

- 5) Takafumi Suzuki. Development of flexible neural probes and their applications to neuroprostheses; 2nd UK-Japan Workshop on the Brain-Machine Interface. 2010.
- 6) 西野高明, 下条誠, 石川正俊. 選択走査方式を用いた省配線・分布型触覚センサ; 計測自動制御学会. 2009.
- 7) 石川正俊. センサ技術とネットワーク技術の真の融合はあるのか? - 解くべき問題は何か? (基調講演); ユビキタス・センサネットワークシンポジウム. 2010. 1. 26 (東京).
- 8) 勅使河原誠一, 清水智, 明愛国, 下条誠, 石川正俊. 高感度初期滑り検出センサの研究開発 - 検出条件に関する検討 -; 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2009). 2009. 12. 25 (東京)
- 9) 長谷川浩章, 多田建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠. 指先にネット状近接覚センサを装着したロボットハンドの研究 - 高速な把持動作の実現のための制御系の構築 -; 第27回日本ロボット学会学術講演会. 2009. 9. 15 (横浜)
- 10) 寺田一貴, 多田建二郎, 石川正俊, 下条誠. 360°特異点の無いネット状近接覚センサの構成法; 第27回日本ロボット学会学術講演会. 2009. 9. 15 (横浜)
- 11) 勅使河原誠一, 清水智, 多田隈建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠. 感圧導電性ゴムを用いた高感度型滑り覚センサの研究開発; 第27回日本ロボット学会学術講演会. 2009. 9. 17 (横浜)
- 12) 溝口善智, 堤隆弘, 長谷川浩章, 明愛国, 多田隈建二郎, 石川正俊, 下条誠. インテリジェントロボットハンドの研究開発 - Pick and Place の達成 -; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニ

- クス講演会 (ROBOMEC 2009) 2009. 5. 26 (福岡)
- 13) 長谷川浩章, 溝口善智, 多田隈建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠. 薄型ネット状近接覚センサを装着したロボットハンド指先の開発と特性評価 - 手先に対し相対的に移動する把持対象物への追従制御 -; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 (ROBOMEC 2009) 2009. 5. 26 (福岡)
- 14) 清水智, 綿奈部裕之, 勅使河原誠一, 多田隈建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠. 感圧導電性ゴムの特性を用いた滑り覚センサの研究開発 - 法線および接線方向変形と抵抗値変化の関係 -; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 (ROBOMEC 2009) 2009. 5. 26 (福岡)
- 15) 勅使河原誠一, 清水智, 多田隈建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠. 感圧導電性ゴムの特性を用いた滑り覚センサの研究開発 - 抵抗値変化の高周波成分について -; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 (ROBOMEC 2009) 2009. 5. 26 (福岡)
- 16) Makoto Shimojo, Takuma Araki, Aigou Ming, and Masatoshi Ishikawa. A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces; IEEE SENSORS. 2010.

## H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
2. 実用新案登録
3. その他  
該当なし

## 研究成果の刊行に関する一覧表レイアウト

## 書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
Yuji Yamakawa, Akio Nakami, Masatoshi Ishikawa and Makoto Shimojo	Knotting a Flexible Rope using a High-speed Multifingered Hand System based on Synthesis of Knotting Manipulation Skills	H. Abdellatif Ed	Robotics 2010 Current and Future Challenges	CINTECH		2010	149-166

## 雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
矢口博彬, 武安聡, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	腱振動刺激によって生起される運動感覚に関する研究	電気学会研究会資料(医用・生体工学研究会)		167-168	2009
小竹直樹, 深山理, 鈴木隆文, 竹内昌治, 満洲邦彦	Parylene を用いた柔軟型グルタミン酸センサの試作	電気学会研究会資料(医用・生体工学研究会)		35-38	2009
矢口博彬, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	腱振動刺激を用いた筋紡錘の運動感覚への寄与に関する検討	第48回日本生体医工学会大会論文集		339	2009
深山理, 谷口徳恭, 鈴木隆文, 満洲邦彦	神経系計測における主観的な発火波形判定の尖度に基づく定量化	第48回日本生体医工学会大会論文集		633	2009
深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	ラットカーシステムを用いた運動皮質における可塑的な機能変化抽出の試み	第3回Motor Control研究会論文集			2009
鈴木隆文, 矢口博彬, 伊藤孝佑, 満洲邦彦, 國本雅也	速順応型機械受容ユニットへの微小刺激により生成される振動感覚に関する検討	第22回ニューログラム研究会論文集		3	2009
深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	車体型 Brain-Machine Interface ラットカーを用いた脳における情報表現変化の抽出	電気学会電子・情報・システム部門大会論文集		219-221	2009
杉本貴大, 浅野航平, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	EMアルゴリズムとスパース性を利用した神経スパイクソーティング手法	生体医工学シンポジウム論文集		525	2009
小濱卓也, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	レバー押しに同期した電気刺激によるラット一次運動野における可塑的变化の誘発の検討	第24回生体・生理工学シンポジウム論文集		47-48	2009

矢口博彬, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	腱振動刺激により生成される運動感覚の明瞭化のための刺激条件の検討	第24回生体・生理工学シンポジウム論文集	167-168	2009
山崎博人, 小竹直樹, 伊藤孝佑, 鈴木隆文, 満洲邦彦	流路構造を備えた神経再生型電極の開発～軸索再生の評価と電極配置の検討～	第24回生体・生理工学シンポジウム論文集	173-174	2009
浅野航平, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	スパイク・ソーティングのための隠れマルコフモデルの変分推論	日本神経回路学会第19回全国大会論文集	44-45	2009
伊藤孝佑, 山崎博人, 鈴木隆文, 満洲邦彦	カフ電極による末梢神経信号データの逐次的信号弁別	日本神経回路学会第19回全国大会論文集	86-87	2009
Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiro Mabuchi	Analyzing transition in correlation between neural signals and locomotion through vehicular BMI RobotCar	Proc. of Neuroscience2009		2009
Naoki Kotake, Takafumi Suzuki, Osamu Fukayama, Shoji Takeuchi, Kunihiro Mabuchi	Preliminary development of parylene flexible sensor for glutamate detection	Proc. of Neuroscience2009		2009
Riho Gojo, Takafumi Suzuki, Kunihiro Mabuchi, Shoji Takeuchi	Quick and Easy Fabrication of Flexible Microfluidic-Electrode without the use of photolithography	Proc. of micro TAS 2009	1662-1664	2009
Takafumi Suzuki, Naoki Kotake, Takayuya Kohama, Osamu Fukayama, Kunihiro Mabuchi	Study on brain adaptation using rat-machine fusion systems and multifunctional neural electrodes	Proc. of the 3rd International Symposium on Mobile Intelligence	238-241	2009
鈴木隆文, 橋秀幸, 戸高貴文, 古川浩太郎, 満洲邦彦	針筋電信号による指の動作推定 (末梢神経信号による義手制御を目指して)	日本機械学会第22回バイオエンジニアリング講演会論文集	182	2010
伊藤孝佑, 山崎博人, 鈴木隆文, 満洲邦彦	末梢神経接続による運動機能代行に向けて～ラット坐骨神経信号からの運動情報抽出と下肢運動推定の試み～	脳と心のメカニズム第10回冬のワークショップ論文集		2010

