

491.367
M176

本館

文部科学省科学研究費補助金研究成果報告書

リハビリテーション効果の定量評価を 目的とした運動機能計測手法の研究

研究課題区分: 基盤研究(B)

課題番号: 17300148

研究期間: 平成17～19年度

平成20年3月

研究代表者: 宮川道夫 [新潟大学教授(自然科学系)]
研究分担者: 木竜 徹 [新潟大学教授(自然科学系)]
研究分担者: 中村康雄 [新潟大学助教(自然科学系)]
研究分担者: 山田幸生 [電気通信大学電気通信学部教授]
研究分担者: 谷川ゆかり [産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門主任研究員]

目 次

研究成果報告

1. はじめに	1
2. 研究の目的と方法	1
3. 学術的特色と成果・意義	1
4. 研究の実施体制	2
(4.1)研究体制	2
(4.2)研究経費	2
5. 研究の成果のまとめ	2
(5.1)マイクロ波イメージング技術	2
(5.2)光拡散イメージング技術	2
(5.3)運動機能の可視化	3
6. 主要な成果論文リスト	3

謝辞

研究成果報告書

1. はじめに

本研究はチャープパルスマイクロ波イメージングシステムを生体計測に適用して、当該イメージングシステムが運動の程度や効果に関連した情報を画像として引き出す能力を有していることを実証することで、最終的にはリハビリテーション効果の定量評価に有効であることを示す目的を有している。実証の方策として、健常者の四肢の筋肉に運動負荷をかけることにより起こる生理学的変化を既存の方法で記述するために、筋電図計測、及び酸素モニタによる組織酸素化状態の計測を同時に行うほか、光拡散イメージングシステムにより組織酸素化度分布の観測を行う。

マイクロ波イメージングでは四肢計測用のシステム試作に始まり、ファントムやヒト四肢断面の計測を行い、得られた画像情報を解析して、既存と言える他の手段により得られた画像及び時系列データから得られる生理学的変化との対応関係を求めることまで非常に幅の広い研究内容となっている。

2. 研究の目的と方法

リハビリテーションの効果は現在、患者本人の自覚と、医師、理学療法士等の判断に頼っている。経験を積んだその判断に誤りはないとしても、効果を経時的に定量把握できれば患者本人のさらなる努力も期待できるし、プロトコルの改善等により更に効率的なリハビリ方法を工夫できる可能性が高い。本研究では、「リハビリテーションの治療効果を定量的にモニタするための運動機能可視化手法を開発する」ことを直接的な目的とする。リハビリ効果を定量表現する手法として、筋肉中における糖代謝と酸素化状態を無侵襲的に画像計測する方法と、筋力や筋運動量を定量評価する都合4通りの手法でリハビリテーション効果の定量評価を試みる。本研究により、治療(リハビリ)方法やプロトコル改善・改良のための情報を与える。

本研究では、下記4種の方法で取得した生体情報からリハビリテーションによって生み出される四肢筋肉の機能生理学的な状態を記述する手法を開発する。①と②は運動が引き起こす組織中の生理・生化学的変化を通して機能の回復状況を評価し、③と④は筋力や疲労、筋運動量を通して機能回復状況を計測・評価する。

- ①マイクロ波CTによる組織代謝のイメージング、
- ②光CTによる運動負荷時血液動態の光拡散イメージング、
- ③表面筋電図からの筋力・筋疲労の計測、
- ④酸素モニタによる負荷筋肉組織酸素化度の計測。

マイクロ波イメージングにより生体中で実際に運動に伴う代謝量増加情報が得られることを実証し、光拡散イメージングでは組織の酸素化・脱酸素化状態と血液量変動が生体中で測定・評価できることを示す。また表面筋電図と酸素モニタにより筋力や筋疲労状態を評価、機能回復状況を推定する手法を開発する。

3. 学術的特色と成果・意義

本研究は“リハビリテーション効果を無侵襲で数量的に評価、治療方法やプロトコルの改良・改善によって、より効果的で効率的なリハビリテーションを実現する”手法開発を目的としている。また、本研究遂行に当たり、評価に必要な情報を獲得する個別生体計測技術の何れも参加者全員がこれまでに開発した独自の計測方式や画像計測アルゴリズム、独自解析法や独自モデルを用いた推定法など、代表者と分担者のこれまでの研究成果を最大限活用し合う点で効率的と言える。マイクロ波イメージングではチャープ信号と信号処理技術を利用することによって単純バックプロジェクションによる画像再構成を可能とするCP-MCT(Chirp Pulse Microwave Computed Tomography)の開発で実証された温度変化、酸や糖の濃度変化イメージング能力を局所代謝機能の画像計測に活用する。また、拡散光トモグラフィでは、800nm付近のピコ秒パルス近赤外光を用いた時間分解計測法の高い空間分解能と酸素化度測定精度を生かして局所血液動態の評価を行う。また、独自解析法を追求し続けてきた筋電図からの疲労計測は信頼性の高い情報が得られる。従って、これらを機能的に統合した新しいリハビリ効果評価法は実現可能性も高い。リハビリテーションの効果を客観的に評価できれば、この結果を利用して更に効果的な治療法やプロトコルの探求が可能になること、効果が客観的に可視化できることで適用手技・手法の決定が最適化されること等の意義も大きい。

