

を、計算機シミュレーションで概ね予測できているといえる。また、鉛直下向きの姿勢で決定した制御器パラメータを使用し、上肢の姿勢を水平にして制御した結果、健常被験者では目標軌道からのずれが大きく、適切に制御できているとはいえない結果となった。刺激強度が最大値で飽和している筋もあった。また、計算機シミュレーションにおいても適切な追従制御ができずに、振動したりオーバーシュートしたりしていることが確認された。また、刺激強度が最大値で飽和する筋があることも確認された。

上記の結果は、上肢を鉛直下向きの姿勢にした場合と、地面に対して水平にした姿勢の場合とでは筋の入出力特性が異なるために生じたと考えられる。そこで、健常被験者で鉛直姿勢と水平姿勢での入出力特性を計測した結果、制御の際の刺激最小値や最大値、特性の傾きなどが、姿勢が異なると大きく異なる場合があることが確認された。筋骨格モデルによる計算機シミュレーションにおいても、制御の際の刺激最小値や最大値の変化はあまり見られなかったものの、入出力特性の傾きや関節が可動する範囲の変動などは実験結果と同様の傾向を示した。

上記の結果をもとに、水平姿勢で計測した入出力特性から制御器パラメータを決定して水平姿勢で制御を行った結果、健常被験者においてはオーバーシュートがわずかに観測されたものの、鉛直姿勢で決定した制御器パラメータを使用した場合と比較し、より適切な制御が行えた。計算機シミュレーションにおいても、水平姿勢で決定した制御器パラメータを用いた場合には適切に制御が行え

た。このことから、姿勢の変化による筋の入出力特性の変化がリアルタイムパラメータ調整法を用いた制御に大きく影響したことが示された。入出力特性の変化を適切に推定することが次の課題になる。

以上の結果は、周期3[s]の円軌道追従制御においても同様に観測された。したがって、姿勢が異なった場合でも、計算機シミュレーションが被験者による実験結果を概ね予測可能であることが示されたといえる。

筋モデルの記述においては、リクルートメント特性や長さ-張力関係、速度-張力関係などが線形近似されて簡略化される場合がある。そこで、これらの非線形特性を線形近似した場合の影響について、手関節運動を対象に実験的検討を行った結果、リクルートメント特性を線形近似した場合には不自然な応答が現れやすいことが確認された。適用範囲を限定すれば影響は小さいと考えられるが、FES制御においては、刺激最小値から最大値まで広範囲に刺激強度を変化させるため、リクルートメント特性は線形近似しない方が良いと考えられる。長さ-張力関係や速度-張力関係については、今回の実験では、線形近似の影響はほとんど見られなかった。

(2) 下肢筋骨格モデルの構築とシミュレーションシステムの開発

これまでに構築してきた下肢の筋骨格モデルを改良し、股関節、膝関節、足関節の運動のFES制御が可能になるようにした。図3に、改良した下肢の筋骨格モデルの概要を示す。ここで構築したモデルを、「2. 筋骨格モデルを利用した実用的下肢 FES 制御方式

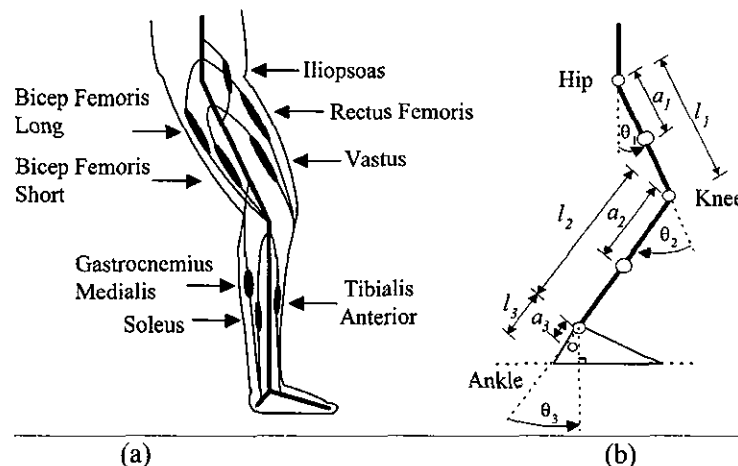
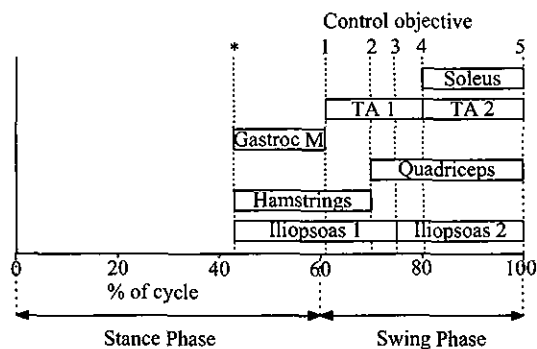


図3 下肢の筋骨格モデルの概略。(a) 刺激される筋。(b) 骨格モデル



TA: Tibialis Anterior
 Hamstrings: Bicep Femoris Short and Bicep Femoris Long
 Quadriceps: Vastus and Rectus Femoris

図 4 cycle-to-cycle 制御のための刺激データ。*: 刺激開始。制御対象: 1: 最大足関節底屈角度, 2: 最大膝屈曲角度, 3: 最大股関節屈曲角度, 4: 最大足関節背屈角度, 5: 最大膝関節伸展角度及び着床時の股関節と足関節の角度。

表 1 settling indexes の平均値 (cycles)

Hip joint	max. flexion		initial contact
		9±3	
Knee joint	max. flexion		max. extension
		5±2	
Ankle joint	max. plantar flexion	max. dorsiflexion	initial contact
	3±1	5±3	7±3

の開発」において利用する。

モデルシミュレーションを実行する際には、モデルパラメータや制御器パラメータなどを様々に変化させる必要がある。そこで、それらを容易に実行できるように、シミュレーション用ユーザインターフェイスの設計を行い、モデルシミュレーションシステムとして実装した。

2. 筋骨格モデルを利用した実用的下肢 FES 制御方式の開発

図 3 に示した筋骨格モデルを用いて、ファジー制御を利用した cycle-to-cycle 制御の有効性を計算機シミュレーションで検討した。刺激バースト時間の自動生成において、settling index と foot クリアランスの最小値を評価指標にした。settling index は、各関節角度の目標値に達するまで (関節角度の誤差が 4θ 以下になるまで) の歩数とし、foot クリアランスの最小値は、爪先と床との距離の最小値とし、関節角度が目標値に達した後の 5 歩

