

第7章

等身大筋骨格ヒューマノイドにおける 機能統合関節駆動評価実験

骨格要素・駆動要素・熱対策等といった関節駆動構造における諸要素についての機能統合を進めることで人体寸法を模擬した構成を崩さずに動作生成可能な身体が構築可能となったことを評価実験を通して示す．外力に対する応答，連続的な力強い動作，環境中での柔軟接触動作等の実験を行い機能統合関節駆動の評価実験とする．

7.1 機能統合された要素技術に関する検証試験

7.1.1 筋腱複合体制御ユニットのメンテナンス性試験

胸部，骨盤内に内蔵されるモータ駆動ユニットを除き，腱悟郎の設計では基本的に骨格に4本のネジ止めと，信号線2ペア，サーボ線1ペアさえ接合すれば取り外しが可能な構成となっている．メンテナンス性が優れていることを示す例としてワイヤ切断し，ドライバ基板・モータの破損時の復旧までの時間を計測した結果を表7.1に示す．駆動ユニットが外装の機能まで備える構成となっているため，外装と駆動部を別々に交換するが必要なく，予備の筋腱複合体制御ユニットの交換から復旧まで10分以内に完了しており，メンテナンス性が良好であるといえる．

表 7.1: Time necessary for maintenance of motor unit.

Event order	Time [min : sec]
Cut wire	0:00
Exchange unit	4:55
Calibration of wire	6:50
Update board number and set to initial pose	9:30

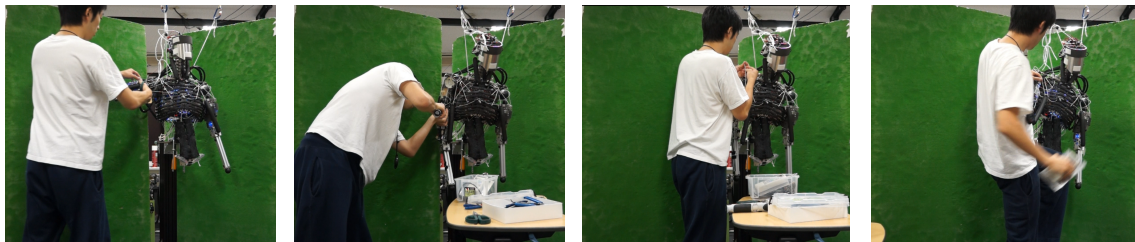


図 7.1: Flow of experiment: Cut wire, exchange motor unit, set wire, calibration of tension sensor.

7.1.2 伝熱・排熱を統合した骨構造の冷却性能検証試験

第6章で説明した機能統合による上肢帯設計により，統合された腱悟郎の状態では，どの冷却性能が実現されているかを試験するために外転姿勢を維持する実験を行った．肩甲上腕関節の角度を70度の状態を維持した際の，この動作に関連する主要な筋の張力値と計測された温度結果を図7.2 図7.3 に示す．実験のセットアップとしては，図7.4 に示すように，右腕を熱対策をしていない同じギア比構成の腕で，左腕を前章で述べた伝熱・排熱機能を統合した上腕で70[deg]の外転動作を行った．

図中の motor-40,41,42 は冷却対策を何もしていない骨格に設置された三角筋前部繊維，中部繊維，後部繊維に相当するモータを表す．motor-32,33,34 は提案の伝熱・排熱機能を統合した骨構造を採用した骨格に設置された三角筋前部繊維，中部繊維，後部繊維に相当するモータを表す．

図5.23の結果と，今回の冷却なしと提案手法を比較し，今回は図5.23以上の冷却性能が実験で認められた．その大きな要因としてはポーラス構造の表面積の差，循環させる水の量の差が考えられる．図5.26に示した熱の流れについては，水温，水压等の影響を受けるが，水温が低い状態においては気化熱による冷却は大きな除熱能力を発揮しないことを考慮すると，比較する2条件において温度上昇の抑制に対して最も支配的な要素は水の循環によるものと推察される．¹

以上より本実験では，採用した熱対策の伝熱・排熱を統合した骨構造による熱対策によって高負荷条件下での動作時間を大幅に伸ばすことが可能になっていることが示された．

¹図7.3において，実験を継続した場合には水温・水压が上昇し気化熱による冷却が発揮されると推察される．本提案システムによって構築される熱対策システムにおいて，水冷による冷却・気化熱による冷却のいずれがどう影響・増減するかについては水温・水压・アセンブリ等の構成により影響を受けるため一概には定式化することが難しい．

