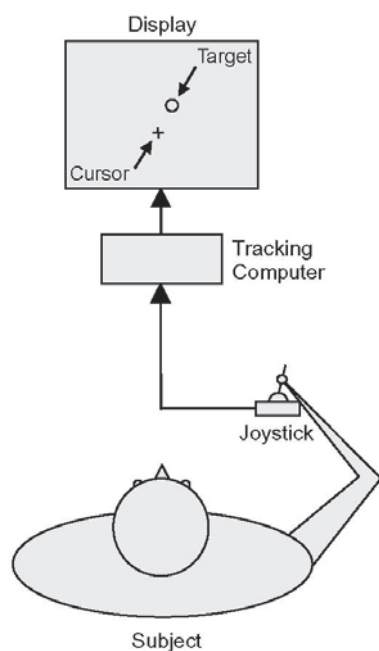


図 1 実験システム

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験課題

トラッキング課題として, ディスプレイ上を動くターゲットをカーソルで追従する動作を行わせる。目標値を示すターゲットは直径 44 画素 (13mm) の円で, 制御値を示すカーソルは一辺 44 画素 (13mm) の十字で表示される。ターゲットはあらかじめ作成, 保存された目標値データに

基づき, 直径 500 画素 (148mm) の円周上で規則的な運動 (周期は 5 s) を繰り返す。一方, 十字のカーソルは, ジョイスティックで制御される。視距離は 66cm である。

実験の課題には, ターゲット消滅とカーソル消滅の 2 種類があり, それぞれ, ターゲットもしくはカーソルが, ある時間だけ表示されない。本実験では, いずれも 1 回の試行時間は 20s で, ターゲットやカーソルは, 試行開始後 5s から 7s までの時刻において消滅し, 11s から 13s までの時刻に再び出現するように設定した。なお, 消滅と再出現の時刻は, それらの範囲内でランダムに決定されるようになっている。被験者には, 「ジョイスティックを操作して, 十字のカーソルをできるだけ正確にターゲットに合わせるようにしなさい。消滅している間もできる限り最善を尽くしなさい。」という指示を与えた。

### 2.2.2 被験者

19 歳から 24 歳までの健常な大学生 20 名 (男性 10 名, 女性 10 名) を被験者とした。実験に先立ち, 被験者には実験に関する調査票に記入をさせた。質問項目は, 年齢, 学部・学科・学年の他, 利き手と視力に関することであり, 利き手についてはペンを持つ, 箸を使う, ボールを投げるなどが異なるかどうか, 視力については眼鏡やコンタクトレンズの使用の有無についても尋ねた。その結果, すべての被験者について, 利き手は右であること, また, 裸眼もしくは眼鏡・コンタクトレンズの使用により, 本実験を行うのに十分な視力 (両眼で 0.7 以上) を有していることを確認した。

### 2.2.3 実験条件

被験者 20 名を, T-C 群と C-T 群の 10 名ずつ (男女 5 名ずつ) の実験群に分けた。ここでは 5 回の試行を 1 ブロックとし, 実験は, テスト前 (pre-test) ブロック, 学習ブロック, テスト後 (post-test) ブロック, 転移ブロックから構成される。どちらの実験群でも, テスト前ブロックとテスト後ブロックでは, 通常課題 (試行途中で消滅の起こらない課題) をそれぞれ 1 ブロックずつ実施した。また, それぞれの実験群において, 学習ブロックと転移ブロックとでは, 異なる種類の消滅課題を実施した。すなわち, T-C 群では, 学習ブロックはターゲット消滅を 6 ブロック, 転移ブロックはカーソル消滅を 2 ブロック, それとは逆に, C-T 群では, 学習ブロックはカーソル消滅を 6 ブロック, 転移ブロックはターゲット消滅を

2ブロック, となる. 実施に際しては, 各ブロックの間に約1分程度の休憩を挿入し, 被験者が疲労しないように心がけた. なお, 実験の総測定時間は約40分である.

### 3. 結果

#### 3.1 誤差データの波形

各試行における消滅と再出現の時刻をそれぞれの基準 (0s) とし, 目標値データと制御値データからそれらの2次元絶対誤差データ (以下, 単に誤差データ, 単位は mm) を算出する. 消滅および再出現について, それぞれ-4.0s から 4.0s までの範囲において, ブロックごとにすべての試行 (5試行×被験者 10名) を同期加算し, 平均した波形を実験群別に描いた. ここでは, 学習ブロックについてのみ図2に示した.