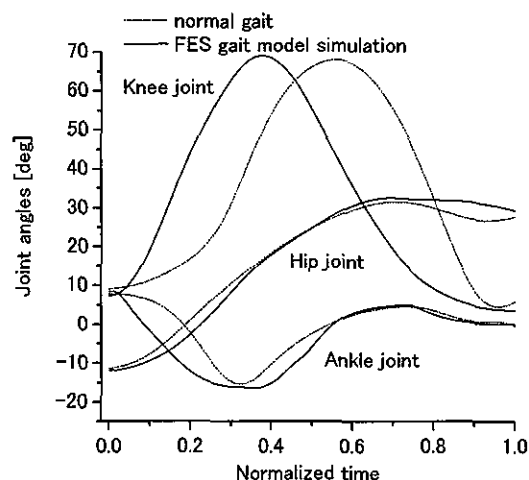


図 5 計算機シミュレーションでの制御結果による関節角度軌跡 (基準ヒトモデル)。健常者の歩行時の関節角度軌跡も示す。

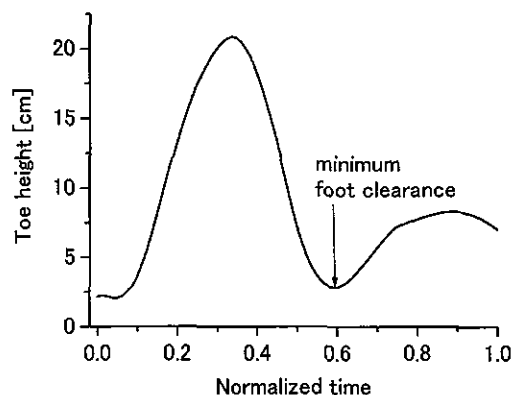


図 6 遊脚器の爪先位置。基準ヒトモデルでの計算機シミュレーション結果。健常者の歩行計測結果も示す。

の平均値から求めた。

図 4 に、設計した各筋への刺激順序を示す。これを用いて、ファジー制御器は、20 人の異なるヒトモデルにおいて、すべての関節角度が目標値に達するように cycle-to-cycle 制御での刺激バースト時間を適切に制御できた。すべてのヒトモデルでの settling index の平均値を表 1 に示す。一方、FES 制御した関節角度軌跡は、図 5 に示すように、健常者の歩行時の関節角度軌跡と一部異なっており、FES 制御した場合、健常者の歩行時に比べて、膝関節角度が早い段階で屈曲し始めて、最大屈曲に達した。これは、cycle-to-cycle 制御では、健常者の歩行時の角度軌跡を連続的に追従するように制御を行っているのではなく、重要と思われる点だけを目標値として与え

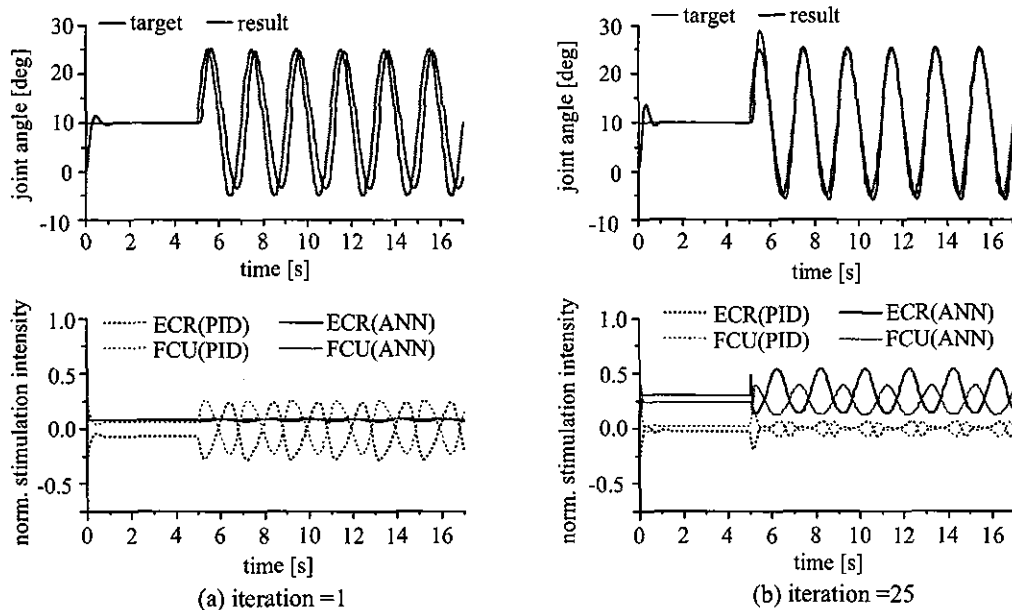


図 7 フィードバック誤差学習を用いた FES 制御による手関節掌背屈運動のモデルシミュレーション結果の例

ているためである。また、cycle-to-cycle 制御では、刺激強度を最大値で固定していたことも関係があると考えられる。

次に、遊脚期における爪先の高さを図 6 に示す。foot クリアランスの最小値は、2.32-3.60cm (2.85±0.26cm) となり、健常者での平均値(2.19±0.66)よりやや大きくなった。Foot クリアランスが起こる時刻は、規格化歩行時間において、平均で 60.8%の時点であり、健常者の歩行よりもやや早くなった。

3. 筋骨格モデルを利用した学習型 FES 制御方式の検討

FEL を用いた制御結果について、学習 1 回目及び学習 25 回目の関節角度軌跡、及び、PID 制御器と ANN による開ループ制御器の出力を図 7 に示す。学習 1 回目では制御に遅れがみられるが、学習 25 回目には遅れがほとんどみられなくなっていることがわかる。また、各制御器の出力については、学習 1 回目には PID 制御器の出力がほとんどであったが、学習 25 回目には ANN の出力が大部分を占めるようになった。これらの結果より、FEL によって適切な ANN が構築され、遅れの小さい開ループ制御が行われたことが示される。

上記のシミュレーション結果は、以前に行った健常被験者での制御結果と同様であった。また、一度学習した ANN を他の健

表 2 ANN による特徴的動作の認識に関する評価結果

	ANN の組合せ	認識率・誤検出
A	ze3&ae5, ze6&ae5 ae5&xzar4	10/11・0 回
B	yz1, er1, xyz1	11/11・0 回

常被験者に適用した場合、未学習の ANN を用いるよりも学習回数が少なくて済むことが実験結果で確認されている。モデルシミュレーションにおいても、学習した ANN を異なる筋の入出力特性を有するモデルに適用した結果、少ない回数で学習が終了することが確認された。

4. 制御命令入力方式の開発

被験者 A では、誤検出が多く認識率も低かったため、認識率が 86.4% (22 回中 19 回認識) 以上で誤検出が 10 回以下の条件で ANN を抽出し、2つの ANN の出力を AND 演算処理後、誤検出回数が 1 回以下のものを 3 組選択した。この 3 組の ANN のうち、いずれかが特徴的動作を検出した後 3 サンプル以内に残りの ANN のいずれかが特徴的動作を認識した場合のみ、特徴的動作を検出したと判定した。被験者 B では、認識率が 100% (22 回中 22 回認識) で、誤検出が 0 回の条件で ANN を 3 個選択した。表 2 に、3 回目