深山理, 小濱卓也, 鈴木隆文, 満洲邦彦	車体型BMI「ラットカー」を用いた運動皮質における可塑的变化の検出と誘導	脳と心のメカニズム第10回冬のワークショップ論文集			2010
芳賀達也, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	発火確率モデルを用いた神経細胞ネットワーク構造の動的推定法-培養神経細胞に対する試験的解析	脳と心のメカニズム第10回冬のワークショップ論文集			2010
橘秀幸, 鈴木隆文, 満洲邦彦	針筋電信号と単収縮畳み込みモデルによる手指筋の等尺性収縮時張力の推定	電気学会論文誌C	130(2)	254-260	2010
鈴木隆文	脳機能計測の基礎とその応用第5回 微小電極法の基礎とその応用	ヒューマンインタフェース学会誌	11(2)	135-140	
芳賀達也, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	発火確率モデルを用いた無入力条件下での培養神経細胞ネットワークの結合強度解析	電気学会医用・生体工学研究会		65-70	2010
矢口博彬, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	2点での腱振動刺激によって生成される運動感覚に関する基礎的研究	電気学会医用・生体工学研究会		61-64	2010
Takafumi Suzuki	Development of flexible neural probes and their applications to neuroprostheses	2nd UK-Japan Workshop on the Brain-Machine Interface		12	2010
Takafumi Suzuki, Naoki Kotake, Kunihiko Mabuchi, Shoji Takeuchi	Regeneration-Type Nerve Electrode Using Bundled Microfluidic Channels	Electronics and Communications in Japan	92 (4)	29-34	2009
五條理保, 森本 雄矢, 竹内 昌治	簡易マイクロデバイス作製法	生物物理	287	50-51	2010
A. Matani, Y. Naruse, T. Hayakawa, T. Nogai, Y. Terazono, N.Fujimaki, T. Murata	Phase-related Phenomena in MEG Analyzed by Phase-compensated Averaging	Abstracts of the 17th International Conference on Biomagnetism	W-I	T4-22	2010

Ayumu Matani	Phase series analysis for analyzing phase-related phenomena in MEG coils	第24回日本生体磁気学会大会論文集		21	2009
西野高明, 下条誠, 石川正俊	選択走査方式を用いた省配線・分布型触覚センサ	計測自動制御学会論文集	45(8)	391-397	2009
石川正俊	センサ技術とネットワーク技術の真の融合はあるのか? - 解くべき問題は何か? (基調講演)	ユビキタス・センサネットワークシンポジウム (東京, 2010. 1. 26) / 予稿集		1-4	2010
勅使河原誠一, 清水智, 明愛国, 下条誠, 石川正俊	高感度初期滑り検出センサの研究開発 - 検出条件に関する検討 -	第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2009) (東京, 2009. 12. 25) / 講演論文集,		1035-1038	2009
長谷川浩章, 多田建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	指先にネット状近接覚センサを装着したロボットハンドの研究 - 高速な把持動作の実現のための制御系の構築 -	第27回日本ロボット学会学術講演会 (横浜, 2009. 9. 15) / 予稿集		1A3-02	2009
寺田一貴, 多田建二郎, 石川正俊, 下条誠	360° 特異点の無いネット状近接覚センサの構成法	第27回日本ロボット学会学術講演会 (横浜, 2009. 9. 15) / 予稿集		1I1-02	2009
勅使河原誠一, 清水智, 多田建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	感圧導電性ゴムを用いた高感度型滑り覚センサの研究開発	第27回日本ロボット学会学術講演会 (横浜, 2009. 9. 17) / 予稿集		3I1-04	2009
溝口善智, 堤隆弘, 長谷川浩章, 明愛国, 多田建二郎, 石川正俊, 下条誠	インテリジェントロボットハンドの研究開発 - Pick and Place の達成 -	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2009 (ROBOMECH 2009) (福岡, 2009. 5. 26) / 講演論文集		2A2-J04	2009

長谷川浩章, 溝口善智, 多田隈建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	薄型ネット状近接覚センサを装着したロボットハンド指先の開発と特性評価—手先に対し相対的に移動する把持対象物への追従制御—	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2009 (ROBOMECH 2009) (福岡, 2009. 5. 26) / 講演論文集		2A2-J08	2009
清水智, 綿奈部裕之, 勅使河原誠一, 多田隈建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	感圧導電性ゴムの特性を用いた滑り覚センサの研究開発—法線および接線方向変形と抵抗値変化の関係—	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2009 (ROBOMECH 2009) (福岡, 2009. 5. 26) / 講演論文集		2P1-J13	2009
勅使河原誠一, 清水智, 多田隈建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	感圧導電性ゴムの特性を用いた滑り覚センサの研究開発—抵抗値変化の高周波成分について—	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2009 (ROBOMECH 2009) (福岡, 2009. 5. 26) / 講演論文集		2P1-K06	2009
Makoto Shimojo, Takuma Araki, Aiguo Ming, and Masatoshi Ishikawa	A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces	IEEE SENSORS JOURNAL	Vol.10, No.4	822-830	2010
Taku Senoo, Yuji Yamakawa, Satoru Mizusawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Shimojo	Skillful Manipulation Based on High-speed Sensory-Motor Fusion	2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Kobe, 2009.5.15)/Proceedings		1611-1612	2009
Seiichi Teshigawara, Kenjiro Tadaku, Aiguo Ming, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Shimojo	High Speed and High Sensitivity Slip Sensor Utilizing Characteristics of Conductive Rubber—Relationship Between Shear Deformation of Conductive Rubber and Resistance Change—	Journal of Robotics and Mechatronics	21 (2)	200-208	2009
Shimojo M., Araki T., Ming A., Ishikawa M	A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces	IEEE Sensors Journal	10 (4)	822-830	2010

Teshigawara, S.; Tadakuma, K.; Ming, A.; Ishikawa, M.; Shimojo, M.	Development of high-sensitivity slip sensor using special characteristics of pressure sensitive conductive rubber	2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)	3289-3294	2009
Taku Senoo, Yuji Yamakawa, Satoru Mizusawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa and Makoto Shimojo	Skillful Manipulation Based on High-speed Sensory-Motor Fusion	2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation	1611-1612	2009
Seiichi Teshigawara, Satoru Shimizu, Kenjiro Tadakuma, Ming Aiguo, Masatoshi Ishikawa and Makoto Shimojo	High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Sensitive Conductive Rubber	Int. Conf. on SENSORS 2009	988-991	2009

## IV. 研究成果の刊行物・別刷



# 腱振動刺激によって生起される運動感覚に関する研究

矢口博彬\*, 武安聡, 深山理, 鈴木隆文, 満淵邦彦 (東京大学)

A study on the perception of movement evoked by tendon vibration

Hiroaki Yaguchi\*, Satoshi Takeyasu, Osamu Fukayama,  
Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi (The University of Tokyo)

## Abstract

Illusionary joint movement can be evoked by tendon vibration, but the velocity of the movement is so slow. We supposed the velocity would become higher if initial burst was represented by the vibration, and activation of cutaneous vibration receptor would cause the low velocity. So we introduce stimulus waveform whose frequency was high at the beginning and low in the end to represent the initial burst, and cooling of the skin by putting ice on the vibrated position to inactivate cutaneous vibration receptor. It was suggested that both of them heighten velocity of the illusionary movement.

キーワード：感覚フィードバック, 運動感覚, 筋紡錘, 義手

(perception feedback, movement perception, muscle spindle, artificial limb)

## 1. はじめに

義手を装着者にとって自然なものとするため、運動感覚のフィードバック機構を備えることは有効である。また、生体信号を用いて義手を制御する場合、その精度の向上にも、運動感覚フィードバックは有効と考えられる。何故なら、不随意的な運動の調整にも、運動感覚(正確には、運動の速度や身体各部位の位置を伝える感覚信号)が重要な役割を果たしている<sup>(1)</sup>ためである。

皮膚上から腱に対して機械的な振動刺激を与えることにより、振動された腱に繋がる筋肉が伸展する運動の錯覚を引き起こすことが可能である。例えば、肘窩付近に振動子を当て、上腕二頭筋の腱を振動すると、肘が伸展する錯覚を生み、肘頭付近に振動子を当て、上腕三頭筋の腱を振動すると、肘が屈曲する錯覚を生む<sup>(2),(3)</sup>ことが知られている。腕を切断した障害者は、腕や手を動かす筋肉の腱のうち、少なくとも一部を失っている場合が多いため、腱への振動という方法の義手への応用は大きく制限される可能性がある。しかし、腱への振動では、筋紡錘や皮膚感覚受容器を刺激できることから、実験の方法を工夫することによって、ヒトの運動感覚における、筋紡錘及び皮膚感覚受容器に由来する信号の寄与度について、運動感覚フィードバックの観点から有用な知見をもたらすものと考えられる。