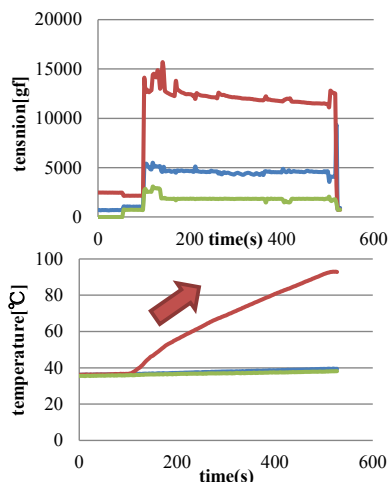


図 7.2: Measurement result of three motors representing deltoid during abduction without any cooling system.

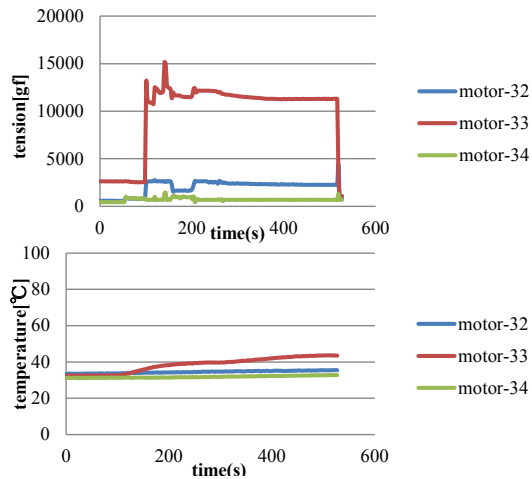


図 7.3: Measurement result of three motors representing deltoid during abduction with heat exhaustion with proposed method.

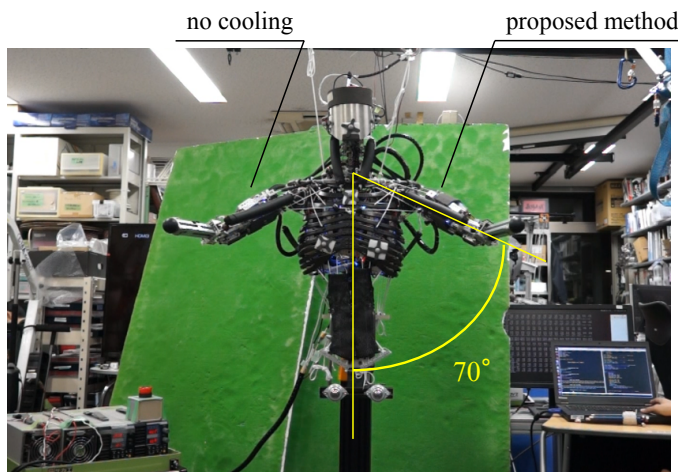


図 7.4: Setup for measuring temperature in Ken-goro deltoids.

7.2 関節駆動構造における機能統合構成法による運動性能評価実験

本章では第3章-第5章の各章にて提案・検証を進めた各要素技術について、腱悟郎の関節駆動構造に組み込んだ結果獲得される運動性能についての検証を行う。

7.2.1 頭部への衝撃による筋腱複合体制御ユニットの可変剛性試験 実験概要

4.3.3 節で述べたムチ打ちを模擬する頭部衝撃実験では、筋に非線型バネ要素を組み込み強く緊張させることで筋骨格ヒューマノイドの関節剛性が可変であることを示した。一方同実験では衝撃後にワイヤがたるむ状態が発生し、筋張力のみならず関節角レベルでの振動につながってしまうことが課題と4.3.4 節で指摘された。本節では新駆動ユニットを採用した腱悟郎において、頭部に”腱志郎”と同様の衝撃を与え、筋の緊張状態およびNSTの有無による衝撃への応答を検証する。

実験設定

質量5[kg]の硬質ゴム製ボールを250[mm]の高さから振子により腱悟郎の頭部に衝突させる。体幹部で衝撃を吸収しないよう背骨を支柱に拘束し、僧帽筋が経由・停止する肩甲骨と鎖骨は固定して経由点・停止点の位置が変化しないようにした。各筋は4.4.4 節にしたがったのソフトウェア的な弾性及び、非線型バネ要素(NST)によるハードウェア的な弾性を取り入れた構成の筋腱複合体制御を適応している。