図2より, 次のようなことが分かる.

- 1) いずれの実験群においても, 誤差は消滅までは小さく, 通常課題の誤差とは違いはない.
- 2) 消滅後, 再出現の直後まで誤差は少しずつ単調に増加していく. カーソル消滅の方が, 消滅からしばらくの間の増加は急である. 誤差は再出現の直後から急速に減少し, 消滅前のレベルに戻る.

3) 最も重要なことは, 消滅している間の誤差は, 学習ブロックによって変化するということがある. ターゲット消滅では, 学習ブロック1~3の誤差は, 学習ブロック4~6までと比べて明らかに大きい. それに対して, カーソル消滅では学習ブロックによる違いは見られるものの, その違いはそれほど明確ではない.

#### 3.2 平均誤差増加値の算出

誤差データの波形から誤差の増加の特徴を示す範囲を定め, 評価値を算出する. その結果, 消滅の時刻を基準として, -1.0s から 0s までの誤差データの平均を基線とし, 消滅の時刻から再出現の時刻の 2.0s 後までの誤差データの平均と基線との差分を試行ごとに算出し, それを平均誤差増加値 (単位は mm) と定義し, 制御成績の評価に用いることにした.

ここで, この評価値についての学習効果を調べるために, 実験群 (T-C 群, C-T 群) とブロック (学習ブロック1, 学習ブロック6) を要因とした分散分析を行い, 学習ブロック1と学習ブロック6での平均誤差増加値の比較を行った. その結果, まず, ブロックによる主効果が見られ ( $F(1,18) = 11.514, p = 0.003$ ), 学習ブロック1よりも学習

