

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12731

研究課題名（和文）深層学習とモデル統合理論の構築による骨格筋の多元的理解の実現

研究課題名（英文）Realization of Multidisciplinary Understanding of Skeletal Muscle by Constructing Deep Learning and Model Integration Theory

研究代表者

神谷 直希 (Kamiya, Naoki)

愛知県立大学・情報科学部・准教授

研究者番号：00580945

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、従来の単要素の骨格筋認識に基づく骨格筋認識・解析技術に対し、深層学習とモデル統合理論により、全身にわたる骨格筋認識の課題を克服することを目的とした骨格筋セグメンテーション技術の開発に取り組んだ。ここでは、これまでに、モデルベースによる筋の外形の記述により認識された、比較的形状が特徴的な8つの骨格筋における自動認識をベースラインとし、全身の骨格筋認識に展開可能な深層学習とモデルベース認識技術として、アノテーションコストと両立可能な脊柱起立筋および体腔をキーとする部位別骨格筋の認識法および、骨格筋を含む全身の体組成の推定ではない実量計測技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、骨格筋の自動認識と解析を新しい視点で再定義することを目的として実施した。骨格筋の解析は医師による半自動セグメンテーションが主流であり、主に横断面積に焦点を当てているが、我々は深層学習ベースの骨格筋認識と形状・筋束モデルの併用による、全身規模による認識を目指した。本研究により、深層学習とモデルを併用することで、従来の単一要素による解析にとどまらず、筋のミクロ・マクロ構造の多角的な解析の糸口を構築できた。本研究は、萎縮性筋疾患の画像鑑別など新たな医学的見地を得るために必要な要素技術の一つとしての可能性があり、医学的、工学的、産業的にも意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we aimed to develop a skeletal muscle segmentation technology that overcomes the challenges of whole-body skeletal muscle recognition by employing deep learning and model integration theory, as opposed to conventional single-element skeletal muscle recognition and analysis techniques based on skeletal muscle recognition. As a baseline, we used the automatic recognition of 8 relatively shape-specific skeletal muscles, which were previously recognized by model-based descriptions of muscle contours. We then developed a deep learning and model-based recognition technology that can be expanded to whole-body skeletal muscle recognition, compatible with annotation costs. This includes a recognition method for region-specific skeletal muscles using the erector spinae and body cavity as keys, as well as a real-quantity measurement technology for whole-body body composition, including skeletal muscle, rather than mere estimation.

研究分野：医用画像情報処理

キーワード：骨格筋 脊柱起立筋 L3断面 体組成 体腔 深層学習 セグメンテーション

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究計画申請時の社会的背景として、令和2年度の高齢社会白書では、我が国の高齢化率は28.4%であった。また、WHOのワールドレポートにおいて、2050年までに世界の高齢者人口は20億人と推定されていた。このように、超高齢社会を迎えている我が国において、健康寿命の延伸は大きな課題である。特に、高齢者における寝たきり人口の増加は国家規模の経済的損失である。実際に、21世紀における国民健康づくり運動(健康日本21:厚生労働省、現在第2次継続中)においても健康寿命延伸の重要性は述べられ、骨格筋量の維持・増進はQoL向上に大きく関わるため、若年層から取り扱う問題として認識されており、さらに、未来投資戦略2018「Society 5.0」「データ駆動型社会」への変革(平成30年6月15日閣議決定)においても、戦略分野の1つとして「健康寿命の延伸」が挙げられている。

これらのことから、健康寿命の延伸とその早期対策として、骨格筋の管理は全ての年齢層において重要な課題である。しかしながら、骨格筋は、CT、MRIなど断層画像の多くで描出されるが、通常は対象疾患や周辺組織の読影に注力され、健康時より管理可能であるが、筋量を含む正確な状態把握は困難な課題であるという背景があった。このように、骨格筋は重要な対象であるものの、現実的には、コンピュータを使用しても十分な解析ができる状態には至っていなかった。当時の骨格筋のセグメンテーションに基づく解析では、CT横断像を用いた骨格筋の面積測定(半自動)による単純な筋萎縮の評価にとどまっていた。また、筋をポリウムとして捉えることは、大腿部の一部行われているのみで、臓器領域を含む体幹部や全身規模では筆者らの提案が主要なものであり、コンピュータ上における、全身の骨格筋認識は未解決な課題であった。

### 2. 研究の目的

研究開始当初の背景で述べたように、CT画像やMRI画像といった断層画像において骨格筋を自動的に認識し、解析することは限定的であった。これは、対象となる断面が第三腰椎(L3)断面である場合や、対象とする骨格筋が大腰筋であるように、人体全域の骨格筋について、詳細解析を前提とした骨格筋の自動認識や解析は実現されていないことを意味する。