腱志郎での実験同様に T_{ref} を緊張状態と弛緩状態の二種類を与えて検証を行う。各筋(図6.21)の張力値は $F = [f_{\#1}, f_{\#2}, f_{\#3}, f_{\#4}, f_{\#5}, f_{\#6}]$ とおくと、緊張状態には $F_{high} = [10000, 7000, 7000, 7000, 12000, 2000]$ [gf] 弛緩状態には $F_{low} = [2000, 1400, 1400, 1400, 2400, 2000]$ [gf] を与えた。回旋方向のみに寄与する#6については値を変えていない。またそれぞれの条件でNSTの有無を変えた場合の、計4条件について実験を行った。

実験結果・考察

図 7.5 , 図 7.6 , 図 7.7 , 図 7.8 に実験結果の各条件での張力値を示し, 図 7.9 に関節角度変化を示す. 張力値は I 制御を入れていないためオフセット張力に対し定常偏差が存在している.

NST のある条件では無い条件より張力値のピークが低く抑えられており, NST の粘弾性が撃力の吸収に貢献していることが分かる. #5 の筋は衝突と同時にたるみやすいが, NST 有り緊張状態では張力 0 を示すことが無くたるみが生じていないことから, 高張力域で NST を収縮させておくことで衝突時に弾性エネルギーが解放されたるみが防止できることが分かる. NST が無い条件でも最大張力は 18.7[kgf] と NST を挿入した”腱志郎”での最大張力より小さく, 張力制御で素早く筋を巻き出し衝撃緩和が行えている. さらに張力の振動も速やかに収束しており, 新制御構成の有効性が現れている.

今回の実験での角度変化は, NST 有り弛緩状態で-20.2[deg], NST 有り緊張状態で-15.2[deg], NST 無し弛緩状態で-26.4[deg], NST 無し緊張状態で-9.8[deg] となり, ”腱志郎”と同様に筋を緊張させることで首の過伸展を防止できることが確認できた. NST の無い条件では筋の弾性特性は線形のため張力により剛性は変化しないと考えられるが, 緊張状態では明らかに角度変化が小さくなった. この条件では関節角が初期姿勢に戻らないことから, 高張力にすることで乾性摩擦によるダンピング効果が非常に大きく作用していると考えられる. NST 有り弛緩状態も関節角が初期姿勢に戻っていないが, これは初期姿勢に戻るために発揮した張力で NST が伸び, 姿勢変化に寄与していないためと考えられる.

また腱志郎と腱悟郎での実験結果を比較したものを図 7.10 に示す. 腱志郎の制御構成では撃力後にワイヤのたるみにより関節角がしばらく振動してしまっていたのが, 腱悟郎のシステム構成ではこれが改善されていることがわかる. これは撃力によって張力が上がり伸長する筋と拮抗する筋の挙動の改善によるものといえる. 4.4.6 節に示したように, 腱悟郎の新制御構成では, 腱志郎での制御構成と比較したるみに対して素早い立ち上がりで目標張力値に対して追従可能となっており, これにより 4.3.4 節で述べたワイヤのたるみによる振動等の課題が抑制されているといえる.