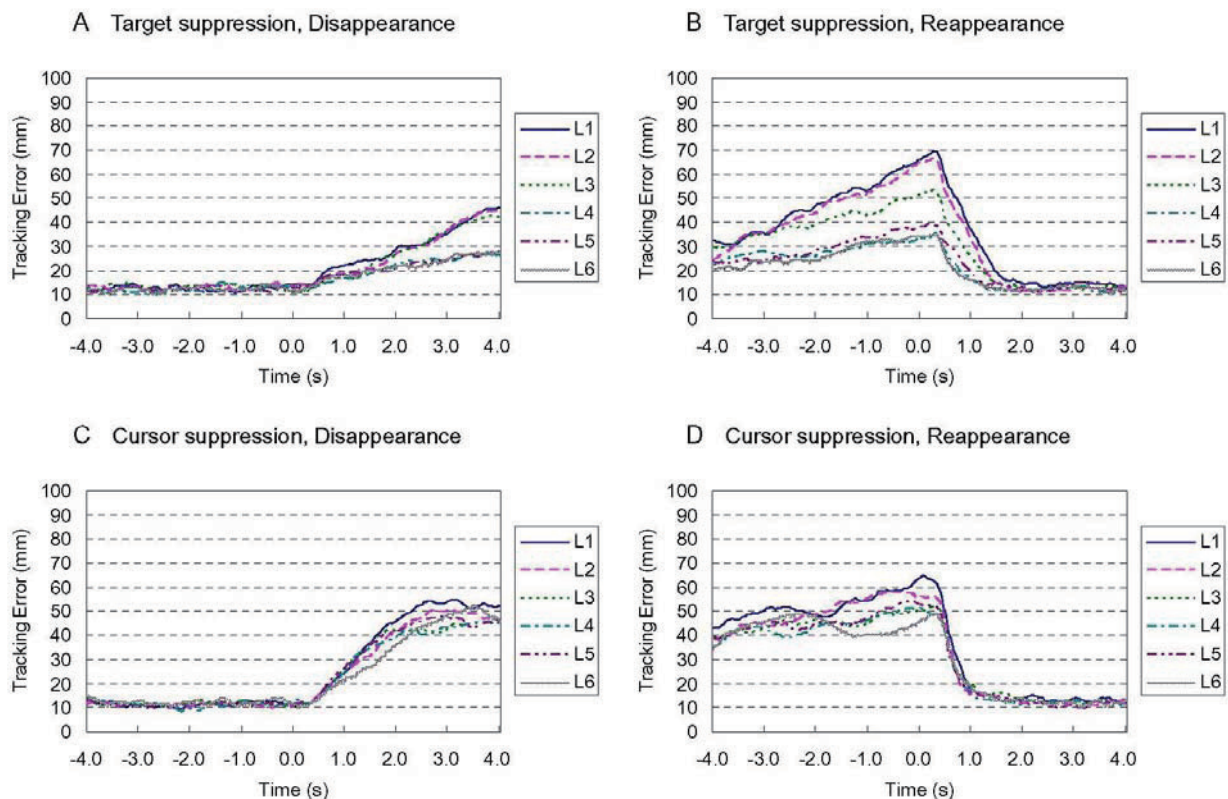


図2 学習ブロックごとの誤差データの同期加算平均波形

ブロック6が有意に小さいことが示された。また、実験群による差はなく ( $F(1,18) = 3.701, p = 0.070$ ), 交互作用もなかった ( $F(1,18) = 1.859, p = 0.190$ )。すなわち、いずれの実験群においても消滅課題に対して学習効果が認められた。

### 3.3 学習の転移

平均誤差増加値について、実験群 (T-C 群, C-T 群) とブロック (学習ブロック, 転移ブロック) を要因とした分散分析を行った。その結果、まず、実験群については、C-T 群が T-C 群よりも制御成績が優れるという有意傾向が示された ( $F(1,18) = 4.188, p = 0.056$ )。また、ブロックについては、転移ブロックの方が学習ブロックよりも有意に制御成績がよく ( $F(1,18) = 0.401, p = 0.021$ )、全体として、有意な学習の転移が見られた。さらに、もっとも重要な点として、明確な交互作用が認められた ( $F(1,18) = 11.341, p = 0.003$ )。そこで、この交互作用について下位検定を行った (図3)。その結果、T-C 群、すなわち、先にターゲット消滅を学習し、あとでカーソル消滅を学習した実験群では、有意な転移が見られなかったが ( $t(18) = 0.001, n.s.$ )、それに対して、C-T 群、すなわち、先にカーソル消滅を学習し、あとでターゲット消滅を学習した実験群では、有意な正の転移が認められた ( $t(18) = 2.460, p = 0.024$ )。

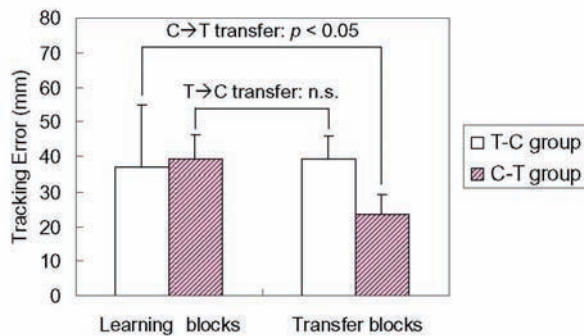


図3 学習の転移

## 4. 考察

### 4.1 視覚運動学習における予測モデル

本研究では、視覚運動制御における2種類の予測モデルを検討する方法として、ターゲットもしくはカーソルの消滅を伴うトラッキング課題を用いた。ターゲットやカーソルを表示させなくすることは視覚フィードバックによる誤差修正の可能性を排除し、被験者に予測的表現だけに基づいて制御を続けることを要求する。ターゲット消滅では、カーソルは手の位置に関する視覚的情報を与

え続けているのに対して、被験者はターゲットの現在の位置を予測しなければならない。カーソル消滅では、ターゲットは視覚的に示されているが、被験者は手の位置の情報からカーソルの位置を推測・予測しなければならない。

実験結果より、両方の実験条件において、消滅している間について誤差の減少が見られることから、明確な学習効果が認められた。ターゲットやカーソルが消滅している場合は、フィードバックによる誤差修正が不可能であるので、消滅課題での制御成績の改善は、ターゲットの動きや被験者自身の手の動きについての内部表現を学習したと考えられる。多くのトラッキングの研究によりトラッキング動作における運動学習は本質的に予測的であるということが示されている (Craig, 1947)。それゆえ、トラッキングの制御成績が改善されたことは、被験者が予測することを学び、練習することで予測が改善されたからであるといえる。

