

機関番号：32678
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20500492
 研究課題名（和文） 近赤外線経皮エネルギー伝送による筋電義手用低侵襲完全埋め込み型
 インターフェイス
 研究課題名（英文） Fully implantable myoelectric interface powered by NIR power system
 for application with myoelectric prosthesis.
 研究代表者
 島谷 祐一 (SHIMATANI YUICHI)
 東京都市大学・工学部・准教授
 研究者番号：20154263

研究成果の概要（和文）：筋電義手を制御するための良質な筋電信号を得るため、皮下に完全に埋め込んで筋電信号を計測する装置を開発した。装置には体外から近赤外光を照射することで電力を供給し、電池交換を不要とした。また記録電極に従来の金属ではなくカーボンナノチューブをコーティングした繊維を用いることで、電極が破損することなく長期間の埋め込み記録が可能な装置を開発することに成功した。装置をラットの皮下に埋め込み実験を行ったところ、良好な結果を得た。

研究成果の概要（英文）： We have developed a fully implantable myoelectric interface powered by a wireless NIR (near infra red) power system. In the long-term experiments, the implanted device functioned normally for more than weeks without degrading the signal quality. The lifetime of the device were extended by using CNT (carbon nanotube) coated thread as unbreakable recording electrodes. The interface successfully functioned in the bodies of rats to record EMG (electromyogram) signals.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2009年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：生体医工学、神経科学

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：筋電義手、筋電図、無線電力伝送、近赤外線、カーボンナノチューブ

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、筋電義手研究の主流は、体表面電極で筋電を取得する非侵襲型インターフェイスに関するものであった。使用者にとって安全で、既に実用化も進んでいるという利点からである。しかし、表面電極で得ら

れる筋電情報には限りがあり、複数の電極を用いたとしても、使用者の意思を正確に読み取ってロボットハンドに細かな動作をさせることは容易でない。これらの問題を解決するためには、電極を個々の筋に直接埋め込んでその活動を個別に記録する侵襲的方法が有利

であるが、1) 複数の筋に電極を埋め込み配線を接続コネクタに束ねる外科手術は受術者の身体的負担が大きい。2) 外部機器を接続するコネクタから細菌感染する危険が常にある。またコネクタ引き抜き事故等の危険もある。3) 電極材料の生体適合性が確立されておらず、長期の埋め込みが期待できない。などの問題点があった。これらの諸問題を解決し、安全で低侵襲な埋め込み筋電インターフェイスを開発することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、個々の筋の活動電位を低侵襲の埋め込み電極で長期間安全に記録する方法を確立することであった。そのために以下のような到達目標を掲げた。

- (1) 超小型の生体アンプを内蔵したアクティブ電極を個々の骨格筋内に埋め込み、記録した筋電波形を無線通信で体外に送信する。
- (2) 体内装置は完全埋め込み式とし、危険な外部機器接続コネクタをなくす。このためにアンプ等の体内装置への電力供給は近赤外光とフォトダイオードを用いて経皮的に行い、電池交換手術を不要にする。
- (3) 筋ごとにインターフェイスを独立させることで埋め込み手術の低侵襲化を図る。

3. 研究の方法

- (1) 体内埋め込み装置のための電子回路の設計と製作。

図1に示すような体内完全埋め込み式の筋電インターフェイスを考案したこのインターフェイスは一組の体内ユニットと体外ユニットで構成される。体内ユニットはいわゆるアクティブ電極で、筋線維に接する電極と筋電（複合活動電位）を増幅する生体アンプが一体となっている。電極とアンプをつなぐリード線がないのでノイズの筋電信号への混入

を極力抑えることができる。アンプからの出力は送信機に送られる。送信機は筋電信号をFM変調し、皮膚を挟んで対向設置された受信機に無線送信する。通信方法は電磁誘導による近距離無線通信である。受信された信号はFM復調器でもとの筋電波形に復元される。アンプと送信機への電力供給は、電池交換のための再手術を避けるために近赤外光による経皮エネルギー伝送を用いる。すなわち体内ユニットの一部として真皮下にフォトダイオードを埋め込んでおき、体外から近赤外光を照射する事で電力を発生させる。体内ユニットはマイクロパワーのチップ素子を用いることでフォトダイオードの発生する低電力での動作が可能となり、数ミリのサイズに超小型化できる。このような微小ユニットを個々の筋に分散して埋め込む事で体内に長い配線を引き回す必要がなくなり、低侵襲化が進む事が期待される。組み立てた回路は透明アクリル樹脂に封入し、さらに生体用シリコンで被膜することで体液の浸入を防止する。

