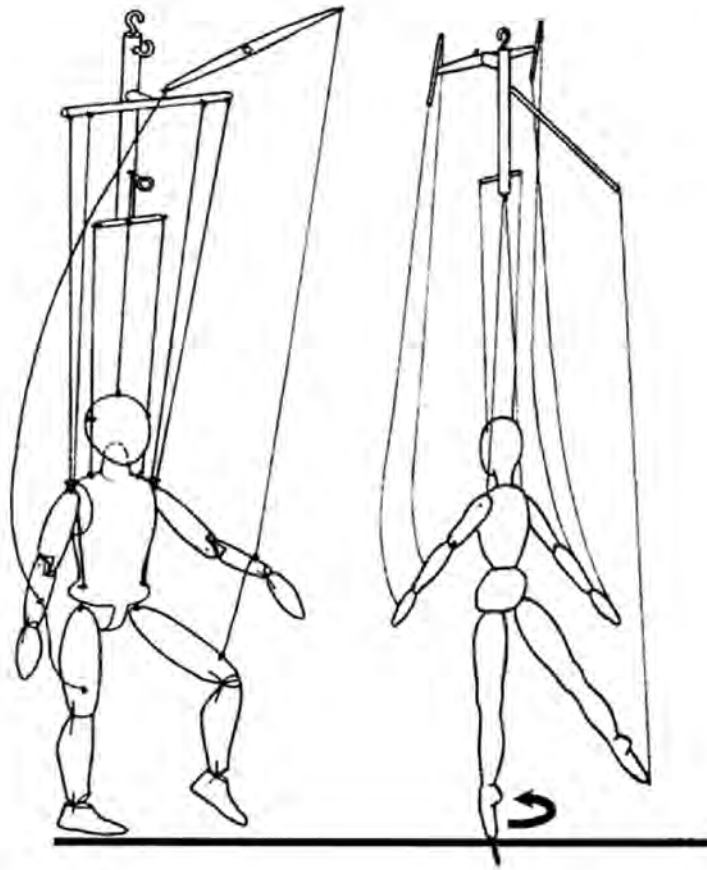


生理学研究所
第4回 Motor Control 研究会



27-29 May 2010
OCC
Okazaki

第4回 生理学研究所「Motor Control 研究会」

日時:平成22年5月27日(木) 16:00 - 22:30

5月28日(金) 8:30 - 18:30

5月29日(土) 8:45 - 15:00

場所:自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター (OCC)

提案代表者: 関 和彦(国立精神神経医療研究センター)

第4回世話人: 内藤栄一(NICT/ATR)

所内対応者: 伊佐 正(生理研・認知行動)

参加者へのご案内

- 1.参加費: 3000円(一般)
2000円(一般・運営ボランティア)
2000円(学生)
1000円(学生・運営ボランティア)
(含昼食代、Get-Together Party代、お茶代、諸経費)
- 2.参加受付:OCC 正面ホールで受け付けます。
ネームカードをお受け取りください。
(できるだけ27日16:00-17:00にお願いします。)
- 3.懇親会: 3000円(学生・院生)
5000円(PD)
6000円(一般)
参加者:102名
場所:魚光 岡崎市稲熊町字山神戸 6-6
Tel 0120(15)0173
- 4.クローク: クロークは設けません。
- 5.昼食 両日とも弁当を参加者人数分用意いたします。

発表者へのご案内

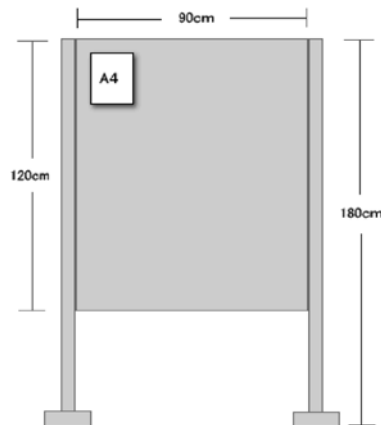
口演発表とポスター発表、両方を行っていただきます(シンポジウムは除く)。

口演

- 1.使用言語: 日本語または英語
- 2.発表時間: 1分(発表時間は厳守してください)。
- 3.討論時間: 1演題につき1分の討論時間を設けます
(セッション毎にまとめて:4演題なら4分)
- 4.スライド: 事前にご提出いただいたPDF1枚を説明してください。

ポスター

- 1.使用言語：日本語または英語。
- 2.パネルサイズ：幅 90cm x 高さ 120cm（下図参照）
- 3.貼付時間：27 日受付時、または 28 日の研究会開始前までに掲示。
- 4.場所指定：指定された場所に掲示をお願いします。画鋏は用意いたします。
- 5.発表日・時間：口演と同日
（eg.口演 1 の発表者はポスターセッション 1）
発表時間中はポスター前で待機してください。
- 6.画鋏：画鋏は用意いたします。
- 7.撤収：ポスターは各自必ずお持ち帰りください。残されたものは破棄します。



優秀発表賞

「優秀発表賞」を発表者の方に選んでいただきます。全演題(シンポジウムを除く)の中から5演題を選択・投票していただきます。投票は 29 日のポスターセッションの最後に行い、研究会最後に結果を発表いたします。投票用紙は受付時にお渡しします。

例えば、以下のような発表をお選びください

1. 口演・ポスターを通じて、発表内容がよく理解できた演題
2. その内容が運動制御の研究に直接大きな貢献をされると思われる演題
3. 現在は未完成であるが、将来的に運動制御研究に貢献大と思われる演題。

例えば、このような基準での投票はお控えください

1. プレゼンテーションのインパクトだけを基準にした投票
2. 用いられている方法論の斬新さだけを基準にした投票
3. 発表者の知名度にバイアスのかかった投票
4. ご自分の研究分野のみを評価対象とした投票

第 4 回 MC 研究会日程詳細

////////////////////////////////////

5 月 27 日 受付開始 16:00 (できる限り 27 日に参加受付をお済ませください。ポスター貼り付けも特別講演開始までにできるだけお願いします。)

17:00-19:00

特別講演

理化学研究所 脳科学総合研究センター 特別顧問 伊藤正男先生
「神経系の回路構造に運動系の基本的な設計をどう読み取るか？」

花束贈呈 伊澤佳子 先生

集合写真撮影

19:30-21:15 Get together パーティー

21:30 パーティー完全撤収ですが、22:30 まで会場は開いておりますので、poster での議論もお楽しみください(強制ではありません)。ポスター貼り付けまだの方は、この時間をお願いします。

////////////////////////////////////

5 月 28 日の受付開始 8:30

5 月 28 日 8:40-10:00

チュートリアルレクチャー 「これだけは最低理解しておきたい運動制御研究に必要な計算神経科学 理論の基礎と物の考え方」

講師

東京大 野崎大地先生 「運動系の冗長性はどのように解消されるか？ー最適化によるアプローチー」

東工大 小池康晴先生 「運動計画と運動学習ー運動制御の観点からー」

ATR 大須理英子先生 「運動学習をモデルで考えよう」

5 月 28 日 10:00-10:15 ブレイク

5 月 28 日 10:15-11:15

口演1 1-min talk(座長:星英司 玉川大学)

5 月 28 日 11:15-12:00 昼食 (お済みの方からポスターへ)

5 月 28 日 12:00-14:00 ポスター 口演1の発表者はポスター発表義務

5 月 28 日(金) 14:10-17:05

特別シンポジウム「神経系による運動制御研究の最前線」お一人につき簡単な質疑応答を含む 25 分発表

座長 順天堂大学 北澤茂先生

14:10-15:25

旭川医大 高草木薫先生 「脳幹と脊髄の筋緊張制御系による運動の制御」

生理学研究所 伊佐正先生 「膝状体外視覚系による視覚運動変換機構」

都神研 寛慎治先生 「大脳小脳連関における小脳の機能的意義」

15:25-15:30 ブレイク

15:30-17:05

生理学研究所 南部篤先生 「情報の表現から情報の流れへ」
 弘前大学医学部 蔵田潔先生 「弓状溝周辺皮質における眼と手の到達運動制御」
 東北大学医学部 虫明元先生 「動的情報表現と行動制御」
 総合討論(20分) 進行 北澤茂先生 「MotorControl 研究の短期、中期、長期的ゴール」

5月28日 17:05-17:15 ブレイク

5月28日 17:15-18:30

公募シンポジウム1

提案者 NICT/ATR Dr. Ganesh Gowrishankar
 タイトル "Motor Control: in Humans, for Robots"
 演者

MCR, ATR Dr. Nobuhiro Hagura

「How kinesthetic information can contribute for visual perception in humans」

NICT/ATR Dr. Ganesh Gowrishankar

「Learning soft manipulation from humans」

CCC, ATR Mr. Emre Ugur

「Action planning based on learned affordances」

NAIST Dr. Takamitsu Matsubara

「Learning stylistic models of human motion sequences for humanoid robotics: High-accuracy on-line prediction and stylistic dynamic movement primitives」

5月28日 18:30(市内の会場へバスで移動し、懇親会。2次会あり。
 Have a nice evening, but don't drink too much !)

////////////////////////////////////

5月29日 8:45-9:45

公募シンポジウム2

提案者 筑波大学 西丸広史 先生
 タイトル「運動制御回路を構成するニューロンの機能解析」

演者

生理研 木村有希子先生 「ゼブラフィッシュを用いた脊髄運動系神経回路の機能解析」

筑波大 西丸広史先生 「マウス脊髄反回抑制回路制御のシナプス基盤」

東京大 松崎政紀先生 「マウス大脳皮質運動野のニューロン活動の光制御」

5月29日 9:45-10:00 ブレイク

5月29日 10:00-11:00

口演2 1-min talk(座長:伊澤佳子 東京医科歯科大学)

5月29日 11:00-12:00 昼食 (お済みの方からポスターへ)

5月29日 12:00-15:00 ポスター 口演2の発表者はポスター発表義務

5月29日 15:00 閉会式、優秀発表賞 (お疲れさまでした。来年も更にすばらしい発表をお待ちします。またお会いしましょう!)

////////////////////////////////////

一般口演プログラム

5月28日

口演 1 (1-min talk 厳守をお願いします。)

小脳・制御モデル

1. 運動記憶痕跡の小脳皮質から核への移動に皮質のタンパク質合成は必要である

岡本武人^{1,2}、白尾智明¹、永雄総一² (1 群馬大学大学院・神経薬理、2 理研脳センター・運動学習制御研究チーム)

2. 小脳から大脳皮質背側運動前野への入力様式

橋本雅史、高原大輔、平田快洋、井上謙一、宮地重弘、南部篤、丹治順、高田昌彦、星英司 (玉川大・脳研、京大・霊長研・分子生理・統合脳システム、京大・霊長研・行動神経・高次脳機能、生理学研究所・生体システム研究部門)

3. 両手運動における大脳小脳連関の変調

荒牧勇、河内山隆紀、大須理英子、野崎大地 (名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター、ATRプロモーションズ脳活動イメージングセンター、ATR脳情報研究所運動制御機能回復研究室、東京大学大学院教育学研究科)

質疑応答 3分(発表者は速やかに登壇)

4. プリズム順応の学習と消去の時間経過 —「速い学習系」と「遅い学習系」で説明できるのか?—

井上 雅仁、内村 元昭、苅部 綾香、北澤 茂 (順天堂大学医学部生理学第1講座)

5. 視覚運動変換学習の誤差フィードバックに最適なタイミングは運動終了時か課題終了時か?

阪口豊、石川拓海 (電通大院・情報システム学)

6. 指標追跡運動における2つの並列制御器の分離とその機能の検証

李 鍾昊、戸松彩花、笥 慎治 (東京都医学研究機構・東京都神経科学総合研究所・認知行動研究部門)

7. 運動中に時間変化するフィードバックゲイン

植山祐樹、宮下英三 (東工大院・総理工・知能システム、東工大院・総理工・知能システム)

8. 運動学習における報酬予測誤差と感覚予測誤差の役割

井澤淳、Reza Shadmehr (電気通信大学、Johns Hopkins University)

質疑応答 5分(発表者は速やかに登壇)

学習機能促進と可塑性

9. 時間推定能力はタイミング予測を要する運動課題の訓練で向上する

角田吉昭、笥慎治、永雄総一 (理研・運動学習制御、東京都神経研・認知行動)

10. ヒト背側運動前野への経頭蓋直流電気刺激で、並列反応選択課題のパフォーマンスを向上させる

鈴木裕輔、内藤栄一 (NAIST・情報、ATR-CMC, NICT Bio-ICT Group, 大阪大院・医)

11. 間欠的な視覚フィードバックによる周期運動学習の促進

池上剛、平島雅也、大須理英子、野崎大地 (ATR、東大院・教・身体、NICT)

12. 運動前短時間の感覚刺激による技能学習の停滞状態からの脱却

上原信太郎、南部功夫、戸松彩花、鈴木裕輔、李鍾昊、笥慎治、内藤栄一 (京大院・人環・共生人間)

/日本学術振興会、NICT、東京都神経研・認知行動、NAIST・情報、東京都神経研・認知行動、東京都神経研・認知行動、NICT(ATR)

13. ヒト運動野の可塑性に対する情動の影響

小金丸聡子^{1,2}、美馬達哉¹、道免和久²、福山秀直¹（京都大・医、兵庫医科大・高次神経制御系リハビリテーション科学）

質疑応答5分(発表者は速やかに登壇)

全身運動・四肢運動協調

14. 着地からのジャンプにおける下肢・体幹の筋活動パターン

飯田祥明、稲葉優希、中澤公孝、金久博昭（東京大学総合文化研究科、東京大学総合文化研究科、東京大学総合文化研究科、鹿屋体育大学）

15. 熟練度が全身リズム動作中の共収縮レベルに及ぼす影響

三浦哲都、工藤和俊、大築立志、中澤公孝（東京大学大学院 総合文化研究科）

16. 空間位置を音階で定義した音によるトラッキング運動 -競泳ドルフィンキックの場合-

下門洋文、市川浩、椿本昇三、高木英樹（筑大院・人間総合・体育科学、国立スポーツ科学センター）

17. プリズム適応における学習と記憶保持特性に与える重力の影響

加島崇史、和田佳朗、桑田成雄、平田豊（中部大院・工・情報工学、奈良県立医科大・医・医、航空自衛隊・航空医学実験隊、中部大院・工・情報工学）

18. 落下タイミングの予測で反射的活動は抑制されるか？

須田悠紀、北澤茂、米田継武（順天堂大院）

19. 運動指令の違いが同側二肢協調動作の安定性に与える影響

中川剣人、田代哲朗、村岡哲郎、坂本将基、彼末一之（早稲田大学大学院スポーツ科学研究科、日本大学経済学部、早稲田大学スポーツ科学学術院）

20. 脚関節間協調に注目した歩行運動の解析

垣内田翔子、橋爪善光、西井淳（山口大院・理工）

質疑応答 7 分(発表者は速やかに登壇)

認知運動

21. 運動イメージによる転移

雨宮薫、小嶋祥三（東大院・医・脳神経医学、慶應・人文GCOE）

22. 物体への接触が運動イメージ中の皮質脊髄路の興奮性に及ぼす影響

水口暢章、坂本将基、村岡哲郎、中川剣人、中田大貴、彼末一之（早大院スポーツ科学、日本学術振興会、早大スポーツ科学、日大経済）

23. 視覚-運動連合学習には視覚情報に対するセルフエージェンシーが必要である

廣瀬智士、小原一樹、内藤栄一、松村道一（情報通信研究機構、京大院・人・環、ATR-CMC,DCN、大阪大院・医）

24. 観察学習中の一次運動野の活動変化

森山倫良、水口暢章、坂本将基、彼末一之（早稲田大学、スポーツ科学学術院）

25. 幻肢の状態を客観的に捉える方法

河島則天（国立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）

26. 聴覚フィードバック情報に基づく到達運動のオンライン修正
藤井進也、平島雅也、野崎大地（東大院・教育・身体教育学）

27. 聴覚運動統合の神経機構：手指による音高操作に関与する皮質領域
橋亮輔、柳田 益造、力丸 裕（同志社大・院・生命医科、同志社大・院・理工、同志社大・院・生命医科）

質疑応答 7 分(発表者は速やかに登壇)

5 月 29 日

口演 2（1-min talk 厳守をお願いします。）

眼球運動から行動発現まで

28. 前頭眼野による急速眼球運動および滑動性眼球運動の抑制
伊澤佳子（東京医歯大院・医・神経生理）

29. 眼球運動学習中のサル大脳皮質の神経活動
大藤智世、竹村文（筑波大院・人間総合科学・感性認知脳科学、産総研・ヒューマンライフテクノロジー・システム脳科学）

30. 短潜時の修正運動制御に学ぶ
竹村文、安部川直稔、河野憲二、五味裕章（（独）産総研・ヒューマンライフテクノロジー・システム脳科学、NTT・CS研、京大院・医学研究科・認知行動脳科学、NTT・CS研）

31. ラットにおける上丘両側性破壊による自発運動への影響
長谷川良平、野田康剛、長谷川由香子（産総研・ヒューマンライフテク・ニューロテク）

32. 複数ニホンザルにおける上肢運動の無意識的な同調
長坂泰勇、Zenas C. Chao、長谷川有美、能登谷智則、藤井直敬（理研・BSI・適応知性研究チーム）

質疑応答 5 分(発表者は速やかに登壇)

歩行

33. トレッドミル歩行およびその経験がトレッドミル上での視知覚に及ぼす影響
谷部好子、渡辺はま、多賀巖太郎（高知工科大学総合研究所、東京大学大学院教育学研究科身体教育学コース）

34. 歩行中の手先振動を抑制するシナジーの解析
東郷俊太、香川高弘、宇野洋二（名大院・工・機械理工学）

35. 歩行時の特徴的動作に基づく関節間協調の構成要因の評価
船戸 徹郎、青井 伸也、土屋 和雄（京大・工・機械理工、京大・工・航空宇宙、同志社大・理工・エネルギー機械）

36. 歩行中の後方転倒誘発刺激に対する補償動作パターンの解析
香川高弘、太田雄、宇野洋二（名大院・工・機械、名大院・工・機械、名大院・工・機械）

質疑応答 4 分(発表者は速やかに登壇)

脊髄

37. 覚醒行動下のサルにおける筋求心性神経へのシナプス前抑制

金 祉希、関 和彦 (国立精神・神経医療研究センター、神経研究所、モデル動物開発研究部門)

38. 脊髄介在ニューロンは把握運動におけるシナジーの形成に貢献しているか？

武井智彦、関和彦 (国立精神・神経医療研究センター・神経研究所・モデル動物開発研究部)

39. 運動軌跡は一次求心性ニューロンによってどのようにコードされているか？

梅田達也、坂谷智也、山下沖人、佐藤雅昭、森本淳、関和彦、川人光男、伊佐正 (生理研・認知行動発達、ATR、国立精神・神経センター)

40. ペダリング運動と経皮的電気刺激の併用治療が spinal interneuron に与える影響

山口智史、藤原俊之、田辺茂雄、村岡慶裕、大須理英子、大高洋平、里宇明元 (慶應大院・医・リハビリ、藤田保衛大・医療科・リハビリ、国病機構村山医センター・臨研センター、ATR・脳研、東京湾岸リハ病院)

41. 長期的な身体運動による脊髄反射応答の特異的变化

小川哲也、河島則天、鈴木秀次、中澤公孝 (国リハ運動部、国リハ運動部、早大・人間科学、東大院・総合文化)

質疑応答 5 分(発表者は速やかに登壇)

一次感覚運動領野のリハビリテーション

42. 第一次運動野損傷前後の精密把握動作中の脳血流変化-PET を用いたサルの脳機能イメージング

村田 弓、肥後 範行、西村 幸男、林 拓也、大石 高生、塚田 秀夫、伊佐 正、尾上 浩隆 (産総研・ヒューマンライフテクノロジー、生理研・認知行動発達、理研・分子イメージング科学研究センター、京大・霊長研・分子生理、浜松ホトニクス・中央研究所)