### 4.2 2種類の予測モデルと学習の転移

ターゲット消滅とカーソル消滅という2つの消滅課題を用いることにより、ターゲットについての学習と被験者自身の動きについての学習を明確に区別することができる。ここでの重要な疑問は、2つの異なる内部モデル (1つはターゲットの動きについてのモデル、もう1つは被験者自身の手の動きについてのモデル) をどのように用いて制御しているのか、またどのように学習しているのか、であり、さらに、2つのモデルの関係はどうなっているのか、である。ここでは、これらの問題に対して学習の転移について調べることで対処した。

その結果、被験者自身の手の動きについての学習から、ターゲットの動きについての学習への明確な転移が示されたが、その逆には転移はなかった。このことは2つの重要なことを示唆している。1つは、運動制御についての内部モデルを学習することと、外界の事象を一般的に予測する過程は明確に異なるということである。もう1つは、視覚運動制御は階層的な構造になっていることを示唆しているということである。すなわち、被験者がカーソル消滅のトラッキングをしている際には、被験者自身の手の動きの運動モデルを学習しているが、この内部モデルの獲得は、同時に外部環境の純粋に知覚的な事象についての学習も含んでいる。なぜならば、被験者がターゲットの動きにつ

いての内部モデルを持っていることが求められる, のちのターゲット消滅のトラッキングで, うまく制御ができたからである. それとは逆に, 被験者がターゲット消滅のトラッキングをしている際には, ターゲットの動きの知覚的な予測をする視標モデルを学習しているが, この内部モデルの獲得は, 被験者自身の運動制御についての学習を支援しない. なぜならば, 被験者が運動モデルを持っていることが求められる, のちのカーソル消滅のトラッキングでは, うまく制御できなかつたからである. 基本的な内部モデルの観点からすれば, 運動学習には外部の知覚学習を含んでいる, もしくは, 少なくとも知覚学習を一般化している, ということ推察される. 逆に, 外部環境の知覚学習は, 運動学習とは明確に異なる性質のものであると考えられる.

## 5. おわりに

本研究で示された, ターゲット消滅とカーソル消滅の間の非対称な学習の転移は, それぞれの条件での異なる内部モデルの存在とそれらの内部モデルの階層的な関係を示唆している. また, 運動学習と知覚学習の関係についても興味深い結果が示された.

心理学の理論は受動的な知覚から相互作用的な知覚へとパラダムシフトしている (Goodale & Milner, 1992; Wexler & van Boxtel, 2005). 本研究の結果から, 自分自身の動きの内部表現についての学習は, 外部の知覚世界の学習に重要な役割を果たしていることが示唆される.

## 謝辞

本研究は2004年度 龍谷大学国外研究員として, ロンドン大学認知神経科学研究所 (University College London, Institute of Cognitive Neuroscience) で研究を行った期間にまとめられたものです. 関係者の方々, 特に Patrick Haggard 教授に感謝申し上げます. また, 本稿について有益なコメントを下さった査読者の方々にも御礼申し上げます.

## 参考文献

- Adams, J. A. (1987). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, 101, 41-74.
- Beppu, H., Nagaoka, M., & Tanaka, R. (1987). Analysis of cerebellar motor disorders by visually guided elbow tracking movement, 2. Contribution of the visual cues on slow ramp pursuit. *Brain*, 110, 1-18.
- Craik, K. J. W. (1947). Theory of the human operator in control systems: I. The operator as an engineering system. *British Journal of Psychology*, 38, 56-61.
- Grafton, S. T., Salidis, J., & Willingham, D. B. (2001). Motor learning of compatible and incompatible visuomotor maps. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 217-231.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15, 20-25.
- Haggard, P., Miall, R. C., Wade, D., Fowler, S., Richardson, A., Anslow, P., & Stein, J. (1995). Damage to cerebellocortical pathways after closed head injury: a behavioural and magnetic resonance imaging study. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 58, 433-438.
- Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2000). Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature*, 403, 192-195.
- Kawato, M., & Gomi, H. (1992). A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error-learning. *Biological Cybernetics*, 68, 95-103.
- Poulton, E. C. (1974). *Tracking skill and manual control*. New York, Academic Press.
- Wexler, M., & van Boxtel, J. J. A. (2005). Depth perception by the active observer. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 431-438.
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11, 1317-1329.
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 338-347.