4. 研究の実施体制

(4.1) 研究体制

本研究は下記の研究従事者5名が、マイクロ波イメージング、筋電図及び酸素モニタによる筋活動計測、及び光拡散イメージングの3項目を協力しつつも分担し、新潟大学工学部福祉人間工学科、並びに大学院自然科学研究科の学生の協力を得ながら、筋活動状態の画像計測を直接的な目標とし、リハビリテーションの可視化を最終的な目標として、新しい機能イメージング手法の可能性について検討したものである。

(1) 計画研究実施者

- ・ 新潟大学教授(自然科学系) 宮川道夫
- ・ 新潟大学教授(自然科学系) 木竜 徹
- ・ 新潟大学助教(自然科学系) 中村康雄
- ・ 電気通信大学電気通信学部教授 山田幸生
- ・ 産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門主任研究員 谷川ゆかり

(2) 研究協力者

- ・ 新潟大学工学部福祉人間工学科、及び新潟大学自然科学研究科人間支援科学専攻学生 石黒隆志、宮崎康彰、岩田直之、横尾高史、長井大輔、馬場裕子他2名

(4.2) 研究経費

本研究で直接受けた科学研究費補助金は以下の通りである。

平成 17 年度	直接経費 6,000 千円
平成 18 年度	直接経費 4,100 千円
平成 19 年度	直接経費 4,200 千円 (間接経費 1,260 千円)
合 計	直接経費 14,300 千円 間接経費 1,260 千円
総 計	15,560 千円

5. 研究の成果のまとめ

* 未だ論文として公表していない内容を多く含むため、投稿時のオリジナリティを担保するために本項では事実を示す図表、写真等は掲載しない。

(5.1) マイクロ波イメージング技術

- ① 四肢計測用に装置上部の空間を空けた四肢計測用ファンビーム方式 CP-MCT を試作・開発した。計測の高速化に関しては「市販品」でないために計測回路をアンテナ数だけ用意せず、PIN ダイオードスイッチで切り替え使用しており、計測時間約5分を要している。
- ② 筋活動のイメージングは前腕と脚で行った。運動前後に撮像された画像の差分演算により運動に伴う画像上の変化を読み取ろうとしたが、運動に伴う筋活動により腕や脚の断面形状も変化してしまうために、単純には差分演算ができず、レジストレーション処理が必要になる。この自動処理は現時点でも未対応で、従って、現状では光断層画像等との対比が困難である。
- ③ 差分画像で骨の部分が運動による変化を受けない、あるいは受けにくい場合、運動前後で殆ど変化のない部分として共通特徴となり、差分演算の結果、両者が空間的にうまく符合する位置にない限り画像上には骨の影響が大きく現れる。これを避けるため、運動に伴い骨位置や断面形状の変化する2枚の画像の動的対応付け(レジストレーション)が必要である。
- ④ 上記③の裏返しであるが、運動負荷前後で骨の位置が変化しない場合には、差分画像で濃度値がゼロになるために筋肉部分の微妙な濃度分布が強調される。ただし、微妙な濃度分布が何を意味しているか、現状で意味付けは困難であった。組織の生化学的分析が不可欠な段階と判断される。
- ⑤ 結論として、筋活動に伴う乳酸などの化学物質の生成等が画像に影響を与えている可能性も考えられるので、これを確かめるために、撮像と同時の血液サンプリングや当該部位からのサンプル採取が不可欠であると思われる。

(5.2) 光拡散イメージング技術

- ①システムの重いファイバーセンサー先端部を体表に密着させること、運動によっても体表から離れないことなどが肝要であるが、実際には測定の際で数本が体表から離れてしまい、再構成すらできない場合が多い。試作装置とはいえ、この部分の構造の抜本的改善が必要である。
- ②グリップ運動によっても一部の筋肉は大きく活性化され、この筋活動により静脈が押しつぶされるのに対して動脈は大きな影響を受けないことから酸素化Hbと酸素飽和度が増加、脱酸素化Hbが減少する傾向が観測された。
- ③グリップ時間が終了時間の5分にまで近づくと、多くの場合、筋疲労の状態が観測され、これは上記の光断層イメージングの結果と対応すると思われる。