43. 健常及び損傷後のマカクサル運動皮質における SPP1 の役割変化

杉山容子、肥後範行、大石高生、山下晶子、村田弓、山本竜也、伊佐正 (筑波大・人間総合科学、産総研・ヒューマンライフ、京都大・霊長研・統合脳システム、日大・医・応用システム神経科学、産総研・ヒューマンライフ、筑波大・人間総合科学、生理研・認知行動発達)

44. Mirror therapy による皮質運動興奮変化

野嶋一平、美馬達哉、小金丸聡子、福山秀直、川又敏男 (神大院・医・リハ、京大院・医・脳機能センター)

45. 脳卒中片麻痺例における運動負荷に依存した脳活動の Laterality

武田湖太郎、安田恒、相原孝次、北佳保里、大高洋平、大須理英子 (ATR脳情報研究所、東京湾岸リハビリテーション病院)

質疑応答 4 分(発表者は速やかに登壇)

運動情報表現

46. 両腕運動学習中の潜在的な視覚エラー割り当てにおける混線

森山翔子、野崎大地 (東大院・教育・身体教育学コース)

47. 両腕運動学習の汎化様式から明らかになった両腕運動情報の掛け算的情報表現

横井惇、平島雅也、野崎大地（東大院・教育・身体教育学、学振・特別研究員(DC)、東大院・教育・身体教育学、東大院・教育・身体教育学）

48. Interpreting the neural activity of monkey's primary motor cortex during reaching movement using joint angular velocity and joint torque

上田大志、新井直樹、田村優治、宮下英三（東工大院・総理工・知能システム）

49. 筋座標系仮説に基づく一次運動野モデルから生じる見かけ上の筋及び空間情報表現ニューロン
平島雅也、野崎大地（東大院・教育）

質疑応答 4 分(発表者は速やかに登壇)

運動前野と一次運動野

50. マカクザルの淡蒼球内節 (GPI)から背側運動前野 (PMd)への多シナプス性入力様式

佐賀 洋介、平田 快洋、高原 大輔、井上 謙一、宮地 重弘、南部 篤、丹治 順、高田 昌彦、星 英司（玉川大・脳研、京大・霊長研・統合システム、京大・霊長研・高次脳、生理研・統合生理・生体システム）

51. 「抽象的動作」と「視覚空間」の情報が運動前野へ入力する経路は異なる

山形朋子、中山義久、丹治順、星英司（玉川大・脳研）

52. 運動前野背側部における仮想レベルから運動レベルへの動作の変換

中山義久、山形朋子、丹治順、星英司（玉川大・脳科学）

53. 報酬系の活性化がヒト一次運動野に与える影響

美馬達哉、Mohamed Nasreldin Thabit Hamdoon、小金丸聡子、福山秀直（京大院・医・脳機能総合研究センター）

質疑応答4分(発表者は速やかに登壇)

BMI 関連

54. 運動課題中の EEG データから脳内電流源をベイズ推定する

相原孝次、武田湖太郎、安田恒、大高洋平、田中悟志、花川隆、本田学、佐藤雅昭、川人光男、大須理英子（ATR・脳情報、NCNP・神経研・疾病研究第七部、東京湾岸リハ病院、生理研・心理生理、ATR・脳情報解析）

55. 重度運動障害者の意思伝達支援を行う BMI における P300 脳波誘発手法の検討

高井英明、南哲人、長谷川良平（産総研・ヒューマンテック、豊橋技科大・エレクトロニクス先端融合RC、産総研・ヒューマンテック）

56. Decoding two different sequential finger movement from fMRI signal

南部功夫、羽倉信宏、川人光男、内藤栄一（NICT、ATR-CNS、JSPS、ATR-CMC）

57. 運動皮質における可塑的な機能変化の観測・誘発技術を用いたBMIポート形成の試み

深山理、鈴木隆文、満淵邦彦（東大院・情理）

58. 習熟度を考慮した筋電義手制御システムの開発

北佳保里、横井浩史（ATR・脳情報研究所、電通大院・情報理工）

質疑応答 5 分(発表者は速やかに登壇)

特別講演

「神経系の回路構造に運動系の基本的な設計をどう読み取るか？」

伊藤正男 先生

理化学研究所 脳科学総合研究センター 特別顧問

神経回路網の構造と機能の解明が進んでいるが、そこにある設計としての意味をよみとめることは容易なことではない。私が遭遇した過去の例からいくつか紹介してみよう。また将来どんな問題が重要となるか考えてみたい。

抄録

シンポジウム

チュートリアルレクチャー

「これだけは最低理解しておきたい運動制御研究に必要な計算神経科学 理論の基礎と物の考え方」

提案者 内藤栄一(NICT/ATR)

大学入試のころには、数学が大きな得点源であった人も数多いことでしょう。しかし、ハタと気づくと！？読めさえしない記号が氾濫する数式を全く理解できなくなっていること(learning no-use)を嘆いている人も多いこととお察しいたします(大きい声では言えないが計算論のお膝元で研究する私がそうである)。このレクチャーでは、いまさら聞けない、計算神経科学の基礎と物の考え方について、日本を代表する3名の先生方にわかりやすく解説いただきます。この考え方、発想を取り入れると、今までとは違う新鮮な観点から脳がみえてくるかもしれません。このレクチャーが、計算論との距離を縮め、個々の研究が益々多面的に発展する契機となれば幸いと思い企画してみました。

「運動系の冗長性はどのように解消されるか？—最適化によるアプローチ—」

野崎大地 (東京大学、大学院教育学研究科)

我々の筋骨格系は、単一の関節における筋力発揮に複数の筋が関与しているという特徴を有している。さらに筋を活動させる大本まで遡って考えれば、そこには膨大な数の脊髄運動ニューロンや一次運動野のニューロンの活動が関与していることがわかる。このような「冗長」な系のもとでは、理論上、無限の組み合わせの筋群の活動パターンや一次運動野ニューロンの活動パターンが、全く同じ力レベルを実現しうる。しかし、実際には、研究者は、筋活動やニューロン活動を記録し、そこに力発揮に関連した再現性のある活動を見つけている。試行を行う度にでたらめな活動パターンになるわけではないということは、このような冗長性は確かに解消されているはずだ。本レクチャーでは、冗長性を解消するフレームワークとして「最適化」の概念を簡単に説明する。最適化とは、ある大きさの力を発揮するという条件(拘束条件)を満たす無限の筋活動パターンのうちで、筋群の活動レベルに関連したある関数(評価関数)を最小(もしくは最大)にするものを探してみましょう、ということだ。こうした問題を解く手法として一般的に用いられるラグランジュの未定係数法を紹介し、それぞれの筋力の二乗和を評価関数としたときに、筋活動パターンがどのように決定されるかを具体的に計算してみる。実は、この最適解が予測するパターンは、筋の活動レベルがそれが跨いでいない関節で発揮されている力にも依存して決まるという点で直感に反するものにも関わらず、実際の実験結果によく適合するのである。また、計算を少し拡張すれば一次運動野ニューロンの最適方向の分布を説明できること、また、恣意的な考え方を導入しなければ説明不可能なヒトの直立姿勢時の筋活動パターンを極めて自然に説明できることなどを紹介する。しかし、いくら実験結果に合うとはいえ、筋力の二乗和というものを評価関数として設定することの妥当性はどこにあるのか、ということは大問題であろう。運動の出来映えについての情報(例えばエラー)は脳が直接参照できる情報だが、一方、全ての筋について筋力の二乗和を計算する具体的な仕組みを想定することは難しい。おそらく筋力の二乗和に関連する量を、間接的に、脳が参照していると考えるのが自然なアイデアであろう。事実この線に沿って、いろいろなアイデアが提案されてきた。いくつかのアプローチとともに、我々が最近たどり着いた、神経系の「学習と忘却」の性質が、二乗和=評価関数となることに関連しており、結果的に冗長性の解消に寄与しているのではないかという仮説についても紹介したい。

「運動計画と運動学習—運動制御の観点から—」

小池康晴 (東工大・ソリューション研究機構)

ヒトの上肢水平面内運動に関しては、様々な最適化規範が提案されている。これらの運動規範に従って腕は制御されるとしても、腕の運動制御についても筋骨格系の非線形性、冗長性などが存在し、計画通りの運動を実現するためには運動制御についても考慮する必要がある。本講演では、運動の最適化規範がどのように提案されてきたか、歴史的な背景とそれを証明してきた実験、また、フィードフォワード制御を実現するための制御モデルについて、逆モデルの獲得方法に関する様々なアプローチについて概説する。さらに、運動規範と運動制御モデルについて、その間をどのように結びつけて考えるのかについて、トルク変化最小規範とフィードバック誤差学習などを例に解説する。

「運動学習をモデルで考えよう」

大須 理英子 (ATR・脳情報)

目指した所に腕を素早く動かすには、それを実現するための運動指令をあらかじめ計算しておかなければならない。腕の大きさや重さは、成長に伴って変化し、また、環境によって同じ軌道を実現するためにも必要な力が変化する。そこで、脳は、目標とする動きに対して必要な運動指令を計算するシステム（内部モデル）を学習によって獲得することができるようになっている。このような入力（目標）と出力（運動指令）の関係を学習するには、教師あり学習が有効である。教師あり学習においては、入ってくる情報に対して何を出力すべきかが教師信号として与えられていて、実際の出力と教師信号との差（誤差信号）が少なくなるように学習が行われる。すなわち、入力 x に対して y を出力する関数 $y = F(x)$ を、入力 x と教師信号 y^* のサンプルをもとに学習することであり、この関数がうまくできあがれば、任意の入力 x に対して適切な出力が計算できるようになる。内部モデルを獲得する学習アルゴリズムの例として、フィードバック誤差学習があげられる。このアルゴリズムの特徴は、フィードバックコントローラの出力を誤差信号として使う点であり、フィードバック制御で運動を制御しながら、徐々に内部モデル（逆ダイナミクスモデル）を学習して、フィードフォワード制御に移行していくことができる。フィードバック誤差学習は小脳での入出力関係とよく一致しており、内部モデル獲得の座の有力候補である。

特別シンポジウム

「神経系による運動制御研究の最前線」

座長：北澤茂（順天堂大学・医学部）

運動制御には脊髄、脳幹、中脳、大脳皮質運動野、大脳基底核、小脳などの神経系が関与する。神経生理の研究ではそれら領域のどれかを専門とすることが伝統である。しかし、それらは単独では運動を制御することはできないから、相互作用を視野に入れられない限り、運動制御の全体像はつかめない。本シンポジウムではそれぞれの領域の研究の第一人者の方々に研究の最前線をお話いただき、それらを総合することで、それぞれの領域だけを見ているとつかめない運動制御の全体像を明らかにすることをねらいとしている。運動制御全体を統合して理解するためのキーワードを抄録から抜き出すとすれば、最適な筋緊張の制御（高草木先生）、視覚から運動への変換（伊佐先生、蔵田先生）、ループ神経回路（筧先生）、情報の流れ（南部先生）、動的な情報変換（虫明先生）などを挙げることができるだろう。運動制御の全体像を描き出すために何をこれから研究しなければならないのか、も自ずと明らかになればよいのである。

「脳幹と脊髄の筋緊張制御系による運動の制御」

高草木薫（旭川医大・生理・神経機能分野）

我々が表出する全ての運動において、その運動に最適な姿勢や筋緊張レベルが自動的に調節される。しかし、我々がこのプロセスを意識することは無い。脳幹や脊髄の損傷のみならず、大脳皮質や大脳基底核、そして、小脳の障害によって誘発される運動異常には、必ず、姿勢や筋緊張の異常が随伴する。姿勢や筋緊張の制御には脳幹と脊髄とが重要な働きを担っている。また、体幹や手足の運動が脊髄反射経路を介して発現されることを考慮すると、脳幹と脊髄において、どの様に筋緊張が制御されるのかを理解することは運動制御のみならず運動障害のメカニズムを考察する上で極めて重要である。では、脳幹と脊髄の神経回路はどの様に運動と筋緊張とを統合的に制御しているのだろうか？姿勢筋緊張は起立を可能にする持続的な筋張力と定義される。しかし、姿勢筋緊張を調節する神経機構の仕組みについては、様々な神経疾患における運動や筋緊張の異常を論理的に説明できる程度にまで解明されている訳ではない。そこで、今回は、筋緊張制御系の働きがどの様に運動機能の調節に関与するのかを私のこれまでの研究成績に基づいて解説したい。1. 筋緊張制御系は覚醒-睡眠状態に依存する運動機能の調節に関与する多くの霊長類において大脳皮質運動領域からの運動性出力は脊髄に投射し、運動細胞を直接興奮させる。従って大脳皮質運動野に加えた微小電気刺激は、その領域が支配する身体部位の筋収縮を誘発する。即ち、「一次運動野の同じ領域を刺激した時には、必ず、身体と同じ部位の運動が誘発される」という。しかし、覚醒時とレム睡眠時では、大脳皮質の同じ部位からの信号によって誘発される運動は全く異なる。覚醒時と同様にレム睡眠の脳波では低振幅速波（脳波覚醒）が誘発される。大脳皮質からの出力は脊髄に直接投射すると共に、皮質網様体投射を介して網様体脊髄路系を賦活させる。覚醒時には、促進性の網様体脊髄路系やモノアミン作動性下行路系などの筋緊張促進系の興奮性が高いため、筋緊張ならびに脊髄反射弓の興奮性は高く維持される。従って、皮質網様体投射系は筋緊張促進系を興奮させる結果、大脳皮質からの信号は運動を誘発させる。しかし、レム睡眠では、筋緊張抑制系を構成する抑制性網様体脊髄路の興奮性が高く、筋緊張促進系の興奮性は低い。従って、皮質網様体投射は筋緊張抑制系を選択的に賦活させて、大脳皮質の活動は運動を強く抑制することになる。これ

は Chase が提唱した State-dependent response reversal という現象である。この現象を説明する論理的根拠の一つに、ノーベル賞受賞者である Edelman の提唱した Operator theory (The theory of neural group selection; for any brain activity, the ablest group of neurons is selected to do the task)がある。

3. 筋緊張制御系と脊髄反射経路の統合的作用により運動時の筋緊張が調節される筋緊張抑制系を構成する抑制性網様体脊髄路は脊髄の抑制性介在細胞を介して、 α 運動細胞、 γ 運動細胞、相反抑制、自原抑制、反回抑制、屈曲反射などを媒介する介在細胞群、そして、一次求心性線維の活動を抑制する。即ち、脊髄反射系路の入力部(感覚線維)、統合部(介在細胞)、そして、出力部(運動細胞)の全てを抑制する。従って、筋緊張抑制系が活動すると、その作用を受ける髄節の脊髄反射弓の興奮性は強く抑制される。一方、抑制性介在細胞は屈曲反射経路から強い抑制を受けるので、屈曲反射が作用する髄節の脊髄反射弓の活動は抑制系されない(筋緊張は維持される)。この筋緊張抑制系と屈曲反射経路と相互抑制作用は、運動制御を理解する上で非常に重要である。上に示した様に、レム睡眠時の筋緊張消失は、筋緊張抑制系が脊髄の全髄節に作用することにより誘発されると考えられる。また、筋緊張抑制系は歩行運動時にも活動する。歩行時には、左右肢の屈曲反射経路に、歩行サイクルに対応したりズミカルな活動が誘発される。従って、筋緊張抑制系が活動しても、屈曲反射が作用する髄節の脊髄反射の興奮性は維持され筋緊張が保たれる。即ち、筋緊張抑制系と屈曲反射との相互抑制作用は、歩行時における筋緊張の調節とリズムカルな肢関節の屈曲・伸展を円滑に遂行させる役割を持つと考えられる。一方、物を掴む、握るなどの動作は、外側皮質脊髄路が屈曲反射経路を積極的に動員することにより誘発される手指遠位筋の屈曲運動である。屈曲反射経路は筋緊張抑制系の作用を低下させるので、その外側皮質脊髄路が投射する髄節に存在する脊髄反射弓の興奮性だけが強く維持される。これは目的とする精緻運動を遂行する上で合理的なメカニズムである。従って、網様体脊髄路(筋緊張抑制系)と屈曲反射経路の相互作用は、姿勢維持や歩行などの全身運動においても Precision grip など局所的な精緻運動においても、その運動に適切な筋緊張の調節に重要な役割を担っており、各々の運動の定型性に寄与すると考えられる。

「膝状体外視覚系による視覚運動変換機構」

伊佐正 (自然科学研究機構生理学研究所)

高等な哺乳動物では、大脳皮質の発達に伴って外側膝状体から一次視覚野に至る「膝状体視覚系」が発達し、物体視や様々な視覚認知機能に関わっている。一方、より下等な脊椎動物で主要な視覚系である視蓋ないしは上丘を介する膝状体外視覚系は、相対的な役割が減じているとはいえ、高等霊長類においても、サッケードや注意の制御において重要な役割を果たしていると考えられるが、膝状体視覚系に比べると明らかでないことが多い。特に、上丘は浅層には網膜ないしは一次視覚野から視覚入力が入力し、視覚空間マップが展開されていること、そして中間・深層にはサッケードなどの指向運動のベクトルマップがあり、そこからの出力は脳幹や脊髄に投射されることはよく知られているが、それぞれの層の内部、ないしは層の間の結合関係といった局所神経回路の構造とその機能的意義はよくわかっていなかった。私たちはこれまで14年余り、上丘による視覚-運動変換系について、脳スライス標本を用いた上丘局所神経回路の解析とサルの上丘系によるサッケード系の解析を組み合わせ研究を行ってきた。本シンポジウムでは、(1)げっ歯類のスライス標本を用いた上丘の異なる層の間の信号伝達、及び上丘の浅層及び中間層内での水平性結合、およびそれらの修飾因子(2)上記の局所神経回路の構造がもつ機能的意義のサルの上丘系での検証(3)特に一次視覚野損傷後、残存視覚によってサッケード遂行が可能になっている「盲視」モデルのサルにおける上丘によるサリエンシー検出機構について、主として私たちのデータをもとに議論したい。

参考論文(総説)

Isa T & Sparks D (2006) Microcircuit of the Superior Colliculus: A Neuronal Machine that Determines Timing and Endpoint of Saccadic Eye Movements. 93rd Dahlem Workshop on Microcircuits; The interface between Neurons and Global Brain Function, pp1-34.

Isa T, Hall WC (2009) Exploring the superior colliculus in vitro. Journal of Neurophysiology (review), 102: 2581-2593.

Isa T, Yoshida M. (2009) Saccade control after V1 lesion revisited. Current Opinion in Neurobiology (review), 19: 608-614.