これまで、腱への振動刺激では、ゆっくりと関節が回転する運動(関節の回転角速度として、最大で約 15deg/s<sup>(3)</sup>)の錯覚を提示するに止まっていた。義手における感覚フィー

ドバックという観点からは、より素早い運動の錯覚を提示することが望まれるが、1)刺激開始時に一瞬、高い周波数で刺激する、2)皮膚感覚受容器を不活性化して振動する等が可能性のひとつとして考えられる。これは、1)ヒトが肘を伸展する時、運動開始時に筋紡錘の高頻度の発火(initial burst)が観測されている<sup>(4)</sup>こと、2)振動中、振動子直下の皮膚にあって振動を検出する感覚受容器が発火すると考えられるが、この感覚受容器は運動に関連した活動をしない<sup>(4)</sup>ことがその理由である。ただし、2)については、皮膚への電気刺激や関節周辺の皮膚を伸張することによって運動錯覚を生じた研究<sup>(5)</sup>があるため、錯覚される運動速度がかえって遅くなる可能性もある。

以上より、我々は 1)initial burst 再現のため、刺激開始時に高周波で振動する、2)皮膚の感覚受容器を不活性化するため、氷を皮膚に当てて冷却した後に振動することで、運動錯覚に変化が生じるかどうか、実験により検証した。

## 2. 実験

被験者は、20代の健常な男性10名である。右腕の上腕二頭筋遠位側の腱に対して、振幅0.8mm<sub>pp</sub>、周波数40~80Hz、刺激時間10秒の正弦波振動刺激を与えた。その間に感じた肘の回転運動を左腕で再現させ、肘と手の位置を記録すると共に、生じた感覚を口頭で回答させた。腱への振動は、機械刺激装置 DPS-290H(ダイヤモンドカルシステム)によって与えた。刺激パルスはPC上で正弦波を作成、DA変換

表 1 DPS-290H の仕様

Table 1. The specification of the vibrator	
瞬間最大駆動力	100grf
応答特性	2ms 以下
変位制御誤差	0.005mm 以下
外部コマンド信号	±1V

器 PCI-3338 (Interface) を介して DPS-290H に入力し、DPS-290H 付属の振動子で刺激した。振動子末端は直径 1cm の円形である。また、肘及び手の位置の記録には、画像センサ CV-3500(KEYENCE)を利用した。DPS-290H の仕様を表 1 に、実験系のブロック線図を図 1 に、そして実験の様子を図 2 に示す。被験者には、アイマスクを装着させて視覚情報を、耳にイヤホン装着させてホワイトノイズを聞かせることにより聴覚情報を、それぞれ遮断した。

本研究はヘルシンキ宣言の倫理的原則に則り、被験者のインフォームド・コンセントを得て行った。

### 2. 1 initial burst の再現

J.P.Roll ら<sup>(3)</sup>は、ヒトの足首を受動的に掌側屈曲させ、前脛骨筋 (Tibialis anterior) 及び長趾伸筋 (Extensor digitorum longus) の筋紡錘の活動を記録した。この時、筋紡錘が運動開始時に一瞬高頻度で発火する現象 (initial burst) を観測している (図 3)。我々はこの initial burst が運動の認識に関わっているのではないかと考え、図 4 に示すような、刺激開始時に周波数 80Hz で刺激し、200ms 後まで徐々に周波数を落とし、最終的に 40Hz となるような刺激によって initial burst の再現を試みた。実験では、6名の被験者に対して、この刺激と周波数 40Hz 一定、周波数 80Hz 一定の刺激を与え、刺激中に生じた運動錯覚について、肘関節の回転角速度を比較した。

### 2. 2 冷却による皮膚感覚受容器の不活性化

皮膚感覚受容器を不活性化する方法は、皮膚の冷却、局所麻酔等が考えられる。局所麻酔はショック反応のようなリスクを伴うことから、我々は、簡便な手法として、振動子直下の皮膚を氷によって冷却した。その際、冷却時間は 4 分間としたが、これは、皮膚の感覚受容器は 2~3 分で刺激への閾値が上昇し、筋紡錘の閾値が上昇するには 15~20 分かかるとの報告がされている<sup>(6)</sup>ためである。実験では、5名の被験者を対象とし、1) 皮膚を冷却しない状態 (冷却前)、2) 冷却した状態 (冷却あり)、3) 冷却した状態での実験後、数分間の休憩により皮膚表面の温度を常温まで回復した状態 (回復後) の 3 通りの状態に対し、上腕二頭筋の腱に振動刺激を与えた時の運動錯覚について、肘関節の回転角速度を比較した。なお、刺激周波数は 80Hz 一定とした。

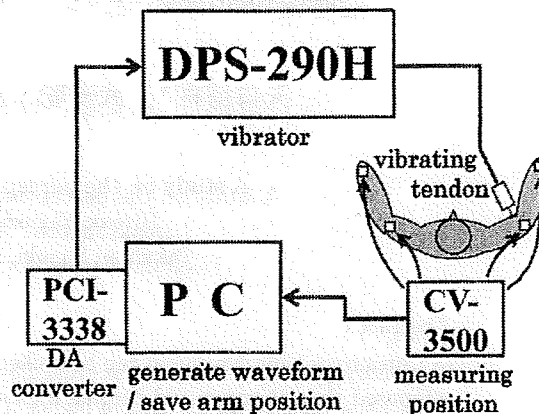


図 1 実験系のブロック線図

Figure 1. The block diagram of the experiment system

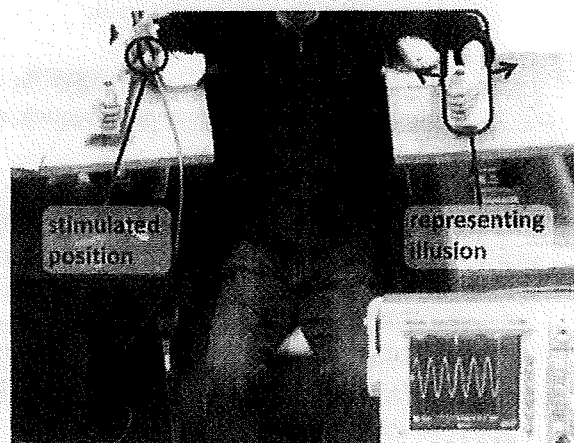


図 2 実験風景

Figure 2. A picture of experiment

## 3. 結果

### 3. 1 initial burst を模した刺激の効果

腱への振動刺激の周波数を、刺激開始時は 80Hz とし、200ms の間に 40Hz まで変化させた実験の結果を図 5 に示す。図 5 より、80→40Hz と周波数を変化させ、initial burst を模した条件において、肘の伸展角速度が最も大きい結果となっている。しかし、これは同条件において角速度の最も大きい 1 点が平均値を上大きくシフトさせており、これを除くならば、周波数 80Hz 一定の条件及び周波数を 80→40Hz と変化させた条件では、角速度の平均はほぼ等しい。一方、周波数 40Hz 一定の条件では、肘の伸展角速度の平均は小さいことが分かる。ただし、各々の条件共に角速度の分散は大きい。なお、被験者が振動中に肘の伸展を感じたと回答した割合は、周波数 80Hz 一定とした条件では

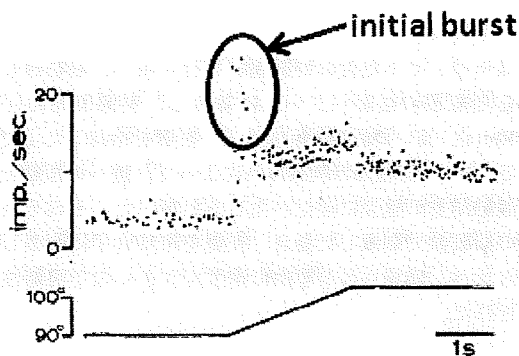


図3 initial burst (文献(3)より改変引用)