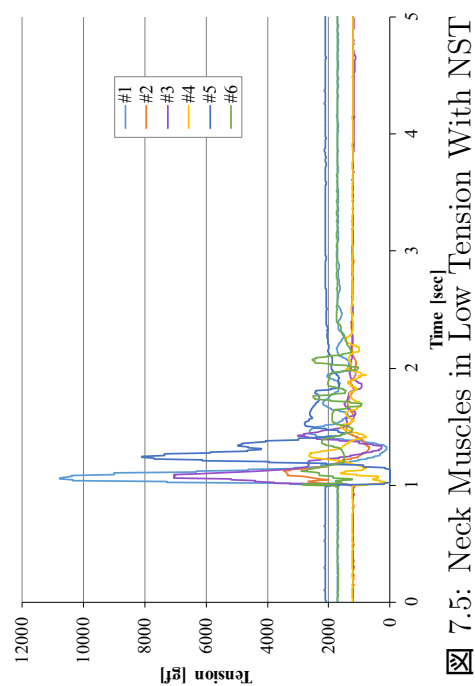


図 7.5: Neck Muscles in Low Tension With NST

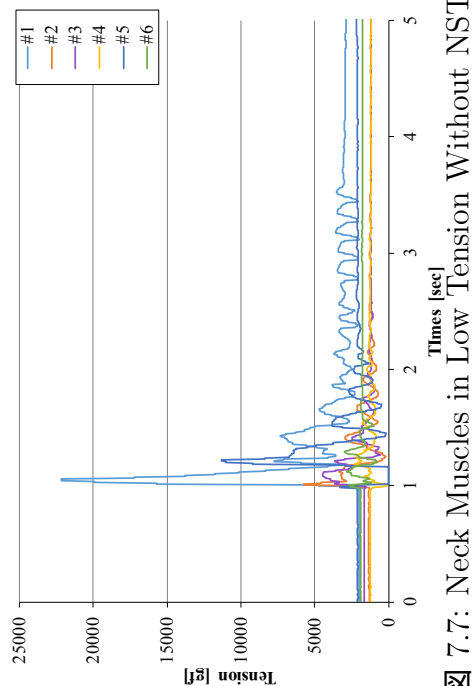


図 7.7: Neck Muscles in Low Tension Without NST

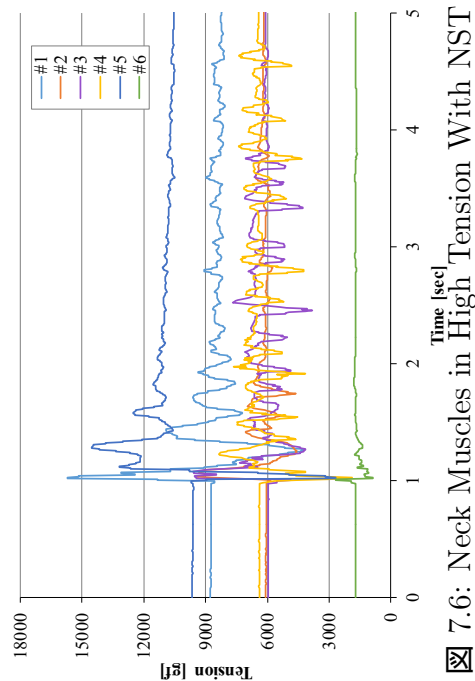


図 7.6: Neck Muscles in High Tension With NST

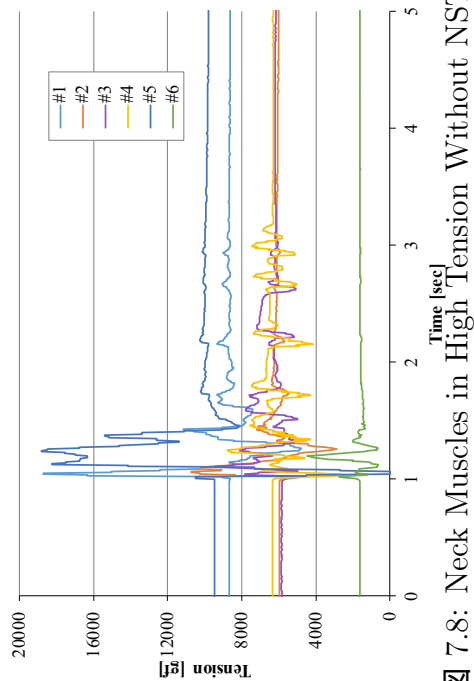


図 7.8: Neck Muscles in High Tension Without NST

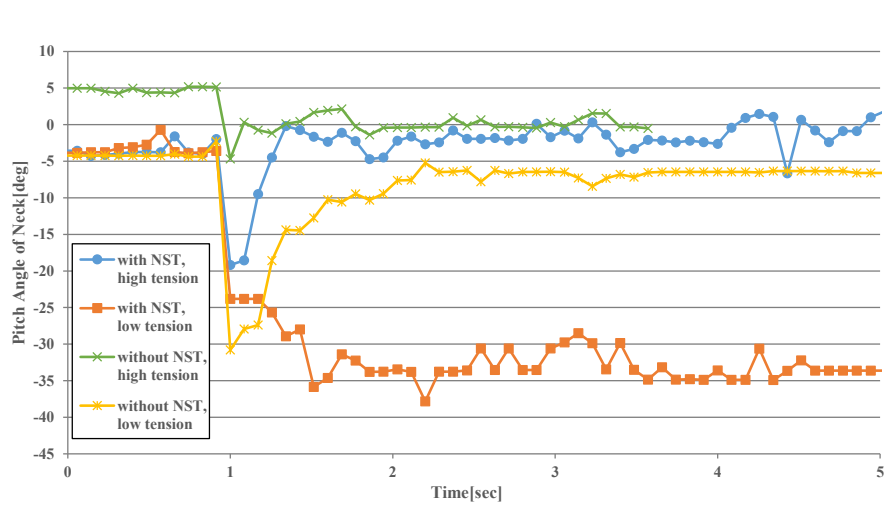


図 7.9: Pitch Angle of Head

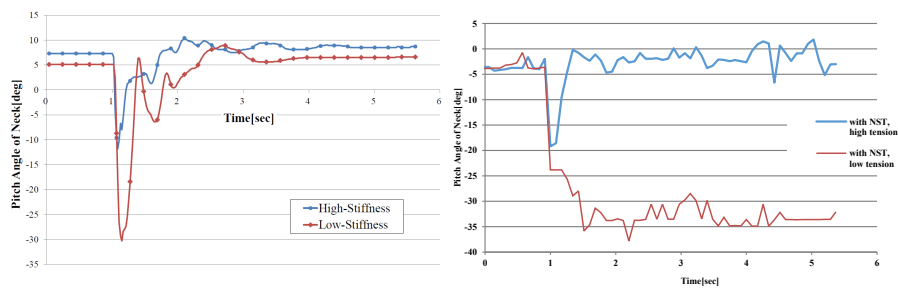


図 7.10: Comparison of neck angle with Kenshiro and Kengoro. Both robots were subject to ball impact in high/low stiffness condition.

7.2.2 撃力に対する柔軟応答を要する環境接触実験

実験概要

全身構成の中で手先に撃力を付与し，外力に対して柔軟に応答可能かを試す試験をおこなった．

実験設定