「大脳小脳連関における小脳の機能的意義」

笥 慎治, 戸松彩花, 角田吉昭, 李 鍾昊 ((財)東京都医学研究機構、東京都神経科学総合研究所)

運動制御のシステム論的研究、特にEvartsに始まる慢性サルを用いた行動と神経活動の関

係を分析する実験は、更なる飛躍のためには方法論的な根本的見直しが必要な時期に来ている。一次運動野から始まった個々の領野の機能を調べる研究は、前方は前頭連合野に至り、後方は頭頂連合野を経て側頭連合野に到達し、フロンティアは消失した。そこでTanjiらのグループは、いち早く多数の運動関連領野のニューロン活動を同じ条件下で、つまり共通の物差しで比較し、機能的な位相関係を分析することにより大きな成功をおさめてきた。これらの研究によって運動関連領野の機能分担、局在の様相がかなり明らかになってきた。それでは運動関連領野の相関図を超える次のステップは何であろうか？私はそれを「システム同定」レベルでのシステムが働く仕組みの解明と考える。これが難問である。それを先導する計算論的な枠組みという点でも、実験に落とし込むための技術的な点でも、見通しが立たない状況である。何が障害なのか、我々に何が足りないのかを整理することは重要である。そこでShinoda & Yoshida (1974)が制御工学的枠組みで前庭動眼反射を解明した方法論を念頭に、我々が直面する問題点の一部を(比較的やさしいものに限る)挙げてみる。

- 1) 記録しているニューロンの同定の欠如: 神経回路上での位置づけ、すなわち入力と出力。入出力関係の分析がシステム同定の基本である以上、この同定は必須。この問題は安易なニューロンpopulationの扱いに警鐘を発する。
- 2) 運動器のモデルが単純すぎる: 例えば単関節を蝶番とみなし、1-2個の位置センサーによる角度の計測で済ますこと。「状態推定」が極度な単純化に陥る。制御対象を十分な精度でモデル化できなければ実験データに現れる複雑な現象を「理解不能」として不当に無視するしかない。
- 3) ループ神経回路の動作原理が不明: 神経回路の至る所にループがあることは周知であるが、その意義は全く知られていない。特に多重ループの機能的意義、ダイナミクスが収束する原理はともに全く理解されていない。
- 4) より長い時系列データの必要性: システム同定の基本
- 5) 入力と出力の同時記録の必要性: システム同定の基本

我々が脳小脳連関を研究対象に選ぶ理由は、小脳では上記の困難の1)が回避できること、3)のループ構造が比較的単純で多重ループの度合いが弱いこと、そして小脳機能に有力な作業仮説が存在することである。

現在有力な運動制御の仮説によれば、小脳は運動指令に基づいて、現在実行中の運動の結果を予測するforward modelの座と考えられている。この見方によれば、小脳への大脳皮質からの入力は皮質から出力される運動指令の忠実なコピー、いわゆるefference copyであることが要請される。従って、大脳皮質の出力を小脳に中継する橋核は、機能的には入力から出力への変換を行わない単純な中継核であると考えられる。ところが神経解剖学的には橋核における中継は全く異なるとらえ方をされてきた。大脳皮質から橋核への投射は高度な発散と収束の複合であるため、橋核では大脳皮質の出力が統合され異なる表象に変換されると信じられてきたのである。2つの見方の間には明らかに大きな溝がある。

そこで我々は2頭のニホンザルに異なる姿勢下での手首運動課題を習得させ、小脳の第VおよびVI小葉半球部から課題に関連するニューロン活動を記録し、それらの姿勢依存性を併せて分析した。橋核ニューロンから直接記録する代わりに神経終末である苔状線維の活動を顆粒細胞層で記録したところ、基本的に一次運動野および腹側運動前野に見られると同様の3つのタイプのニューロン活動が確認された。このことは、橋核では線形に近い穏やかな変換が行われ、大脳皮質の運動指令のコピーあるいはそれに準ずる情報が小脳に供給されていることを示唆する。小脳がforward modelの座である必要条件の一つは満たされているように思われる。

我々はさらに、この苔状線維入力を受けるゴルジ細胞およびプルキンエ細胞からも記録を行い、小脳皮質における苔状線維入力の変換過程について検討を行った。その結果、小脳皮質への苔状線維入力はプルキンエ細胞から出力されるまでに複雑な非線形的変換を受けることが明らかになった。

「情報の表現から情報の流れへ」

南部 篤 (生理学研究所・生体システム研究部門)

私たちが日頃行っている霊長類の慢性実験は、言うまでもなく1960年代のEvartsに始まる訳です。彼は、手首関節の屈曲伸展という単純な運動中のサルの大脳皮質一次運動野から、単一ニューロン活動の記録を行い、運動野がまさに運動の発現に寄与していることを示しました。その後、後継者たちによって、慢性実験は一次運動野ばかりでなく、高次運動野、感覚野、さらには連合野、小脳、大脳基底核などに広がり、また、それに伴って運動課題も複雑になっていきました。このような霊長類の慢性実験は、神経活動と機能の関係を明らかにする強力な方法で、脳機能の解明に大きな役割を果たしてきました。Evarts はまた、錐体路に刺激電極を入れ、逆行性応答により脊髄に投射している皮質ニューロンを同定し、その活動を調べるという、急性実験の手法も導入しました。この手法はあまり追従されることがなかったのですが、最近になって見直されつつあるように思います。

これまで、ある脳領域の機能を調べようとする際は、その領域に特徴的な活動を調べる、すなわち情報表現に注目して解析されてきました。しかし考えてみれば、記録しているニューロンが介在ニューロンか投射ニューロンかで、大きく解釈が変わってきます。また、スライス実験の結果をみるまでもなく、入力線維の終止様式、介在ニューロンと投射ニューロンの相互連絡など、複雑なものです。したがって、ある領域の機能を知るためには、どのような入力が入ってきて、ニューロン毎にどのように情報処理がなされ、最終的に投射ニューロンでどのように情報が統合され送り出されるのか、いふならば情報の流れを明らかにする必要があります。

このことは、電気刺激によって引き起こされる順行性応答や逆行性応答による経路の同定、局所薬物注入による受容体あるいは経路特異的な入力遮断など、古典的ではあるが有効な手法によって、ある程度可能です。最近では、(げっ歯類が中心となりますが)遺伝子改変動物を用いた解析、ウイルスベクターによる興奮性制御、光遺伝学など、遺伝子改変技術を応用することでも可能になってきました。大脳基底核の神経回路や機能の解析への応用例、試用例などを紹介し、「情報の表現から情報の流れへ」をキーワードに、脳による運動制御研究の今後の展開について考えてみたいと思います。

「弓状溝周辺皮質における眼と手の到達運動制御」

蔵田 潔 (弘前大院・医・統合機能生理)

ヒトやサルは視覚目標への到達運動を行うとき、通常、手と眼の協調運動により、この運動を達成している。このとき、手と眼の運動はそれぞれが独立して生成されるのではなく、それぞれに関わる中枢領域が相互に関連して制御・実行系として機能するものと考えられる。具体的には、到達運動の生成過程では、到達目標の視覚空間座標情報は眼と手の運動空間座標の変換のために共通して用いられ、視覚到達目標に関する情報は手あるいは眼のいずれか、あるいはその両方を選択し、それら運動の準備および運動指令生成を行う過程に用いられると考えられる。これらの過程を経て、最終的に、個々の運動効果器に特化した中枢領域において運動の最終指令へと変換されるとともに、運動がどのように行われたかに関するフィードバック信号を処理することにより、精度の高い運動が実現されるものと思われる。これらは複数の中枢領域で直列的ならびに並列分散的に処理されているものと考えられるが、これらの脳機能を明らかにするには、上記の到達運動生成過程を明らかにするための条件設定を満たす運動課題をサルに課し、課題遂行中の神経活動を解析することが必要である。そこで本研究では、同一の視覚目標に対し、手と眼球のそれぞれの運動を制御する課題を用い、その際の神経活動を、これまで知られているさまざまな大脳皮質の到達運動制御中枢からニューロン活動を同時記録し解析することにより、個々の中枢の機能特異性と、それら中枢相互の調節機能と情報処理を明らかにすることを目標とした。

大脳皮質には一次運動野をはじめとする数多くの運動関連領域の存在が明らかになっており、それぞれの運動関連領域は体性(特に手)あるいは眼球運動に重要な役割を果たしていることが知られてきている。これらの領域のうち、弓状溝周辺皮質と呼ばれる領域は運動前野(腹側部および背側部)と前頭眼野(急速および追跡眼球運動領域)が含まれており、いずれも視覚運動変換に関与していることが明らかになりつつあるが、それらが相互にどのような機能連関を有しているかは未だ明らかではない。また弓状溝の底に存在する領域がどのような機能特異性を有しているかは明らかではない。これら隣接する弓状溝周辺領域に注目し、視覚目標情報が手あるいは眼による個別の到達運動、そしてこれらの協調運動に、これらの皮質領域がどのような役割を果たしているか、またそれら領域がどのような機能連関を有しているかを明らかにしようとした。

この目的のため、ディスプレイ上に呈示した中心固視点に対し上下左右等距離にある4つの視覚目標へ、眼と手のいずれか、あるいはその両方による以下のような到達運動課題を行うようサルを訓練した。その際、眼球運動を赤外線眼球運動計測装置で、またマウスを用いたタブレットで手運動をモニターした。運動に先行する準備期間中に、次に行うべき運動が手・眼のいずれか、または両方を動かすかを示す指示信号、および4つの目標点のうちどの目標に到達すべきかを示す指示信号をランダムな順で与えた。その結果、運動前野腹側部表面部では手運動に選択的なニューロン活動が多数を占めていたが、運動前野腹側部と背側部間の弓状溝深部領域では運動の準備期間に、眼と手の運動のいずれの場合も共通に用いられる視覚到達目標を指示する信号に反応して活動が変化するニューロンや、その空間指示信号への予期を反映するニューロン活動などが存在していた。一方、眼球運動に先行して活動するニューロン活動は弓状溝前壁皮質表面部で低閾値の質内微小刺激で眼球運動が誘発される前頭眼野に多く存在し、眼球運動後に活動の変化を示すものは少数であった。しかし弓状溝前壁で弓状溝底に近づくにつれ、眼球運動後に活動の変化を示すものが多数を占めていた。さらに弓状溝底近くの皮質では、手と眼の両方の到達運動が実行されたとき、眼球運動終了後に遅れて手運動による到達運動が終了するまで活動が持続するものが存在していた。また、前頭眼野に BDA を注入したところ、これらの領域と対応する相互結合が存在することが明らかになった。これらの結果は、眼と手の到達運動の開始と遂行の制

御のみならず、両者の運動が完遂するまでのモニターを弓状溝深部皮質が行っており、これらの協調運動に重要な役割を果たすことを示すものと考えられる。これら領域における特異的なニューロン活動の存在は、異なる効果器のどの組み合わせを選択するかに必要な情報処理が運動前野腹側部と前頭眼野を含む弓状溝周辺の一連の領域で行われていることを示すものである。

「動的情報表現と行動制御」

虫明 元（東北大学、大学院医学系研究科、生体システム生理学分野）

前頭前野は、他の連合野と連携しながら、ゴール指向的かつ融通性のある行動選択に関わっている。その特徴は、長期的な行動制御の側面に加えて、その試行内の一時的な情報を用いて、適切に行動に結びつけることである。課題遂行中の動物からの細胞活動からは、前頭前野がさまざまな情報変換にかかわることが判明してきた。まずこのような例を紹介する。

問題解決課題における例としては、コンピュータ上の迷路課題を用いて、サルを訓練した。迷路課題では、サルが両手のマニピュレータを中立位に保持すると、前方スクリーンの格子状の迷路にスタート地点の位置、次いでゴールの位置を一定時間呈示して消した後、ゴー信号が呈示された。サルは、両手のマニピュレータを操作して、カーソルをステップごとに上下左右の選択を行い移動させゴールまで到達すると報酬が与えられた。最終ゴール指示後の遅延期間においては、前頭前野細胞の多くの細胞において、課題関連の細胞活動が多数見出された。その中には前頭前野にはゴール表現を示す細胞が多数見つかった。ひとつのタイプは、最終的ゴールに関する情報を反映する活動をしめず細胞であった。また別なタイプは、最初にどちらに目標に向かうかという即時ゴールの情報を反映する細胞が存在した。さらに、ある最終ゴールをどの即時ゴールを組み合わせた統合した情報を反映する前頭前野の細胞があった。興味深いことに、準備期間である遅延期間の間に細胞の示すゴール情報表現は時間的に変化する細胞が多く存在した。すなわち最初は最終ゴールを示す細胞が多かったが、実行直前には、即時ゴールを示す細胞が増えてくる。さらには、将来の自ら行うカーソル移動の操作順序を反映する細胞も実行前に現れてくる。このような細胞の中には、実行中に再度活動する細胞も認められた。前頭前野のこのような細胞活動表現は、ポピュレーションとしても非常にダイナミックな活動といえる。

他の研究者の例で動的な情報変換の例としては、振動周波数の弁別課題がよく知られている。この課題では、サルの片手に振動子を当てて、遅延期間をはさんで二つの異なる周波数の振動刺激を与える。サルは、その周波数を比較して、もう片方の手で、二つのボタンのどちらかを押し、後の刺激が最初の刺激の振動周波数より高いか低いかを答える。この課題で記録できる細胞活動を調べると二つのタイプの情報表現が見出されている。一つ目は、最初の刺激のときから遅延期間に見られるもので、最初の刺激周波数の量的な作業記憶として表現されている。もうひとつのタイプは、二つの刺激が与えられた跡に認められるもので、二つの刺激の周波数それぞれに関わる情報を持っているが、典型的には、その後意思決定に関わる二値的な表現である。

さまざまな問題解決、意思決定課題において、細胞活動を調べると、その情報内容が、課題の異なる文脈や課題時期において、一時的にオンラインで保持されている。これがいわゆる作業記憶であるが、これはアトラクターとして捉えることができることがわかってきた。このような状態は、記憶の一時的な保持や、その想起に関わることをわかっている。しかし、このような局所回路の特性は状態維持としての側面もあるが、状態遷移させて、情報の切り替えや新たな情報の生成に関わると考えたほうが、前頭前野の融通性のある情報制御には重要な側面であると考えられる。先に述べた迷路課題の例では、離散的な状態を状況に合わせて維持したり切り替えたりする。この情報内容をきりかえに関して注目すべきは、情報表現を行う基準を変えるという意味でより高位の動的変換の例である点である。また、他の研究者たちの最近の事例は、連続的な量的なアトラクターか状態から、離散的な二値的なアトラクター状態への変換として、内容を変換するのではなく内容表現の基準を変化させている。このような、情報表現の基準を変えるような、階層的により上位の“メタレベル”な切り替えを行うことで、動的な情報変換が可能になっていると考えられる。このような動的な情報変換に関しては、それを支える局所の神経回路の特性が重要であると考えられる。特に興奮性抑制性の細胞クラスターのかなでバランスが、アトラクター状態としての神経回路の状態維持と切り替えとしての状態遷移に関わると可能性を検討する。

総合討論

「MotorControl 研究の短期、中期、長期的ゴール」

進行：北澤茂（順天堂大学）

公募シンポジウム1

“Motor Control: in Humans, for Robots”

提案者 Ganesh Gowrishankar (NICT/ATR)

It is amazing to observe how the human central nervous system (CNS) integrates various sensory signals to control the complex system of the human body and learn new motor tasks. A human baby exhibits better motor control and adaptation capabilities than the best of current robots. This exhibits that we still have a lot to learn about the human CNS!

This symposium will give examples from coordinate planning, manipulation, gripping and walking where research in human motor control has helped develop robot behavior and discuss how the robots can in turn help us understand motor control in humans better.

「How kinesthetic information can contribute for visual perception in humans」

Nobuhiro Hagura (CNS ATR)

Kinesthetic information, which arises from muscle and joints, tells you not only about your own body movements but can also help you gathering information about the outer environment. In my talk, I will show evidences that kinesthetic information of hand movement can be utilized to improve visual motion direction judgment task. Further, I will try to explain this behavioral result by looking at the change of activity pattern in visual motion sensitive region (human MT+). Change of activity pattern by kinesthetic input may indicate that what we call ‘visual space’ is not merely represented by processing visual information, but by integrating multimodal information.

「Learning soft manipulation from humans」

Ganesh Gowrishankar (NICT/ATR)

In contrast to the typically fixed movements of robots, humans constantly adapt their motor behavior to the external environment. This presentation will first describe how humans coordinate and adapt their muscles to perform successful and stable movements with least effort in novel stable or unstable environments. It will then present the computational model of this learning we have developed, which can predict the whole evolution of muscle activity observed in experiments. Robotic implementations of this controller will show how the robot can automatically adapt to the environment to produce smooth and stable interactions with minimal impedance like humans.

「Action planning based on learned affordances」

Emre Ugur (CCC-ATR)

In this talk, I will describe a robotic system that interacts with its environment for discovering the effects of its actions and learning the relation between these effects and object properties, i.e., the affordances. After the learning phase, we show that the robot can make non-trivial multi-step plans involving push and grasp-and-lift behaviors based on the learned affordance relations. From a developmental point of view, this learning phase can be related to development of infants between 7–11 months, who explore the environment and learn the dynamics of the objects by hitting, grasping and dropping them and observing the results of their actions.

「Learning stylistic models of human motion sequences for humanoid robotics: High-accuracy on-line prediction and stylistic dynamic movement primitives」

Takamitsu Matsubara (NAIST)

Modeling of human motion sequences is essential for recognition, prediction and motor control of humanoid robots executing tasks in the human living environment. Modeling of human motion sequences, however, has difficulties such as high-dimensionality and nonlinearity. In addition, human motion sequences have sequence-specific inherent features, broadly termed by “style”. In this talk, we present our recent research progress on modeling of such “stylistic” human motion sequences for humanoid robotics, especially for the purposes of on-line human motion prediction and motor control on humanoid robots. For on-line human motion prediction scenario, we propose a novel generative model by focusing on walking behavior (periodic motions), which is comprised of a low-dimensional state dynamics and a two-factor (state and style) observation model. The learning

procedure of the model from a various motion sequences during walking behavior, and on-line EM-like estimation algorithm of both state and style from a unknown motion sequence are proposed. This approach allows to capture the both state and style of unknown motion sequence in on-line manner, and achieves high-accuracy prediction. The effectiveness for motion capture data is demonstrated. For motor learning and control scenario on humanoid robots, we propose a novel class of motor primitives named “stylistic” dynamic movement primitives (SDMPs). Focusing on discrete movement, the SDMPs are modeled as an extension of Dynamic Movement Primitives (DMPs) proposed by Ijspeert et al. The SDMPs have three independent control variables for duration, goal state and “style” in motion, respectively. A novel learning procedure of the SDMP from multiple demonstrations including a diversity of motion styles and two practical applications of this framework with a 7DoFs anthropomorphic manipulator, i.e., learning stylistic table tennis swing skill and point-to-point reaching skill with obstacle avoidance.