我々は、本研究計画に先立ち、骨格筋の解剖学的特徴に着目し、骨格筋が付着する骨格や、筋そのものの走行を計算機上に表現し、さらに形状をモデリングするという手法により、骨格筋の部位別自動認識法を考案し、大腰筋などの一部の骨格筋で3次元自動認識を実現した。また、機械学習や深層学習ベースのハンドクラフト特徴量によらない部位別骨格筋認識として、脊柱起立筋群などで初期結果を有していた。

以上のような先行研究、すなわち、モデルベースの骨格筋部位別認識技術と深層学習を用いた骨格筋の部位別認識技術において、それぞれの利点と課題が明らかとなっている。特に、一般の画像処理タスクとは異なり、深層学習用の骨格筋のアノテーション作業は現実的ではない。そこで、本研究では、骨格筋の部位別解析における、深層学習ベースの部位別骨格筋セグメンテーションについて、アノテーションコストとセグメンテーション精度の両立を目指し、深層学習とモデルベース手法の併用による、AI時代の筋の記述法および認識手法の提案を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 大域構造としての骨および体腔の認識と骨格筋認識への応用

深層学習を利用した骨格筋認識では、認識対象とする骨格筋の領域が入力画像全体に対し、相対的に小さい場合に認識精度が極端に低下するという課題があった。ここでは、人体の大域的な構造認識と骨格筋認識における利用について提案した。

最初に、CT画像における人体の大域的な構造として最初に考えられる骨について、骨を利用した骨格筋認識を提案した。骨の認識はコンピュータを利用した医用画像において、臓器領域と同様に認識対象として取り込まれている。しかしながら、骨格筋認識を目的とした骨領域の積極的な利用は少ない。しかしながら、骨格筋は骨に付着するため、骨格筋認識において骨の活用は自然な発想であると考えられる。本研究では、棘上筋を対象に、体幹部CT画像上における小さな骨格筋を深層学習で取り扱うための試みとして、付着骨認識による骨格筋の存在範囲の特定(ローカライゼーション)を行い、ローカライゼーションされた領域を深層学習の入力とするU-Netベースの認識スキームを提案した。

次に、もう一つの人体の大域的な構造として、体腔に着目した骨格筋認識手法を提案した。体腔は臓器領域を内包する領域であるため、コンピュータを利用した医用画像解析において注目されても良い領域であるが、これまでにモデルベースの手法において取り組みられたが、体腔領域の活用や、深層学習ベースの手法による体腔の認識とその活用は行われていない。本研究の対象である骨格筋についても、体幹部において、骨格筋の大部分を占める表層筋は体腔の外側に存在し、一部の深部筋は体腔内に存在するなど、体腔を骨格筋認識に利用できる可能性は高いと考えた。そのため、本研究では、体腔そのものの認識について、U-Netにより取り組んだ。さらに、認識された体腔領域を用い、CT画像から体腔領域内を取り除いた簡略化CT画像を作成した腹斜筋の認識法を提案した。一方で、この認識された体腔領域を簡略化ではなく直接活用する方法として、表層部の骨格筋のセグメンテーションと同時に、脂肪領域を認識し、体腔領域を用い、皮下脂肪および内臓脂肪を認識する手法を提案した。

## (2) 脊柱起立筋群の認識と部位別骨格筋認識への応用

脊柱起立筋群は、我々が機械学習ベースの手法や深層学習ベースの手法を初期に取り入れた領域である。そして、脊柱起立筋群は高い精度で安定して認識できていた。この脊柱起立筋群は断層画像において広範囲に存在するため、アノテーションコストが高いことが課題であり、アノテーションの枚数と認識精度の関係についての検証を最初に行った。

次に、脊柱起立筋群の高い認識精度が安定して得られるという特徴と、断層画像において広範囲に存在するという特徴に着目した、部位別骨格筋の自動認識への応用手法を提案した。ここでは、U-Net における部位別骨格筋認識において、脊柱起立筋群を認識対象とする骨格筋と同時に学習することで、対象とする骨格筋の認識精度向上を目指したものである。

## 4. 研究成果

### (1) 大域構造としての骨および体腔の認識と骨格筋認識への応用

棘上筋の認識では、ローカライゼーションを使用しない従来手法では認識できなかったことに対し、提案である骨位置を用いたローカライゼーション手法において、平均 Dice 係数は 0.881 と大幅に精度が向上した。さらに、疑似の胸部 CT 画像に対し、ローカライゼーションを適用したところ、従来法では認識精度が 0.850 であるのに対し、提案手法は 0.881 であった。このように、深層学習を用いる場合に、認識対象となる骨格筋が画像の入力範囲に対し相対的に小さく、認識ができない、あるいは認識精度が見込めない場合に、提案手法の骨によるローカライゼーションは有効である。また、この骨によるローカライゼーションは骨格筋の付着骨による体軸方向のスライスを限定するため、深層学習特有の解剖学的にはありえない位置に対する誤抽出が抑制できるという点も特徴である。