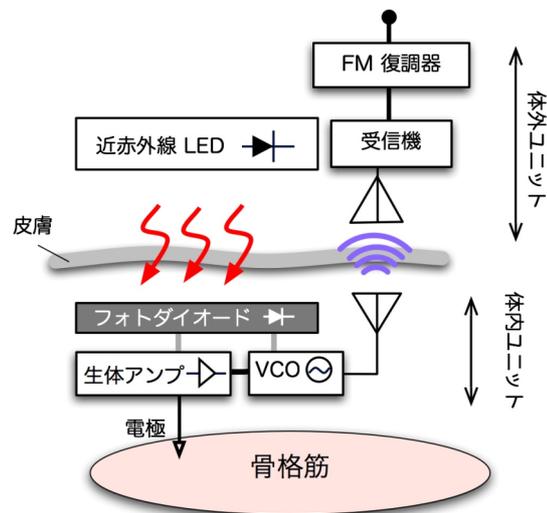


図1. 完全埋め込み型筋電インターフェイス

- (2) 非金属電極の開発

体内埋め込み型インターフェイスでは記録電極の寿命が問題となる。電極の材料には当初白金イリジウム等の金属も用いるが、金属電極は体内で筋収縮による金属疲労が生じて破損するという欠点がある。このため長期間の埋め込みを要求される筋電義手用の電極として適しているとはいえない。そこで本研究では導電性繊維などの柔軟性を持った非金属材料で電極を試作し、長寿命の電極の開発を目指した。電極材料として着目した物は、当時新たに開発された、カーボンナノチューブをコーティングした導電性繊維（クラレリビング社製, CNTEC）である。これを記録電極に加工し、体内ユニットに取り付けた。

(3) 動物実験による性能評価

以上の方法で試作した電極と装置は、ラットを用いた動物実験でその性能をテストした。動物実験はすべて東京都市大学動物実験規程に基づき、動物委員会の承認を得ておこなった。試作した装置はラットの大腿屈筋に埋め込んだ。手術後約2週間で埋め込み手術による傷が完治するので、その後麻酔下および覚醒下で筋電の記録を試みる。麻酔下で随意的に大腿筋を収縮させ筋電を誘発する方法として、後肢の足を機械的に刺激し引き込み反射を引き起こす方法を行った。また覚醒下での筋電の記録を行うために、ラットをトレッドミルで歩行させて記録する方法をとった。また、長期記録実験では一週間おきに麻酔下での筋電記録を試みた。

4. 研究成果

(1) フォトダイオードによる電力測定

本装置でエネルギー伝送に用いたLEDは波長780nm, 放射強度200mW/srで、2mmの距離からフォトダイオードに直接照射することによって、フォトダイオードに約2.5V、700 μ A

の電流を生じさせることが可能である。このLEDとフォトダイオード間に動物（ラット）の皮膚を挿入した場合、フォトダイオードの発電量がどの程度減少するかを調べた。その結果を図2に示す。厚さ約1mm皮膚片をLED-フォトダイオード間に挿入したとき、発生する電流は直接照射時の約40%に減少した。以上の結果より、体内埋め込みユニットの消費電流は最大400 μ A以下とする必要があることがわかった。この条件に合う回路は、生体アンプおよびVCOにマイクロパワーICを用いることで実現した。本研究では、体内ユニットの消費電力が600 μ W以内に収まるように設計を行った。

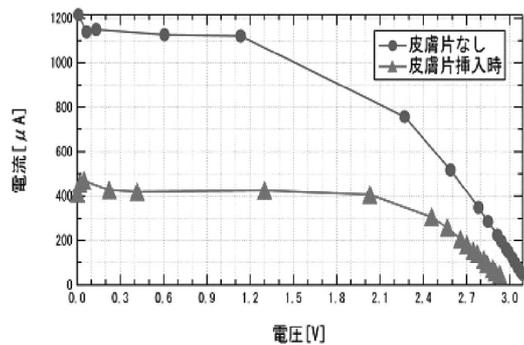


図2. フォトダイオードのV-I特性の測定

(2) 装置の設計および試作

試作した筋電インターフェイスは、体内に埋込む体内ユニットと、体内ユニットから無線送信された生体信号を体外で受信する体外ユニットで構成される。体内ユニットは、筋電記録電極、生体アンプ、FM送信器およびそれらの回路に電力を供給するフォトダイオードで構成され、フォトダイオードの受光面を外側に向けて皮下に埋め込まれる。体外ユニット(図3a, b)は、信号受信器、FM復調器、および体内ユニットのフォトダイオードに近赤外光を照射するLEDで構成される。体外ユニットはLEDが体内ユニットのフォトダイオードに対向するように皮膚表面に取り付ける。