の測定結果に対する認識結果を示す。ここで、ze3 は入力データが z と e で中間層のニューロン数が 3 個の ANN を表す。被験者 A、B とも誤検出がなく、認識率も十分に高い結果となった。しかし、うなずき動作に似た動作が存在すると誤検出が生じる可能性があり、完全に誤検出を防ぐことは困難な場合もあった。評価データ数を増やした検討が今後必要であろう。

D. 結論

本研究では、筋骨格モデルを用いた計算機シミュレーションが FES 制御に関する研究において有用であることを示し、下肢運動制御への拡張とシミュレーションシステムの実現を進めた。これらに関しては、両側下肢の運動を表現するモデルへさらに拡張すること、データの可視化と解析を容易に行えるシミュレーションシステムを実現することが次の課題である。また、FES による歩行制御や学習型制御器についても計算機シミュレーションで実現可能性を示した。さらに実用的な方法へ展開するとともに、実験的検証を進めることが課題である。下肢の FES 制御では、上肢を使用しないシステム操作が望まれる。本研究で検討した方法は、精度の点で改善できたといえる。今後、麻痺患者での評価を通して、実用上の問題をさらに検討することが必要であろう。

E. 研究発表

T. Watanabe, M. Otsuka, M. Yoshizawa, N. Hoshimiya: Computer Simulation for Multichannel Closed-loop FES Control of the Wrist Joint, Proceedings of Vienna FES Workshop 2004, pp.138-141, 2004, and abstract in Artificial Organs, Vol.28, No.8, pp.767-768, 2004.

渡邊高志, 星宮 望: FES による運動機能代行 — 現在の方法と課題, 制御技術の開発 —, 日本エム・イー学会雑誌 BME, Vol.18, No.4, pp.3-10, 2004.

A. Arifin, T. Watanabe, M. Yoshizawa, N. Hoshimiya: A test of fuzzy controller of cycle-to-cycle control for controlling three-joint movements of swing phase of FES gait, 第 25 回バイオメカニズム学術講演会予稿集, pp.43-46, 2004.

渡邊高志, 帖佐征一, 吉澤 誠, 星宮 望: 機能的電気刺激 (FES) による麻痺上肢制御法の開発における筋骨格モデルの利用, 第 19 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.135-138, 2004.

藤原大樹, 渡邊高志, 村上 肇, 古瀬則夫, 吉澤 誠, 星宮 望: 人工神経回路 (ANN) による動作認識を用いた運動機能障害者のための制御命令入力システムに関する基礎的検討, 第 38 回日本エム・イー学会東北支部大会講演論文集, p.32, 2004.

上田智志, 渡邊高志, 杉 義宏, 吉澤 誠, 星宮 望.: リアルタイムパラメータ調整法を用いた異なる肢位での閉ループ FES 制御に関する基礎的検討, 第 11 回日本 FES 研究会学術講演会講演論文集, pp.43-48, 2004.

林 剛哉, 村上 肇, 渡邊高志, 星宮 望: 光素子を用いた頭部運動による障害者用制御命令入力装置に関する基礎的検討 — 第 2 報: 光通信部におけるパルス変調方式の検討 —, 第 11 回日本 FES 研究会学術講演会講演論文集, pp.37-41, 2004.

村上 肇, 渡邊高志, 星宮 望: 機能的電気刺激 (FES) に望まれるヒューマンインタフェース, 生体医工学, 第 43 巻, 特別号, 2005. (発表予定)

S. Chosa, T. Watanabe, M. Yoshizawa and N. Hoshimiya: A Computer Simulation Study of the Feedback Error Learning Controller for FES on the Wrist Joint's 1-DOF Movement, APCBME 2005, 2005. (発表予定)

A. Arifin, T. Watanabe, M. Yoshizawa and N. Hoshimiya: A Test of Stimulation Schedule for the Cycle-to-Cycle Control of Three-joint Movements of Swing Phase of FES-induced Hemiplegic Gait, APCBME 2005, 2005. (発表予定)

DEVELOPMENT OF POSITION MEASUREMENT SYSTEM AND TRAINING METHOD FOR PARALYZED PATIENTS

Imre CIKAJLO Graduate School of Engineering, Tohoku University

Abstract

In the conducted research the emphasis is on measurement system that would allow us to obtain sufficient information for motion analysis and later use in restoration of functional movement of patients with spinal cord injury. The sensory system is based on single axis gyroscope and two axis accelerometer providing angular velocity and acceleration respectively. When it is attached to the shank of the human being the obtained information equals to shank angular acceleration in sagittal plane as well as radial and tangential acceleration of the lower extremity. In addition PC based software has been developed to communicate with the sensor, record and present the assessed data. Later on the sensory system has been tested during overground walking of healthy subject. Simultaneously the overground walking was monitored by contactless optical measurement system Vicon that was considered as an errorless positioning system and provided a good reference when the evaluation of the sensor applicability took place.

A. Objective

Several studies, reviewed in, have demonstrated beneficial effect of reducing a part of the weight, shown in improved gait pattern, as this enabled impaired subjects to start very early with functional locomotor training in incomplete spinal cord injury (SCI) when overground walking was not possible. Visintin have conducted a controlled clinical study in which two similar groups of stroke subjects have received the same type and amount of gait training on the treadmill during 6-week period. The only difference in treatment existed in that the experimental group was provided up to 40 body weight support (BWS) and the amount of BWS was progressively decreased as the gait pattern improved, while the control group trained without BWS. At the end of treatment the difference in overground walking speed was significant. This difference doubled at 12-weeks follow-up. In the past functional electrical stimulation (FES) systems for either therapeutic or orthotic use during walking simple foot switches were used as the source of information on stance and swing phase occurrence. The major difficulties reported by majority of clinical practitioners were associated with unreliability of the system, as the correct functioning depends largely on "correct" foot placement in order to obtain a clean contact. If a subject walks with feet inverted or averted, this results in

non-detection of an event, which is clearly a serious impediment to the process of re-learning.

We propose an alternative sensory-control system composed of accelerometer and gyroscope, mounted in suitable chassis, which should be worn on the lower leg of walking subject. This sensory system provides radial and tangential accelerations and the inclination of the tibia from which it is possible to derive information on height and length of a step as well as the stability of the knee which is important when evaluating the quality of the stance and swing phases of each stride. Within this the on-line algorithms enabling detection of stride phases and measurement, derivation and evaluation of stance and swing phases have been developed.

B. Methodology

The proposed sensory device was designed in a way to provide sufficient information that may serve for several purposes, including functional electrical stimulation control. The built in two axis accelerometer provide two dimensional acceleration, radial and tangential respectively when attached to the front of the shank. The acceleration time-course may be used to determine the walking pattern or identify the adequacy of the assessed pattern. On other hand when low-pass filtered provide reliable on-line information of segment inclination.

