

Anybody を用いたマッスルスーツ^(R) の補助効果評価

○小林 宏 (東京理科大学, (株) イノフィス), 一瀬 浩輝 (東京理科大学), 秦 健太 (東京理科大学)

Analysis of Muscle Assistive Effect of Muscle Suit by AnyBody Modeling System

○Hiroshi KOBAYASHI(Tokyo Univ. of Science, INNOPHYS Co. Ltd.),
Koki ICHINOSE(Tokyo Univ. of Science), and Kenta HATA (Tokyo Univ. of Science)

Abstract: Lower back support muscle suit is applied to the work of lifting heavy material in the material handling field and also care giver, in order to reduce the workload. Over 3400 muscle suits have sold so far as lower back support device. Since estimation of assist effect is also important as well as developing devices, this paper presents analysis results in terms of reduction of muscle use during motion by using The AnyBody Modeling System™.

1. 緒言

装着型筋力補助装置: マッスルスーツ^(R)(¹)は、「生きていく限り自立した生活を実現する」装置をめざし、2000年から開発を始めた。腰補助(「腰補助用マッスルスーツ^(R)」)は2006年より開発を開始し、大学発ベンチャー(株)イノフィス⁽²⁾から販売している。マッスルスーツは、他社製品と比較し、唯一、空気圧により駆動するMcKibben型人工筋肉を動力として使用していることを特徴とし、腰補助用マッスルスーツの標準モデルの場合、140Nm(約35kgf)という大きな補助力で滑らかに着用者の動きをサポートする⁽³⁾。2014年に販売を開始したが、作業者を対象とした装着型筋力補助装置としては世界初だと思われる。開発当初からユーザの意見を取り入れてきたため、シンプルな構造と類似製品に比べて安価な価格(50万円から80万円。他社製品は100万円以上)を実現し、工場・物流・介護、建設、農業分野など、これまでの出荷台数は3400台を超えた。

ところで、装置の開発と同様に重要なことは、その効果の評価である。これまで、筋電位を用いた評価⁽³⁾⁽⁴⁾、作業量を指標とした評価⁽⁵⁾、近赤外光(NIRS)を用いた評価⁽⁶⁾、重心移動を用いた評価⁽⁷⁾、などを行ってきたが、新たに、筋骨格モデリングシミュレーションソフトAnyBodyを用いた定量的な補助効果について報告する。本稿ではまず、マッスルスーツの概要を述べ、AnyBodyによる解析結果を紹介する。

2. 腰補助用マッスルスーツ

2.1 McKibben型人工筋肉

国内の類似製品は全てモータ駆動であるが⁽⁸⁾⁻⁽¹²⁾、マッスルスーツでは、空気圧駆動のMcKibben型人工筋肉を採用している。McKibben型人工筋肉は、1957年にJoseph McKibbenにより、四肢疾患のリハビリテーションや装具用のアクチュエータとして発明された⁽¹³⁾。空

気圧式のためコンプレッサが必要となるが、軽量で柔らかく、非常に大きな収縮力を発生するという特徴があり、人間の動きを補助するためには適していると考えた。マッスルスーツで使っているMcKibben型人工筋肉は、直径1.5インチ、長さ300mm、重さ130gで、0.5MPaの供給により最大200kgfの引張り力を発生する。また、100万回以上の繰り返し収縮を実現している。以下に原理を説明する。

図1にMcKibben型人工筋肉の構造と動作メカニズムを示す。伸縮性のないポリエステルモノフィラメント製の繊維コードを格子状に編んだスリーブでゴムチューブを覆い、スリーブの両端を固定するだけの簡単な構造となっている。チューブ内の圧力を上げるとチューブは半径方向に膨張し、このとき生じる円周方向の張力が繊維コードにより軸方向の大きな収縮力に変換される。