体内ユニット全体の消費電流を約 $400\mu\text{A}$ 以下に抑えるために、マイクロパワーのIC素子を使用した。生体アンプの増幅率は1000倍とし、低域遮断周波数を1.6Hzに設定した。増幅した生体電気信号(筋電)を経皮送信するには、VCO(Voltage Controlled Oscillator)を用いたFM通信を行った。FM送信回路の搬送波周波数は生体への透過度、生体信号波の時間特性、低消費電力化、素子の特性等を考慮し、222 kHzに設定した。送信回路の出力部にフェライトコア・コイルアンテナを用い、体外ユニットの受信アンテナと磁気結合にすることで至近距離通信と指向性の向上を図った。

体内ユニットは金属電極を取り付けた後、アクリル樹脂と生体適合性シリコン樹脂をコーティングして防水保護加工を施した。

図3(c)に示したように、この装置の周波数特性は約50Hz~1kHzであり、この値は筋電を記録するのに適しているといえる。

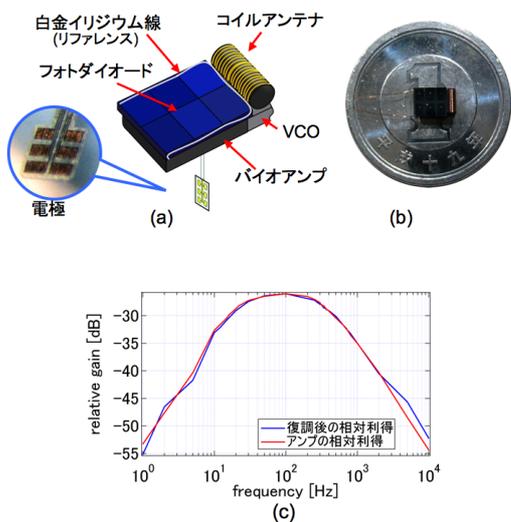
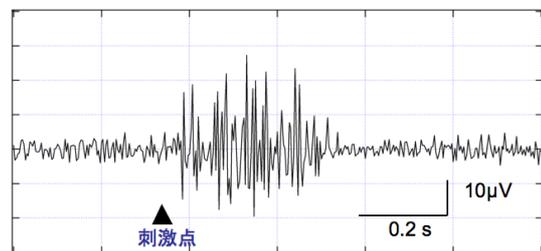


図3. 試作した体内ユニット

(3) 動物実験による筋電の記録

試作した筋電記録装置(体内ユニット)をラットの後肢大腿屈筋に埋め込んで、筋電図の記録を試みた。図4(a)は浅い麻酔下で誘発された後肢引き込み反射にともなう筋電である。また、(b)は覚醒時のトレッドミル歩行パターンに同期して得られた筋電の記録である。覚醒時の筋電も麻酔下同様に、十分なS/N比と振幅で記録された。また、電極を埋め込んだ大腿筋以外の筋からの筋電混入も見られなかった。

(a)



(b)

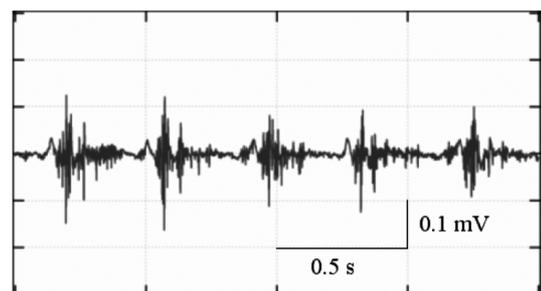


図4. 埋め込み装置によって得られた筋電図

(4) 非金属電極の開発

本研究では金属に代わる電極材料として、カーボンナノチューブ(CNT)コーティング導電性繊維であるCNTEC(クラレリビング社提供サンプル品, 図5)を使用し、埋込み用筋電電極として利用可能かどうかを実験・検討した。