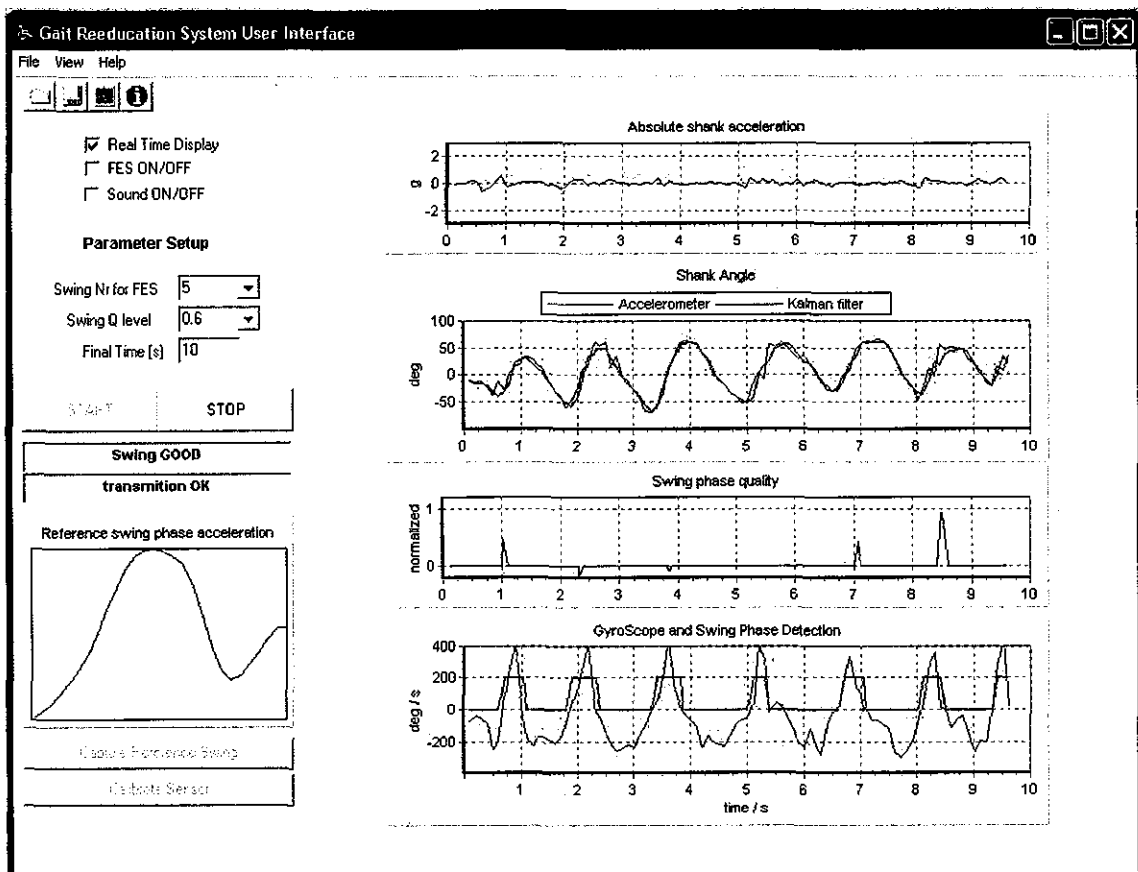


Figure 1. Graphical User Interface (GUI) running on PC was used for data acquisition and research purposes.

Therefore we may determine the joint angles when used in combination with several sensory devices attached to other segments or in our case extremities.

Using the low-pass filtering may not be the optimal solution for dynamical movement, where also dynamical components are required. Therefore we considered applying a gyroscope. The gyroscope was implemented in the sensory device and provided one DOF angular velocity. When attached to the shank of the human extremity the angular velocity presented the angular velocity of the shank. The provided angular velocity was integrated in order to determine the shank angle, but unfortunately it seemed that the gyroscope bias due to the temperature change and other related noise information have been a cause for accumulated integration error that resulted in useless information. Therefore an efficient algorithm that overcomes the disadvantage of the gyroscope was applied.

An efficient but simplified gyroscope model was implemented into the state-space

estimator that takes into consideration the additional measurement to improve the predicted output. The Kalman filter has become a linear and time invariable, but only under the circumstances that it was applied on one DOF.

A single DOF application was sufficient for the real-time functional electrical stimulation control as well as for the gait quality evaluation in sagittal plane.

The preliminary measurement were needed to determine the number of sensors needed and at the same time to estimate the information needed for on-line gait evaluation that may play the most important role in the gait training of spinal cord injured patients. In recent years we came to the conclusion that a patient's assistance and voluntary activity is needed for successful rehabilitation. Here we suggest several approaches which may be found successful in different type or level of spinal cord injury. One and recently also very successful is the treadmill based training where the patient whether incomplete or completely paralyzed patient has gave up the whole concern at gait

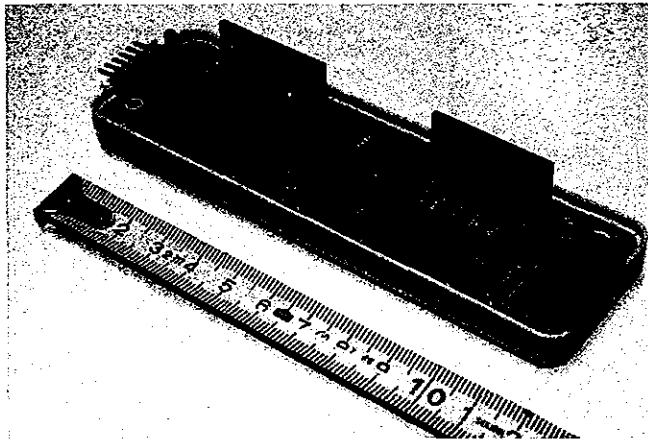


Figure 2. Multipurpose microcontroller based sensor.

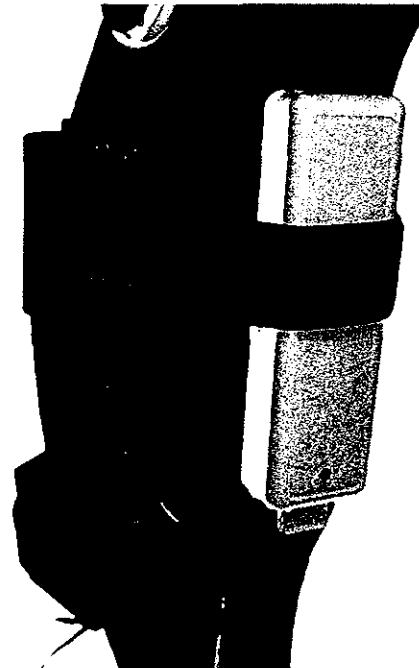


Figure 3. The possible sensor configuration at the shank when it is used in combination with surface peroneal FES.

stability. In a case of completely paralyzed patients we provide body weight support to decrease the strenuous contribution of upper extremities and allow the patient to proceed into the swing phase. To offer motor augmentation we apply functional electrical stimulation. A single channel FES may be sufficient in some cases while in complete paralysis a multichannel FES will be prevalent. Here we suggest surface FES while we may not determine whether the patient is subject to permanent FES. The later may be needed in a case of complete SCI, but before making any decision regarding the implanted FES, we need to assure the FES strategy. This may be decided after (un)successful training.