公募シンポジウム2

「運動制御回路を構成するニューロンの機能解析」

提案者 筑波大学 西丸広史

運動制御を司る神経回路に関してその作動原理、特に構成するニューロンの性質やお互いの結合様式、そしてその機能的な役割に関しては依然として未知の部分が多い。本シンポジウムでは、主に遺伝学と生理学、あるいは最新のオプトジェネティクスによるアプローチを組み合わせ、これらの問題解決に挑む研究の発表と議論を行う。まず、ゼブラフィッシュとマウスの二つの実験モデル動物において、遺伝学・遺伝子工学技術を駆使し、脊髄の運動神経回路網を構成する特定のニューロン集団を蛍光タンパク質で標識し、神経回路結合を正常に保ったままその詳細な電気生理学的・形態学的解析を行っている研究に関して発表する。これらの研究では泳動や歩行運動を司る神経回路を構成する興奮性および抑制性ニューロンの同定、およびその活動パターンやシナプス入力パターンの解析における有用性を紹介する。さらに、遺伝子改変マウスにおいてチャネルロドプシンなどの光感受性電位変換色素をニューロン特異的に発現させ、大脳皮質運動野の神経回路を人為的に刺激、制御するアプローチによる研究成果を紹介する。このアプローチでは長期間に渉る2次元マッピングが可能であり、個体レベルでの運動制御メカニズムの解析および制御に重要な方法論であると考えられる。このようなアプローチの有効性と可能性を、国内外の次代を担う気鋭の若手およびトップレベルの研究者が集う本研究会で議論することを目的とする。

「ゼブラフィッシュを用いた脊髄運動系神経回路の機能解析」

木村有希子、東島眞一（岡崎統合バイオ・神経分化）

脊髄運動系神経回路が機能するメカニズムを理解するためには、脊髄にどのような種類の神経細胞が存在し、各種の細胞が機能的回路の中でどのような役割を担っているかを明らかにする必要がある。これらの研究を進めるためには、特定の機能を持つ神経細胞群を生きたまま同定する手法を確立することが重要である。近年、分子生物学的研究による脊髄発生機構の解明が進み、特定の転写因子の発現の有無によって、特定の機能を持つ神経細胞集団を同定することが可能になると期待されている。現在、特定の転写因子を発現する神経細胞が、脊髄運動系神経回路で果たす役割を調べる研究が進められている。ただし、哺乳類の脊髄神経回路は複雑なため、実際の研究には困難な点が多い。そこで我々は、ゼブラフィッシュを材料に用いている。ゼブラフィッシュは哺乳類に比べ、単純な神経系を持ち、神経細胞の種類も少ないため、効率的かつ詳細に神経回路の解析を行える。また、得られた結果は転写因子の発現パターンが進化的に保存されている哺乳類にも示唆を与えると期待される。方法としては、特定の転写因子を発現する様々な細胞を蛍光タンパク質で可視化したトランスジェニック魚を作製し、可視化した細胞について形態学的な観察と、仮想遊泳中の細胞活動について電気生理学的な解析を行う。今回は、特に転写因子 Chx10 を発現する脊髄 V2a ニューロンの解析について具体的に報告し、脊髄 V2a ニューロンが脊髄運動系神経回路において果たす役割について示す。

「マウス脊髄反回抑制回路制御のシナプス基盤」

西丸広史（筑波大学・院・人間総合科学研究科）

脊髄の出力ニューロンである運動ニューロンは抑制性介在ニューロンの Renshaw 細胞を介して反回抑制を受ける。この回路では、末梢の筋肉に投射する運動ニューロンの軸索の側枝は脊髄内で Renshaw 細胞と興奮性のシナプス結合をする一方、Renshaw 細胞は軸索を運動ニューロンに投射し、そ

の活動を反動的に抑制する。1940年代に Renshaw によって発見されたこの回路は、脊髄からの最終出力の調節に重要な役割を担っていると考えられているが、未だにその機能的な役割は明らかではない。一つの有力な説は、この回路が運動ニューロンの入出力の利得を調節しているという variable gain regulator 仮説である。運動ニューロンがある強さの興奮性入力を受けたとき、同時に受ける反回抑制入力が高い場合(=Renshaw 細胞がより興奮している場合)、運動ニューロンへの入力の大きさに対する運動出力の大きさの傾きは小さくなり、逆に反回抑制入力が弱い場合(=Renshaw 細胞の活動が抑制されている場合)、その傾きは大きくなると考えられる(Hultborn et al. Exp Brain Res, 1979)。この説を支持する実験結果がヒトやネコの運動中の反回抑制の強さを間接的に測定した研究で得られているが、その際、Renshaw 細胞がどのような性質のシナプス入力によって制御されているのかはほとんどわかっていない。

我々は、GABA 作働性抑制性ニューロンが蛍光タンパク質 GFP を発現する GAD67-GFP ノックインマウス新生児から、脊髄の神経結合をほぼ正常に保持できる in vitro 脊髄摘出標本を作製し、運動ニューロンの活動と同時に Renshaw 細胞へのシナプス入力の電気生理学的性質を調べることによって、運動ニューロンが興奮したときに、Renshaw 細胞の活動がどのように制御されているかを解析した。この標本で NMDA とセロトニンの灌流投与によって誘発される運動ニューロン群の歩行運動様リズム活動の際、Renshaw 細胞は結合している運動ニューロンから興奮性シナプス入力を受けてリズム的に発火する。その一方で、興奮性入力とほぼ同時にリズム的な抑制性シナプス入力を受けていた。これは歩行運動の際、Renshaw 細胞が興奮性入力と抑制性入力を同時に受けることでその発火パターンが複雑に制御されていることを示唆している。また、腰髄前根では数百ミリ秒から数秒間続く自発的なバースト活動がみられるが、ほとんどの Renshaw 細胞で、近傍の運動ニューロンが発火するのとほぼ同じタイミングで抑制性シナプス入力を受けており、その振幅の大きさは運動ニューロンへの興奮性シナプス入力のそれと正の相関を示していた。これは、運動出力の大きさに合わせて Renshaw 細胞の興奮性が脊髄神経回路網によってダイナミックに調節されることを示唆しており、反回抑制回路の variable gain regulator 仮説を支持するシナプス・メカニズムと考えられる。

「マウス大脳皮質運動野のニューロン活動の光制御」

松崎政紀 (東大院・医・構造生理)

マウス大脳皮質運動野のニューロン活動の光制御 東京大学大学院医学系研究科疾患生命工学センター 松崎政紀我々はこれまでケイジドグルタミン酸を用いたシナプス・細胞の光刺激法を開発してきたが、青色光を照射すると活性化されるカチオンチャネルタンパク質、チャネルロドプシン 2(ChR2)にも注目し、この遺伝子導入マウスにおける神経細胞の光刺激を行っている。特に光刺激の結果を個体行動の出力として検出可能な運動野に研究の焦点を絞っている。このマウスを麻酔下で頭部固定し、頭蓋骨越しに青色光を皮質運動野に照射することによって、照射領域の第5層 ChR2 発現細胞に活動電位を誘発させて、任意の肢の運動を誘発させる非侵襲的な経頭蓋光刺激法を確立した。これを用いると、前肢・後肢の支配領域を皮質表面に対して2ヶ月間に渉る2次元マッピングが可能となった。光刺激によって明らかになった支配領域は皮質内電気刺激法による機能マッピングによる結果と一致していた。また皮質内でのシナプス結合を明らかにするのもにも光刺激が有効であることがわかってきた。今後この刺激法が、運動機能を司る神経回路網の計測・制御に重要な方法論となることが期待される。

Wang H et al. High-speed mapping of synaptic connectivity using photostimulation in Channelrhodopsin-2 transgenic mice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 104. 8143-8148, 2007.

Hira R et al. Transcranial optogenetic stimulation for functional mapping of the motor cortex. J. Neurosci. Methods 179, 258-263, 2009.

一般口演

小脳・制御モデル

運動記憶痕跡の小脳皮質から核への移動に皮質のタンパク質合成は必要である

岡本武人^{1,2}、白尾智明¹、永雄総一² (1 群馬大学大学院・神経薬理、2 理研脳センター・運動学習制御研究チーム)

海馬や扁桃体が重要な役割を演じる恐怖反応の条件付けでは、記憶の固定化にタンパク質合成が必要であることが知られている。しかしながら小脳依存性の運動学習では、小脳皮質や小脳(前庭)核でのタンパク質合成がどのような役割を演じているか、あまり検討されていない。私たちは、マウスの水平性視機性眼球運動(HOKR)の効率(利得)の適応に、小脳皮質でのタンパク質合成が関与しているかどうかを、タンパク質合成阻害剤(アニソマイシン)を用いて調べた。HOKRの訓練には、チェック模様のスク

リーンの正弦波状回転刺激(0.22Hz、15° peak-to-peak)を用い、誘発された眼球運動は、TVカメラによる画像計測法を用いて測定した。1時間持続的にHOKRの訓練をした集中学習の群と15分の訓練を1時間間隔で4回行った分散学習の群では、訓練直後は両群ともに、30%程度のHOKRの利得が増加した。しかし24時間後には、集中学習群では利得は回復したが、分散学習群では、利得の増加は維持されていた。訓練の数時間前にアニソマイシン(0.4 μ g/ μ l)を小脳片葉に微量投与すると、集中学習群ではHOKRの利得は増加したが、分散学習群では利得は変化しなかった。局所麻酔薬を用いた実験結果は、分散学習によって生じたHOKRの適応の記憶痕跡が、片葉の出力先の前庭核に移動していることを示している。これらの所見は、片葉内部でのタンパク質合成は、HOKRの適応の記憶痕跡の獲得には必要ないが、その片葉から前庭核への移動の過程では必要であることを示唆する。

小脳から大脳皮質背側運動前野への入力様式

橋本雅史、高原大輔、平田快洋、井上謙一、宮地重弘、南部篤、丹治順、高田昌彦、星英司（玉川大・脳研、京大・霊長研・分子生理・統合脳システム、京大・霊長研・行動神経・高次脳機能、生理学研究所・生体システム研究部門）

狂犬病ウイルストレーサーを用いた解剖学的実験により、大脳皮質-小脳間の多シナプス性ネットワークの解析を行い、ニホンザル大脳皮質高次運動野のF2領域の吻側部(rostral part of area F2, F2r)および尾側部(caudal part of area F2, F2c)へそれぞれ投射する小脳部位(小脳核および小脳皮質プルキンエ細胞)を同定した。狂犬病ウイルスをサル8頭のF2r(4頭)およびF2c(4頭)へそれぞれ注入し、ウイルスが二次ニューロン(小脳核ニューロン)および三次ニューロン(小脳皮質プルキンエ細胞)に伝播していると考えられる時間に合わせて環流固定、脳切片作成を行い、免疫染色により投射細胞を可視化した。その結果、小脳歯状核の尾側腹側に位置するニューロンはF2rへ選択的に投射するのに対し、より吻側背側に位置するニューロンはF2cへ選択的に投射することが明らかとなった。また、小脳皮質 CrusI、CrusIIに位置するプルキンエ細胞はF2rへ投射するのに対し、III-VIII葉に位置するプルキンエ細胞はF2cへ選択的に投射していた。したがって、F2rおよびF2cはそれぞれ異なる小脳部位(小脳核および小脳皮質)からの投射を受けており、またF2cはF2rに比べてより広範囲の小脳部位からの投射を受けている様式が明らかとなった。

両手運動における大脳小脳連関の変調

荒牧勇、河内山隆紀、大須理英子、野崎大地（名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター、ATRプロモーションズ脳活動イメージングセンター、ATR脳情報研究所運動制御機能回復研究室、東京大学大学院教育学研究科）

片手だけで覚えた運動と、もう一方の手の運動がある状態で覚えた運動は、部分的にしか転移しない(Nozaki et al., Nature Neuroscience, 2006)。我々はこの結果から、同じ手の運動でもその神経表現は片手運動時と両手運動時では異なる、という仮説を持っている。実際、両手鏡像運動時は左片手運動時よりも、左手制御系である右一次運動野と左小脳の活動が少なく済むことがfMRI研究で示されている(Aramaki et al., Neuroscience, 2006)。今回我々は、左手運動制御系の右一次運動野と左小脳の「大脳小脳連関」に、片手/両手運動でどのような文脈差があるかをfMRIデータのDynamic causal model(DCM)により調べた。右利き健常成人8名が、視覚ターゲットの動きに合わせた手首伸展屈曲運動を(1)左片手運動条件(UL)と(2)両手鏡像運動条件(BM)でおこなった。DCMの作成にあたり、右一次運動野と左小脳の双方向結合を、片手が両手かによらない「左手運動」の固有結合とした。BM条件での「右手運動」は、「左手運動」の固有結合へのモジュレーションとした。その結果、BM条件において、「右手運動」というモジュレーションは、左手運動制御系の右一次運動野と左小脳間の双方向結合のうち、左小脳から右一次運動野への結合のみを減弱させた。これは、非利き手制御系の大脳小脳連関において、BM時には小脳から一次運動野への内部フィードバックが減弱することを示唆しており、同じ手の運動でもその神経表現は片手運動時と両手運動時では異なる、という我々の仮説はさらに補強された。

プリズム順応の学習と消去の時間経過 —「速い学習系」と「遅い学習系」で説明できるのか?—

井上 雅仁、内村 元昭、苅部 綾香、北澤 茂（順天堂大学医学部生理学第1講座）

視野をプリズムで平行移動すると目標に手を伸ばす到達運動に誤差を生じるが、運動を繰り返すことで減少する。プリズムをはずすと、逆方向の誤差が生じる。小脳が障害されると、誤差が減少せず残効も失われるので、プリズム順応は小脳が関与する運動学習のモデルと考えることができる。我々はこれまで、プリズム順応の効果が長期(24時間以上)にわたり保存される条件を調べてきた。プリズムありで50または250試行行わせたときには24時間後には明らかな残効は見られなかったが、500試行行わせたときには残効が見られている。一方、速度に応じた外乱力場を使った運動学習では「速い学習系」と「遅い

学習系」の存在が注目されている (Smith et al., 2006)。プリズムありで 250 試行行わせたときに 24 時間後に残効が見られないことは、「遅い学習系」の残効は 24 時間後には消失することを意味する。プリズムありで 500 試行行った場合に観察される 24 時間後の残効は、「遅い学習系」よりも「さらに遅い学習系」が駆動されると仮定しなければ説明できない。そこで、われわれは、プリズムありの試行数を 30 回、150 回、500 回行った後、視覚フィードバックなしの試行を 50 または 100 回行って学習の消失する時定数を比較した。その結果、30 回、150 回、500 回の時定数は有意に異なった。「速い学習系」と「遅い学習系」だけでは、150 回と 500 回の時定数は同じになるはずであり、このことは「速い学習系」、「遅い学習系」に加えて「さらに遅い学習系」が存在することを示唆する。

視覚運動変換学習の誤差フィードバックに最適なタイミングは運動終了時か課題終了時か？

阪口豊, 石川拓海 (電通大院・情報システム学)

課題成績向上に必要な情報を脳がいかにして獲得しているかは運動学習における重要な問題である。この問題へのアプローチとして、本研究では視覚運動変換の適応における誤差フィードバックのタイミングの影響を調査した。到達運動のプリズム適応では、到達位置の視覚フィードバックが運動終了より 50 ms 以上遅れると学習の残効量が有意に減少することから (Kitazawa et al. 1995), 脳は運動終了直後に最も効果的に誤差情報を受容していると考えられる。本研究では、脳が誤差情報を受容するメカニズムをさらに探究するため、以下の問いを提起した。1: 誤差フィードバックの最適タイミングは身体運動終了時か課題終了時か? 2: 課題終了時が重要だとすれば、そのタイミングを知るために感覚手がかりは必要か? これらの問いに答えるため、運動終了と課題終了のタイミングを人為的に操作できる仮想投てき課題を設定して適応実験を行なった。被験者は手首運動により画面上のボールの向きを制御するにあてて、ボールが的にあたる時刻 (課題終了時刻) を基準として、ボール到達点がそれと同時に提示される条件、遅れて提示される条件、早く提示される条件において残効量を比較した。また、手首運動終了からボール到達までの時間を操作して運動終了からの時間の影響を調べた。その結果、残効量は、ボール到達までの時間によらず、到達点がボール到達と同時に提示される条件で最大になった。(予備実験では) ボール到達を告げる感覚手がかりがない条件でも同じ結果が得られた。これらの結果は、脳が課題終了タイミングを予測しそれにあわせて誤差情報を受容していることを示唆する。

指標追跡運動における2つの並列制御器の分離とその機能の検証

李 鍾昊, 戸松彩花, 寛 慎治 (東京都医学研究機構・東京都神経科学総合研究所・認知行動研究部門)

指標追跡運動には、ターゲットとの誤差を修正するフィードバック制御器と、ターゲットの動きを予測するフィードフォワード制御器という2つの並列制御系が機能し、2つの制御器からの制御信号が混ぜ合わされた運動指令 (筋活動) によって追跡運動が行われていると考えられる。通常、この2種類の運動指令を分離することは極めて困難である。我々は、フィードフォワード運動指令が低周波に、フィードバック運動指令がより高周波となるような運動課題をデザインし、2つの制御器からの運動指令を周波数の違いを利用して分離することに成功した。それぞれの運動指令について、我々が提案した筋活動を位置、速度、加速度のキネマティクスの成分に分解する分析法を適用し、フィードバック制御器では単純な位置制御が優位に行われており、フィードフォワード制御器では速度と位置のハイブリッド制御が行われていることが確認された。最後にフィードフォワード制御器に小脳が含まれていることを脊髄小脳変性症患者の運動指令の分析や動物実験によって検討した。

運動中に時間変化するフィードバックゲイン

植山祐樹, 宮下英三 (東工大院・総理工・知能システム、東工大院・総理工・知能システム)

Animals apply two types of controller, feedforward and feedback controllers. We estimated a Japanese monkey's arm stiffness as positional sensory feedback gains during the reaching movement using a manipulandum in order to reveal a feature of the feedback controller. The arm stiffness was estimated from hand trajectories and forces at 50–70 ms after perturbation because the somatosensory feedback was observed to follow the perturbation after a delay of about 20 ms. The arm stiffness was time-varying during the reaching movement. This result suggests that the feedback gains are scheduled in the motor planning and Optimal Feedback Control model is a plausible model for the movement control.

運動学習における報酬予測誤差と感覚予測誤差の役割

井澤淳, Reza Shadmehr (電気通信大学, Johns Hopkins University)

これまでの運動学習の研究では、脳は運動実行に関する誤差を最小化するように記憶を更新すると考えられてきた。しかし、最近の研究結果は、運動学習の目的が報酬獲得の最大化であることを示している(Izawa 2008)。もしも運動学習をタスクの達成度の最大化であると再定義すると、最適制御理論に基づく枠組みは、報酬予測誤差によって更新される運動指令選択メカニズムと感覚予測誤差によって更新される順モデルの、二つの独立した部位によって運動学習メカニズムが構成されることを予測する。この仮説を検討するために、被験者にロボットマニピュラタムを把持させて、ターゲットを通過するような素早い“shooting”運動を行わせた。被験者の腕をスクリーンで覆ったが、カーソルを投影することで、手先位置のフィードバックを与えた。学習課題中にはカーソル位置と手先に回転外乱を与えた。報酬学習グループにはタスクの成否に関するフィードバック情報のみを与えたが、感覚誤差学習グループにはタスクの成否に関するフィードバックの他に運動中の視覚フィードバックも与えた。どちらのグループも回転外乱を補償するような学習に成功したが、誤差学習グループは自分の手先運動の予測値も更新したのに対して、報酬学習グループは予測値を更新しなかった。この実験結果は、感覚予測誤差が順モデルを更新して、報酬予測誤差が運動指令選択を更新することを示唆する。さらに、学習の汎化関数が二つのグループで異なることがわかった。これは、運動予測誤差によって更新される学習メカニズムと報酬予測誤差によって更新される学習メカニズムは二つの異なる基質によって担われていることを示唆している。

学習機能促進

時間推定能力はタイミング予測を要する運動課題の訓練で向上する

角田吉昭、笈慎治、永雄総一（理研・運動学習制御、東京都神経研・認知行動）

我々は環境の変化を予測しあらかじめ行動を準備することができる。準備することで効率よく行動できる。たとえば、行動に関連する事象が“いつ”起きるかを知ることが、すばやく反応するための手掛かりとなるであろう。そのためには経過時間を知る必要がある。脳は時間を推定しなければならない。あいまいさが存在する。すなわち、運動の準備には時間推定のあいまいさが伴うことになる。過去の研究では、時間弁別、再生能力は訓練により向上することが報告されている。時間推定のあいまいさは、タイミング予測を要する運動課題の訓練で小さくなるかもしれない。本研究では、ヒト被験者が反応時間課題を訓練することによりこの問題を検証した。各試行では警告信号(WS)と反応信号(RS)が提示される。被験者はRS提示後にすばやく手首運動を開始しなければならない。運動方向はWSにより指示される。WSとRSの間は先行期間と呼ばれ、各試行で1~2秒の均一な確率分布からランダムに選ばれた。WS提示後、RSが現在まで現れず、次の瞬間にRSが現れる確率は先行期間が長くなるほど高くなる。この条件確率はハザード率と呼ばれる。被験者はこの確率分布を知らされずに課題を訓練した。反応時間は先行期間が長くなるほど短縮された。さらに先行期間に対する反応時間の関係は訓練とともに変化した。これは被験者がハザード率を学習しRSを予測するようになったことを示唆している。反応時間の変化に伴い時間推定のあいまいさが減少していることが分かった。上記の結果はタイミング予測を必要とする運動課題の訓練によって時間推定能力が向上することを支持する。