Figure 3. Initial burst<sup>(3)</sup>

61%(11/18), 周波数を 80→40Hz と変化させた条件では 39%(7/18), 周波数 40Hz 一定とした条件では 39%(8/18)であった。

### 3. 2 皮膚冷却の効果

氷による皮膚冷却の、腱振動で錯覚される肘関節の回転角速度への影響を調べた結果を図 6 に示す。3. 1 節の結果と同様に、各条件共に角速度の分散が大きかったが、図 6 に示されるように、皮膚を冷却した状態で腱振動を行った場合、皮膚冷却のない状態で腱振動を行った場合と比べて、肘の関節回転角速度の平均値は大きくなった。また、冷却前の状態と回復後の状態では、錯覚上の肘伸展角速度の平均値は冷却前の方が大きい。なお、被験者が振動中に肘の伸展を感じたと回答した割合は、冷却前 40%(8/20), 冷却あり 60%(12/20), 回復後 30%(6/20)であった。

### 4. 考察

3. 1 の実験結果より、initial burst を模したことで、腱振動によって錯覚される肘伸展の角速度の平均は、周波数が一定かつ等しい大きさ(40Hz 一定)の振動を与えた場合と比べて大きくなった。その理由として、initial burst を模したことで、振動による筋紡錘の活動が、より実際に運動を行った時のそれに近くなった可能性が挙げられる。それによって、運動錯覚がはっきりとし、錯覚される肘の伸展角速度を大きくしたものと考えられる。あるいは、initial burst を模した刺激と、その刺激開始時と等しい周波数(80Hz 一定)の刺激では、錯覚される肘の伸展角速度の平均がほぼ等しかったことから考えると、刺激開始時の周波数が、知覚される肘伸展の速度を決定し、それ以降の周波数は速度に影響しないとも考えられる。しかし、Roll ら<sup>(7)</sup>は、複数の筋肉の腱に対して同時に振動刺激を与え、各腱への

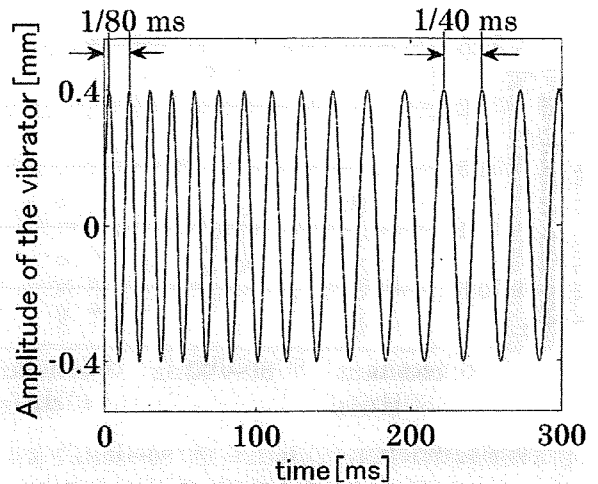


図4 initial burst を模した刺激波形

Figure 4. Stimulus waveform which imitates initial burst

刺激周波数を刻々と変化させることにより、2 次元的な運動の錯覚を被験者に提示しているから、刺激開始時だけでなく、それ以降の刺激周波数も、錯覚される肘伸展の速度に影響するはずである。

氷によって皮膚を冷却した上で腱振動を行った実験の結果より、皮膚感覚受容器の不活性化によって、より素早い運動の錯覚を提示できる可能性が示唆される。また、皮膚冷却を行ったことにより、腱振動により錯覚される肘伸展の角速度の平均は大きくなったが、回復後に皮膚を常温まで温めて腱振動を行った時、錯覚上の肘伸展角速度は再び小さくなった。このことから、皮膚温度を常温に戻すことによって、速やかに皮膚感覚受容器の不活性化が解消され、冷却の影響がなくなったものと考えられる。しかし、皮膚を冷却した状態での刺激中、被験者は振動されていることを認識したため、冷却によって皮膚感覚受容器の不活性化が為されているか、疑問が残る。これについては、今後確認する必要がある。

なお、図 5,6 において、80→40Hz, 40Hz 一定, 冷却前, 冷却あり, 回復後の各条件について、1~2 点、回転角速度の値が特に大きいものが見られるが、これは振動が効率良く腱に伝わった場合の結果と考えることができる。というのは、振動子の出力が小さく、皮膚に強く押しつけられないため、振動の振幅が皮膚で減衰し、腱が十分に振動されない場合が存在する可能性があるためである。

ただし、肘伸展角速度の平均値に比べて分散が大きいため、明確な結論を得るためには、さらに実験を重ね、データ数を確保する必要がある。

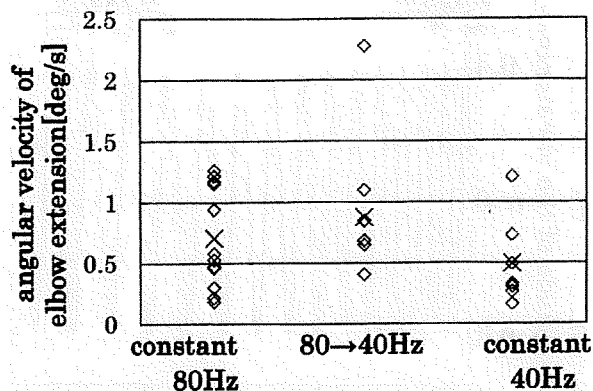


図5 振動刺激の周波数を、80Hz一定、80→40Hzと変化、40Hz一定とした場合の運動錯覚の速度。ただし、刺激中に肘の伸展を感じたと被験者が回答した場合のみプロットした。×は各条件における平均値である。周波数を変化させる条件では、刺激開始から200msのうちに周波数40Hzまで変化させた。

Figure 5. Speed of the illusionary elbow extension evoked by tendon vibration with frequency of constant 80Hz, varied 80 to 40Hz in 200ms, constant 40Hz. X mean average value at each condition. Speed is plotted only if the subject sensed extension of the elbow.

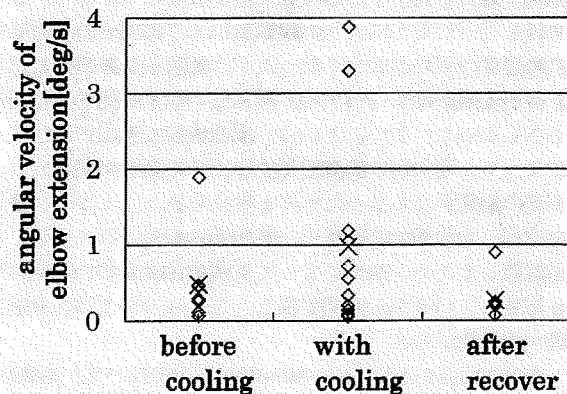


図6 氷によって皮膚を冷却した場合、冷却しない場合の運動錯覚の速度。肘の伸展を感じたと被験者が回答した場合のみプロットした。×は各条件における平均値。

Figure 6. Speed of the illusionary elbow extension when skin under the vibrator was iced or not. Speed is plotted only if the subject sensed extension of the elbow. X mean average value at each condition.