We were also using audio cognitive feedback and the results have shown a significant improvement in patient's endeavour to accomplish a successful gait cycle. There we may use similar approach in training of incomplete SCI patients in the combination with FES.

Before and after the training period a comprehensive gait analysis is recommended in order to evaluate the importance and efficiency of the training method. For that purpose we use Vicon or similar optical position measurement

system in a combination with force plates.

C. Outcome and Results

When the hardware and software of the first stage (PC based Windows GUI, and redesigned controller-sensor device for the MicroFES) were ready for testing we carried out some experiments on healthy subjects in the HoshimiyaLab and Miyagi Prefectural Research Centre where we were able to use optical measurement system Vicon. The later testing experiment was useful in the sense of sensor comparison with optical measurement during human subject's walking.

The results have shown a significant improvement when the Kalman filter was applied to estimate the shank angle (fig. 5) and that the information may be used for control purposes during swing phase, i.e. when the knee is progressing from flexion to extension (fig 4) The application of sensory device for FES control purpose and real-time gait evaluation has been presented and published in related references.

D. Discussion

The strategy for training incomplete and complete SCI patients may not meet the

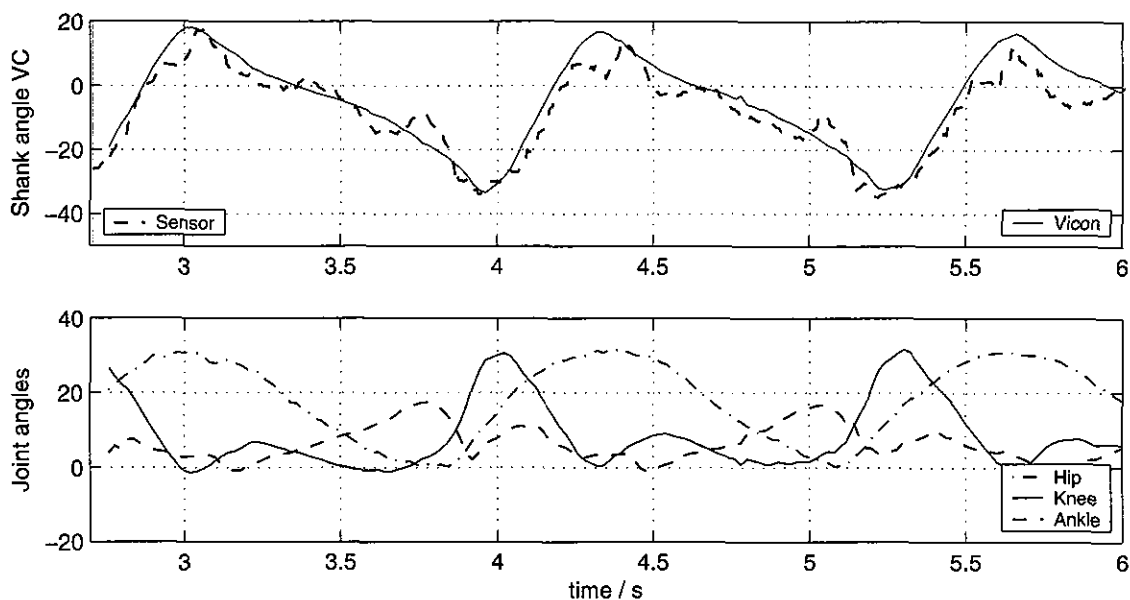


Figure 4. Sensory device evaluation during overground walking of healthy person. In addition to make the gait cycle more comprehensive joint angles are shown.

common requirements therefore it must be treated separately. In a case of complete SCI patients we may deal with the necessity of implantable FES, possibly BION or similar products that may not need a surgical procedure, while in incomplete SCI, especially when the injury level has not affected the majority of motor control, we strongly dissuade from implanted FES, since the patient may not need a permanent FES. It has been shown that the FES training was very efficient and had a significant impact on patient's gait performance. But after training the patient has found the FES inefficient while its contribution was not significant.

We realized that the supervised control of walking assistance is necessary to involve the patient into treadmill training rehabilitation. Strictly speaking the control of FES replaces the strenuous physiotherapist's assistance and in combination with the swing phase estimation introduces a new approach in treadmill rehabilitation [Cikajlo et al., 2003, JRM].

E. Related references

I. Cikajlo and T. Bajd, Swing Phase Estimation in Paralyzed Persons Walking. *Technology & Health Care*, 5: 425-433, 2002

I. Cikajlo, Z. Matjačić and T. Bajd, Development of gait re-education system in incomplete spinal cord injury, *J. Rehabil Med*, 35, 5: 213-216, 2003

I. Cikajlo, R. Futami and N. Hoshimiya, "FES Control Based Treadmill Rehabilitation After Incomplete Spinal Cord Injury", *Proc. Korean-Japanese Joint Conference on Rehabilitation Medicine*, Kyoto, Japan, 2004

I. Cikajlo, Z. Matjačić, and T. Bajd, "Control of the Functional Electrical Stimulation in Treadmill Rehabilitation", *Proc. Of the European Federation of Rehabilitation Research Conference*, Ljubljana, Slovenia, 2004

I. Cikajlo, Z. Matjačić, T. Bajd and N. Hoshimiya, "The use of Kalman filtering in assistive device for data assessment and control in gait re-education", *Proc. Of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004

I. Cikajlo, Z. Matjačić, T. Bajd, R. Futami and N. Hoshimiya, "Sensory Supported FES Control In Gait Training Of Incomplete SCI Persons", *Proc. Of 8th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation*, September 10-13, 2004, Vienna, Austria

I. Cikajlo, Z. Matjačić, T. Bajd, R. Futami and N. Hoshimiya, "Sensory Supported FES Control In Gait Training Of Incomplete SCI Persons", Abstract published in *Artif. Organs*, 28(8):754-781, 2004