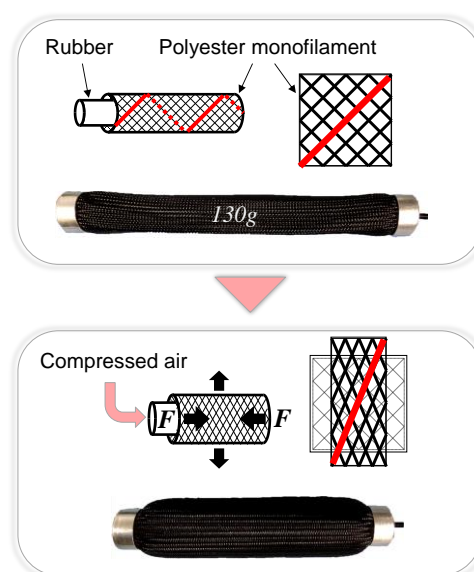


Fig.1 Structure of McKibben-type artificial muscle

図2に、0.5MPaと0.3MPaを入れた場合の、引張力と収縮率の関係を示す。これより、自然長で200kgf、それより伸ばした状態では約225kgfと、非常に大きな引張力が確認できる一方、収縮すればするほど、引張力が減ることが分かる。そのためマッスルスーツでは、10%程度の収縮率の範囲内で動作するように設計している。

2.2 動作原理と特徴

図3右において、黒い円で表すプーリ（固定プーリ）の周りを白抜きの円が回転する。白抜きの円には背中フレームが接続されており、人工筋肉の上部一端を背中フレーム上部に固定し、他端につけたワイヤをプーリを介して固定プーリに接続する。これにより、人工筋肉の収縮力が固定プーリ回りの背中フレームの回転力となり、上半身を起こす力となる。また、固定プーリから腿フレームを伸ばし、それに取り付けた腿前面を覆う腿パッドにより、上半身を起こす力の反力を受ける。

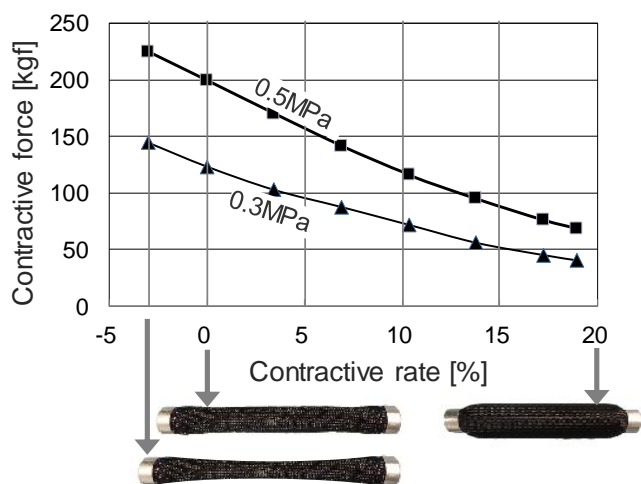


Fig.2 Output of McKibben-type artificial muscle

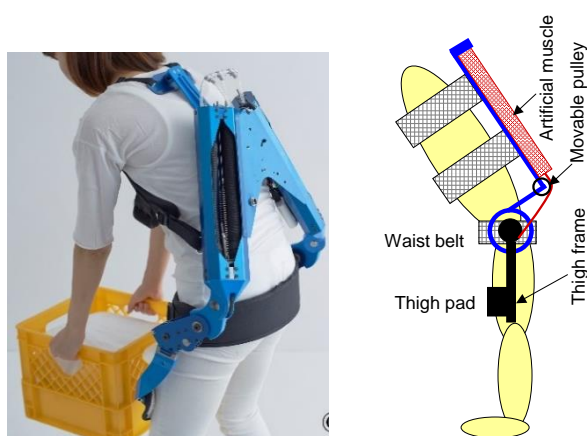


Fig.3 Conceptual structure of muscle suit

この構造では、上半身を起こすトルクを腿で直接受け、腿に対して上半身を回転させ、腿と上半身がまっすぐになるように補助力が働く。そのため、腿を直立状態で上半身を起こす動作、及び、上半身を直立状態にして

腰を落として脚の力で物を持ち上げる動作のどちらにも補助力を発生し、結果として腰や脚への負担を軽減する。腰補助用マッスルスーツでは、労働基準法の第6章（衛生基準）をもとに、常時取り扱う重量は最大でも30kg程度と考え、補助力30kgfを実現するために、上部に30kgf（約300N）が集中しても補助できるトルク（伸展モーメント：下半身に対して上半身を起こすトルク）である120Nmをマッスルスーツの補助力の目安とし（腰の回転中心から腕までが0.4mと仮定）、このトルクを実現するために、McKibben型人工筋肉を左右に2本ずつ、合計4本使用している（標準モデル）。図4に実際に計測した伸展モーメントを示す。これより、0.5MPaを供給する場合は、目標値を上回る140Nmが発生できていることが分かる。