(5.3) 運動機能の可視化

結論として、本実験結果の範囲内で、マイクロ波CTにより運動機能の可視化が可能であると結論するには至らない。マイクロ波CT画像の画像差分がほぼ正しく計算されていると仮定しても、その妥当性検証には生化学的な分析が不可欠である。また、その精度を向上させるために、断面形状の変化した腕や脚の2枚の断層画像間で対応する位置をうまく重ねあわせるレジストレーションの技術も活用する必要がある。

6. 主要な成果論文リスト

【平成17年度の主な公表文献】

1. M. Miyakawa, Y. Kawada and M. Bertero: "Image generation in Chirp Pulse Microwave Computed Tomography (CP-MCT) by numerical computation: Computation of a human head model", *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 88, No. 9, pp.53-63 (2005).
2. N. Ishii, Y. Yonemura and M. Miyakawa: "Simultaneous measurement of antenna gain and solution dielectric properties," *IEICE Trans. Communications*, E88-B, Np. 6, pp. 2268-2274 (2005).
3. 石井望, 金子貴幸, 宮川道夫: "改良型 Wheeler 法におけるアンテナ放射効率の落込み回避について", *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J88-B, No. 11, pp. 2287-2295 (2005).
4. M. Watanabe, M. Miyakawa, T. Tanaka, N. Ishii and M. Bertero: "Nondestructive imaging of the sugar distribution inside a fruit by use of CP-MCT", *35th European Microwave Conference Proceedings*, pp. 1379-1382 (2005).
5. M. Miyakawa, H. Ikarashi, N. Ishii and M. Bertero: "Visualization of the breast tumor by the integrated use of CP-MCT and Chirp Pulse Microwave Breast Radar", *35th European Microwave Conference Proceedings*, pp. 1043-1046 (2005).
6. T. Hirono, K. Yabusaki and Y. Yamada: "The development of leukocyte counter using fluorescence imaging analysis," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 37, No.8, pp. 735-753 (2005).
7. F. Gao, H. Zhao, Y. Tanikawa, K. Homma, and Y. Yamada: "Influences of target size and contrast on near infrared diffuse optical tomography - A Comparison between featured-data and full time-resolved schemes," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 37, pp. 1287-1304 (2005).
8. C. Sato, M. Shimada, Y. Hoshi, and Y. Yamada: "Extraction of depth-dependent signals from time-resolved reflectance in layered turbid media," *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 10, No. 6, pp. 1-11 (2005).
9. M. Shimada, Y. Hoshi, and Y. Yamada: "Simple algorithm for measurement of absorption coefficients of a two-layered medium by spatially resolved and time-resolved reflectance," *Applied Optics*, Vol. 44, No. 35, pp. 7554-7563 (2005).

【平成18年度の主な公表文献】

1. A. M. Massone, M. Miyakawa, M. Piana, F. Conte and M. Bertero: "A linear model for chirp-pulse microwave computerized tomography: Applicability conditions", *Inverse Problems*, Vol. 22, pp. 2209-2222 (2006).
2. M. Miyakawa, T. Takahashi, N. Iwata, N. Ishii and M. Bertero: "Fan beam-type CP-MCT with microstrip dipole array receiving antenna," *Proceedings of 36th European Microwave Conference*, pp.1244-1247 (2006).
3. M. Watanabe, M. Miyakawa, Y. Miyazaki¹, N. Ishii¹ and M. Bertero: "Image Restoration of CP-MCT for Sugar Distribution Imaging inside a Fruit", *Proceedings of 36th European Microwave Conference*, pp.1248-1251 (2006).
4. 岩田直之, 米村剛一, 宮川道夫: "マイクロ波イメージング用プリントダイポールアレイアンテナ", *電子情報通信学会技術研究報告*, MBE2006-74, pp.33-36 (2006).
5. 高橋利之, 岩田直之, 宮川道夫, 石井望: "時間領域記録とアレイアンテナにより高速化したファンビーム CP-MCT", *電子情報通信学会技術研究報告*, MBE2006-75, pp.37-40 (2006).
6. 五十嵐裕之, 宮崎康彰, 宮川道夫: "チャープパルスマイクロ波プレストレーダ(CP-MBR)による胸部腫瘍視覚化の検討", *電子情報通信学会技術研究報告*, MBE2006-76, pp.41-44 (2006).
7. 宮崎康彰, 五十嵐裕之, 渡邊正和, 宮川道夫: "CP-MCT と CP-MBR による早期乳がん検出 シミュレーションによる可能性の検討", *電子情報通信学会技術研究報告*, MBE2006-77, pp.45-48 (2006).
8. 谷川ゆかり, 高峰, 石黒隆志, 宮崎康彰, 岩田直之, 中村康雄, 木竜徹, 宮川道夫, 山田幸生: "拡散光トモグラフィを用いたヒト上肢・下肢運動の時間分解測定", *第5回生体医用光学研究会予稿集*, 9pP71 (2006).
9. F. Gao, H. Zhao, Y. Tanikawa, and Y. Yamada: "A linear, featured-data scheme for image reconstruction in time-domain fluorescence molecular tomography," *Optics Express*, Vol. 14, No. 16, pp. 7109-7124 (2006).