次に、体腔を用いた骨格筋の認識では、腹斜筋の認識精度が平均 Dice 値 0.849 と、腹部の臓器が隣接する領域においても高い精度で骨格筋の認識が実現できた。実際に、腹斜筋のセグメンテーションでは、過抽出のピクセル数の 36.21% の減少効果が確認できた。体腔そのものの認識精度は、0.978 であり、皮下脂肪と内臓脂肪の認識においてもそれぞれ 0.960 および 0.936 の Dice 係数で実現し、提案した骨および体腔の大域的な構造認識を用いた骨格筋認識手法が、深層学習を用いた医用画像解析において有効であることが確認された。この成果は、医用画像解析における骨格筋の自動認識・解析の精度向上に寄与し、将来的には臨床応用における診断支援や治療効果の評価に貢献することが期待できる。

### (2) 脊柱起立筋群の認識と部位別骨格筋認識への応用

脊柱起立筋群の認識とその部位別骨格筋認識への応用手法を提案した。脊柱起立筋群は、広範囲にわたるためアノテーションコストが高いという課題がある。この課題を解決するために、アノテーションの枚数と認識精度の関係について検証を行った。

まず、Bayesian U-Net を使用して脊柱起立筋群のセグメンテーションを行い、アノテーション枚数と認識精度の関係を明らかにした。実験では、30 例の体幹部 CT 画像を使用し、アノテーション枚数が 100% のケースでは Dice 係数が 0.934 であり、50%、25%、10% の場合でもそれぞれ 0.927、0.926、0.890 と高い精度が維持された。

次に、脊柱起立筋群を同時に学習することで、他の部位別骨格筋の認識精度の検証を行った。具体的には、U-Net を用いて脊柱起立筋群とターゲットとなる骨格筋を同時に学習する手法を提案した。提案手法により、L3 スライスにおける骨格筋のセグメンテーション精度が、従来手法の平均 Dice 値が 0.637 であったのに対し、提案手法を用いることで 0.864 と大幅に向上した。

さらに、この手法を他の部位の骨格筋にも適用し、同様の効果を確認した。例えば、僧帽筋および棘上筋の認識においても、それぞれ 0.876 および 0.883 の Dice 値を達成した。