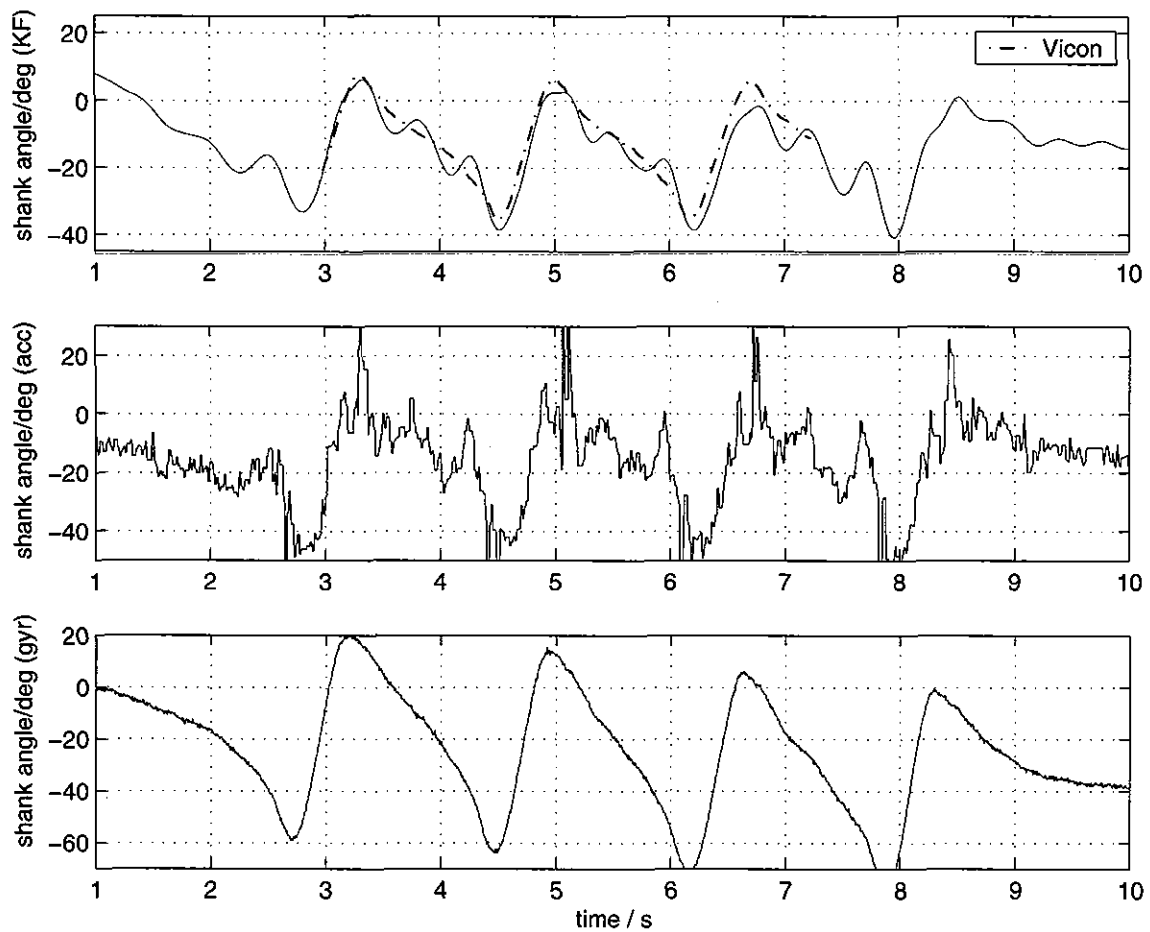


Figure 5. The figure presents the problems of each sensor group and efficient application of Kalman estimator.

厚生労働科学研究費補助金（障害保健福祉総合研究事業）
分担研究報告書

筋電制御による不全麻痺への筋力増強制御方式の開発
(FES の基盤技術としての生体電気信号計測・解析手法の検討と、
ヒューマン・インタフェースへの応用)

分担研究者 加納慎一郎 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 助手

研究概要

不全麻痺患者に関する閉ループ FES 制御システムのひとつである筋力増強制御方式による精緻な麻痺肢制御のための基礎研究として、微小振幅生体電気信号の低雑音増幅手法、および計測信号からの雑音除去や信号検出のための信号解析手法に関する研究を行った。本研究では、計測・解析法を実際に生体信号計測に活用し、その効果を検証した。また、現行の FES システムで問題となっているヒューマン・インタフェースへ本技術を活用するための基礎研究も並行して行い、眼球運動の検出による FES 用ヒューマン・インタフェースシステムの開発の可能性が示された。

A. 研究目的

従来の機能的電気刺激（Functional Electrical Stimulation: FES）における制御手法は、あらかじめ決定された電気刺激パターンで被適用者に刺激を行う、閉ループ制御であった。この方法は実現が比較的容易である反面、刺激対象の時変性を考慮しないため、当初意図した効果と現実の効果が異なり、また再建動作が不安定になる問題点があった。この問題を解決するためには、閉ループ制御、すなわち FES による四肢の動作を検出し、その情報を用いて刺激を調整するようなフィードバック刺激呈示系を構築する必要がある。

動作検出の対象は四肢の物理的動作がまず考えられるが、より詳細な情報を抽出するためには、動作に伴う刺激対象の電氣的活動を直接計測してフィードバックに供することが望ましい。このような系の研究・開発においては、(1)微小振幅信号の低雑音増幅手法、(2)計測信号からの雑音除去や信号検出のための信号解析手法の 2 点が特に重要である。

生体電気信号の検出は、FES システムの機能向上を支える基礎研究に有効なだけでなく、昨今開発の必要性が高まっている FES システムの周辺技術としてのヒューマン・インタフェースの開発にも有用である。現行の FES システムでは、患者に残された身体動作

（残存動作）によってスイッチを物理的に操作することにより FES 刺激装置への制御入力を行っている。しかしこの方法では、スイッチ操作によって残存動作が占有されてしまうために、FES による再建動作が制限されることが問題となっていた。この問題を解決するためには、末梢の残存動作自体を物理的に利用する従来の方法ではなく、眼球運動などの身体動作に伴う生体電気信号、あるいは将来的には、脳活動を反映した生体電気信号である脳波から患者の意図の検出を行うことによって外部機器を制御する技術が必要である。これらの技術を実現するためには、合目的な生体信号計測・解析技術の検討を行う必要がある。

そこで本研究では、不全麻痺患者の筋収縮に伴い発生する筋電図を高精度に計測し、それに基づいて FES 制御を行うことでより精緻な制御を行う「筋力増強制御方式」の開発のために、生体信号の計測・解析に関する基礎研究を行い、その有効性を示すことを目的とした。また、この技術を活用し、FES における新たなヒューマン・インタフェースシステムの開発に関する基礎研究を行った。

B. 研究方法

FES 研究で用いるための生体電気信号の低雑音計測・解析に関するシステムの構築に関する研究を行った。

また、本技術のヒューマン・インタフェースへの応用のための研究として、眼球の運動に伴って生じる生体電気信号である眼電図 (electrooculogram: EOG) を計測し、それに基づいて眼球運動によって外部機器を制御する手法について検討を行った。さらに、脳波から被験者の意図 (末梢運動動作のイメージ) を検出するための信号計測手法についての予備実験を行った。