補助力の強さに加え、脱着の容易さも、実際に使用してもらうためには非常に重要な要素である。マッスルスーツは、背負った後に腰ベルトを締め、腿パッドを腿の前に持ってくるだけで装着が完了するため、慣れると10秒程度で装着でき、ワイシャツを着るよりも早く装着も脱着もでき、この脱着の容易さもマッスルスーツの特徴の一つである。

以上、マッスルスーツの特徴をまとめると、以下のようになる。

- (1) 空気圧式 McKibben 型人工筋肉の採用により十分な補助力と滑らかな動きを実現
- (2) 持ち上げる場合も降ろす場合も補助が可能
- (3) 用途に応じたインタフェースを用意
- (4) 簡易な脱着（10秒程度）

なお、腰補助用マッスルスーツは、2015年にCEマーキング自己宣言を行っている。

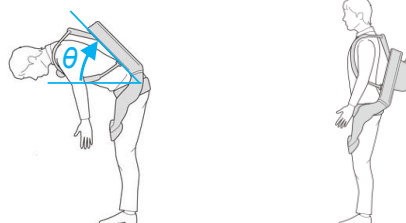
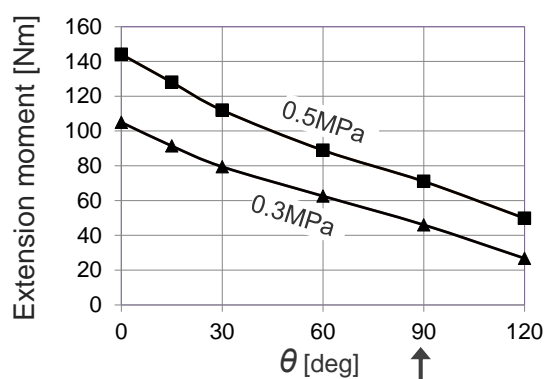


Fig.4 Output torque of muscle suit

2.3 スタンドアロンモデル

腰補助用マッスルスーツは、分野を問わず、利用者から補助力は十分で腰は楽になると言われる一方、

- ① コンプレッサとコンプレッサから空気圧を供給するチューブ、もしくはタンクが邪魔で使いにくい
- ② スイッチなどのインターフェースの扱いが面倒くさい、もしくは適していない
- ③ 重い (6kg 以上)

というご指摘を常に頂いていた。そこで、これらの問題を解決した「スタンドアロンモデル」を開発し、2015年11月に公表した。簡単に原理を紹介する。

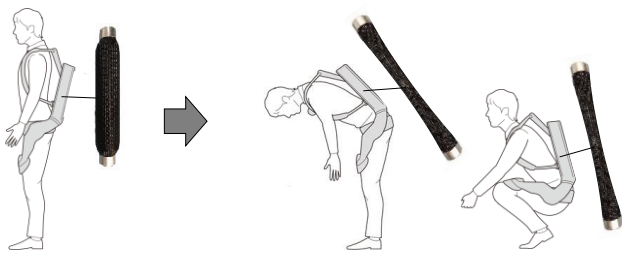


Fig.5 Shape of McKibben artificial muscle for each posture

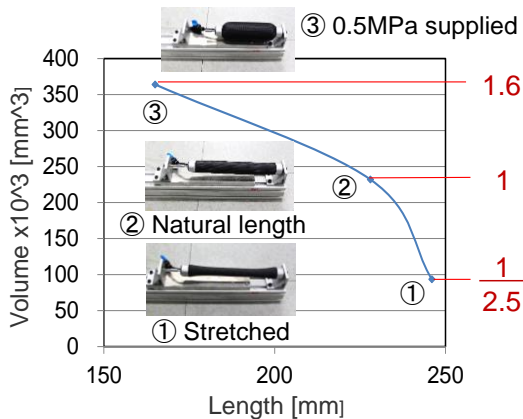


Fig.6 Volume change of McKibben artificial muscle

使用している McKibben 型人工筋肉は、外部からの力で伸びる特性を持つ (伸びないタイプもある⁽¹⁴⁾)。マッスルスーツを装着している場合、体を屈曲し、前傾になったりしゃがんだりすると、図 5 に示すように人工筋肉は伸ばされる。この時の人工筋肉の体積変化を図 6 に示す。この図から分かるように、体積は減少し、半分以下となる。従って、直立時にある程度の空気圧を入れて空気の出入りを遮断すると、屈曲により体積が減るため、(圧力) × (体積) が一定であることより (ボイルの法則)、内部の圧力は増加する。例えば、直立時に 0.2MPa の空気圧を入れることで、屈曲により体積が 1/2.5 になるとすると、圧力は 2.5 倍の 0.5MPa となり、外部から 0.5MPa 供給する場合と同等の引張力が発生可能となる。結果として、図 7 に示すように、約 100Nm