これにより、提案した脊柱起立筋群の活用が部位別骨格筋認識において有効であることが確認された。

以上のように、本研究では、従来の単要素の骨格筋認識に基づく骨格筋認識・解析技術の課題に対し、深層学習ベースの手法とモデルベースの手法の両者の利点を活かした方法論を示した。具体的には、付着骨ベースのローカライゼーション、高精度な体腔認識とそれに基づく骨格筋認識および体組成認識、脊柱起立筋群を活用した部位別骨格筋認識である。これらは、腹部の骨格筋認識において従来の L3 断面にとどまらない認識を可能とするだけでなく、様々な撮影範囲の断層画像における骨格筋認識を 3 次元で実現したという点で意義がある。また、体腔に着目した方法論は、臓器領域と骨格筋の濃淡値分布が類似する課題に対し有効であるため、骨格筋認識だけでなく、臓器領域の認識においても展開の可能性がある。このように本研究では、骨格筋の多元的理解を推し進めることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Wakamatsu Yuichi, Kamiya Naoki, Zhou Xiangrong, Kato Hiroki, Hara Takeshi, Fujita Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Automatic Segmentation of Supraspinatus Muscle via Bone-Based Localization in Torso Computed Tomography Images Using U-Net	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 155555 ~ 155563
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3127565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Wakamatsu Yuichi, Kamiya Naoki, Zhou Xiangrong, Hara Takeshi, Fujita Hiroshi	4. 巻 1179207
2. 論文標題 Relationship between number of annotations and accuracy in segmentation of the erector spinae muscle using Bayesian U-Net in torso CT images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Forum on Medical Imaging in Asia 2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2590780	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kamiya Naoki, Zhou Xiangrong, Kato Hiroki, Hara Takeshi, Fujita Hiroshi	4. 巻 12177
2. 論文標題 Automated segmentation of oblique abdominal muscle based on body cavity segmentation in torso CT images using U-Net	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of International Workshop on Advanced Imaging Technology 2022	6. 最初と最後の頁 121771V
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2624316	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawamoto Masahiro, Kamiya Naoki, Zhou Xiangrong, Kato Hiroki, Hara Takeshi, Fujita Hiroshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Simultaneous Learning of Erector Spinae Muscles for Automatic Segmentation of Site-Specific Skeletal Muscles in Body CT Images	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 15468 ~ 15476
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3335948	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 野崎孝太, 周向栄, 神谷直希, 原武史, 藤田広志
2. 発表標題 3次元DeepCNNによる全身CT画像からの骨格筋領域の自動抽出に関する基礎的な検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤彰, 神谷直希, 周向栄, 加藤博基, 原武史, 藤田広志
2. 発表標題 体幹部CT画像におけるU-Netを用いた脊柱起立筋と僧帽筋の同時自動認識
3. 学会等名 医用画像情報学会 (MII) 令和3年度秋季 (第191回) 大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kawamoto, N. Kamiya, X. Zhou, H. Kato, T. Hara, and H. Fujita
2. 発表標題 Skeletal muscle segmentation by simultaneous learning of particular superficial back muscles using 2D UNet in torso CT images
3. 学会等名 36th International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川本真大, 神谷直希, 周 向栄, 加藤博基, 原 武史, 三好利治, 松尾政之, 藤田広志
2. 発表標題 体幹部CT 画像における2D U-Net を用いた体腔の同時学習による腰方形筋の自動認識
3. 学会等名 第41回日本医用画像工学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮本桜, 川本真大, 神谷直希, 周向栄, 加藤博基, 原武史, 藤田広志
2. 発表標題 仮想展開画像を用いた2D U-Netにおける僧帽筋と隣接する骨格筋の認識
3. 学会等名 医用画像情報学会 (MII) 令和4年度秋季 (第194回) 大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川本真大, 神谷直希, 周向栄, 原武史, 藤田広志
2. 発表標題 体幹部CT画像における脊柱起立筋の区分化学習による腸腰筋の認識
3. 学会等名 第21回情報学ワークショップ (WiNF2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 芦野公祐, 神谷直希, 周向栄, 原武史, 藤田広志
2. 発表標題 CT画像における骨格筋の同時学習による骨位置推定を要しない胸鎖乳突筋の自動認識法
3. 学会等名 第21回情報学ワークショップ (WiNF2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 芦野公祐, 神谷直希, 周向栄, 加藤博基, 原武史, 藤田広志
2. 発表標題 体幹部CT画像における2D U-Netを用いた大域構造5領域の認識
3. 学会等名 医用画像情報学会 (MII) 令和5年度年次 (第196回) 大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野崎孝太, 周向荣, 神谷直希, 原武史, 藤田広志
2. 発表標題 自己教師あり学習に基づく全身CT画像からの骨格筋の自動抽出に関する研究
3. 学会等名 医用画像情報学会 (MII) 令和4年度春季 (第195回) 大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Miyamoto, N. Kamiya, X. Zhou, H. Kato, T. Hara, and H. Fujita
2. 発表標題 Automatic Segmentation of Superficial Skeletal Muscles by 2D U-Net Using Simultaneous Learning of Bones by Virtual Unfolded CT Images
3. 学会等名 International Forum on Medical Imaging in Asia (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Kawamoto, N. Kamiya, X. Zhou, H. Kato, T. Hara, and H. Fujita
2. 発表標題 Skeletal Muscle Segmentation in L3 Cross Section by 2D U-Net Using Simultaneous Learning of Skeletal Muscles in Body CT Images
3. 学会等名 International Forum on Medical Imaging in Asia (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Ashino, N. Kamiya, X. Zhou, H. Kato, T. Hara, and H. Fujita
2. 発表標題 3D body composition analysis via body cavity recognition in body CT images
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Radiological Physics and Technology (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Ashino, N. Kamiya, X. Zhou, T. Hara, and H. Fujita
2. 発表標題 Automatic Segmentation of Site-Specific Deep Skeletal Muscles in Body CT Images Using Multi-Task Learning of Skeletal Muscles
3. 学会等名 The 63rd Annual Conference of Japanese Society for Medical and Biological Engineering
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 神谷直希	4. 発行年 2021年
2. 出版社 アークメディア	5. 総ページ数 310
3. 書名 Bone Joint Nerve	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Google Scholar  <a href="https://scholar.google.co.jp/citations?hl=ja&amp;user=VzYGJekAAAAJ&amp;view_op=list_works&amp;sortby=pubdate">https://scholar.google.co.jp/citations?hl=ja&amp;user=VzYGJekAAAAJ&amp;view_op=list_works&amp;sortby=pubdate</a>          愛知県立大学情報科学部神谷直希研究室  <a href="https://www.ist.aichi-pu.ac.jp/~n-kamiya/">https://www.ist.aichi-pu.ac.jp/~n-kamiya/</a></p>
---

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)		備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------