ヒトに対する計測実験は「東北大学大学院工学研究科ヒトを対象とする研究に関する倫理委員会」の認可を受け、その規定に則って行った。事前に被験者に十分なインフォームド・コンセントを実施し、被験者の人権保護と安全に十分配慮した。なお、これらの実験は医師 (東北大学大学院医学系研究科教授半田康延医師) の監督のもと、倫理上、安全上の助言を受けて行った。

C. 研究成果

被験者の末梢から生じる筋電に基づいて FES 刺激信号を生成し、より精緻な制御を行う筋電駆動型下肢 FES 制御システムのシステム開発を行い、良好な結果を得た。

脳における認知活動に関連して生じる脳波成分である事象関連電位 (event-related potential: ERP) を健常被験者から計測し、その脳活動との対応を調べる研究を行った。その結果、聴覚系における感覚記憶機能と、計測された事象関連電位の規模が対応することが示され、本研究で検討した微小信号計測・解析手法の有効性が示された。

また、眼電図から被験者の眼球運動の方向や大きさを検出するための信号解析技術について検討を行った。この手法に関しては先行研究が存在するが、これらでは眼球運動をより忠実に計測するために、眼電図を技術的な困難な直流増幅で増幅するものであった。本研究では、技術的な難度が比較的低い交流増幅で増幅し、解析処理によって本質的な情報を抽出する手法の開発を目指した。本研究の結果、交流増幅によって 16 種類の眼球運動 (8 方向の長短) を検出できる可能性が示された。

分担者は、脳波によるヒューマン・インタフェースの研究に長年従事している Gert Pfurtscheller 教授 (オーストリア・グラーツ工科大学) との共同研究により、ヒューマン・インタフェースにおける脳波計測・解析

およびシステム実装に関する研究を開始した。

D. 結論

不全麻痺患者に関する閉ループ FES 制御システムのひとつである筋力増強制御方式による精緻な麻痺肢制御のための基礎研究として、微小振幅生体電気信号の低雑音増幅手法、および計測信号からの雑音除去や信号検出のための信号解析手法に関する研究を行った。被験者の末梢から生じる筋電の高精度計測を行い、それに基づいて FES 刺激信号を生成して精緻な制御を行う筋電駆動型下肢 FES 制御システムの基礎的な検討を行い、良好な結果を得た。また本研究の基礎となる生体電気信号の計測・解析法が、生体機能解析に有効であることを示した。さらに、現行の FES システムで問題となっているヒューマン・インタフェースへ本計測・解析技術を活用するための基礎研究も行い、眼球運動の検出による FES 用ヒューマン・インタフェースシステムの開発の可能性が示された。これらの結果は FES における制御精度や実際の患者への適用方法の改善に有用であると思われる。

E. 研究発表

1. Shin'ichiro Kanoh, Ryoko Futami, Nozomu Hoshimiya: Sequential grouping of tone sequence as reflected by the mismatch negativity, *Biological Cybernetics*, 91, 6, pp.388-395 (2004)
2. Shin'ichiro Kanoh, Ryoko Futami, Nozomu Hoshimiya: Neuronal Correlates of Human Auditory Grouping: An ERP Study, *Proceedings of the 2004 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2004)*, pp.513-516 (2004)
3. 川西 努, 加納 慎一郎, イムレ ツカエロ, 二見 亮弘: 筋電駆動型下肢 FES 制御システムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE2004-66 (2004)
4. 川西 努, 加納 慎一郎, イムレ ツカエロ, 二見 亮弘: 筋電駆動型下肢 FES 制御システムの開発, 第 11 回日本 FES 研究会学術講演会論文集, pp.49-52 (2004)
5. 鈴木 信太郎, 加納 慎一郎, 二見 亮弘: 交

流眼電図からの FES 制御命令取得に関する
基礎的検討, 第 11 回日本 FES 研究会学術講
演会論文集, pp.33-36 (2004)

F. 知的財産権への出願・登録状況
なし

下肢制御臨床試験と、痙性低減に関する基礎的研究
（痙性軽減に関する研究）

分担研究者 半田康延 東北大学大学院医学系研究科障害科学専攻 教授

研究要旨

前脛骨筋を支配する総腓骨神経に条件刺激を加え、その後脛骨神経への試験刺激によってひらめ筋から H 波を記録した。その結果、脳卒中片麻痺患者では治療的電気刺激（TES）によって H 波が抑制され痙性軽減が図れることが判明した。

A. 研究目的

通常足関節背屈筋の収縮に伴って筋紡錘から発射されるインパルスは、求心性 Ia 神経線維を經由して背屈筋支配の α 運動ニューロンに興奮的に作用する。また同じインパルスは、脊髄内の抑制性介在ニューロンを刺激して足関節底屈筋の α 運動ニューロンを相反的に抑制する。痙性麻痺患者の内反尖足のような異常な筋緊張は、 α 運動ニューロンと抑制性介在ニューロンの相反性神経結合の働きが障害され、底屈筋の α 運動ニューロンのみが異常に興奮するために発生すると考えられる。一方脳卒中後の痙性片麻痺では、TES 施行後に相反性 Ia 抑制の回復と考えられる H 波の振幅減少が認められ、長期に渡る H 波抑制が観察される場合もある。

これらのことから、本研究では、FES を用いて麻痺肢の動作を再建する上で障害となる痙性の低減を最初に検討することとした。特に、下肢の動作を再建する際には転倒の危険もあることから、痙性を抑制することが重要になる。そこで痙性片麻痺患者における、麻痺側の足関節背屈筋から拮抗筋への求心性 Ia 神経線維と抑制性介在ニューロンからなる 2 シナプス性脊髄反射回路の機能を、条件刺激を用いた H 反射から検討し、さらに TES 前後での H 反射の変化から痙縮抑制を目的とした TES の効果を検討した。

B. 研究目的

ひらめ筋からの H 波導出に先行して、拮抗筋である前脛骨筋支配の総腓骨神経に条件刺激を加え、その後脛骨神経への試験刺激

によって H 波を記録した。条件刺激は前脛骨筋に M 波が誘発される最小閾値強度とし、試験刺激は膝窩部で脛骨神経を刺激する従来からの H 波誘発刺激とした。条件刺激と試験刺激の時間間隔（condition-test interval :CTI）は、介在ニューロンの発火による時間遅延を考慮して 0、1、2、3ms に設定した。条件刺激を加えずに測定した H 波（Control H）に対する、条件刺激を加えた H 波（Conditioned H）の振幅比率（Cond. H / Cont. H）を相反性抑制の指標とし、各 CTI につき 10 回の測定を実施した。その後 TES としての電気刺激を 15 分間行い、終了後に再度条件刺激を用いた H 波の測定を行った。TES には OG 技研社製 PULSECURE-PRO を用い、刺激時間 0.2ms、刺激周波数 20Hz の矩形波で 10 秒刺激 10 秒休止のくり返しパターンを用いた。電極は 9×7cm の表面電極を使用し、陰極を腓骨小頭部に、陽極を前脛骨筋に貼付した。対象は、平均年齢 54.9±10.0 歳、脳卒中後の平均罹患期間 71.5 か月の痙性片麻痺患者 11 名と、平均年齢 26.8±4.2 歳の健常成人 5 名とした。