の伸展モーメントが実現できる。これは、回転中心から 0.4m 離れた位置 (腰から腕までの長さ) で約 25.5kgf (250N) の補助力を発生することに相当する。また、最初に入れておく空気圧の大小により、最大伸展モーメントも変化することが分かる。これは、作業内容により使用者が伸展モーメントを調整できることを意味し、柔軟な対応ができると言える。

次章の実験では、このスタンドアロンモデルを対象とする。

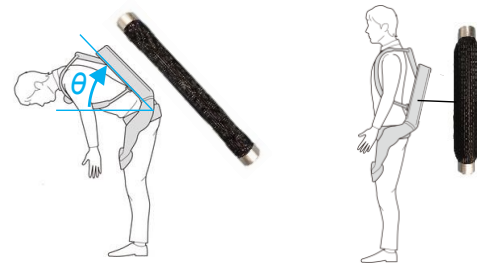
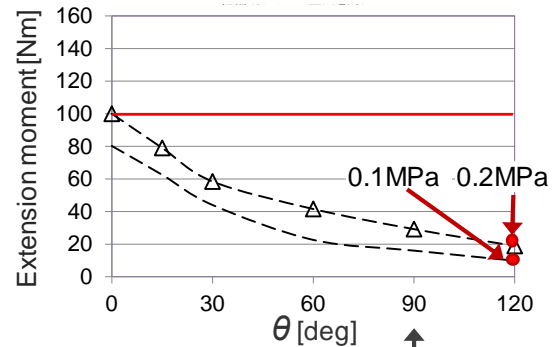


Fig.7 Output of stand-alone model

通常のマッスルスーツでは、McKibben 型人工筋肉に外部から圧縮空気を供給するが、スタンドアロンモデルでは、このように最初に空気圧を入れるだけで、大きなトルクが発生できる。従って、コンプレッサもチューブもタンクも不要になり、自分で力の方向を変えるだけで良いので、インターフェースを使う必要も無い。さらに、バッテリー、電気回路、電磁弁なども必要が無いため、軽量化 (最新の Edge モデルは 4.3kg。これまでは 5.3kg 以上 g) とコストダウンが可能となった。

3. Anybody による補助効果解析

AnyBody Modeling System⁽¹⁵⁾の筋骨格解析とモデル化機能を用い、腰補助用マッスルスーツ・スタンドアロンモデルの人体への影響を評価するモデルを作成した。そして、身長 170cm、体重 68kg の男性にそのモデルを当てはめ、次の 2 つの動作を行い、3 次元モーションキャプチャにより動作を取得して、最初に 0.2MPa の圧縮空気を入れた腰補助用マッスルスーツ・スタンドアロンモデルの有無による影響を調べた。

条件 1： 体幹を屈曲し、床に置いてある 12kg の保存水ケース（幅 370mm，高さ 220mm，奥行き 250mm で、両サイドに取っ手がある）を右側から左側へ運び、再び床に置く。

条件 2： 立位姿勢からしゃがみ、繰り返し 3 回、ショベルで床レベルにある雪を除雪する。ただし、ショベルの質量は 1kg で、先端に雪の質量として 2kg のペットボトルを固定した。

ベルトと左右の腿パッドがそれぞれ 125N 作用するように、角度に応じて補助力を比例配分した。

腰椎椎間板圧縮力について、条件 1 の結果を図 8 に、条件 2 の結果を図 9 に、緑色の線で示す。これより、条件 1 の保存水ケース移動の動作では、スーツ無では最大 4500N，スーツ有では最大 3200N であり、71%に減少していることが分かる。また、条件 2 のショベル除雪動作では、スーツ無では最大 3600N，スーツ有では最大 2000N を示し、56%に減少していることが分かる。