【平成19年度の主な公表文献】

1. M. Miyakawa, N. Iwata, N. Ishii and M. Bertero: "Low reflection sandwiched dipole array antenna used in high-loss liquids," Proceedings of 37th European Microwave Conference, pp. 317-320 (2007).
2. Y. Miyazaki, M. Miyakawa, N. Ishii and M. Bertero: "Analytical study of Chirp Pulse Microwave Breast Radar (CP-MBR)", 2007 Asia-Pacific Microwave Conference Proc., Vol. 2, pp. 597-600 (2007).
3. 岩田直之、宮川道夫、石井望：“低反射プリントダイポールアンテナ —1-2 GHz帯と2-3 GHz帯におけるマイクロ波生体イメージング—”, 電子情報通信学会技術研究報告、MBE2007-67, pp.21-24 (2007).
4. 横尾高史、長井大輔、宮川道夫、木竜 徹、谷川ゆかり：“四肢計測用チャープパルスマイクロ波 CT —数値解析と実験による検討—”, 電子情報通信学会技術研究報告、MBE2007-68, pp.25-28 (2007).
5. 宮崎康彰、宮川道夫、石井望：“チャープパルスマイクロ波プレストレーダ(CP-MBR)の数値解析 —乳腺を考慮に入れたシミュレーション—”, 電子情報通信学会技術研究報告、MBE2007-69, pp.29-32 (2007).
6. M. Miyakawa, T. Yokoo, N. Ishii and M. Bertero: "Visualization of human arms and legs by CP-MCT", Proceedings of 37th European Microwave Conference, (to be published).
7. 横尾高史、長井大輔、宮川道夫：“CP-MCTによる四肢マイクロ波イメージング —数値解析及び実測による検討—”, 2007年度電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会予稿集、C-2-95, p.117 (2007).
8. 谷川ゆかり、高 峰、石黒隆志、宮崎康彰、岩田直之、中村康雄、山田幸生、木竜徹、宮川道夫：“ヒト上腕・下肢運動による光学特性変化の時間的分解計測および画像再構成”、第6回生体医用光学研究会予稿集、28pE6, p. 620-621 (2007).
9. A. Marjono, S. Okawa, F. Gao, and Y. Yamada: "Full time-resolved scheme data in time-domain fluorescence diffuse optical tomography," Proceedings of SPIE, Vol. 6434, BiOS2007, SPIE, Paper No. 64340U, pp. U1-U9 (2007).
10. A. Marjono, S. Okawa, F. Gao, and Y. Yamada: "Light Propagation for time-domain fluorescence diffuse optical tomography by convolution using lifetime function," Optical Review, Vol. 14, No. 3, pp. 131-138 (2007).
11. H. Zhao, F. Gao, Y. Tanikawa, and Y. Yamada: "Time-resolved diffuse optical tomography and its application to *in vitro* and *in vivo* imaging," J. Biomedical Optics, Vol. 12, No. 6, paper No. 062107 (2007).
12. F. Gao, H. Miao, H. Zhao, Y. Tanikawa, and Y. Yamada: "Fluorescence diffuse optical tomography by full time-resolved scheme," Proceedings of SPIE Vol. 6434, BiOS2007, SPIE, San Jose, USA, Paper No. 64340G, pp. G1-G12 (2007).

謝辞

本研究を進める上で、新潟大学大学院自然科学研究科人間支援科学専攻宮川研究室、木竜研究室の大学院生、並びに新潟大学工学部福祉人間工学科の学生さん達の熱心なご協力を得た。当該学生の方々に感謝申し上げる。彼らの熱心な研究態度に支えられて本研究は実を結んだものである。