ヒト背側運動前野への経頭蓋直流電気刺激で、並列反応選択課題のパフォーマンスを向上させる

鈴木裕輔、内藤栄一（NAIST・情報、ATR-CMC, NICT Bio-ICT Group, 大阪大院・医）

大脳皮質運動領野への可塑性誘導は、これと同時にまたはこれに引き続き実行される認知運動課題と相互作用をおこす。従って、ある認知運動機能を向上させるには、LTP型の情報処理促進が効果的な場合とLTD型の処理抑制が効果的な場合が想定され、これらは課題自身がどのような可塑性を脳内に誘導するか依存する。本研究では、psychological refractory period (PRP)課題に対する両者の効果を検討した。PRPとは、2つの刺激(S1,S2)が非常に短い時間差で連続して提示され、それぞれについて別々に反応する(R1,R2)場合、個々の反応時間(RT)が遅延する現象である。この原因の1つとして、SとRを対応付ける処理(S-R処理)が並列処理され、相互に干渉することで、背側運動前野(PMD)の過活動が起きることがあげられる。本研究では、課題遂行中にPMDへ経頭蓋直流電気刺激(tDCS)を与え、促進型(anodal tDCS)または抑制型(cathodal tDCS)のどちらかが、PRP効果を軽減するかを検証した。実験では、反応選択枝数の異なる2つのPRPタスク(一択単純反応; SSタスク, 二択選択反応; CCタスク)を用意した。各タスクは、3つのtDCS (sham, anodal, cathodal)ブロックから構成され、刺激提示時間差 50 ms, 500 msの条件を比較した。CCタスクの50 ms条件でRTの遅延が最も顕著に観察されたが、このRTはanodalによって有意に短縮できた。一方、cathodalでは、短縮効果は見られなかった。この結果は、anodalがPMDの情報処理を促進した結果、通常みられる干渉を軽減できたためと推測された。本研究は、tDCSで人間のマルチタスク処理能力が向上する可能性を示した最初の研究でもある。

間欠的な視覚フィードバックによる周期運動学習の促進

池上剛、平島雅也、大須理英子、野崎大地（ATR、東大院・教・身体、NICT）

我々は、視覚運動変換課題（カーソルへの 30° 回転変換）を、周期的運動で学習した場合の学習成績（学習曲線の時定数、プラトー値）が、離散的運動で学習した場合に比べて顕著に低いことを報告した（Ikegami et al., 2010）。この結果は、視覚運動変換の学習システムが離散運動と周期運動で異なることを示唆している。そこでシステム同定法を応用し、周期運動時に視覚的エラー情報がどのように内部モデルの更新に利用されているのかを調べるために、8 人の被験者に、サイクル毎にランダムな回転変換が付加される条件下で周期的な到達運動を行ってもらった（1 サイクル ≒ 400ms）。同定の結果、周期運動の学習システムは、5 サイクル前までのエラー情報を参照して現在の運動指令を修正していた。さらに、同定されたモデルを用いたシミュレーションは、周期運動における一定回転変換に対する低い学習成績を再現した。我々は、こうした成績の低下には、一度に複数のエラー情報を参照してしまうことが関連しているのではないかと考えた。そうであれば、エラー情報を間欠的に与えた方がむしろ成績を改善させるはずである。実際、被験者に 30° の回転変換の学習を 4 つの条件（連続的に (n=15)、2 サイクルに 1 回 (n=8)、3 サイクルに 1 回 (n=5)、5 サイクルに 1 回 (n=15) の視覚フィードバック）で行ってもらったところ、5 サイクルに 1 回フィードバックを与えた場合だけ、連続的に与えた場合よりも有意に学習が改善された。この結果は、約 2 秒（5 サイクル × 400 ms）間に次々と入力される過度のエラー情報が、周期運動の学習成績を低下させることを示唆している。

運動前短時間の感覚刺激による技能学習の停滞状態からの脱却

上原信太郎、南部功夫、戸松彩花、鈴木裕輔、李鍾昊、寛慎治、内藤栄一（京大院・人環・共生人間 / 日本学術振興会、NICT、東京都神経研・認知行動、NAIST・情報、東京都神経研・認知行動、東京都神経研・認知行動、NICT/ATR）

運動技能学習は果々しく行動が変化する学習初期とそれに続く漸進的変化を特徴とする学習後期に分けることができる。この学習後期にはいくら練習を重ねても顕著な向上が見られない段階が存在し、ここに達すると定常的練習ではさらなる技能向上を期待することは難しくなる。この段階から脱し更なる向上を導く（=後期学習促進）にはどのような手段が有用で、どのような神経系の変化が必要なのだろうか？我々は、体性感覚入力が運動機能に恩恵をもたらさしめる知見に基づき、経皮的神経・筋電気刺激（TENS）を利用し、運動前短時間の TENS 介入が停滞した運動技能に及ぼす行動学的効果の検証と、その背景にある神経機序の解明を行った。運動課題には掌で 2 つの球を回す手指巧緻運動を用いた。事前の練習によって技能が自動化し、且つ停滞に至った参加者に対し、運動前に運動閾値下の高頻度 TENS を母指球部に短時間介入した。すると運動制御が効率化され、即時的に技能の向上を導くことができた。更に TENS を介入する試行を繰り返すことでその技能レベルは保持され、介入を辞めても維持された。これらの背景には、TENS が主に筋感覚繊維由来で、一次運動野（M1）の興奮性を上昇させ、この状態で運動を行うと M1-大脳基底核回路の機能的結合が強化、固定化されることが存在していた。最後に、TENS を伴う試行を日々反復訓練することで、TENS 介入なしの通常の訓練のみでは、促進できなかった後期学習を段階的に促進することに成功した。自動化された後期運動技能学習をさらに促進するには運動制御の効率化が鍵であり、その裏には運動中枢、特に M1-基底核回路の機能結合強化とその固定化が必要であることが分かった。運動前の短時間高頻度感覚線維刺激は、これらを効果的に誘導できる、いつでも、どこでも、だれでも、できる方法である。

ヒト運動野の可塑性に対する情動の影響

小金丸聡子 1, 2、美馬達哉 1、道免和久 2、福山秀直 1（京大・医、兵庫医科大・高次神経制御系リハビリテーション科学）

我々の学習や記憶はしばしば情動の影響を受ける。しかしながらヒトにおいてその脳内メカニズムは十分に明らかにされていない。特に、逃避行動など負の情動に関わる運動学習についての報告は少ない。今回我々は International Affective Picture System (IAPS) と経頭蓋磁気刺激 (TMS) を用いて、負の情動を引き起こす視覚刺激がヒト運動野の可塑性に影響するかどうかを検討した。一次運動野の LTP 様の変化を誘導する手法として、間欠的シータバースト法を使用した。結果として、我々は負の情動刺激が、ヒト運動野の可塑性を増強し、さらに標的部以外にも LTP 様の効果を引き起こす事を発見した。この現象は、精神運動障害 (Psychotic movement disorder) の神経生理学的基盤である可能性が考えられる。

全身運動・四肢運動協調

着地からのジャンプにおける下肢・体幹の筋活動パターン

飯田祥明、稲葉優希、中澤公孝、金久博昭（東京大学総合文化研究科、東京大学総合文化研究科、東京大学総合文化研究科、鹿屋体育大学）

背景・目的: 着地からのジャンプは、球技をはじめとするスポーツ活動において多用される動作の1つである。その遂行にあたっては、下肢と体幹に位置する筋群の協調的な筋活動パターンが要求されると考えられる。しかし、これまでのところ両セグメントの筋活動パターンを包括的に検討した例はない。そこで本研究は、着地からのジャンプにおける下肢・体幹の筋活動パターンについて検討することを目的とした。方法: 健康男性17名が被験者として実験に参加した。被験者には高さ35cmの台上からの着地からのジャンプを10試行課した。課題動作中、床反力、キネマティクス、および下肢と体幹の筋電図の各データを取得した。筋活動パターンの定量指標として、重心下降および重心上昇の各局面において、筋放電がピークとなる時点(筋放電ピークタイミング)を分析した。結果: 重心下降局面における筋放電ピークタイミングには、脊柱起立筋と大殿筋の間にのみ有意な差が認められ、筋活動ピークの発現順序に特徴的なパターンは観察されなかった。一方、重心上昇局面においては、ヒラメ筋と脊柱起立筋、大殿筋、外側広筋の3筋との間に有意な差が認められ、近位から遠位の順で筋活動のピークが発現するパターンが観察された。

熟練度が全身リズム動作中の共収縮レベルに及ぼす影響

三浦哲都、工藤和俊、大築立志、中澤公孝（東京大学大学院 総合文化研究科）

近年、主に上肢における短期の運動学習により主働筋一拮抗筋の共収縮レベルの低下が報告されている。本研究は、全身動作中の下肢筋群の共収縮レベルが熟練度により異なるのかを検証した。全身リズム動作熟練者であるストリートダンサー8名(国際大会優勝者2名を含む)とダンス未経験者9名に、ストリートダンスの基本のリズム動作(ビートと膝屈曲を同期)を8種類の周波数(40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180bpm)で行わせ、下肢の筋活動測定(前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋)および2次元動作解析を行った。屈筋と伸筋の筋電図の相対差分信号から共収縮レベルを算出した。また、股関節、膝関節、足関節の関節角度範囲、関節角速度を算出した。下腿、大腿の屈筋一伸筋の共収縮レベルは非ダンサー群と比較してダンサー群において有意に低かった。すべての関節における関節角速度のピーク値の絶対値、膝関節と足関節における関節角度範囲は非ダンサー群よりもダンサー群の方が有意に高かった。以上の結果は、ダンサー群における全身リズム動作中の下肢筋群の共収縮レベルが長期の運動学習により低下し、より大きな関節角速度絶対値と関節角度範囲を実現していることが明らかになった。またこれらの結果は、運動学習における主働筋一拮抗筋の共収縮レベルの低下が、上肢の運動のみならず全身リズム動作中の下肢においても、また短期運動学習のみならず数年という長期運動学習においても観察されることを示し、共収縮レベルの低下が運動学習における一般原則であることを示唆する。

空間位置を音階で定義した音によるトラッキング運動 -競泳ドルフィンキックの場合-

下門洋文、市川浩、椿本昇三、高木英樹（筑大院・人間総合・体育科学、国立スポーツ科学センター）

現在の競泳規則では、すべての種目において水中でのドルフィンキック動作が許されており、これは水中での周期的な推進運動である。競泳指導において、水中環境で指導者が求める周期運動をコントロールできるようになれば、さらなるパフォーマンス向上が期待できる。本研究では、モデル選手のドルフィンキック動作を音で表現し、トラッキングすることで泳動作に及ぼす影響を調査した。モデル選手(全国大会出場レベル)のドルフィンキック動作から得られた二次元の足先位置座標を標準化し電子音に変換した。音は足先位置が高い位置にある場合は高音階(900 Hz)、低い位置は低音階(300 Hz)となるように空間位置を定義した。これをターゲット音とし、競泳選手13名(全国大会出場レベル)に音の定義を十分説明した後、水中ドルフィンキックで音を聞きながら足先位置をトラッキングして泳いでもらい、水中カメラ(60 Hz)で撮影した。被験者全体の足先位置の平均値を見ると、ターゲットとは逆位相の結果となった。そこで、ターゲット音の高音階の瞬間と身体各部の動作ピークの瞬間との誤差を評価した。しかし、本来定義したものと異なり、足先位置の高い瞬間と高音階の瞬間が近づく様子は見られなかった。他の運動学的指標と比較したところ、最もピーク時間が近づいたものとして、蹴り下ろし中の大転子の水平方向加速度ピークの瞬間が高音階の瞬間に近づいた。空間位置を定義したものの、時間的なタイミングを最大加速の瞬間で合わせるように音と運動が近づいていた。このことから、音を用いることで競泳の推進運動をコントロールできる可能性があるものと考えられる。

リズム適応における学習と記憶保持特性に与える重力の影響

加島崇史、和田佳朗、桑田成雄、平田豊（中部大院・工・情報工学、奈良県立医科大・医・医、航空自衛隊・航空医学実験隊、中部大院・工・情報工学）

我々の身体運動は地上重力との相互作用のもとで調整されており、重力環境が変化すれば、運動制御の再調整が必要になる。また、運動の学習や記憶保持特性に変調をきたす可能性もある。これまで、微小重力下におけるこうした運動の適応過程については、宇宙飛行士による経験的な内省としての報告はあるが、適応時の学習特性や忘却特性と重力の関係に関する定量的な評価は見あたらない。本研究では、重力環境の変化が運動の学習、忘却特性、ならびに記憶保持に与える影響を評価するため、リーチング動作のプリズム適応実験を、1) 座位と仰臥位、2) 通常重力と過重力環境下で実施し、比較した。その結果、仰臥位は座位に比べ、過重力下では通常重力下に比べ、学習スピードが速く、記憶保持率が高くなることが示された。

落下タイミングの予測で反射的活動は抑制されるか？

須田悠紀、北澤茂、米田継武（順天堂大院）

吊り下げ状態からの不意な落下により、前庭器官に起因した反射的な筋活動が生じるが、自ら落下開始のタイミングをコントロールする場合(自発落下)には生じない(Greenwood & Hopkins, 1976)。自らの運動によって生じる感覚器からの信号は、運動指令のコピーに基づいて抑制されると考えられている(Mittelstaedt, 1950)。これに従えば、自発落下では前庭器官からの感覚情報が運動指令に基づいて抑制されたと考えられる。では、他者が開始する落下時の反射的な筋活動も、タイミングが予測できれば抑制されるのだろうか。本実験では、吊り下げ状態からの落下に伴う筋活動を、自発落下条件、他者による落下でタイミングを予測できる予測条件、予測できない不意条件、の3条件各30試行で調べた。被検筋は、胸鎖乳突筋、僧帽筋、三角筋、腹直筋、大腿二頭筋、大腿直筋、腓腹筋、前脛骨筋の8筋とした。落下開始40ms後から170ms後までの筋電図を整流し積分した放電量を、被験者ごとに3条件の平均で標準化した後、二元配置の分散分析により統計解析した。落下条件と筋の二元配置分散分析の結果、落下条件で有意な主効果($F_{(2,12)}=16.0, p<0.001$)、と2要因間で有意な交互作用($F_{(14,84)}=2.0, p<0.05$)が認められた。単純主効果の事後解析の結果、被検筋中6個の筋の自発条件と他発予測条件は、不意条件より有意に抑制されていた($p<0.01$)。他発的に開始した落下でもタイミング予測できれば反射的筋活動が抑制されることが明らかになった。

運動指令の違いが同側二肢協調動作の安定性に与える影響

中川剣人、田代哲朗、村岡哲郎、坂本将基、彼末一之（早稲田大学大学院スポーツ科学研究科、日本大学経済学部、早稲田大学スポーツ科学学術院）

【序論】多肢・多関節を同時に制御する協調動作に関する研究は古くから行われている。それらの多くは二肢を能動的に制御するものだが、日常生活やスポーツ場面では、受動的に身体を動かされ、それに対して能動的に協調する場面も存在する。本研究は、二肢を能動的に制御する協調動作と、一肢は受動的に動かされ、もう一肢を能動的に制御する協調動作の様相を比較することで、運動指令の違い（一肢を能動的に動かすか受動的に動かされるか）により協調動作の安定性にどのような影響を受けるかを検討した。【方法】被験者は椅子に座り、右前腕をゴムバンドで肘掛けに回内位に固定した。右足は矢状面上に足関節の底屈・背屈運動が可能な板付きの三脚に固定し、手関節と足関節の周期的な屈曲・伸展動作を行った。手関節および足関節の関節角度変化は、ゴニオメータを用いて測定した。タスク間では、足関節動作(受動、能動)、動作の方向(逆方向、同方向)の要素を組み合わせ、4種類のタスクを7試行を行った。手と足の関節角度変位から算出した位相差を元に、それぞれのタスクの成功率を求めた。【結果・考察】タスク成功率は足関節動作が受動的、能動的に関わらず、逆方向動作が小さく、同方向動作が大きかった。足関節が受動的か能動的かの間に違いは見られなかった。この結果は、協調動作の安定性は運動指令の違い(足関節が能動動作か受動動作か)には影響しないことが示唆され、足関節由来の体性感覚情報が影響していることが予想された。

脚関節間協調に注目した歩行運動の解析

垣内田翔子、橋爪善光、西井淳（山口大院・理工）

生体は熟練した運動を行なう際、複数の関節をそれぞれの状況に応じて臨機応変に協調させて目的の運動を実現している。Bernsteinは運動中、タスク達成に重要なポイントではこのような関節間の協調が強く働くと述べている。そこで、本研究ではヒトの歩行運動中のどのような瞬間に股・膝・踝関節間の協調が生じているかを調べることを目的とし、歩行軌道のUCM(Uncontrolled Manifold)解析を行った。その結果、腰・膝・踝関節の協調によって腰に対する足先の鉛直位置が歩行周期全体に渡り調整されていることがわかった。また、以下にあげる3つの瞬間については、特に関節間協調が強く働いていることがわかった。第一に、片足支持期終期から両脚支持期にかけては、立脚側は関節間協調を活用することで腰の高さと速度を調整し、遊脚側は脚姿勢および関節角速度のばらつきを抑えるような調整がなされている

ことがわかった。第二に、着地前に両脚が協調的に働くことで着地時の足先位置と速度を調節していることがわかった。第三に、脚を前に振り出す際の足先が最も床と近づく瞬間には、その足先の高さが関節協調を使って調整されていることがわかった。すなわち、足先が低い位置を通り地面につまずく可能性の高い瞬間や着地による衝撃で転倒しやすい瞬間において、ヒトは特に関節間協調を活用して足先を巧みに調整し歩行の安定化を図っていることがわかった。

認知運動

運動イメージによる転移

雨宮薫, 小嶋祥三 (東大院・医・脳神経医学, 慶應・人文GCOE)

本研究では、運動イメージを用いて、両側性転移の効果とその学習前後の活動の変化を比較することで、実際の運動を用いない学習とその効果の般化がどのように行われるかを検討した。課題は簡単な左手(非利き手)によるタッピングを用い、運動イメージ学習の前後に同側のテスト(プレテスト・ポストテスト)、その後に反側(右手)によるテスト(転移テスト)を行った。結果、同側学習の成績は上昇し、かつ、右手の成績は左手の成績と同程度へ転移する傾向が見られ、本先行研究結果と同様、運動イメージ学習が効果器非依存の効果を持つ傾向がうかがわれた。fMRI 結果では、同側学習結果であるポストテストの賦活領域はプレテストより減少する一方、転移テストの賦活領域は右手の運動野以外にも上頭頂・下頭頂領域が上昇する傾向が見られた。これら領域は運動イメージ中において強い関連性が示されている領域であり、かつ運動の軌道のコントロールの獲得や抽象的ルール獲得、効果器非依存の学習における関連が示唆されている領域でもある。これらのことより、運動イメージのように、実際の運動学習による修正が不可能な学習の場合にも、抽象的ルールの獲得により学習の転移可能となっていた可能性があると考えられ、かつ同側の学習促進の領域とは異なる領域が関連していた可能性が示唆される。

物体への接触が運動イメージ中の皮質脊髄路の興奮性に及ぼす影響

水口暢章, 坂本将基, 村岡哲郎, 中川剣人, 中田大貴, 彼末一之 (早大院スポーツ科学, 日本学術振興会, 早大スポーツ科学, 日大経済)

「運動イメージ」は実際の動きを伴わずにある動作を想起するものと定義される。我々は物を扱う運動イメージ中に実際にその物に触れて行くと皮質脊髄路の興奮性がより高まることを報告した。本研究ではイメージする動作で扱う物と実際に触れる物の「形」が異なった場合や物の「質感」が異なった場合の皮質脊髄路の興奮性を検討した。皮質脊髄路の興奮性は経頭蓋的磁気刺激(TMS)によって誘発される運動誘発電位(MEP)の振幅から求めた。MEP は第一背側骨間筋から記録し、TMS 強度は安静時閾値の 1.2 倍とした。運動イメージはスポンジボール(4cm)を握る動作とした。物の形が異なる条件では直径 2cm のボールに触れながら運動イメージを行った。質感が異なる条件では表面が滑らかなプラスチックのボールに触れながら運動イメージを行った。その結果、触れるボールの大きさが運動イメージと同じだった場合のほうが異なった場合と比べて MEP 振幅が大きかった。しかし、触れる物の質感の違いによる MEP 振幅の差はなかった。さらに、物対に接触している部分の広さを変化させた場合の MEP を測定した。その結果、物に接触している面積を広くしても運動イメージ中の MEP にさらなる増大は見られなかった。つまり、皮膚刺激の強さは運動イメージ中の皮質脊髄路の興奮性に影響しないと考えられる。これらのことから、物を扱う運動イメージ中に「同じ形」の物に触れて行くとより皮質脊髄路の興奮性が高まる可能性が示唆された。