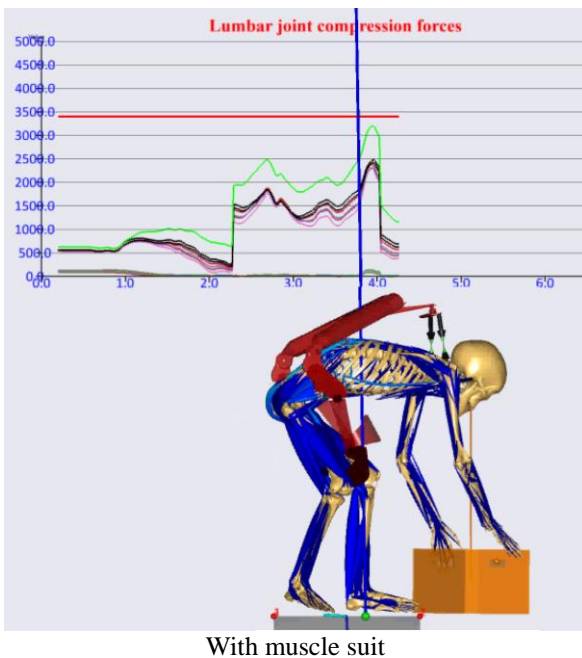
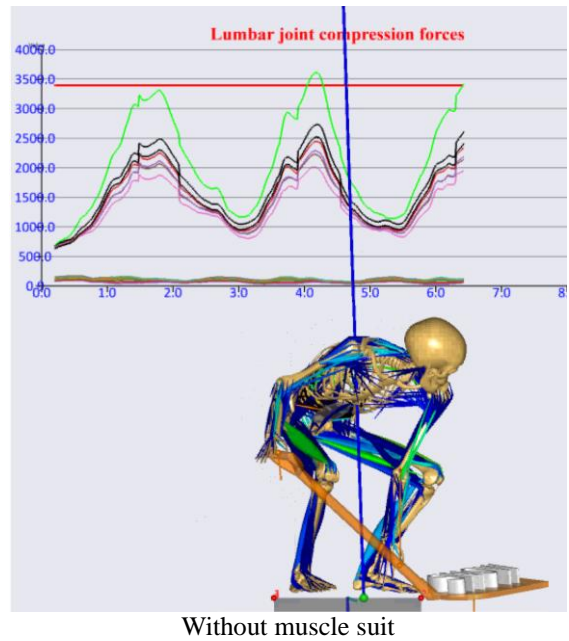
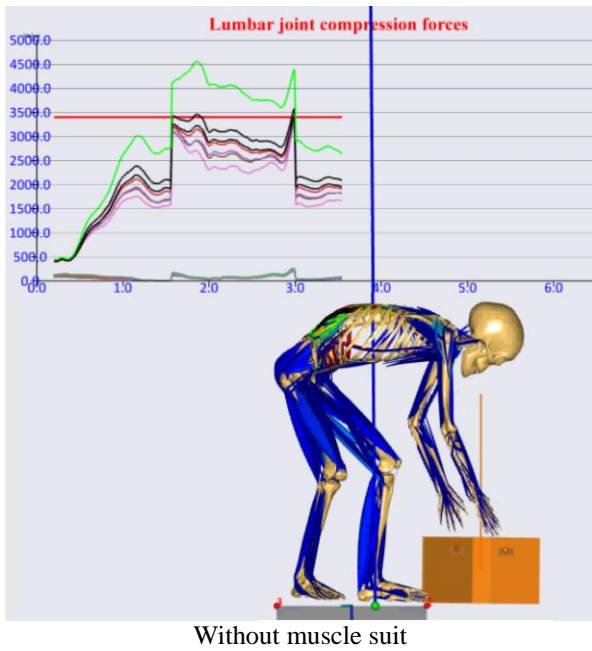