## 5. まとめ

我々は、ヒトが肘の伸展運動を行う時の、筋紡錘と皮膚感覚受容器の活動パターンに着目し、刺激開始時に一瞬(200ms)、高い周波数で刺激する、皮膚を冷却した上で振動するという2種類の刺激方法によって、腱への振動で生じる運動錯覚の速度に変化が生じるか調べた。それぞれ、一定の周波数で刺激した場合、皮膚を冷却せずに刺激した場合と比べ、錯覚される運動の速度が大きくなる可能性が示唆された。

## 謝辞

本研究の一部は、厚生労働省科学研究費補助金(H20-ナノ一般-003)、文部科学省科学研究費補助金(20246045)の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- (1) 豊田順一ら編：「標準生理学 第5版」, 医学書院, p.308-309 (2000)
- (2) G.M.Goodwin, D.I.McCloskey and P.B.C.Matthews : "The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents", Brain, Vol.95, pp.705-748 (1972)
- (3) J.P.Roll and J.P.Vedel : "Kinaesthetic role of muscle afferents in man, Studied by tendon vibration and microneurography", Experimental Brain Research, Vol.47, pp.177-190 (1982)
- (4) 岩村吉晃:「タッチ」;医学書院;pp.26-27,38(2001)  
Yoshiaki Iwamura : "Touch", Igaku-Shoin, pp.26-27,38 (2001)
- (5) D.F.Collins and A.Prochazka : "Movement illusions evoked by ensemble cutaneous input from the dorsum of the human hand", The Journal of Physiology, Vol.496, pp.857-871 (1996)
- (6) L.Cohen and A.Starr : "About the origin of cerebral somatosensory potentials evoked by achilles tendon taps in humans", Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Vol.62, pp.108-116(1985)
- (7) F.Albert, M.Bergenheim, E.Ribot-Ciscar and J.P.Roll : "The Ia afferent feedback of a given movement evokes the illusion of the same movement when returned to the subject via muscle tendon vibration", Experimental Brain Research, Vol.172, pp.163-174

原稿受付日

平成21年3月11日

# Parylene を用いた柔軟型グルタミン酸センサの試作

小竹直樹\*, 深山 理, 鈴木隆文, 竹内昌治, 満洲邦彦 (東京大学)

## Preliminary Study of a Parylene Flexible Glutamate Sensor

Naoki Kotake\*, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Shoji Takeuchi, Kunihiko Mabuchi (The University of Tokyo)

### Abstract

Glutamate is the major excitatory neurotransmitter in the central nervous system. Recent studies have revealed that glutamate is involved in most aspects of normal and abnormal brain function. Several types of rigid microsensor for detecting glutamate in the brain have been reported. Since rigid material does not deform in the organs, the microsensor causes a slight shift and some damage in the soft neural tissue. In this study we designed and fabricated a parylene-based flexible probe for glutamate detection in the brain using micro electro mechanical systems technology. The flexible electrode was fabricated on a 20- $\mu\text{m}$ -thick Parylene C substrate. Then we coated the two kinds of enzymes and the mediator on the electrodes to modify the electrodes. We are currently attempting to evaluate the detection of glutamate *in vitro* using the enzyme-modified electrodes that we fabricated.

キーワード: 柔軟電極, パリレン, 神経伝達物質, グルタミン酸センサ  
(Flexible electrode, parylene, neurotransmitter, glutamate sensor)

### 1. はじめに

神経における情報伝達は神経軸索上の電気的な信号伝導のみならずシナプス間隙における化学的な信号伝播との協調により成立している。すなわち、軸索上を伝導した電気信号にともないシナプス前軸索終末からは神経伝達物質が放出される。放出された神経伝達物質はシナプス後膜に存在する受容体に作用し、その膜のイオン透過性を変えて、シナプス後電位を発生させる。このように神経系では、電氣的・化学的・電氣的へと伝達方法の変換を経て情報が伝えられる。

シナプス間隙で放出される神経伝達物質は、その作用別に興奮性と抑制性に大別される。興奮性の代表的な伝達物質であるグルタミン酸は、シナプスの可塑的变化に関与し、記憶・学習の機序において重要な役割を果たす物質として注目されている。さらにグルタミン酸は本来の情報伝達の役割だけではなく、虚血性の脳疾患や神経細胞死等においても深く関与していることが示されてきた<sup>(1)</sup>。

このような背景からグルタミン酸の挙動を調べる研究は盛んに行なわれ、複数の測定手法が用いられてきた。例えば、マイクロダイアリシス法は脳内の神経伝達物質を測定する代表的な手法であり、グルタミン酸の測定にも用いられる。しかしながら、この方法は計測対象とした組織あるいはその近傍から微量の細胞外溶液をサンプリングした後

に検出を行なうため、サンプリングから検出までに時間差が生じる問題があった。

脳内のグルタミン酸の速い濃度変化をほぼリアルタイムに観察する手法としては、L-グルタミン酸オキシダーゼ (GluOX) 等を電極表面上にコートした酵素電極が用いられる<sup>(2)</sup>。検出速度や時間分解能に優れる本手法に関して、さらに検出感度あるいは空間分解能の向上を図った研究報告はあるものの<sup>(3)</sup>、これら酵素電極の脳への刺入がその周囲の組織へおおよそ影響については着目されなかった。そのため、これまでに開発された酵素電極はいずれもシリコン<sup>(4)</sup>、セラミック<sup>(5)</sup>などの硬い材料で構成されている。

一方、神経の電気的な活動の計測を目的とした神経電極では、ポリイミドやパリレンなどの柔軟な材料を用いた電極の開発が進められてきた。シリコン等を用いた硬い電極は脳組織を傷つける可能性が示唆されたことから、このような柔軟な神経電極の開発が行なわれてきたが、電極による脳組織の侵襲は神経電極のみならず酵素電極においても共通の問題である。したがって、柔軟型の神経電極自体あるいはその電極開発過程で培われた技術は生体内で使用される各種酵素電極、特に柔らかな脳組織へ刺入して用いられるグルタミン酸センサ等において有益であると考えられる。

## 2. 目的

我々の研究グループでは、脳における電気的な神経信号の計測を目的に、パリレンを用いた刺入型の柔軟な神経電極を開発してきた<sup>(5)(6)</sup>。開発されたこれらの柔軟型神経電極は電極表面を特定の酵素等で修飾することにより各種酵素電極へ応用可能であると考えられる。しかしながら、柔軟型神経電極を酵素電極へと応用した研究報告はなく、まずは応用に好ましい電極形状や電極作製方法、さらには電極表面への修飾方法を検討する必要があった。

そこで本研究では、柔軟型のグルタミン酸センサを試作し、電極形状やその作製方法、そして電極表面への酵素等のコート方法を検討した。

## 3. 方法

**(3-1) 材料** 本研究にて試作する電極の基板材料としては柔軟な高分子材料であるパリレン C (ポリモノクロロパラキシリレン) を用い、配線および電極部には金を用いた。電極表面の修飾には GluOX、さらに西洋わさびペルオキシダーゼ (HRP) が固定されたオスミウム・ポリビニルピリジンレドックスポリマー (Os-gel-HRP) を用いた。その他、L-グルタミン酸に対する電極の応答選択性を向上させるために Nafion 膜を用い、酵素等を電極表面に固定するために牛血清アルブミン (BSA) およびグルタルアルデヒドを使用した。

**(3-2) 設計** 本研究では応用に好ましい電極形状および作製方法を検討するための足がかりとして、これまでに我々の研究グループにて開発された神経電極のデザインを用いた。電極先端はフォーク状に 4 つに分かれており、それぞれに 2 つの電極が配置されている (図 1)。

**(3-3) 検出原理** 図 2 は本酵素電極におけるグルタミン酸の検出原理を模式的に示したものである。グルタミン酸が GluOX にて酸化される。その際に発生する過酸化水素を HRP により水と酸素に分解して電流を検出するものである。さらに、HRP を含む電子メディエータ Os-gel-HRP を用いることにより、グルタミン酸の濃度変化を電流変化として直読可能にしている。