視覚-運動連合学習には視覚情報に対するセルフエージェンシーが必要である

廣瀬智士, 小原一樹, 内藤栄一, 松村道一 (情報通信研究機構, 京大院・人・環, ATR-CMC, DCN, 大阪大院・医)

我々が運動を行う際、視覚座標上で計画した運動を、運動指令に変換しなければならない。我々は運動を繰り返し、運動指令と対応する視覚入力との関係を学習することで、運動指令と視覚上での動きを対応づけている。本研究では、自己の動きに帰属する(視覚フィードバックである)視覚上での動きのみが視覚-運動の関連付けに貢献することを示す。参加者は、後述するトレーニングの前後で以下の課題を行った。右もしくは左に、試行毎にランダムに動く円を観察しながら、あらかじめ指示されている方向(右もしくは左だが円の動く方向とは無関係)に手首をできるだけ早く動かす単純反応課題を行った。トレーニングでは、静的に呈示される視覚刺激の位置に対して、反対方向に手を動かす、選択反応課題を用いた。この際、半数の参加者では、自分の手の動きに連動してこれと反対方向に動く円を観察させ、運動と視覚フィードバックの方向が逆転する環境を訓練した[Agency Training (AT)群]。もう一群では、視覚刺激は手と反対方向に動くが、実験者が円の動きを操作し、自分の手に連動しない環境を訓練した[Non

Agency Training (NAT)群]。トレーニング前には、両群とも、円の動く方向と手を動かす方向が同じ条件（一致条件）で、方向が逆の条件（不一致条件）に比べて、反応時間が短くなった。一方、トレーニング後には AT 群においてのみ、不一致条件の反応時間がトレーニング前より短くなり、一致条件と不一致条件の有意な差は見られなかった。これは、AT 群においてのみ、トレーニングによって、運動とは逆向きへの視覚刺激の動きが、自己の手の動きと関連づけられた結果であると考えられる。本研究の結果は、視覚—運動連関の書き換えには、自己の運動に帰属する視覚情報を観察することが重要であることを示す。

観察学習中の一次運動野の活動変化

森山倫良、水口暢章、坂本将基、彼末一之（早稲田大学、スポーツ科学学術院）

「観察学習」とは、身体を動かさずに観て覚えることである。観察学習は特に新しい運動技能の学習の初期で行われ、例えば、熟練者の動作を模倣しようとして観察する際の学習方法である。しかし、その神経機構は明らかになっていない。そこで本研究では、観察学習中の一次運動野(M1)がどのような活動を示すかについて検討した。3種類の実験を行った。すべてで10種の手話の指文字を、10回で1setとし、5set繰り返して観察する時にM1を磁気刺激し、運動誘発電位を第一背側骨間筋から記録した。また、全実験の初めにコントロールとして、スクリーン内の止まっている右手を筋活動がない状態で観察させ、TMSを約10秒間隔で10回与えた。実験1では、TMSを9番目の指文字が提示されたときに与えた。実験2では、指文字の順序を実験1と逆にし、実験1の9番目と同じ指文字を2番目に提示し、その時にTMSを与えた。実験3では、9番目以外がset毎に異なる順序の映像を提示した。TMSを与えた9番目の指文字は実験1と同一とした。実験1から、観察学習が進むにつれて運動誘発電位が小さくなることがわかった。さらに実験2では実験1より早くに運動誘発電位が小さくなり、実験3ではset毎に大きな変化は見られなかった。このような結果は、学習過程には運動誘発電位が大きくなることを示唆する。

幻肢の状態を客観的に捉える方法

河島則天（国立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）

多くの体肢切断者に生じる「幻肢(phantom limb)」の状態を記述した研究報告では、被験者の内省や臨床的な所見を扱うに留まったものが多く、幻肢の運動の成就や運動感覚の変化を定量的に評価した研究はほとんどみられない。本研究では、Visual analog scale (VAS) による被験者の主観(心理)的尺度と、動作の速度(物理量)に応じたその変化を捉えることで、幻肢の状態を定量的に把握するための心理物理学的评价法の適用可能性を検討した。前腕切断者12名を対象として、幻肢と健側手の両手運動(手首の掌背屈運動)を快適運動速度を基準とした異なる10段階の規定動作速度下で実施した。各動作速度での運動実施後に主観的運動感覚(VAS)の回答と求めるとともに、運動中に切断端の手関節屈筋・伸筋の筋活動、健側の手関節角度を記録した。当日は、結果の詳細を提示し、上記の方法の有用性と問題点について議論したい。

聴覚フィードバック情報に基づく到達運動のオンライン修正

藤井進也、平島雅也、野崎大地（東大院・教育・身体教育学）

ヒトの聴覚系は、視覚情報の二経路処理モデル(“where”と“what”経路)と同様に、音の高さと聴こえた位置とを異なった神経基盤を用いて情報処理している(Alain et al., PNAS, 2001)。この知見に基づくと、ヒトの脳内においては、音高情報の誤差よりも、音定位情報の誤差と視覚運動情報の誤差を結び付ける方が容易であり、ヒトは音定位の誤差フィードバック情報に基づいて運動をオンライン修正できる、という仮説を立てることができる。本研究では、到達運動課題を用いた、2つの実験により、この仮説を検証した。第1の実験(N=6)では、視覚カーソルの位置に応じて音の定位を変化させ、第2の実験(N=6)では、視覚カーソルの位置に応じて音高を変化させた。両実験とも、被験者に前方への到達運動を十分学習させた後に、視覚運動回転による視覚・聴覚情報の誤差を突如生じさせ、聴覚誤差フィードバック情報のみを与えた場合に到達運動がオンライン修正されるかを検証した。実験1の結果、音定位の誤差フィードバック情報に基づいて運動が機能的にオンライン修正されていることが確認された。実験2の結果、3名の被験者は、音高の誤差フィードバック情報に基づいて運動を機能的にオンライン修正することができなかった。これに対し、残り3名の被験者(2,3歳からのピアノ経験者)は、音高の誤差フィードバック情報に基づいて運動を機能的にオンライン修正することができた。これらの結果は、幼少期に音高情報に関わる脳内聴覚運動マップが形成されていれば、音高の誤差フィードバック情報によっても、運動がオンライン修正されることを示唆している。

聴覚運動統合の神経機構：手指による音高操作に関する皮質領域

橘 亮輔, 柳田 益造, 力丸 裕 (同志社大・院・生命医科, 同志社大・院・理工, 同志社大・院・生命医科)

歌唱や楽器演奏は、音の特徴量(ピッチ, 音色, ラウドネスなど)を素早く正確に操作することを必要とする。このことは、聴覚フィードバックを運動制御に上手く反映させる仕組みを要求する。本研究では、聴覚運動統合に関わる脳領域を検討するために、入出力を簡単化した擬似楽器を操作する際の脳活動を調べた。擬似楽器は圧力センサと波形生成器で構成され、手指でセンサをつまむようにして圧力をかけると、その強弱に応じたピッチを持つ音が生成されるというものであった。目標ピッチに合うよう調整する課題をおこなう際の脳活動を fMRI で計測した。実験の結果、聴覚運動統合をとまなう課題に特異的な賦活が、一次聴覚野, 一次運動野, 側頭平面, 背側前運動野にみられた。また、背側前運動野の賦活は試行毎の制御誤差と正の相関を示した。側頭平面と背側前運動野の賦活は、発声制御の先行研究でも示されてきた。したがって、側頭平面と背側前運動野は、聴覚フィードバックを身体運動に統合するための神経機構を構成していると考えられる。

眼球運動から行動発現まで

前頭眼野による急速眼球運動および滑動性眼球運動の抑制

伊澤佳子 (東京医歯大院・医・神経生理)

動物が興味ある視標を中心窩に捉えて注視している時には、視野内に現れる視標に対して反射的に起こる眼球運動は抑制されている必要がある。大脳前頭眼野は従来急速眼球運動(サッケード)の発現に重要な役割を果たすことが知られているが、我々は前頭眼野において、微小電流刺激によりあらゆる方向の視覚誘導性サッケードの発現を強く抑制する部位が存在することを明らかにした。この前頭眼野のサッケード抑制部位では注視中に強い持続発火を示す注視ニューロンが数多く記録されたことから、この部位は注視の際に働き、サッケードの抑制に関わるものと考えられる。一方、サッケード以外の眼球運動の抑制については、前頭眼野の刺激効果は調べられていない。本研究では、訓練したサルにおいて前頭眼野の刺激による滑動性眼球運動の抑制について調べた。刺激部位では、まず電気誘導性サッケードの閾値と、視覚誘導性サッケードの抑制の閾値を確認した後、滑動性眼球運動に対する刺激効果を調べた。その結果、電気誘導性サッケードが誘発される閾値より低い刺激強度で、前頭眼野の刺激により滑動性眼球運動の発現が強く抑制されることがわかった。この抑制は、catch-up サッケードを伴わない滑動性眼球運動においても認められた。以上の結果から、前頭眼野はサッケードのみならず滑動性眼球運動の発現も抑制することにより、注視の維持に関わるものと考えられる。

眼球運動学習中のサル大脳皮質の神経活動

大藤智世, 竹村文 (筑波大院・人間総合科学・感性認知脳科学, 産総研・ヒューマンライフテクノロジー・システム脳科学)

我々は運動学習のメカニズムを解明するために、サルの追従眼球運動を用いた研究を行っている。追従眼球運動は、視野の広い部分が突然動き出すと、それを追いかけるように短潜時で生じる眼の動きである。この眼球運動は、体の揺れなどによる視野のブレを素早く補正し、視線の静定化に役立っていると考えられ、運動学習をはじめ、さまざまな修飾を受ける。post-saccadic enhancement と呼ばれる現象では、サッケード直後に視野が動く誘発される追従眼球運動が増強する。追従眼球運動の発現に関与する神経回路には大脳皮質 MST 野 (Medial Superior Temporal area) と小脳腹側傍片葉が含まれるが、post-saccadic enhancement の原因と考えられる神経活動が MST 野から記録された。本研究では MST 野が学習にも関与しているかを調べるために、運動学習中の MST 野の神経活動を記録した。眼球速度が減少する学習課題として、視覚刺激(ランダムドット像)を二段階で動かす課題をサルに数百~数千試行繰り返し行わせた。一段階目で記録中のニューロンが最も強く応答する動きで追従眼球運動を誘発し、二段階目で動きを突然止めて視覚誤差を作り出した。運動学習中のサルの眼球運動と MST 野の単一ニューロン活動を記録した結果、全く同じ視覚刺激によって誘発される追従眼球運動の速度は学習の初期から有意に減少した。一方、MST 野のニューロン活動は有意な変化を示さなかった。本研究の結果より、MST 野は追従眼球運動の学習の初期には関与しておらず、運動学習の座は MST 野より下流に位置することが示唆された。

短潜時の修正運動制御に学ぶ

竹村文, 安部川直稔, 河野憲二, 五味裕章 ((独)産総研・ヒューマンライフテクノロジー・システム脳科学, NTT・CS研, 京大院・医学研究科・認知行動脳科学, NTT・CS研)

例えばボールやコップを取ろうとしたときなど、私達は日常的に眼と腕の協調運動をなにげなく

行っている。このとき、不意に体勢が崩れても目標物を手に取ることができるが、このようなアクシデント時の修正運動はどのようなメカニズムでおきているのだろうか？近年、腕の到達運動中に背景である視覚刺激を動かすと、腕軌道がその動きを追うように逸れることを五味らが発見した。このような無意識な腕のオンライン修正運動は「短潜時腕応答」と名づけられ、実験室で条件を揃えて誘発することができ、定量的に解析することが可能になった。予備実験ではあるが、ヒトに近い筋・骨格系を持つサルを対象とし、背景である視覚刺激を動かしたときの腕の軌道と眼球運動を記録しながら、視覚の動きの情報を処理していると考えられる大脳皮質MST野(Medial Superior Temporal area)をムシモールで抑制した。すると、眼と腕のそれぞれに異なる障害が現れた。腕運動では、対側の腕をもちいたときの短潜時腕応答が消失した。一方、同時に測定した眼球運動では、同側方向にむかう眼球運動が障害を受けた。このことから、視覚を処理する領域より下流で運動コマンドを構築するメカニズムが、眼と腕では異なることが示唆された。

ラットにおける上丘両側性破壊による自発運動への影響

長谷川良平、野田康剛、長谷川由香子（産総研・ヒューマンライフテク・ニューロテク）

ラットの上丘は古典的には視覚の主要経路の一つと有名であるが、上丘深層の電気刺激実験では頭部運動やロコモーションなどの定位行動が誘発されたり、逆にすくみ行動が引き起こされたり、多様な運動を誘発することもわかってきている。本研究では、しばしば上丘前方部の電気刺激によってすくみ行動が誘発されやすいことに着目し、この部位が定位行動の抑制に関わるという仮説を立てた。この仮説を検証する第一段階として、通電による局所脳破壊法を用いて上丘前方部を標的として両側性に破壊し、自発的な移動行動に誘発する回転カゴを用いて運動量の変化を測定した。その結果、実験に用いた個体のうち、過半数(8匹中5匹)において破壊後に回転数が有意に増加した。これらの個体では破壊後数日で回転数を伸ばし始め、なかには破壊前の回転数の数倍にまで達したものもあった。これら結果は、上丘前方部が本来、定位行動のような移動を伴うような運動を抑制する働きを持っていることを示唆している。

複数ニホンザルにおける上肢運動の無意識的な同調

長坂泰勇、Zenas C. Chao、長谷川有美、能登谷智則、藤井直敬（理研・BSI・適応知性研究チーム）

社会において他者との間で適応的な行動をとるためには意識的に行動を変化させるだけでなく、無意識的なプロセスの関与が必要であると考えられている。しかし意図的な同調行動や模倣行動を扱った研究はこれまで多数行われている一方で、無意識的な同調行動に焦点を当てた研究はごく少数である。またヒト以外の動物を対象とし、行動(比較認知心理学)と脳(神経科学)の両面から検討する試みはこれまでほとんど見られなかった。本研究では、神経科学的な検討に先立ち、複数のニホンザルの無意識的な行動の同期現象について行動科学的検討を行った。はじめに2つのボタンを交互に押すことを3頭のサルに訓練した。訓練後2頭のサルを対面させ、訓練と同様なボタン押し課題を行わせた。各個体のボタン押しのスピードの変化を比較したところ、個体により速さの変化は異なるが、個体が単独でボタン押しを行っているときのその速さと対面条件での速さに変化が認められた。さらにその速さはペアとなったサルのボタン押しの速さの整数倍に近似した。続いて対面状況において視聴覚情報を統制した実験を行ったところ、特定のペアにおいて対面個体の視聴覚情報がボタン押しの速さに影響していることが示された。以上の結果から、ニホンザルにおいてもヒトと同様な行動の同調現象が生じることが示された。さらに訓練期においてボタン押しを他個体と同調するよう学習させていなかったため、この同調現象は無意識的あるいは無意図的な同調行動であることが示唆された。

歩行

トレッドミル歩行およびその経験がトレッドミル上での視知覚に及ぼす影響

谷部好子、渡辺はま、多賀巖太郎（高知工科大学総合研究所、東京大学大学院教育学研究科身体教育学コース）

本研究は、トレッドミル歩行及びその経験による視知覚の調節を示す。実験1ではトレッドミル非経験者18名を対象とし、トレッドミル歩行(W)、トレッドミル上での立位(Str)、床上での立位(Sfl)の3条件で足元に水平の縞の仮現運動画像を3秒間提示した。画像の運動方向には上か下へ物理的バイアスを掛け、どちらの運動が見えたか回答を求めた。下へと回答された頻度に関する分散分析の結果、条件の効果は有意であり($F(2,34)=7.292, p<.005$)、条件 $W >$ 条件 $Str =$ 条件 Sfl ($MSe=0.004, p<.05$)であった。また条件 W での頻度はチャンスレベルより有意に高かった($p<.05$)。以上よりトレッドミル歩行非経験者では歩行中に下向きの運動が知覚されやすくなることが確認された。これは通常の歩行で経験される地面の視覚的流動が歩行と連関を成し下向きにバイアスがかかるためと考えられる。実験2では運動方向判

断へのトレッドミル使用経験による影響を調べた。トレッドミルを習慣的に使用した場合、流動するベルトと静止した地面とのどちらかに運動視が適応する可能性がある。前者なら条件 Str で条件 W と同様のバイアスが生じ、下向きの運動知覚の頻度がこの 2 条件で条件 Sfl に比べて増えると予想されるが、後者なら条件 W で下向きの運動知覚へのバイアスが消え、3 条件の差が無くなると予想される。そこでトレッドミル習慣的使用者 18 名を対象としたところ、3 条件に有意差は無く後者の予想が支持された。トレッドミル歩行経験に伴い視覚的流動の無い地面がトレッドミル歩行との連関を形成し、下向きへのバイアスが消えると考えられる。

歩行中の手先振動を抑制するシナジーの解析

東郷俊太、香川高弘、宇野洋二（名大院・工・機械理工学）

人間には自然に行うことの出来る、巧みな動作がたくさんある。その中でも本研究では、コップの水をこぼさずに運ぶというタスクに注目し、人間がどのような方策を用いてこの巧みな動作を実現させているのかを解析した。このタスクを達成するためには、手先のジャークを小さくすることと、コップの角度を一定に保つことが重要であると仮定し、三次元位置計測装置を用いて、身体各部位のキネマティクスデータを取得し、解析を行った。水が入ったコップを持って歩行をする場合と、水が入っていないコップを持って歩行する場合を比較した結果、水が入ったコップを持って歩行する場合のほうが、手先のジャークが小さくなっており、コップの角度の分散も小さくなっていることが確かめられた。次に、手先のジャークを小さくし、コップの角度を一定に保つために、人間はシナジーを用いている、すなわち各関節を協調させているという仮説を立てた。このことを確かめるために、人間のシナジーを定量的に評価するUCM解析と呼ばれる解析法を用いた。UCM解析とは冗長性を持つ多要素（各関節）の分散を性能変数（手先ジャーク、コップ角度）に直接性能を与えないUCM成分と、直接影響を与えるORT成分の異なる二つの分散成分に分ける。UCM解析により得られた結果から、人間が手先のジャークを小さくし、コップの角度を一手に保つために各関節を協調させていることがわかった。また、視覚情報の有無を実験条件に加えた結果から、振動抑制の動作における視覚情報の働きについても考察していく。

歩行時の特徴的動作に基づく関節間協調の構成要因の評価

船戸 徹郎、青井 伸也、土屋 和雄（京大・工・機械理工、京大・工・航空宇宙、同志社大・理工・エネルギー機械）

歩行運動では各関節や筋が独立に制御されているのではなく、各関節の運動には強い相関（関節間協調）が見られることが知られている。Ivanenkoら（Y.P.Ivanenko et. Al., J.Neurophysiol, 2007）はこれらの協調が下肢の伸縮と回転に対応していることを示しており、さらに下肢の伸縮と回転に対応する指令はネコの後脊髄小脳路においてが確認されていることから（R.E.Poppele et.al., J.Neurophysiol, 2002）、これらの特徴点の動きが運動の生成に関与している可能性がある。一方でIvanenkoらの研究では、検討する特徴点の動きが下肢の伸縮と回転に限定されており、より適切な動きがある可能性は否定できない。特に下肢関節のみではなく、上体まで含めた全身運動でみられる協調がどのような物理的要因によって生成されているかについては調べられていない。そこで本研究では、歩行中の全身の関節間及び重心の伸縮・回転の考えられるすべての動きの組み合わせと歩行中の協調パターンとの比較を行う。このとき、組み合わせの数が膨大なることを防ぐために、各動きを試行ごとのばらつきの大きさに基づいて評価し、比較する動作をばらつきが少ないものに限定する。ばらつきを評価する方法として、全身の関節運動を特定の動きに関与する動きと関与しない動きに分類して比較する Uncontrolled Manifold 仮説に基づく方法（J.P.Scholz and G.Schoner, Exp. Brain Res.,1999）を用いる。