Fig.8 Lumbar joint compression force in case 1

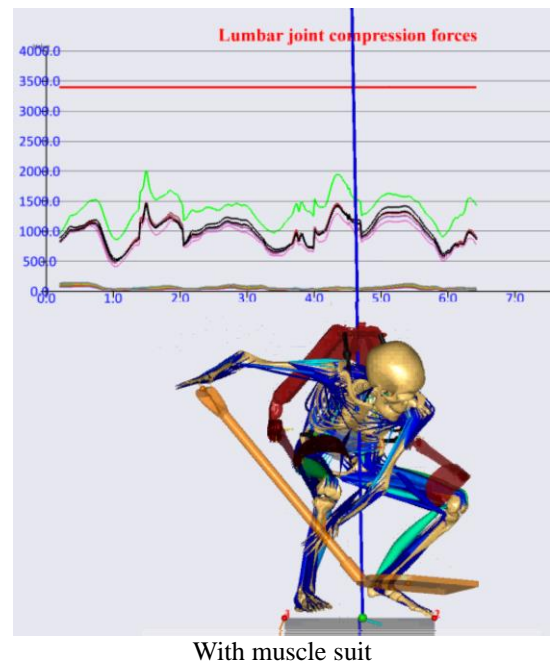


Fig.9 Lumbar joint compression force in case 1

腰補助用マッスルスーツの質量は 5.1kg なので、構造に基づき配分する。また、補助力は最大約 250N であるが、簡単のため、直立時 0N，屈曲 90 度以降で左右の肩

NIOSH(米国立労働安全衛生研究所)の荷物取扱基準でも採用されているように、一般的に腰部椎間板の

許容荷重(限界値)は 3,400N (図 8, 9 に赤線で記入) である⁽¹⁶⁾. この値は, 統計的に約 30%の人に障害が発生する可能性がある値に相当する. 図 8, 9 より, AnyBody による解析は, マッスルスーツ使用でこの値以下で作業が行えることを示している.

4. 結言

本稿では, これまでに 3,400 台以上を出荷した腰補助用マッスルスーツについて, 筋骨格モデリングシミュレーションソフト AnyBody を用い, 腰痛の原因に直結する腰椎椎間板圧縮力を求め, マッスルスーツの効果を検証した. その結果, 大幅な圧縮力軽減が確認できた.

今後は更なる検証を行い, より効果的な措置の開発を進めてゆく.

参考文献

- (1) H.Kobayashi, J.Aoki, H.Hosono, T.Matsushita, Y.Ishida, K.Kikuchi and M.Koseki, Concept of Wear-type Muscular Support Apparatus (Muscle Suit), Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.3236-3241, Washington,DC, (2002-05)
- (2) <https://innophys.jp/>
- (3) 佐藤裕, 何佳欧, 小林寛征, 村松慶紀, 橋本卓弥, 小林 宏, "腰補助用マッスルスーツの開発と定量的評価", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No. 792, pp. 2987-2999, 2012.
- (4) 村松慶紀, 所 晃史, 小林 宏, "マッスルスーツの開発と評価(表面筋電図を用いた補助動作の評価)", 日本機械学会論文集, Vol. 83 (2017) No. 847 p. 16-00078
- (5) 佐藤千恵, 横矢重治, 渡邊博美, 梅原英之, 中村裕紀, 小林宏, "腰補助用マッスルスーツ(R)のフィールドテスト(物流の作業現場への適用)", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.806, pp.3525-3538, 2013
- (6) Yoshiki Muramatsu and Hiroshi Kobayashi, Assessment of local muscle fatigue by NIRS - development and evaluation of muscle suit -, ROBOMECH Journal 2014, 1:19, 18 November 2014.
- (7) 井手 美優, 小林宏 "腰部補助用マッスルスーツの効果の評価", 第 18 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2017 (SI2017) 講演概要集, 3D2-08, 2017.12.20-22.
- (8) <https://www.cyberdyne.jp/>
- (9) <http://atoun.co.jp/products/atoun-model-a>
- (10) <https://www.jtekt.co.jp/news/180530.html>
- (11) <https://www.pai.co.jp/company.html>
- (12) <https://www.nikkari.co.jp/product/assist/buddy>
- (13) Schulte, H. F., The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle, The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, National Academy of Sciences - National Research Council, Publication 874 (1961), pp. 94-115.
- (14) https://www.festo.com/cat/ja_jp/products_010606
- (15) http://www.terabyte.co.jp/AnyBody/anybody_1.htm
- (16) Elfeituri FE, Taboun SM., An evaluation of the NIOSH Lifting Equation: a psychophysical and biomechanical investigation. Int J Occup Saf Ergon. 2002;8(2):243-58. PubMed PMID: 12067513.