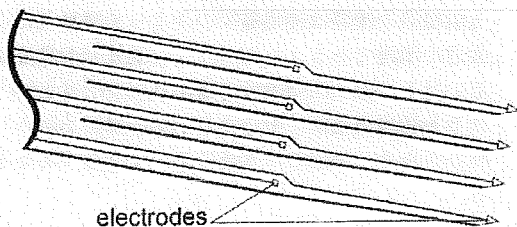


図 1 電極先端概略図

Fig. 1 Schematic of the electrode tip

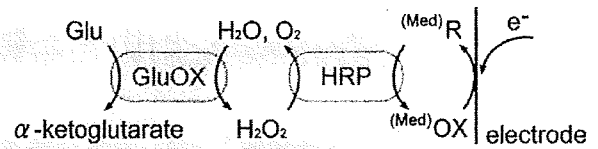


図 2 検出原理

Fig. 2 Schematic diagram of the detection mechanism  
Glu: Glutamate

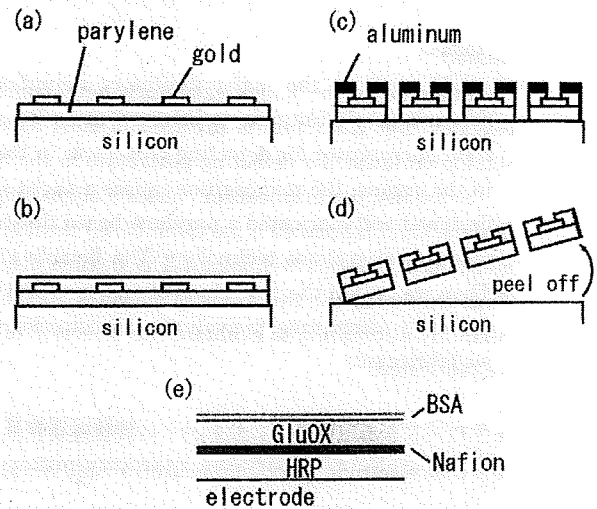


図 3 電極作製工程

Fig. 3 Fabrication process of the electrode

**(3-4) 電極作製方法** 本電極の作製方法を図 3 に示す。なお、作製はシリコンウエハ上で行なう。

- (1) シリコンウエハ上にパリレン C を 10 $\mu$ m コーティング後、その上に金をおよそ 300nm 蒸着し、パターニングを行なうことで配線および電極部を作製する (図 3a)。
- (2) 第 2 層目のパリレンを 10 $\mu$ m 蒸着する (図 3b)。
- (3) アルミマスクを使用した酸素プラズマエッチングを行なうことで電極部およびコネクタ部のパリレンを削り、金を露出させる。この際、同時に電極外形も成形する (図 3c)。
- (4) 電極をシリコンウエハから剥離する (図 3d)。

**(3-5) 電極表面への修飾** 作製した電極をシリコンウエハから剥離後、電極表面へ酵素等をコートした。電極上への酵素等の積層状態を模式図に示す (図 3e)。電極への修飾は、(1) Os-gel-HRP、(2) 5% Nafion、(3) 200 U $\cdot$ ml<sup>-1</sup> GluOX、(4) 14% BSA、(5) 0.25% グルタルアルデヒド、の各溶液を順次電極表面にコートした。各溶液のコートには微量の溶液を扱えるマイクロピペットを使用した。各溶液のコート後には室温で十分に乾燥させた。

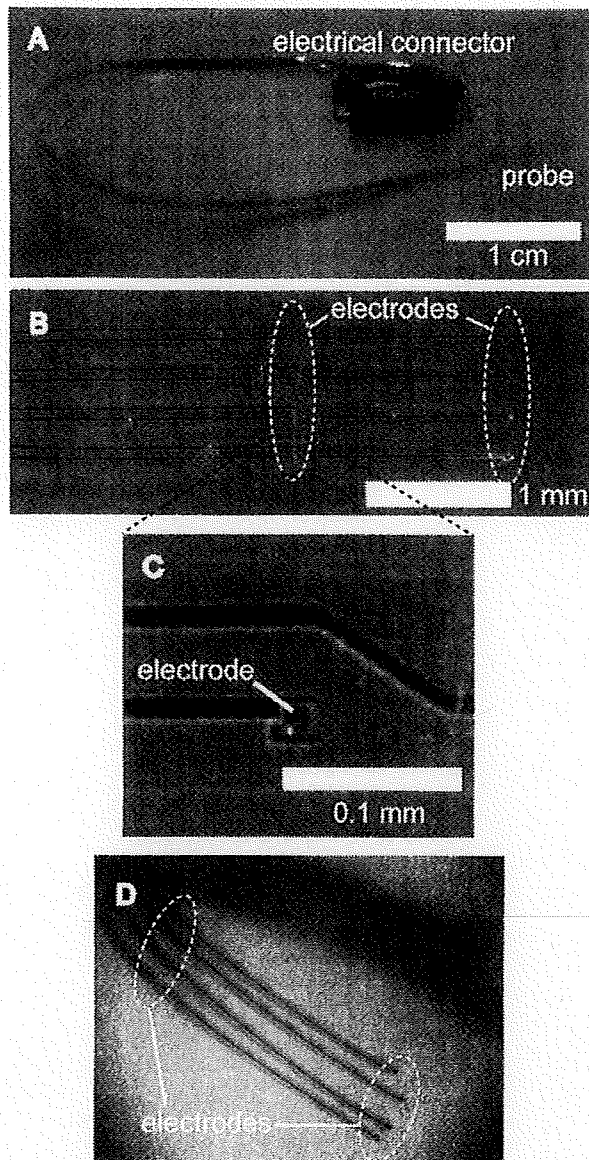


図4 試作された電極写真

Fig. 4 Photos of the fabricated electrode

(A) Overview of the probe. (B) Tip of the probe.  
(C) Magnification of the electrode. (D) The bent probe.

#### 4. 結果

試作した電極の写真を図4に示す。パリレンCを用いて形成した電極の外形は幅1mm、長さ75mmであった(コネクタ部を含む)(図4A)。電極の先端は4本のフォーク状に分かれている。各本の先端、さらに先端から1.5mmの位置にそれぞれ電極が配置され、合計8つの電極が作られた(図4B)。各電極のサイズは $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ であった(図4C)。2層に重ねたパリレンの厚さは $20\mu\text{m}$ と設計したが、その柔軟性は十分に保たれていた(図4D)。電極表面に

Os-gel-HRP、Nafion膜、GluOX等をコートした結果、各電極は酵素等を含んだ薄膜にて覆われていることが観察された。しかしながら、酵素等をコートした後の電極はその柔軟性の低下が認められた。

#### 5. 考察

本稿では、グルタミン酸を検出対象とした柔軟型の酵素電極を提案し、試作した。試作の結果、電極表面への酵素等のコート方法について1つの問題が明らかになった。試作した電極の特徴はその柔軟性にある。そのため酵素等をコートしたことにより、その柔軟性が低下することは望ましくない。柔軟性が低下した要因は、主に電極上に薄膜化したNafion膜のコート方法にある。本試作では、いずれの溶液もマイクロピペットを用いて滴下したが、特にNafion溶液の滴下量が多く、必要以上に厚い膜が製膜された。さらに、過剰に滴下したNafion溶液はパリレン製の電極基板外にも広がり、不必要な場所に製膜された。製膜されるNafion膜の厚さおよびその面積が電極の柔軟性に影響を及ぼすため、Nafion膜は限局的に極めて薄く製膜することが望ましい。この点に関して、先行研究では、培養皿上に配置された微小電極への溶液塗布にガラスキャピラリーを取り付けた微量エア吐出型ポンプを活用している<sup>(7)</sup>。本研究においても先行研究のこの塗布方法を踏襲することで、各溶液を必要な場所へ限局的に極めて薄く積層することが可能であると考えられる。

現在、試作・検討により明らかになった問題を解決するとともに、*in vitro*の実験系で本酵素電極の機能面の評価を行い、柔軟型のグルタミン酸センサとしての有効性を検討中である。