壁から 600[mm] 離れた地点に腱悟郎を直立させ，腕を前に出した姿勢を保ち壁に手を着く実験を行った．姿勢は直立した状態から肩は roll, pitch, yaw がそれぞれ 80 度, 0 度-60 度，肘は 60 度屈曲した姿勢を目標姿勢として送っている．実験は筋の長さを一定に保つ長さ制御による手法と，4.4.4 節の張力制御による手法の 2 種類の制御モードで行った．張力制御による構成では大胸筋，上腕二頭筋 (図 7.11 図 7.12 の 37,45 のモータ) に NST を採用しているがそれ以外の筋には設置していない．

実験結果・考察

図 7.11 図 7.12 に壁に手を付いた際の上腕周辺のモータの張力結果を示す．張力制御手法のものでは壁に手が接触した後ゆっくりと馴染み接地しているのに対して，長さ制御の構成では上肢一体が固く左肘の伸展筋を中心に各筋への負荷も大きくなっている．

一方で全身の挙動としては，張力制御による実験では手が壁に付いた後ゆっくりと馴染む形となっているのに対して，長さ制御による実験では全身が固く，壁から体が一度跳ね返るような挙動となった．これは長さ制御では筋は拘束されているものの，全身としては身体を構成する関節の弾性要素 (背骨のバネ，肩甲胸郭関節の発砲素材，CFRP 肋骨の変形，ワイヤであるダイニーマの弾性) の影響を大きく受け，全身としては弾性体のように体をしならせているためと考えられ，駆動要素による柔軟性ではなく身体骨格の柔軟性が発揮された結果といえる．

本実験ではモータの張力制御によってモータピークトルク低下という意味で負荷の軽減，全身の柔軟性の獲得が確認された．一方で長さ制御による実験は関節構造の弾性特性が発揮される結果となり，今後は腱悟郎による筋と骨格いずれもの柔軟弾性特性を統合した全身動作生成の可能性が示唆される結果となった．