このように 1:歩行中でばらつきの少ない動作を取り出し 2:それらの組み合わせによってできる動作と歩行中の関節間協調とを比較することで、関節間協調が生成される物理的要因を検討した。その結果、重心・足首の並進移動、遊脚の回転を含む動きが関節間協調を最もよく表すことが分かった。

歩行中の後方転倒誘発刺激に対する補償動作パターンの解析

香川高弘、太田雄、宇野洋二（名大院・工・機械、名大院・工・機械、名大院・工・機械）

本研究では、ヒトの 2 足歩行における後方転倒誘発刺激に対する補償動作を解析した。後方転倒に対する安定性は、支持脚足関節に対する身体の重心位置と速度によって評価できる。後方転倒刺激に対して重心が前方に移動できるかどうか依存してその補償動作パターンが変化するという仮説を立てて、苑検証実験を行った。トレッドミル上の歩行において、着地時にベルト速度を急激に減少することで後方転倒を誘発する外乱を与え、その補償動作パターンと後方転倒の安定性との関係を評価した。実験の結果、後方転倒の安定性に応じて 2 つの異なる補償動作パターンが見られた。不安定な場合、遊脚足部が支持脚側部より後方に位置するように急速に着地してその後の歩行リズムの位相が進む動作パタ

ーンが見られた。外乱がより小さい場合、スイング動作を継続して位相が遅れるパターンが見られた。また、遊脚の関節角軌道の違いは遊脚初期から中期に現れた。これらの結果から、ヒトの歩行制御系は、将来の転倒を予測してスイング脚の動作と歩行リズムを制御していることが示唆される。

脊髄

覚醒行動下のサルにおける筋求心性神経へのシナプス前抑制

金 祉希、関 和彦（国立精神・神経医療研究センター、神経研究所、モデル動物開発研究部門）

Wallら(1958)は、脊髄内微小電流刺激によって誘発された逆行性電位を求心性神経末梢部で記録し、そのサイズによってPAD (Primary afferent depolarization)を伴うシナプス前抑制の大きさを評価できる事を報告した(興奮性試験)。我々は、覚醒行動下サルの筋感覚神経にこの興奮性試験を適用し、随意運動時に筋求心性神経へのシナプス前抑制がどのように働くのかを評価した。1頭のサルに手首の屈曲伸展運動を行わせ、橈骨神経深枝(DR)から短潜時入力を受ける脊髄ニューロンを検索し、その近傍で微小電流刺激を行い(10Hz, 1-20 μ A)、DRにおいて誘発される電位を記録した。DRからの記録や刺激はカフ電極を慢性的に埋め込む事により安定的に行った。その結果、DRにおいて38の誘発電位が記録された。それらの中には前腕伸筋群の筋電図活動を伴う電位があった。DRは、求心性線維と遠心性線維が混在しているので、脊髄内微小電流刺激によって求心性の逆行性電位だけでなく、遠心性の順行性電位も誘発する可能性がある。そのため、弱い刺激電流で刺激した時(10 μ A以下)でさえこの筋電図活動が見られるものは、順行性電位と判断し、解析データから除いた。その結果25の電位が逆行性電位として同定された。この逆行性電位のサイズは、手首伸屈トルクを一定に維持する運動局面において有意に減少する事がわかった($p < 0.05$)。この結果は、関節トルクを一定に維持する事が求められる運動時には、一次求心性神経へのシナプス前抑制が減衰し、主動筋からの求心性情報が積極的に中枢神経系に取り込まれていることを示唆した。

脊髄介在ニューロンは把握運動におけるシナジーの形成に貢献しているか？

武井智彦、関和彦（国立精神・神経医療研究センター・神経研究所・モデル動物開発研究部）

霊長類の手には27個もの筋肉が集まっており、中枢神経系がこの冗長自由度をどのように制御しているのかは未だに明らかにされていない。我々はこれまでに、脊髄前運動性介在ニューロン(premotor interneuron, PreM-IN)が手指の複数の筋群を支配していることを明らかにし、これらPreM-INが手指筋群の協働活動パターン(=筋シナジー)の形成に関与していることを示唆してきた。しかし、これらの投射パターンが実際の手指筋群の協働活動パターンと相関しているのかについては明らかではなかった。そこで本研究では、上肢筋活動から筋シナジーを抽出し、これとPreM-INの投射パターンを比較することで、PreM-INの筋シナジーへの関与をより詳細に検討した。まず、3頭のマカクザルに対して把握運動課題を訓練し、課題中の脊髄ニューロン活動および上肢筋活動($n=16$)の記録を行った。次に、筋活動から筋シナジーを抽出するため、非負値因子分解によって筋活動を複数の時系列信号の重み付き線形和として分解した。その結果、3個のシナジーに分解することで全筋活動の80%以上を説明できることが判明した。これら3つのシナジーは、それぞれ(1)手指の屈筋群、(2)手首の屈筋群、(3)手指および手首の伸筋群に高い係数を持っており、これらはPreM-INの投射パターンと強く一致していた。さらに、個々のPreM-INの投射パターンとシナジー係数の一致度を定量化したところ、有意な相関が認められた。これらの結果は、脊髄PreM-INが把握運動における筋シナジーを形成していることを強く示唆するものであった。

運動軌跡は一次求心性ニューロンによってどのようにコードされているか？

梅田達也、坂谷智也、山下沖人、佐藤雅昭、森本淳、関和彦、川人光男、伊佐正（生理研・認知行動発達、ATR、国立精神・神経センター）

体性感覚系の脳領域におけるニューロン活動は正確に四肢の運動をコードしていると考えられる。これまで、触覚刺激に対する単一の一次求心性ニューロンの応答を記録し、多数のデータを解析することで刺激位置を推定できることが報告されている。しかしながら、集団として一次求心性ニューロンの活動パターンが運動軌道をどのようにコードしているか、明確ではない。今回、我々は、サル頸髄の後根神経節(DRG)ニューロンの活動と手/腕の運動軌跡を同時記録し、運動軌跡がニューロン集団の活動でどうコードされるか解析した。2つのマルチ電極アレイ(各48チャンネル; Blackrock microsystems)をイソフルレン麻痺下の2匹のサルのC7/8のDRGに挿入した。指/手首/肘の関節を受動的に動かしたときのニューロン反応を記録し、同時に、手/腕運動の立体軌跡をモーション・キャプチャーシステムで取得した。2匹のサルから合計190個以上のユニット活動をスパイクソーティングにより抽出し、そのうち多くが受動運

動に依ることが明らかになった。Sparse regression 法を用いて DRG ニューロン集団の発火パターンから手/腕の運動軌跡をデコーディングしたところ、いくつかの運動に関して正確に推定する事ができた。現在、我々はニューロンの種類(皮膚受容体・筋紡錘)と受容野がどう手/腕の運動軌跡のデコーディングを反映しているか解析している。

ペダリング運動と経皮的電気刺激の併用治療が spinal interneuron に与える影響

山口智史、藤原俊之、田辺茂雄、村岡慶裕、大須理英子、大高洋平、里宇明元（慶應大院・医・リハビリ、藤田保衛大・医療科・リハビリ、国病機構村山医センター・臨研センター、ATR・脳研、東京湾岸リハ病院）

脳卒中患者において、ペダリング運動が痙縮の改善に有効なことが報告されている。また、拮抗筋を支配する神経への電気刺激が痙縮の改善に有効なことが知られている。今回、ペダリング運動中に電気刺激を組み合わせて行うことによる脊髄相反性抑制の変化を検討した。対象は健常男性 9 名(年齢 27.1 歳±2.8)。介入は、ペダリング運動+電気刺激(PE-ES)、ペダリング運動のみ(PE)、電気刺激のみ(ES)の 3 課題とし、全対象者に日を変えて実施した。PE-ES は、ストレンクスエルゴ TR と電気刺激装置を用いた。運動様式はアイソニックモード、負荷量 5Nm、正回転で任意のペダル回転速度で実施した。電気刺激は、ペダリング運動中の伸展相(股関節最大屈曲位から最大伸展位)に、総腓骨神経へ行った。PE は PE-ES と同様の運動のみ、ES はストレンクスエルゴ TR 上での座位で PE-ES と同様の電気刺激(同じ強度および周期)のみを行った。すべての課題で、実施時間は 7 分間とした。神経生理学的評価として、ヒラメ筋 H 波を用いた条件一試験刺激法により、2 シナプス性相反抑制を測定した。測定は介入前後、15 分後、30 分後に実施した。PE-ES によるヒラメ筋への Ia 相反抑制は、PE および ES と比較し、有意な増加を認めた($p < 0.01$)。また PE-ES は、介入後、15 分後まで Ia 相反抑制が持続していた($p < 0.01$)。今回、健常者において、ペダリング運動中に電気刺激を組み合わせて行うことによって、個々の治療単独より Ia 相反抑制が増強することが示された。

長期的な身体運動による脊髄反射応答の特異的变化

小川哲也、河島則天、鈴木秀次、中澤公孝（国リハ運動部、国リハ運動部、早大・人間科学、東大院・総合文化）

【背景】脊髄反射応答には可塑的に変化する性質が認められており、また、そのような変化をもたらす一因子として、長期にわたる繰り返しの身体運動への参加が知られている。一方、脊髄反射応答の少なくともその一過性の調節においては、運動課題や外部環境の違いなどの要因が影響することが示されてきた。では、特性の異なる身体運動に繰り返し参加すると、可塑的变化の起こる可能性、あるいはその変化のパターンは異なるのだろうか。身体的背景の異なる群間で横断的な比較を実施した。【方法】大学の体育会レベルにおいて非常に高度にトレーニングされた水泳選手 8 名、陸上長距離選手 13 名、および運動習慣のない若年者 8 名の計 29 名(年齢 21.4 (mean)±3.4 (SD)歳)を対象とし、安静座位における右脚のヒラメ筋に誘発される伸張反射応答を測定、群間で比較した。伸張反射応答の誘発にはサーボモーター制御の足底板による足関節の背屈方向への機械的外乱を用い、刺激強度は足関節の回転速度により 4 段階(100、200、300、400 deg/sec)設定した。【結果と考察】すべての刺激条件について、水泳群が他の 2 群と比較して顕著に大きな応答特性を示した。また、刺激条件に対して得られる応答の関係、すなわち入力特性についても水泳群のみ顕著に高い値を示し、日常的に従事する運動の特性(運動課題や、運動を遂行する環境など)を特異的に反映した脊髄反射応答の可塑的变化の起こる可能性が示唆された。

一次感覚運動領野のリハビリテーション

第一次運動野損傷前後の精密把握動作中の脳血流変化-PET を用いたサル脳の機能イメージング

村田 弓、肥後 範行、西村 幸男、林 拓也、大石 高生、塚田 秀夫、伊佐 正、尾上 浩隆（産総研・ヒューマンライフテクノロジー、生理研・認知行動発達、理研・分子イメージング科学研究センター、京大・霊長研・分子生理、浜松ホトニクス・中央研究所）

脳卒中などで脳が損傷された後にリハビリ訓練が行われるが、その回復のメカニズムは明らかになっていない。運動機能の回復がリハビリ訓練によって促進されるのか、また機能回復にどのような脳領域が関与しているのかを明らかにするために、サルの第一次運動野(M1)損傷モデルを使用した。まず、M1 の手領域にイボテン酸を注入して不可逆的な損傷を作成し、運動トレーニングの有無によっておこる回復過程の違いを調べた。損傷直後は把握動作が不可能であったが、損傷後に精密把握動作(母指と人差し指の先端で小さな物体をつまむ動作)のトレーニングを行った「トレーニング群」では 1 ヶ月半程度で

精密把握が回復した。一方、「非トレーニング群」は手全体で把握する握力把握は回復したが、精密把握の回復は認められなかった。この結果から、運動トレーニングが M1 損傷後の運動機能の回復を促進することが示唆された(Murata et al., 2008)。次に、機能回復に関わる脳領域を特定するために、陽電子放出断層撮影法(PET)を用いて M1 損傷前と損傷後に精密把握が回復した時期の脳活動(脳血流)を調べた。その結果、損傷前と比べ、精密把握動作中の運動前野腹側部(PMv)の活動が上昇する傾向が認められた。PMv の活動は、精密把握が回復して間もない損傷 1~2 カ月後には両側性であったが、回復後の安定期である損傷 3~4 カ月後には損傷半球(麻痺から回復した動作手の支配半球)に局限していた。このことから、両側の PMv が M1 損傷後の運動機能回復に関連し、回復の時期によって各半球の寄与が変化する可能性が考えられる。

健常及び損傷後のマカサル運動皮質における SPP1 の役割変化

杉山容子、肥後範行、大石高生、山下晶子、村田弓、山本竜也、伊佐正 (筑波大・人間総合科学、産総研・ヒューマンライフ、京都大・霊長研・統合脳システム、日大・医・応用システム神経科学、産総研・ヒューマンライフ、筑波大・人間総合科学、生理研・認知行動発達)

これまで、私たちは SPP1 (Secreted Phosphoprotein 1) と呼ばれる遺伝子の発現をマカサル大脳皮質で調べ、主に第一次運動野(M1)に存在する皮質脊髄路ニューロンで特異的に発現していることを明らかにした(Higo et al., 2010; J. Comp Neurol.)。この結果は、SPP1 が運動の遂行に重要な役割を果たすタンパクであることを示唆している。一方、ラット運動皮質損傷モデルを用いた研究では、炎症反応に関わるマイクログリアにおいて SPP1 が発現することが報告されている(Wang et al., 1998; J. Neurosci.)。そこで今回、サル運動皮質損傷後における SPP1 の発現変化を検証することで、1 つのタンパクが運動遂行と、皮質損傷後の炎症の両方に関係するのか検証した。M1 の手指領域にイボテン酸を注入することによって、不可逆的な皮質損傷を作成した後、手指の機能回復訓練を行わせた。手指の巧緻動作の回復が不十分である損傷後 2 週間の時期に組織採取を行い、免疫組織化学法によって SPP1 の分布を調べた。その結果、SPP1 は損傷領域のマイクログリア内外で散在していた。健常個体の M1 とは異なり、損傷周辺領域のニューロンでは、SPP1 の発現は確認されなかった。一方、巧緻動作の回復が見られた損傷後 3 カ月では、SPP1 損傷領域のマイクログリア内に存在していた。さらに、損傷周辺領域のニューロンにおいても、SPP1 の発現が見られた。以上の結果から、サル運動皮質損傷後において SPP1 タンパクは炎症と運動の両方に関与した役割を持つことが示唆された。

Mirror therapy による皮質運動興奮変化

野嶋一平、美馬達哉、小金丸聡子、福山秀直、川又敏男 (神大院・医・リハ、京大院・医・脳機能センター)

近年、mirror therapy(以下 MT)という新しいリハビリテーション治療方法が脳卒中片麻痺患者に応用されている。MT とは、鏡を利用し、健常肢の運動を障害肢に重ね合わせた状況で健常肢を動かすことで錯覚を起こし、障害肢の運動機能の向上を図る方法で、元々は幻肢痛に対する治療として報告されたものである。片麻痺患者への応用では、臨床において麻痺肢の運動機能の改善が報告されているが、その神経学的機序は不明な点が多い。本研究は、経頭蓋磁気刺激(以下 TMS)を用いて、MT による運動関連領域の神経メカニズムの変化と運動学習効果を検討した。対象は健常成人 20 名とし、MT 群と non-MT 群(以下 nMT 群)の 2 群に分けた。運動課題として、2 つのコルクボールを非利き手(左)で 30 秒間に何回回すことができるかを計測した。TMS による脳機能評価では右一次運動野(以下 M1)の運動誘発電位(以下 MEP)と運動閾値(以下 MT)を計測した。介入は両群ともに右手でのボール回し練習を 30 秒間 10 セット実施した。MT 群は鏡を用いて左手が回している様な鏡像を見ながら実施し、一方 nMT 群では動かしていない左手を注視しながら実施した。介入後、ボール回し回数と TMS 指標に関して再評価を実施した。結果は、MT 群におけるボール回し回数が nMT 群に比べ有意に増加し、また運動関連領域の MEP と MT ともに MT 群で有意に向上した。これらの結果は、MT により運動同側の M1 に可塑的变化が生じ、それに伴い運動機能の向上が得られたことを示唆していると考えられる。

脳卒中片麻痺例における運動負荷に依存した脳活動の Laterality

武田湖太郎、安田恒、相原孝次、北佳保里、大高洋平、大須理英子 (ATR脳情報研究所、東京湾岸リハビリテーション病院)

脳卒中をはじめとした脳血管障害の後遺症で最もみられるのが片麻痺である。これまでの fMRI・PET・NIRS などを用いた研究で、麻痺手運動時には様々な活動部位がみられ、また、回復の過程で活動領域が変化することが報告されている。しかし、運動負荷による活動領域の違いを報告した例はない。本研究では NIRS(FOIRE-3000, Shimadzu)を用い、回復期脳卒中例(右放線冠梗塞、左片麻痺)を対

象とし、運動負荷による脳活動のLateralityを評価した。国際10-20法のCzを基準として、近赤外光照射・検出 Probe を格子状(4×7 配列)に、運動関連領域をカバーするよう配置した(サンプリング間隔: 130 ms)。NIRS 計測課題として片手の audio-paced index-to-thumb tapping 課題を 1, 3 Hz の運動速度で行い、安静 15 秒-課題 15 秒-安静 15 秒を 6 回繰り返した。25 ポイントの移動平均処理後、ベースラインを課題前 15-10 秒とした酸素化ヘモグロビン濃度長の課題時平均変化量を MR 画像上にマップし(Fusion, Shimadzu)、活動パターンを比較した。非麻痺手運動時には運動速度に依らず対側一次感覚運動野が賦活したが、麻痺手では 1 Hz 運動時に同側一次感覚運動野が賦活し、3 Hz 運動時に両大脳半球において広範囲の領域が賦活した。また、麻痺手 1 Hz 運動時の脳賦活パターンは非麻痺手運動時とほぼ同等の活動パターンであった。脳卒中片麻痺例において、麻痺手運動では運動速度(運動負荷)に依存した活動パターンがみられることが示された。

運動情報表現

両腕運動学習中の潜在的な視覚エラー割り当てにおける混線

森山翔子、野崎大地 (東大院・教育・身体教育学コース)

新奇な環境下でも正確な運動を遂行できる能力は、動作に伴うエラー情報をもとに、フィードバック制御器(内部モデル)が適切に修正される仕組みによって支えられている。エラーと制御器の対応関係が1対1である片腕運動とは異なり、両腕運動のように複数の制御器が複数の身体部位の動作に関わる場合には、どのエラー情報がどの制御器の修正に結びつけられているかという問題は自明ではない。この問題を検討するため、被験者に、前方への両腕リーチング運動中に右腕の視覚情報(カーソル)のみ呈示しながら、カーソル位置がスタート位置を中心に回転して呈示される視覚運動変換を学習してもらった(実験1)。被験者が変換の存在に気づかないように、回転角度は試行毎に漸増させた。その結果、視覚情報を利用できる右腕の運動方向が変換に適応し徐々に変化するのに加えて、視覚情報を与えていない左腕運動にも同じ方向への適応的変化が観察された。この傾向は視覚情報を身体の左側に呈示した場合、特に顕著だった。また、左右の腕にそれぞれ逆方向の回転変換を課すと、同方向の回転変換を課した場合に比較して、適応の程度が有意に阻害された(実験2)。これらの結果は、視覚情報が右腕由来だという顕在的な知識を持ちながらも、視覚情報の身体に対する相対的な位置によっては、左腕制御器が右腕エラー情報を潜在的に参照してしまったことに起因する(実験1)とともに、このエラー情報参照の「混線」は両腕の視覚情報を呈示した場合にも存在する(実験2)ことを示唆していると考えられる。

両腕運動学習の汎化様式から明らかになった両腕運動情報の掛け算的情報表現

横井惺、平島雅也、野崎大地 (東大院・教育・身体教育学、学振・特別研究員(DC)、東大院・教育・身体教育学、東大院・教育・身体教育学)

片腕到達運動における運動学習効果の未学習方向への汎化の程度は、運動が学習方向から離れるに従い徐々に減少する(Thoroughman & Shadmehr, Nature, 2000)。この汎化パターンは、脳内の運動学習過程における運動方向の情報表現を反映していると考えられている。一方、我々はこれまで、両腕到達運動中の一方の腕の運動学習効果も、反対側の腕運動が学習方向から離れるに従い減少することを示してきた(Yokoi et al, SfN, 2008, 2009)。これは、到達運動の学習過程に、同側だけでなく対側の腕の運動情報も表現されていることを示唆している。では、それらはどのように相互作用しているのだろうか? 8名の被験者に、両腕同時に前方への到達運動を行いながら、左腕に課した新奇な力場を学習してもらい、学習効果が、両腕を各々異なる方向に動かしたときにどのように汎化するかを調べた(右腕 6 方向、左腕 8 方向)。その結果、左腕運動方向に依存した汎化曲線のゲインが右腕の運動方向に応じて変化する、すなわち汎化パターンが各腕の運動方向の関数の積として近似できることが明らかとなった。運動学習過程を模した数学的モデルの考察から、こうした汎化パターンが観察されるためには、モデルの構成素子が左右の腕の運動情報を積の形で表現している必要があることが示唆された。このような情報表現(Gain-field)は、任意の変換を学習するための基底関数として機能しうる(Pouget & Sejnowski, JCN, 1997)ため、互いの腕の運動状況に応じた柔軟な協調運動制御の基盤となっている可能性がある。

Interpreting the neural activity of monkey's primary motor cortex during reaching movement using joint angular velocity and joint torque

上田大志、新井直樹、田村優治、宮下英三 (東工大院・総理工・知能システム)

We have previously shown that the neural discharge rate of the arm region of monkeys' primary motor cortex during a reaching movement is explainable with a linear combination of shoulder-elbow joint angular velocity and its torque, especially when treating the extension and flexion

part of the shoulder and elbow movement selectively. In this experiment, we have confirmed the proposed model under two additional conditions: 1) different amount of force on the hand and 2) two workspaces. The model with joint angular velocity and joint torque showed again convincingly good performance, and this is even better for most of units (85%) with the direction selective (extension or flexion) models.