CNTECマルチフィラメント糸1本(1cm)を電極として、生理食塩水中でインピーダンスを測定した。40mV, 1kHzの正弦波を用いて測

定した。その結果、CNTEC電極が生理食塩水中で示す抵抗値は数kΩで従来品のカーボン導電糸に比べ極めて低く、同形状の金属電極に匹敵することがわかった（表1）。

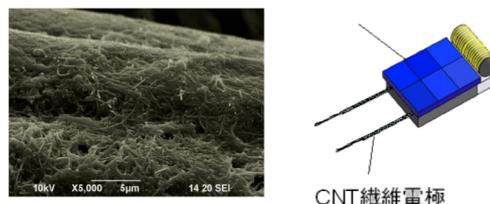
表1. 電極抵抗の比較

| 電極 | 抵抗(kΩ) |
|---------|--------|
| CNTEC | 2.4 |
| カーボン導電糸 | 364.0 |
| 白金イリジウム | 1.3 |
| 金 | 0.9 |

インピーダンス測定による結果が良好であったため、CNTECによる電極を筋電インターフェイス体内ユニットに接続し、ラット大腿筋屈筋に埋め込んで筋電記録を試みた。

埋め込み手術から1週間後、屈曲反射に伴う筋電の記録に成功した。記録した筋電図を図5に示す。得られた筋電波形は、金属電極を用いた筋電図（図4）に匹敵するS/N比と振幅を示し、CNTECが筋電記録用電極として十分に機能することを示している。

この電極を用いて筋電の長期記録を試みた。図5に示すように、埋め込みから9週間すぎた時点でも、埋め込み直後と同様の振幅およびS/N比で筋電を記録することができた。これは埋め込み後約2週間で破損した金属電極と比較するときわめて長寿命で、実用にはCNTの生体に対する侵害性を十分に検討する必要があるものの、CNTコーティング繊維の体内埋め込み電極としての利用に期待が持てる結果である。



(CNTEC 表面:クラレリビング社提供)

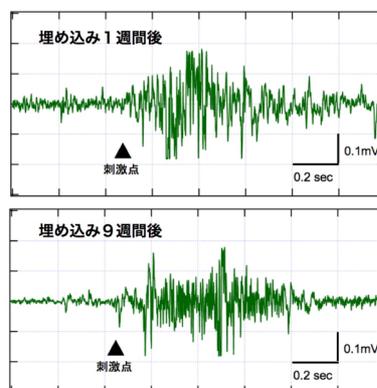


図5. CNT繊維を電極に用いた筋電の記録

(5)まとめ

以上の研究成果は、国内に同様の完全埋め込み型筋電インターフェイスを研究する研究者が少ないこと、また国際的にもごく少数の研究者が研究対象にしているのみであることから、筋電義手用インターフェイスの研究として貴重な成果であると言える。今後はさらに長期の使用に耐えるように装置を改良し、また複数の装置を埋め込んで詳細な筋電信号解析をおこなうことによって、本装置をさらに実用化に近づける研究を進めていく予定である。また開発したシステムは部分的な改変で脳や末梢神経の活動記録にも十分対応可能であり、これらへの応用も行いながら、一般的なBMIインターフェイスとして開発を発展させていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計5件)

- ① 上林真弓、京相雅樹、島谷祐一、Electroencephalograph using subcutaneous implantable device、日本生体医工学会第50回大会、2011年5月1日、東京電機大学(東京都千代田区)
- ② 笠拓哉、島谷祐一、Implantable micro strain sensor using CNT composites、日本生体医工学会第49回大会、2010年6月26日、大阪国

際交流センター（大阪市天王寺区）

③ 原池啓二郎、村田哲雄、島谷祐一、カーボンナノチューブ・コーティング導電性繊維を用いた筋内埋込み型慢性筋電電極、日本生体医工学会第48回大会、2009年4月23日、タワーホール船堀（東京都江戸川区）

④ 村田哲雄、原池啓二郎、島谷祐一、筋電義手への応用を目的とした低侵襲完全埋込み型筋電インターフェイス、日本生体医工学会第47回大会、2008年5月09日、神戸国際会議場（兵庫県神戸市）

⑤ 加藤英樹、仁木清美、島谷祐一、近赤外光経皮発電による完全埋め込み型神経インターフェイス、日本生体医工学会第47回大会、2008年5月09日、神戸国際会議場（兵庫県神戸市）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.bme.tcu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島谷 祐一 (SHIMATANI YUICHI)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：20154263

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし