

## 感覚運動学習を可能にする中枢神経機構

～ 計算理論，行動実験，脳機能非侵襲計測からのアプローチ～

2000 年度 2001.2.7 2.9 神戸大学集中講義

今水 寛 (imamizu@erato.atr.co.jp)

第 1 日目 2 月 7 日 (水) 内部モデルと軌道計画

午前：感覚運動学習と内部モデル

内部モデルの概念，内部モデルの必要性，さまざまな内部モデル，内部モデル理論と行動実験

午後：運動軌道計画～理論と行動実験

軌道は予め計画されているか？，軌道計画の最適化モデル，行動実験による理論の検証

第 2 日目 2 月 8 日 (木) 行動実験による感覚運動学習へのアプローチ

午前～午後：感覚運動学習を可能にする内部モデルの座標系

さまざまな感覚運動学習実験，両手間転移，外部座標の変換実験，身体座標の変換実験，学習レベルの多様性，運動情報の内部表現

午後：感覚運動学習を可能にする内部モデルの表現・構成方法

structured representation, tabular representation, connectionist representation, 学習の汎化, モジュール学習

第 3 日目 2 月 9 日 (金) 脳機能非侵襲計測による感覚運動学習へのアプローチ

午前：機能的磁気共鳴画像 (fMRI) 装置内で行う心理実験

(f)MRI の原理，周辺機器，fMRI 実験デザイン，脳機能画像の統計解析

午後：人間の脳に構成される新しい道具の内部モデル

内部モデル理論と小脳，脳機能非侵襲計測と小脳，内部モデルを反映する信号，多重内部モデルと内部モデルの切り替え

文献一覧

第1日目 内部モデルと軌道計画

午前：感覚運動学習と内部モデル

Flanagan, J. R., & Wing, A. M. (1997). The role of internal models in motion planning and control: evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. *J Neurosci*, 17(4), 1519-1528.

Gomi, H., & Kawato. (1996). Equilibrium-point control hypothesis examined by measured arm stiffness during multijoint movement. *Science*, 272(5258), 117-120.

Johansson, R. S., & Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Exp Brain Res*, 56(3), 550-564.

川人光男 脳の計算理論, 産業図書, 東京 (1996)

Kawato (1999) *Curr Opin Neurobiol*, 9, 718-727

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882.

第1日目 内部モデルと軌道計画

午後：運動軌道計画～理論と行動実験

Bizzi, E., Acconero, N., Chapple, W. & Hogan, N. (1984) Posture control and trajectory formation during arm movement. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 4, No. 11, 2738-2744.

Flash, T. & Hogan, N. (1985) The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, 1688-1703.

Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695), 780-784.

川人光男 脳の計算理論, 産業図書, 東京 (1996)

Morasso, P. (1981) Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, No. 42, 223-227

Nakano, E., Imamizu, H., Osu, R., Uno, Y., Gomi, H., Yoshioka, T., & Kawato, M. (1999). Quantitative examinations of internal representations for arm trajectory planning: minimum commanded torque change model. *J Neurophysiol*, 81(5), 2140-2155.

Osu, R., Uno, Y., Koike, Y., & Kawato, M. (1997). Possible explanations for trajectory

curvature in multijoint arm movements. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 23(3), 890-913.

Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *J Neurosci*, 14(5 Pt 2), 3208-3224.

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

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1993) On the role of extrinsic coordinates in arm trajectory planning: Evidence from an adaptation study. MIT Computational Cognitive Science Technical Report, No. 9308,

## 第2日目 行動実験による感覚運動学習へのアプローチ

午前・午後共通

Atkeson, C. G. (1989) Learning arm kinematics and dynamics, *Annual Review of Neuroscience*, No. 12, 157-183.

Cunningham, H. (1989) Aiming error under transformed spatial mappings suggests a structure for visual-motor mappings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 15, No.3, 439-506.

Imamizu, H., & Shimojo, S. (1995). The locus of visual-motor learning at the task or manipulator level: implications from intermanual transfer. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 21(4), 719-733.

Imamizu, H., Uno, Y., & Kawato, M. (1995). Internal representations of the motor apparatus: implications from generalization in visuomotor learning. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 21(5), 1174-1198.

Imamizu, H., Uno, Y., & Kawato, M. (1998). Adaptive internal model of intrinsic kinematics involved in learning an aiming task. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 24(3), 812-829

Ghahramani, Z., & Wolpert, D. M. (1997). Modular decomposition in visuomotor learning. *Nature*, 386(6623), 392-395.

Kalaska, J. F., Caminiti, R., & Georgopoulos, A. P. (1983). Cortical mechanisms related to the direction of two dimensional arm movements: Relations in parietal area 5 and comparison with motor cortex. *Experimental Brain Research*, 51, 247-260.

Lackner, J. R., & Dizio, P. (1994). Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm

trajectory. *J Neurophysiol*, 72(1), 299-313.

Lacquaniti, F., Guigon, E., Bianchi, L., Ferraina, S., & Caminiti, R. (in press).

Representing spatial information for limb movement: Role of area 5 in the monkey.  
Cerebral Cortex.

Soechting, J. F. & Flanders, M. (1989) Sensorimotor representation for pointing to  
targets in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, Vo. 62, 582-94.

Welch, R. B. (1978) *Perceptual Modification*. New York: Academic Press

### 第3日目 脳機能非侵襲計測による感覚運動学習へのアプローチ

午前・午後共通

Allen, G., Buxton, R. B., Wong, E. C., & Courchesne, E. (1997). Attentional activation of  
the cerebellum independent of motor involvement. *Science*, 275(5308), 1940-1943.

Flament, D., Ellermann, J. M., Kim, S. G., Ugurbil, K., & Ebner, T. J. (1996). Functional  
magnetic resonance imaging of cerebellar activation during the learning of a  
visuomotor dissociation task. *Human Brain Mapping*, 4(3), 210-226.

Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Putz, B., Yoshioka, T., &  
Kawato, M. (2000). Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model  
of a new tool. *Nature*, 403(6766), 192-195.

ポスナー, レイクル (養老他訳) 脳を観る 日経サイエンス社

- ・ 感覚運動変換 / 感覚運動学習

研究対象

外部世界      感覚受容器      脳      筋骨格系      外部世界

研究方法

計算理論, 行動実験, 脳機能非侵襲計測

- ・ 内部モデル理論

内部モデルの概念

弾道運動・開ループ制御・フィードフォワード制御

(修正運動・閉ループ制御・フィードバック制御)

仮想軌道制御仮説

運動中のスティフネス計測

さまざまな内部モデル 直接順逆

順モデル・逆モデル

フィードバック誤差学習 (逆モデルの獲得方法)

内部モデルの存在を示唆する行動実験

Wolpert, Flanagan

内部モデルと小脳 (非侵襲計測部分と重なる)

- ・ 運動軌道計画

軌道は計画されているか

躍度最小

トルク変化最小

中野 JNP

Harris & Wolpert

- ・ 視覚運動学習 ~ 行動実験からのアプローチ

変換学習のいろいろ

キネマティクス プリズム

ダイナミクス コリオリカ, マニピュランダム

両手間転移 JEP

Generalization JEP

Intrinsic Kinematic Model JEP

Flanagan JN

・視覚運動学習～脳機能非侵襲計測からのアプローチ

小脳の神経生理学と計算論モデル

(f)MRIの撮像原理，実験方法，解析方法

Nature / Multiple Model / Mouse beginner

最近の小脳非侵襲計測（注意，ワーキングメモリ，言語）レビュー

<基礎知識>

キネマティクス / ダイナミクス