筋座標系仮説に基づく一次運動野モデルから生じる見かけ上の筋及び空間情報表現ニューロン 平島雅也、野崎大地（東大院・教育）

「一次運動野(MI)ニューロンが何をコードしているのか」という問いには長い論争の歴史がある。筋活動をコードしているとする筋座標系仮説(Evarts 1986)、集団として空間座標系での運動の方向をコードしているとする空間座標系仮説(Georgopoulos et al. 1988)、さらにはそれら両方をコードしているとする仮説(Kakei et al. 1999)が存在する。Todorov(2000)らは、MIニューロンは筋活動をコードしているという仮定を用い、運動中のニューロン活動を予測したところ、ニューロン集団としてはあたかも運動方向をコードしているかのように振る舞うことを報告し、それ以降、筋座標系仮説が有力と考えられるようになってきている。本研究では、筋座標系仮説を用いて、Kakeiらの実験結果を再現する座標変換ニューラルネットワークモデルを提案する。本モデルでは、空間座標系における目標運動方向が、姿勢(筋長)によってゲイン変調された信号が、MIニューロンに入力されると仮定した。ニューロンは筋にのみ接続し、接続構造上はすべて等質なニューロンであることに注意されたい。このモデルに回内位、中間位、回外位の3姿勢において、8方向への運動課題を学習させた。その結果Kakeiらの報告と同じように、空間的ニューロンが最も多く出現し、筋的ニューロンに近づくにつれ数は減少した。また筋的ニューロンほど、姿勢変化に伴うゲイン変化の大きいニューロンの割合が高いという点まで再現することができた。この結果は、筋活動コードニューロンであっても、見かけ上、筋や空間情報に相関を持つ場合があることを示している。

運動前野と一次運動野

マカケザルの淡蒼球内節(GPi)から背側運動前野(PMd)への多シナプス性入力様式

佐賀 洋介、平田 快洋、高原 大輔、井上 謙一、宮地 重弘、南部 篤、丹治 順、高田 昌彦、星 英司（玉川大・脳研、京大・霊長研・統合システム、京大・霊長研・高次脳、生理研・統合生理・生体システム）

生理学的実験によりPMdの吻側部(F2r)と尾側部(F2c)は、異なった機能的役割を担っていることが明らかとなってきた。そこで、この機能分化の構造的基盤を明らかとすることを目的として、シナプスを越えて逆行性に伝搬する性質がある狂犬病ウイルスをトレーサーとして用いることによって、大脳基底核の出力部位であるGPiからF2rとF2cへの経シナプス性入力を解析した。狂犬病ウイルスをF2rまたはF2cへ注入後3日目の標本を作成することによって、視床を介して注入部位へ投射しているGPi細胞を同定することができた。標識細胞のGPi内での分布を解析したところ、GPiの連合領域がF2rへ投射する一方で、GPiの運動領域がF2cへ投射していることが明らかとなった。これらの結果は、F2rとF2cはそれぞれ異なった情報を大脳基底核から受け取っており、こうした入力情報の差がPMd内の機能分化につながっていると示唆された。

「抽象的動作」と「視覚空間」の情報が運動前野へ入力する経路は異なる

山形 朋子、中山 義久、丹治 順、星 英司（玉川大・脳研）

運動前野は視覚誘導性の運動に主要な役割を果たすことが知られている。我々は、視覚情報を運動に変換する過程(視覚運動変換)は、「視覚空間情報」と「抽象化された動作情報」のどちらの視覚情報に基づくかによって異なる、という仮説を検証しながら、運動前野の役割を調べている。本研究では、2つの情報がどのような様式で運動前野に入力しているかを調べるため、「視覚空間情報」と「抽象的動作」への視覚応答について調べた。運動前野の背側部(PMd)と腹側部(PMv)は解剖学的に入出力部位が異なることが知られており、電気生理学的にはその機能が異なることが示唆されているため、視覚応答はPMdとPMvに分けて比較した。「視覚空間情報」へは、PMd、PMvともによく応答した。応答潜時の解析から、視覚空間情報は90ミリ秒でPMdとPMvに到達することが分かった。また、PMd、PMv細胞は記録半球とは対側の視覚空間情報に強く応答する傾向があった。視覚応答を興奮応答と抑制応答に分けて調べた結果、この対側優位性は興奮応答を示す細胞だけにみられた。「抽象的動作」にはPMdがよく応答した。PMdの抽象的動作への応答潜時は150ミリ秒であり、空間情報への応答より遅いことが分かった。また、抽象的動作の指示内容である「左右」には、左(対側)指示や右(同側)指示への優先的な応答傾向はないことが分かった。まとめると、運動前野の視覚応答は、応答潜時と応答特性の観点から、空間情

報と抽象的動作情報で異なることが示された。以上から、運動前野は「視覚空間情報」と「抽象化された動作情報」を異なる経路から受け取ることが示唆された。

運動前野背側部における仮想レベルから運動レベルへの動作の変換

中山義久、山形朋子、丹治順、星英司（玉川大・脳科学）

我々が随意行動を計画する際に、具体的にどのような運動をとるかを決定する前に、より高次のレベルで動作を計画しなくてはならない場面がみられる。たとえば、「隣の部屋に入って左側の本を持ってくる」という行動を計画した時点では、目の前に本がないため、実際にどこに手を伸ばせばよいのかを決定することができない。このように動作には、実際の運動から乖離した仮想レベルのもと、具体的な運動のパラメータを伴う運動レベルのものがあると考えられる。本研究では、仮想レベルの動作の計画と運動レベルの動作の計画を時間的に分離可能な行動課題を作成し、二ホンザルに訓練した。まず指示刺激として視覚物体が呈示され、その内容に応じて右または左への到達を意味した。その後、選択刺激（一対の四角）が呈示され、この色が灰色から白色に変わると運動開始を意味した。選択刺激は、モニター上の様々な位置にランダムに呈示された。サルは指示刺激に基づいて、左または右へのターゲットへの到達を計画し、選択刺激が呈示された後に実際の運動を計画する必要があった。この課題を遂行中の二ホンザルの運動前野背側部(PMd)の細胞活動を記録した。解析の結果、多くの運動前野背側部の細胞が仮想レベルの動作の計画を反映する活動を示すことが明らかとなった。さらに、これらの仮想レベルの動作計画を反映する細胞が、運動レベルの動作の計画へ変換する過程に強く関与することが明らかとなった。

報酬系の活性化がヒト一次運動野に与える影響

美馬達哉、Mohamed Nasreldin Thabit Hamdoon、小金丸聡子、福山秀直（京大院・医・脳機能総合研究センター）

報酬課題は、ドパミン系を賦活することで意志決定や行動に影響を与えると考えられている。ドパミン系は運動統御にも関与するが、ヒトにおいて、報酬課題の遂行が一次運動野(M1)の興奮性にどのような影響を与えるかについては、ほとんど知られていない。本研究では、報酬課題によるM1の興奮性および抑制系回路の変化をTMSによって検討した。13名の正常被験者を対象として、報酬課題と報酬を伴わない対象課題を行わせ、課題遂行中のM1機能を検討した。表面筋電図(EMG)を、左短母指外転筋(APB)から記録した。M1興奮性の評価としてテスト刺激に対するMEP振幅を測定した。抑制系を評価するためには、運動時閾値の95%の強度の条件刺激をテスト刺激の3ms前に与える二連発ペア刺激の手法を用いた(短潜時皮質内抑制:SICI、ペア刺激MEP/テスト刺激MEP比)。報酬課題としては、選択反応課題を用いた。まず、4つの正方形(1秒)がモニター上に提示され、被験者は右手のボタンによって、そのうちの一つを選択する。2秒後に、その選択の結果として、百円硬貨または白色円形が提示される(2秒)。TMSは、結果の提示開始後1秒後に与えた。この試行が8秒ごとに繰り返される。対照課題は、まったく同じ条件であるが、百円硬貨ではなく、たんなる赤色円形が提示される課題である。課題間、ターゲット・非ターゲット間で、MEP振幅に差はみられなかった。しかし、報酬ターゲット提示中のみに、M1皮質内抑制系の過活動が認められた。この結果は、金銭的報酬課題によるドパミン系の賦活がM1の皮質内抑制系回路に影響を与えていることを示唆する。

BMI 関連

運動課題中の EEG データから脳内電流源をベイズ推定する

相原孝次、武田湖太郎、安田恒、大高洋平、田中悟志、花川隆、本田学、佐藤雅昭、川人光男、大須理英子（ATR・脳情報、NCNP・神経研・疾病研究第七部、東京湾岸リハ病院、生理研・心理生理、ATR・脳情報解析）

EEG/MEGはミリ秒オーダーの時間解像度で脳活動を測定可能であるが、EEG/MEGデータから電流源を推定することは不良設定な逆問題であるために、EEG/MEGの空間解像度は低い。この逆問題を解くためには何らかの事前知識が必要である。最近、佐藤らはMEGデータから電流源を推定するための変分ベイズ(VB)法を提案した。この手法では、階層事前分布を導入して構造的な制約と機能的な制約を効果的に組み込むことにより、電流源推定の精度を向上させることが可能である。VB法は、構造MRIと機能MRIによる制約を取り入れてMEGに適用された場合、高い時空間解像度を実現可能であることが、コンピュータ・シミュレーションおよび実験データにおいて示されてきた。そこで、本研究は、実験データを用いて、VB法をEEGの電流源推定に適用した場合の有効性を確かめることを目的とした。健常被験者において、手関節あるいは人差し指の中指節間関節の反復背屈運動課題中に機能NIRS、機能MRI、EEGにより脳活動を計測した。構造MRI制約を取り入れてVB法をEEGの電流源推定に適用し、(1)機

能的な事前情報が無い場合、(2)機能 NIRS 活動を事前情報とした場合、(3)機能 MRI 活動を事前情報とした場合、について電流源推定結果を比較検討した。(1)、(2)、(3)の順に時空間的な解像度が向上する結果が得られ、(2)においても運動肢と対側の感覚運動野に電流源が推定された。従って、NIRS と EEG を組み合わせた VB 推定は、リハビリテーション分野における脳機能計測に有効であることが示唆された。

重度運動障害者の意思伝達支援を行う BMI における P300 脳波誘発手法の検討

高井英明、南哲人、長谷川良平（産総研・ヒューマンテック、豊橋技科大・エレクトロニクス先端融合RC、産総研・ヒューマンテック）

近年、脳と外部機器を直接つなぐブレインマシンインターフェース(BMI/BCI とも)の研究が進められている。BMI は、重度の運動障害により発話や筆記が困難であっても、自身の脳機能を使ってコミュニケーションを行うことを可能とする技術として期待されている。非侵襲的な手法である脳波を用いた BMI による意思伝達システムの例として、P300 スペラー(Farwell and Donchin, 1988)があげられる。スペラーを用いたこのシステムでは、しばしば輝度や色を一瞬変化させること(フラッシュ)によって誘発される事象関連脳波(P300)に着目して利用者の意思決定を解読していた。しかし、P300 等の脳波成分は、刺激タイプによって強度等が変化することが知られている。そこで本研究では、輝度によるフラッシュ以外に、ヒトにとって、特別な刺激といえる「顔」か「文字」、またはその2種類を交互に配置する方法(mix 提示)方法を提案し、それらの成功率を既存の輝度変化による方法と比較した。著者らのグループにて開発された8種類のピクトグラム(単純化した画像)から1つを選択して入力する BMI システムを使って、一般被験者による実験を行った結果、文字提示や顔と文字の mix 提示は、従来の輝度変化に比べ有効であったことが示された。

Decoding two different sequential finger movement from fMRI signal

南部功夫、羽倉信宏、川人光男、内藤栄一（NICT、ATR-CNS、JSPS、ATR-CMC）

近年、デコーディング技術の発展により、fMRI などのヒト非侵襲脳活動から運動パターン(例:じゃんけん運動など)を読み出すことが可能となってきた。しかし、非侵襲脳活動からどのような運動情報が抽出できるか、特に運動系列のような、より抽象的な運動情報の抽出に、この技術が適用可能かは検討されていない。そこで、本研究では、fMRI 脳活動から2つの指の運動系列情報を抽出できるかを検討した。参加者には 1Hz の音にあわせてシンプルな二つの系列(親指→人差し指→中指→小指、もしくは小指→中指→人差し指→親指)を実行してもらい、そのときの脳活動を fMRI で計測した。このうち、運動開始時と運動実行時に関連した fMRI 信号を解析対象とした。複数ボクセルを用いた fMRI デコーディングによって運動系列の判別(予測)を行わせた結果、反対側感覚運動領域および頭頂領域の脳活動から判別が可能であることがわかった。特に、対側感覚運動領域では運動開始時、頭頂領域からは運動実行時の信号から高い判別率で系列情報を読み出すことができた。さらに、頭頂領域の脳活動からは右手と左手にかかわらず、指系列運動の空間的方向を判別できることもわかってきた。これらの結果は、単純な指運動系列は fMRI で計測された感覚運動領域と頭頂領域からの脳活動のパターンから判別できること、また、それぞれの領域における異なる脳情報処理を反映した脳情報抽出が可能であることを示唆している。このような技術をさらに洗練させることにより、ヒトの脳活動からも、運動行動に関連した、より抽象的な運動関連情報を抽出できるだろう。

運動皮質における可塑的な機能変化の観測・誘発技術を用いた BMI ポート形成の試み

深山理、鈴木隆文、満洲邦彦（東大院・情理）

脳内に刺入された電極を介し、細胞外電位の時系列波形から運動情報を推定する運動出力型 BMI では、モデルまたは知識ベースに基づく入出力関係の対応付けが不可欠である。例えば筆者らの開発してきた RatCar システムでは、ラットの神経活動と歩行動作(速度・方向変化)との関係を記述するモデルを構築し、両者の実測値に基づきパラメータを同定することで、推定を実現した。しかし、脳の機能は可塑的な経時変化を示すため、上記の対応関係は定常的ではなく、良好な推定を長時間に亘って維持することは困難である。さらに、神経電極の近傍に目的の運動に対して強い相関を示す細胞が存在するとは限らないことも、推定性能が頭打ちとなる一因である。そこで本研究では、自由歩行するラットの神経活動と歩行動作との関係を状態空間表現によって記述し、内部パラメータの適応的な更新を導入した。その結果として得られたパラメータの時系列変化は、未知の状態からのパラメータの収束、歩行動作に伴う変動特性の計測対象に応じた差異、身体環境の変化によるパラメータ変化について示唆に富むものであった。また、ラットのレバー押し動作に同期した皮質内微小電気刺激によって、電極周囲の神経細胞が目的動作(ここではレバー押し動作)に対して相関を強める場合があることを確認した。これらの

結果を踏まえ、ラットの行動開始・停止といったイベントに対応した電気刺激を加えることにより、目的の動作と神経活動との関係を観測・操作できる BMI プラットホームの構築可能性について検討を行った。

習熟度を考慮した筋電義手制御システムの開発

北佳保里、横井浩史 (ATR・脳情報研究所、電通大院・情報理工)

現在、筋電義手の制御を行うために、機械学習を用いて筋電位から人の動作意図を読み取る様々な動作識別方法が提案されている。しかしながら、信号の非定常性から動作との関係が一意には定まらない、時間経過に伴って信号特性が変化するという筋電位と動作との対応関係の複雑さから、安定して動作を識別することは難しい。一方、筋電義手を自在に取り扱うことができるかは個人によって大きく異なる。すなわち、習熟の程度(習熟度)が機器の使い方の巧みさと強く関連しているため、習熟状態に応じて機器の特性を変更しなければ各個人にとって使いやすいシステムは構築されない。そこで本研究では、より多くの動作を識別することを目的として、習熟度を考慮した筋電義手制御システムを構築した。提案システムにおいては、まず、筋電位から得られる運動パターンの精度と再現度で表される習熟度を用いて現在の人の習熟状態を判定する。それに基づき機器側は、自己組織化クラスタリングを用いて筋電位が変動しても他の動作と重複しない代表的なパターンを抽出し、その対応関係を学習することで安定的な動作識別を構築する。さらに、人には上記の代表的パターンを目標パターンとして提示し、トレーニングを促す。その後再び習熟度を算出し、習熟したと判定された場合は新たな動作を追加する。以上の手順を繰り返すことで、識別可能な動作数の向上を目指す。提案システムを用いて動作識別トレーニングを行った結果、動作識別に対して熟練した操作者においても識別可能動作数が最大9動作まで向上し、動作識別率もトレーニング前後において約21%向上したことから、提案システムの有効性が示唆された。

Motor Control 研究会の歴史

第一回	2007年	6月28-29日	参加者 114名	(世話人 関 和彦)
第二回	2008年	5月29-31日	参加者 107名	(世話人 田中真樹)
第三回	2009年	5月28-30日	参加者 102名	(世話人 筧 慎治)
第四回	2010年	5月27-29日	参加者 138名	(世話人 内藤栄一)

Cover illustration:

From Loeb GE, Journal of Physiology (2001), 533.1, pp. 111-117

"Two marionette puppets (analogous to musculoskeletal systems) with their handheld controls (each analogous to the spinal cord when given a particular functional set by descending commands from the brain). While there are similarities in general form between the puppets and the controls, there are many differences that reflect the performances for which they are specialized. Changes in the mechanics of the linkage require complementary but non-obvious changes in the stringing of the control"