#### 6. おわりに

本研究では、パリレンを用いた柔軟型のグルタミン酸センサの開発を目指して、柔軟型酵素電極の第一試作を行い、その作製方法および構造を検討した。

#### 謝辞

本研究において、マスクの作製は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターの設備を使用した。

また、本研究の一部は、厚生労働省科学研究費補助金(H20・ナノ一般-003)、文部科学省科学研究費補助金(20246045、20033005)、脳科学研究戦略推進プログラムの助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- (1) N. C. Danbolt: Glutamate uptake, *Prog. Neurobiol.* 65, 1-105 (2001)
- (2) J. J. Burmeister, K. Moxon, and G. A. Gerhardt: Ceramic-based multisite microelectrodes for electrochemical recordings, *Anal. Chem.* 72, 187-192 (2000)
- (3) N. Kasai, Y. Jimbo, O. Niwa, T. Matsue, K. Torimitsu: Real-time multisite observation of glutamate release in rat hippocampal slices, *Neurosci. Lett.*, 304, 112-116 (2001)
- (4) O. Frey, P. van der Wal, N. de Rooij, M. Koudelka-Hep: Development and characterization of choline and L-glutamate biosensor integrated on silicon microprobes for in-vivo monitoring, *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2007, pp. 6040-6043 (2007)
- (5) T. Suzuki, K. Mabuchi, S. Takeuchi: A 3D flexible parylene probe array for multichannel neural recording, *Proc. of 1st international IEEE EMBS Conference on Neural Engineering*, 154-156 (2003)
- (6) S. Takeuchi, D. Ziegler, Y. Yoshida, K. Mabuchi, T. Suzuki: Parylene flexible neural probe with micro fluidic channel, *Lab on a chip*, 5, 519-523 (2005)
- (7) 鳥光慶一, 古川由里子, 河西奈保子: 「神経伝達物質放出空間分布のリアルタイム測定法」 *日薬理誌* 121, 349-356 (2003)

原稿受付日

平成 21 年 3 月 11 日



# 腱振動刺激を用いた筋紡錘の運動感覚への

## 寄与に関する検討

矢口博彬, 深山理, 鈴木隆文, 満淵邦彦  
東京大学大学院 情報理工学系研究科

### Study of muscle spindles contributing to the perception of movements by tendon vibration

Hiroaki Yaguchi, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi  
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

#### 1. 背景

義手に運動感覚のフィードバック機構を持たせることは、義手の有用性を大きく向上させると考えられる。骨格筋の遠位側の腱を経皮的に振動させることで、その筋肉が伸展するような運動の錯覚を生じさせることが可能だが、この方法ではゆっくりと伸展する運動(関連する関節の回転角速度として、最大で約  $15\text{deg/s}^{[1]}$ )の錯覚しか生じさせることができていない。その原因として、皮膚に存在する感覚受容器の影響が考えられる。そこで、皮膚感覚の受容器を不活性化した状態で腱振動を行った場合の、運動錯覚の変化を調べるため、皮膚を冷却してから腱を振動する実験を行った。

#### 2. 実験手法

被験者は、健康な男性5名である。右腕の上腕二頭筋遠位側の腱に対して、10秒間の振動刺激を与えた。その間に感じた肘の回転運動を左腕で再現させ、肘と手の位置を記録した。

また、本研究では、振動適用部位の周辺に氷を4分間当てて皮膚を冷却した後、腱への振動を行った。皮膚に氷を乗せると、皮膚の感覚受容器は2~3分で刺激への閾値が上昇し、筋紡錘の閾値が上昇するには15~20分かかるとの報告がある<sup>[2]</sup>ため、冷却時間を4分間とした。

なお、本研究はヘルシンキ宣言の倫理的原則に則り、被験者のインフォームド・コンセントを得て行った。

#### 3. 結果と考察

5名の被験者のうち、1名の被験者に対する実験結果を図1に示す。図1のように、皮膚を冷

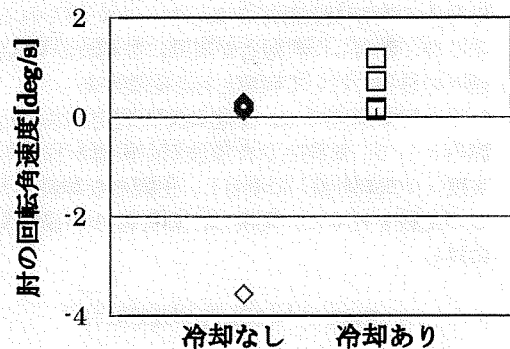


図1 腱への振動によって生じた肘の回転運動の錯覚。正の値は伸展を示し、負の値は屈曲を示す。

却した場合、冷却しない場合と比べて肘の伸展速度が大きくなる場合もあったが、小さくなる場合もあり、分散が大きくなった。これは、皮膚感覚受容器を不活性化することで、経皮的な腱への振動による運動錯覚が曖昧になったことを示すと考えられる。

#### 4. まとめ

未だ試行回数が少なく、明確な結論は出ていないが、本研究より、運動感覚には筋紡錘の活動と共に皮膚感覚受容器が重要な役割を果たしている可能性が示唆される。

#### 5. 参考文献

- [1] J.P.Roll et al.; Exp.Brain.Res. 1982;177-190
- [2] L.Cohen and A.Starr; Electroencephalogr. Clin.Neurophysiol. 62;1985;108-116

## 神経系計測における主観的な発火波形判定の尖度に基づく定量化

○深山理<sup>1</sup> 谷口徳恭<sup>2</sup> 鈴木隆文<sup>1</sup> 満淵邦彦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院情報理工学系研究科 <sup>2</sup>東京大学大学院医学系研究科

### Quantification of subjectively detected spike waveforms in neural signals by kurtosis

O. FUKAYAMA<sup>1</sup>, N. TANIGUCHI<sup>2</sup>, T. SUZUKI<sup>1</sup>, K. MABUCHI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

<sup>2</sup>Graduate School of Medicine, The University of Tokyo

#### 1. はじめに

中枢神経系の活動計測において、細胞外電位計測は個々の神経の発火活動を直接観測できる有力な手法である。しかし現在の計測技術では、発火波形の振幅が小さくノイズ中に埋没し、単純な閾値設定等では発火の有無を判断できないケースが見られる。このため、熟練した実験者が実際に計測波形を観察し、個々の信号に対して判定を行う必要があった。

そこで本研究では、上述の発火判定を自動化する試みとして、計測された原波形の振幅が成す分布の尖度（4次統計量）に着目し、主観的な神経発火判定との比較を行った。尖度は、期待値0の確率変数  $x$  に対し

$$\text{kurt}(x) = E\{x^4\} - 3[E\{x^2\}]^2 \quad (1)$$

として定義される4次の統計量である。この値は、 $x$  が従う確率分布について、ガウス分布からの外れ具合を示す性質を有する。

#### 2. 実験方法

本実験では、Wistar系ラット18匹を被験動物とし、それぞれ20箇所計測点（うち2箇所は基準電位として用いた）を有するワイヤ状多点神経電極を大脳運動皮質内部の深さ1.5 mmに刺入した[1]。次に、被験動物の自由行動中にこれらの神経電極から計測される神経信号を最大4週間に亘って計測した。ここでは、増幅率5,000倍、通過帯域500-3,000 Hzとした生体アンプ(Multichannel Systems PGA-64)により増幅した60-180 sの信号を16 bit A/Dコンバータ(National Instruments PCI-6071E)を介し、それぞれ25 kSpsにてコンピュータに保存した。最後に、計測された信号に対して期待値を0とするようバイアス調整を行った上で、(1)式によって尖度を算出した。