C. 研究結果および考察

健常成人の TES 前の Cond. H/Cont. H の平均は、CTI 2ms および 3ms において 1.0 以下となり、いずれも 0ms に比して有意な低下（ $p<0.05$ ）を示したが、これは TES 後でも同様であった。一方片麻痺患者では、11 名のうち 5 名において CTI 0 から 3ms にかけての Cond. H/Cont. H の平均が 1.0 以上で、H 反射の抑制がみられなかった。しかし TES 後の Cond. H / Cont. H は CTI 2ms を中心に TES 前

に比較して有意な低下 ($p<0.05$) を示し、条件刺激による H 反射の抑制が回復した。TES としての電気刺激がもたらすこうした相反性抑制の回復に関しては、求心性 Ia 神経線維に対するくり返し刺激が、脊髄内の抑制性介在ニューロンにいわゆる post-tetanic potentiation をもたらし、拮抗筋支配の運動ニューロンの興奮性を低下させることがひとつの要因とも考えられるが、Ib 求心線維の関与も否定できない。いずれにしても TES は脊髄内における相反性抑制回路に影響をおよぼし、これを通じて痙縮の抑制をもたらすものと考えられる。

TES 施行によって得られる痙縮抑制効果は、症例によっては数時間におよぶ場合もあるが、個人差が大きく一定しない。効果持続に関与する要因も明らかではない。しかし、発症からの罹患期間が比較的浅い脳卒中例では H 波振幅の抑制が持続しやすい傾向が示された。詳細については今後の検討課題である。

D. 結論

脳卒中片麻痺患者では前脛骨筋の支配神経 TES が拮抗筋であるひらめ筋の H 波を抑制し、ひらめ筋の痙性軽減が図れることが判明した。

E. 研究発表

なし

F. 知的財産権の出願・登録状況

なし

III. 研究成果の刊行に関する一覧表

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
川西 努, 加納慎一郎, イムレ ツカエロ, 二 見亮弘	筋電駆動型下肢 FES 制御シ ステムの開発	電子情報通信学会技 術研究報告		MBE20 04-66	2004
川西 努, 加納慎一郎, イムレ ツカエロ, 二 見亮弘	筋電駆動型下肢 FES 制御シ ステムの開発	第 11 回日本 FES 研究 会学術講演会論文集		49-52	2004
T. Watanabe, M. Otsuka, M. Yoshizawa, N. Hoshimiya	Computer Simulation for Multichannel Closed-loop FES Control of the Wrist Joint	Proceedings of Vienna FES Workshop 2004		138-141	2004
T. Watanabe, M. Otsuka, M. Yoshizawa, N. Hoshimiya	Computer Simulation for Multichannel Closed-loop FES Control of the Wrist Joint	Artif. Organs Abstract	28(8)	767-768	2004
渡邊高志, 星宮 望	FES による運動機能代行 ー現在の方法と課題, 制御技 術の開発ー	日本エム・イー学会雑 誌 BME	18(4)	3-10	2004
Achmad Arifin, Takashi Watanabe, Makoto Yoshizawa, Nozomu Hoshimiya	A test of fuzzy controller of cycle-to-cycle control for controlling three-joint movements of swing phase of FES gait	第 25 回バイオメカニ ズム学術講演会予稿 集		43-46	2004
渡邊高志, 帖佐征一, 吉澤 誠, 星宮 望	機能的電気刺激 (FES) によ る麻痺上肢制御法の開発に おける筋骨格モデルの利用	第 19 回生体・生理工 学シンポジウム論文 集		135-138	2004
藤原大樹, 渡邊高志, 村上 肇, 古瀬則夫, 吉澤 誠, 星宮 望	人工神経回路 (ANN) によ る動作認識を用いた運動機 能障害者のための制御命令 入力システムに関する基礎 的検討	第 38 回日本エム・イー 学会東北支部大会講 演論文集		32	2004
上田智志, 渡邊高志, 杉 義宏, 吉澤 誠, 星 宮 望	リアルタイムパラメータ調 整法を用いた異なる肢位で の閉ループ FES 制御に関す る基礎検討	第 11 回日本 FES 研究 会学術講演会講演論 文集		43-48	2004
林 剛哉, 村上 肇, 渡 邊高志, 星宮 望	光素子を用いた頭部運動に よる障害者用制御命令入力 装置に関する基礎的検討 ー第 2 報: 光通信部におけ るパルス変調方式の検討ー	第 11 回日本 FES 研究 会学術講演会講演論 文集		37-41	2004
I. Cikajlo, R. Futami and N. Hoshimiya	FES Control Based Treadmill Rehabilitation After Incomplete Spinal Cord Injury	Proc. Korean-Japanese Joint Conference on Rehabilitation Medicine, Kyoto, Japan		143	2004
I. Cikajlo, Z. Matjačić, and T. Bajd	Control of the Functional Electrical Stimulation in Treadmill Rehabilitation	Proc. Of the European Federation of Rehabilitation Research Conference		149-152	2004
I. Cikajlo, Z. Matjačić, T. Bajd and N. Hoshimiya	The use of Kalman filtering in assistive device for data assessment and control in gait re-education	Proc. Of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems		2295-23 00	2004

I. Cikajlo, Z. Matjačić, T. Bajd, R. Futami and N. Hoshimiya	Sensory Supported FES Control In Gait Training Of Incomplete SCI Persons	Proc. Of 8th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation		129-131	2004
I. Cikajlo, Z. Matjačić, T. Bajd, R. Futami and N. Hoshimiya	Sensory Supported FES Control In Gait Training Of Incomplete SCI Persons	Artif. Organs Abstract	28(8)	754	2004
Shin'ichiro Kanoh, Ryoko Futami, Nozomu Hoshimiya	Sequential grouping of tone sequence as reflected by the mismatch negativity	Biological Cybernetics	91(6)	388-395	2004
Shin'ichiro Kanoh, Ryoko Futami, Nozomu Hoshimiya	Neuronal Correlates of Human Auditory Grouping: An ERP Study	Proceedings of the 2004 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2004)		513-516	2004
鈴木信太郎, 加納慎一 郎, 二見亮弘	交流眼電図からの FES 制御 命令取得に関する基礎的検 討	第 11 回日本 FES 研究 会学術講演会論文集		33-36	2004

IV. 研究成果の刊行物・別刷