

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	電気刺激による骨格筋収縮を利用した体内エネルギーハーベスティング
Title(English)	Implantable energy harvesting system utilizing electrically-stimulated muscle contraction
著者(和文)	持田匠
Author(English)	Mochida Takumi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12354号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:土方 亘,岡田 昌史,進士 忠彦,中野 寛,石田 忠
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12354号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	持田 匠		指導教員 (主)： 土方 亘 Academic Supervisor(main)
			指導教員 (副)： 岡田 昌史 Academic Supervisor(sub)

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

先進国では高齢化が進んでおり、ペースメーカなどの植込型医療機器や、患者のバイタルサインを常時計測するヘルスマニタリングデバイスの需要が増加している。植込型機器は内蔵のバッテリーによって駆動しており、電池残量の低下に伴い数年に1度の交換外科手術を要するため、患者の経済的、身体的負担が大きい。ヘルスマニタリングデバイスも体内で使用するのが研究開発されているが、電力供給源が不可欠である。この解決策の一つとして体内に分布するエネルギーを電気エネルギーに変換する体内エナジーハーベスティングが挙げられる。そこで本論文では骨格筋の収縮力による力学的エネルギーを利用した発電システムを提案している。

提案するシステムを実現するため、まず 1 Hz 程度の骨格筋の収縮力を数十 Hz の振動に変換する周波数アップコンバート式電磁誘導型発電機を開発した。提案する発電機は骨格筋に接続した駆動側平行ばねと、振動子を搭載した従動側平行ばねで構成される。平行ばね間には同極同士を向かい合わせた永久磁石を配置しており、骨格筋の収縮によって駆動側平行ばねが変位すると、磁石同士の斥力を介して非接触で従動側平行ばねに力が伝達される。ばねの復元力が斥力を上回ると振動子が自由振動し、電磁誘導によって発電する。また骨格筋が弛緩する際、駆動側平行ばねは骨格筋収縮によって蓄えられたエネルギーによって初期位置に戻り、その際も同様に振動子が自由振動するため、1度の骨格筋収縮で2度発電できる機構となっている。この機構について静的な力学的関係から平行ばねの条件を求めてばねの剛性を設計し、試作した発電機を用いた原理検証試験によって提案する発電機の駆動を確認した。

次に植込型医療機器への適用を目指し、発電電力を最大化するように発電機を設計した。発電機の設計では、駆動側平行ばねの剛性、従動側平行ばねの剛性を設計変数とし、筋収縮力と平行ばねのダイナミクスに基づいた数値シミュレーションによって電力を試算した。各平行ばね剛性を総当たりで変えていき発電電力を求めたところ、駆動側を 600 N/m、従動側を 205 N/m としたとき、最大 211 μ W の発電電力が試算され、植込型医療機器の駆動が可能であることを確認した。以上の設計に基づいて発電機を試作し、収縮力をモータで再現した実験では、最大 35.8 μ W の発電電力を実現し、ペースメーカの消費電力である 10 μ W を上回った。さらにカエル骨格筋 3.5 g を電気刺激することで発電機を駆動し、筋収縮時、および筋弛緩時に発電可能であることも確認した。ただし、発電電力から刺激電力を差し引いた正味発電電力は 1.2 μ W であった。提案する試作発電機は摩擦部がなく、かつ正の正味発電電力が得られることを実証したが、目標とする正味発電電力 10 μ W には満たなかった。

発電機の正味発電電力を向上させるため、骨格筋の収縮形態に着目し、電気刺激の周波数に同期して振動する不完全強縮を利用した共振型静電誘導型発電機を新たに考案した。筋収縮および発電機のダイナミクスや静電誘導現象をモデル化し、発電機の正味電力最適化設計を行った。電気刺激のパルス幅、電圧、共振周波数、振動子質量、負荷抵抗を設計変数として最小二乗法を用いて設計したところ、最大 50.2 μ W の正味電力が試算され、ペースメーカの消費電力を上回ることを確認した。試作した発電機を生体模擬環境下で電力評価試験を行ったところ 20.5 μ W の電力を得られたほか、平均 4.4 g のカエル骨格筋を使用し正味電力を評価した結果、平均 13.1 μ W の正味電力が得られ、植込型医療機器への給電が可能であることを示した。

さらなる正味電力の向上と植込型医療機器への実装を目指し、発電素子の改良と小型化を行った。素子に使用しているエレクトレットは表面に半永久的な電荷を保持しており、厚さや作成条件によって保持できるエレクトレット表面の電荷量、及び電位(表面電位)が変化する。そこでエレクトレット厚さ、作成条件を変えて表面電位を計測したところ、試作機で利用した素子よりも最大約 2.7 倍の表面電位が得られることを確認した。また、植込型医療機器に搭載できるよう MEMS 技術を利用して発電機構を小型化し、所望の固有振動数が得られる作成手法を確立した。これらの知見を合わせて小型、高出力な発電機を試作し発電電力を評価したところ、最大 20.9 μ W となり、骨格筋の電気刺激による消費電力を考慮してもペースメーカへの実装が可能であることを示した。

以上より、本研究では骨格筋を用いた体内発電システムの設計方法論を提案し、植込型医療機器へ十分な電力供給が可能な発電機を開発した。また本研究を通して発電機の体積当たりの発電電力を試作当初の 9.4 倍に向上させており、提案システムの実現可能性を示した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野) : 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名 : Student's Name	持田 匠		指導教員 (主) : Academic Supervisor(main) 土方 亘
			指導教員 (副) : Academic Supervisor(sub) 岡田 昌史

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

An energy harvesting device driven by the contraction of an electrically-stimulated skeletal muscle that can be used as an alternative to batteries for implantable medical devices (IMDs) has been developed.

In order to realize a durable generator, a contactless frequency up-conversion mechanism comprising drive and driven parallel leaf springs with magnets was proposed. Based on the dynamics of the parallel leaf springs and electromagnetic induction, the stiffness of the springs was optimized to maximize the power generated. The power generated by a prototype in benchtop was 35.8 μW , which was sufficient to operate IMDs. However, the net generated power in an *ex vivo* experiment using 3.5 g of a toad's gastrocnemius muscle was 1.2 μW .

In order to improve the net generated power, a resonance generator utilizing incomplete tetanus of the skeletal muscle was proposed. Pulse width and voltage amplitude of the stimulation signal, resonance frequency, mass of the oscillator, and load resistance were designed to optimize the net generated power based on the dynamics of the electrically-stimulated muscle contraction, 2 DOF vibration system, and electrostatic induction. The power generated by a prototype in benchtop was 20.5 μW , and the average net power generated in an *ex vivo* environment using the toad's gastrocnemius muscles was 13.1 μW . This was sufficient to operate IMDs and the viability of the proposed energy harvesting system using incomplete tetanus of the skeletal muscle was demonstrated. In addition, the resonance generator was miniaturized to 1/20 by utilizing MEMS technique as well as the electrets mounted on the generator was improved. As a result, the power generated by a prototype in benchtop was 20.9 μW and the power generated per volume was improved to 9.2 times compared to first prototype.

Through this research, the design method of the generator utilizing the electrically-stimulated muscle contraction was proposed, and the feasibility of the proposed energy harvesting system was proven.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).