一方、実験者による主観的な発火波形判定は、増幅された信号をスピーカーを介して聴取し、波形が含有する神経発火の明瞭度に応じてレベル1-9までの段階に分類した。

なお、本実験における電極埋込および慢性信号計測は、東京大学動物実験委員会の定めるガイドラインに沿って行われた。

#### 3. 結果および考察

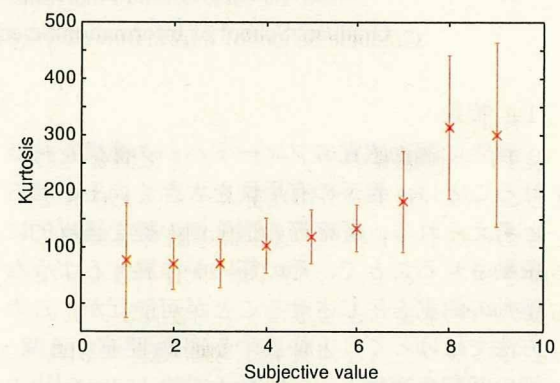


図1 実験者による主観的な判定値(1-9)に対応する尖度(試行間での平均値)。

図1に示すように、主観的な判定値と尖度との間には正の相関が見られた。特に、主観による上位4段階(レベル6-9)と下位5段階(レベル1-5)を比較した場合、試行間での尖度の平均値に有意な差が見られた。

計測信号に含まれる熱雑音や環境雑音は、発生要因に応じて様々な分布に従う多数の波形の重ね合わせによりガウス分布として近似される。これに対して、神経に由来するスパイク状の発火波形が示す振幅はガウス分布から逸脱しており、尖度はその含有度を表す指標として利用可能と考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、計測信号の尖度が実験者による神経発火波形の判定値に相関し、主観的な判定作業を代替できる可能性を示した。

#### 参考文献

- [1] O. Fukayama et al., RatCar System for estimating locomotion states using neural signals with parameter monitoring: Vehicle-formed brain-machine interfaces for rat. In Proc. IEEE EMBC-30, pp. 5322-5325, 2008.

速順応型機械受容ユニットへの微小電気刺激により生成される振動感覚に関する検討

Preliminary study of vibration sensation evoked by microstimulation of rapidly adaptive mechanoreceptor units

○鈴木隆文<sup>1)</sup>, 矢口博彬<sup>1)</sup>, 伊藤孝佑<sup>1)</sup>, 満淵邦彦<sup>1)</sup>, 國本雅也<sup>2)</sup>

○Takafumi Suzuki<sup>1)</sup>, Hiroaki Yaguchi<sup>1)</sup>, Kosuke Ito<sup>1)</sup>, Kunihiko Mabuchi<sup>1)</sup>, Masanari Kunimoto<sup>2)</sup>

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科

2) 済生会横浜市東部病院脳神経センター

1) Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

2) Brain Nerve Center, Saiseikai Yokohama-city Tobu Hospital

我々は感覚神経刺激による触圧覚呈示機能を備えた義手の開発を目指しており、その基礎的研究として、機械受容ユニットへの微小電気刺激によって生成される感覚に関する研究を行っている。今回は、速順応型機械受容ユニットを対象とした実験とその結果について報告する。実験ではまず正中神経へとマイクロニューログラム用タンゲステン微小針電極を経皮的に刺入し、機械受容ユニットを探索した。皮膚への機械的刺激に対する応答などによって同定したユニットが速順応型であり、かつ、そのユニットへの微小電気刺激によって生成される感覚が振動感覚であった場合に、反対側の手の投射野に対応する部位に実際に機械的振動刺激を加え、その振動周波数を調節するなどの心理物理実験的手法を用いて、微小電気刺激による生成振動感覚の振動周波数を求めることを試みた。結果としては微小電気刺激のパルス周波数と生成振動感覚の振動周波数は概ね一致したが、ときに、後者が前者の半分程度まで小さくなるケースもあった。

## 車体型 BMI 「ラットカー」を用いた大脳における情報表現変化の抽出

深山 理\*, 鈴木 隆文, 満洲 邦彦 (東京大学)

Detection of Functional Changes in the Brain Using Vehicular Brain-Machine Interface RatCar  
Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi (University of Tokyo)

## Abstract

'RatCar', a vehicular brain-machine interface (BMI) for a rat has been developed to detect functional changes in the brain during motor control. Extracellular neural signals were chronically recorded from a freely moving rat to estimate its locomotion velocity. Meanwhile, its actual locomotion velocity was simultaneously recorded to update the estimation parameters. While most of the parameters converged in the first 30 s periods of each trial, some showed remarkable variations. In this paper, they were sorted into several classes to detect components caused by functional plasticity in the brain.

キーワード:ブレインマシンインターフェース, 運動皮質, ラット, 適応的推定  
(Brain-Machine Interface, Motor Cortex, Rat, Adaptive Estimation)

## 1. はじめに

本研究では, ラットを対象とする brain-machine interface (BMI) として, RatCar と呼ぶシステムの開発を行っている。BMI は, 中枢または末梢において神経信号を直接に用いる生体インターフェースとして注目される技術である。例えば, 福祉工学の課題として, 移動を意図しただけで動作する車椅子や能動義手, あるいは感覚の人工呈示や定量化といった応用が考えられるほか, 大脳の機能的可塑性の解明, 構成論的理解の進展による脳科学への寄与も期待される。

RatCar システムでは, ラットがその身体と同程度の大きさの車体上に搭載され, その意図通りに車体ごと移動できることを目指している<sup>(1)</sup>。ラットは, 運動中枢の神経信号によって, 車体を身体の一部として用いる。一方, このラット自身が車体上に搭載されているため, その移動結果は視覚, 体性感覚を通じてフィードバックされることとなる。すなわち, 運動系を人工物に置換しつつ, 感覚系は自然の身体を利用する, 運動指令の計測と推定に特化した BMI を構成する。

このようなシステムの実現には, 計測された神経信号のパターンと身体動作との対応付けが必要である。ここで, 再現性の良い対応付けを実現するには, 両者の相関関係が不変ないしは一定の特性に従った特性を示すよう設計することが望ましい。そこで, 本研究では線形状態空間表現を用いて両者の相関関係を適応的モデルとして表し, このモデルの有するパラメータが時間的に変化する様子から, 脳とシステムの双方に存在する状態変化の要因について検討を行った。なお, 本研究では最終的にラットを RatCar 車体上に搭載した状況において, 大脳が BMI に対して生じる可塑的な機能変化を抽出することが目標であるが, 本稿では予備実験として自由行動ラットに対する解析結果を示す。

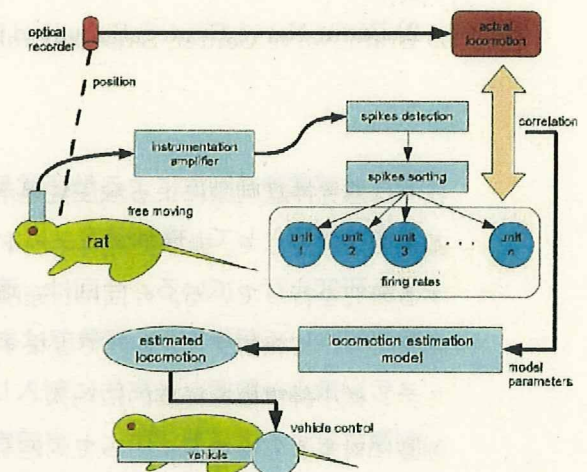


Fig. 1 Basic design of RatCar system.

## 2. RatCar

RatCar システムの構成は図1の通りである。まず実験に先立ち, ラットの脳運動皮質に, 神経電極の埋込を行った。次に, 神経信号を電極から増幅・フィルタリングを経てコンピュータに取り込み, 神経細胞毎に発火を検出し, それぞれの頻度を算出した。最後に, 得られた発火頻度情報を元に,

- (1) 自由行動ラットの歩行動作との比較によるモデルパラメータ同定
  - (2) 自由行動/車載ラットの歩行推定/車体制御
- を行った。本稿では主として(1)の問題を取り扱う。

〈2・1〉信号計測 本研究では, 被験動物としてラット(Wistar系オス, 12-15週齢)を用い, 直径 $20\mu\text{m}$ のタングステンワイヤに厚さ $5\mu\text{m}$ のパリレンポリマーをコート