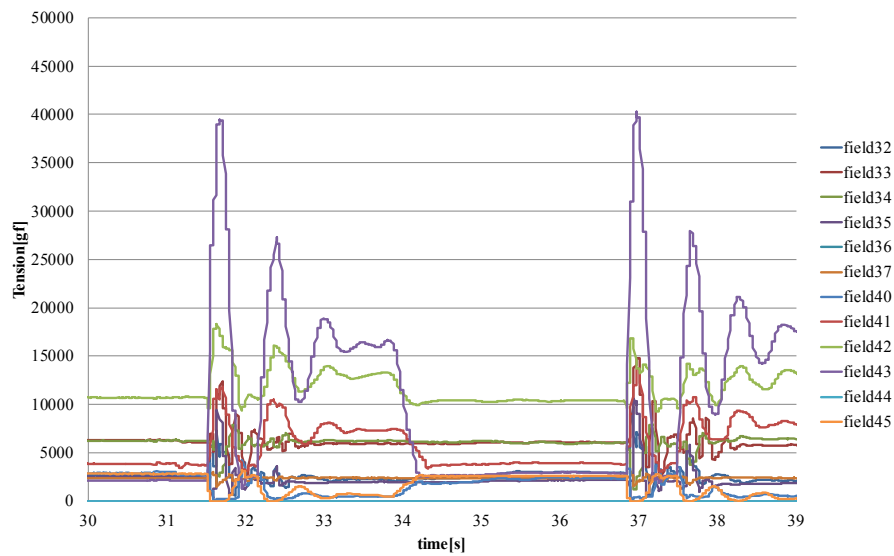


図 7.11: Tension result of upper limb during arm landing on wall approximately 600[mm] away with muscles in length control mode.

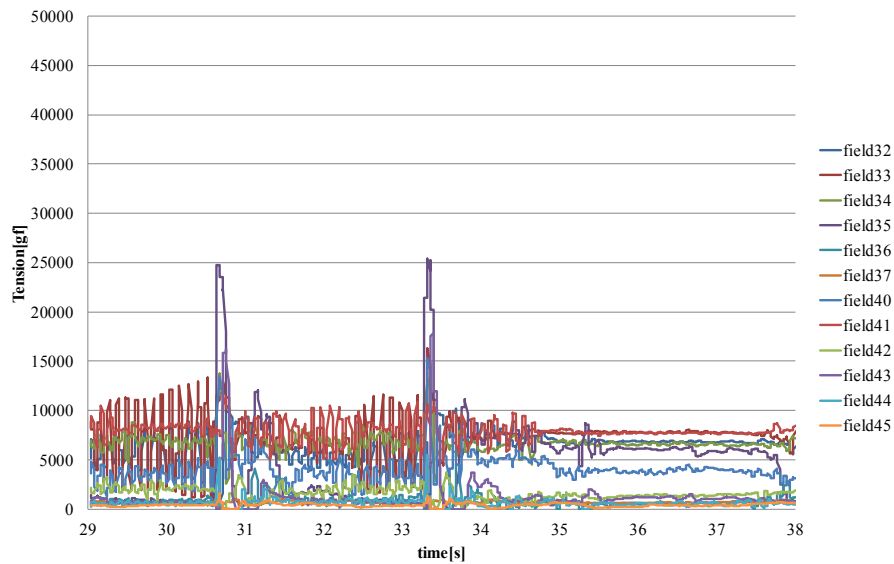


図 7.12: Tension result of upper limb during arm landing on wall approximately 600[mm] away with muscles in tension control mode.

7.2.3 低ギア比柔軟身体構成での繰り返し高負荷動作試験

前節では低ギア比構成による張力制御によって外力に対する即応性を要する動作生成が可能になっていることを示した．関節駆動構造の機能統合構成によるメリットとして骨格強度を損なわずに簡易な構造で熱対策を可能にしていることが挙げられる．これを実現している例として，臙悟郎による自重を支える力強さが求められる腕立て伏せ実験を行った様子を図 7.13 図 7.14 に示す．

図 7.15 に全身で腕立て伏せを繰り返し行ったときの特に負荷が大きかった上腕周りのモータの電流値，張力，温度，モータ巻取・巻出の結果を表す．図中の [32]-[37],[40]-[45] は左・右の上腕に設置されたモータを表し，順に三角筋前部繊維/中部繊維/後部繊維，上腕三等筋，上腕筋，上腕二等筋を表す．

図 7.15 の開始時点で温度がすでに一定でないのは，直立姿勢で腕立て伏せをする姿勢を作り，これを床面に設置し動作を生成する手順となっているためである．

本実験では 30[kgf]-60[kgf] と非常に高い負荷が繰り返しかかる動作を通して，全身の骨格及び駆動ユニットについて十分な強度が認められることが示された．また提案の熱対策手法により，[33][41] と左右の三角筋中部繊維のモータについても熱損が回避されていることが分かる．

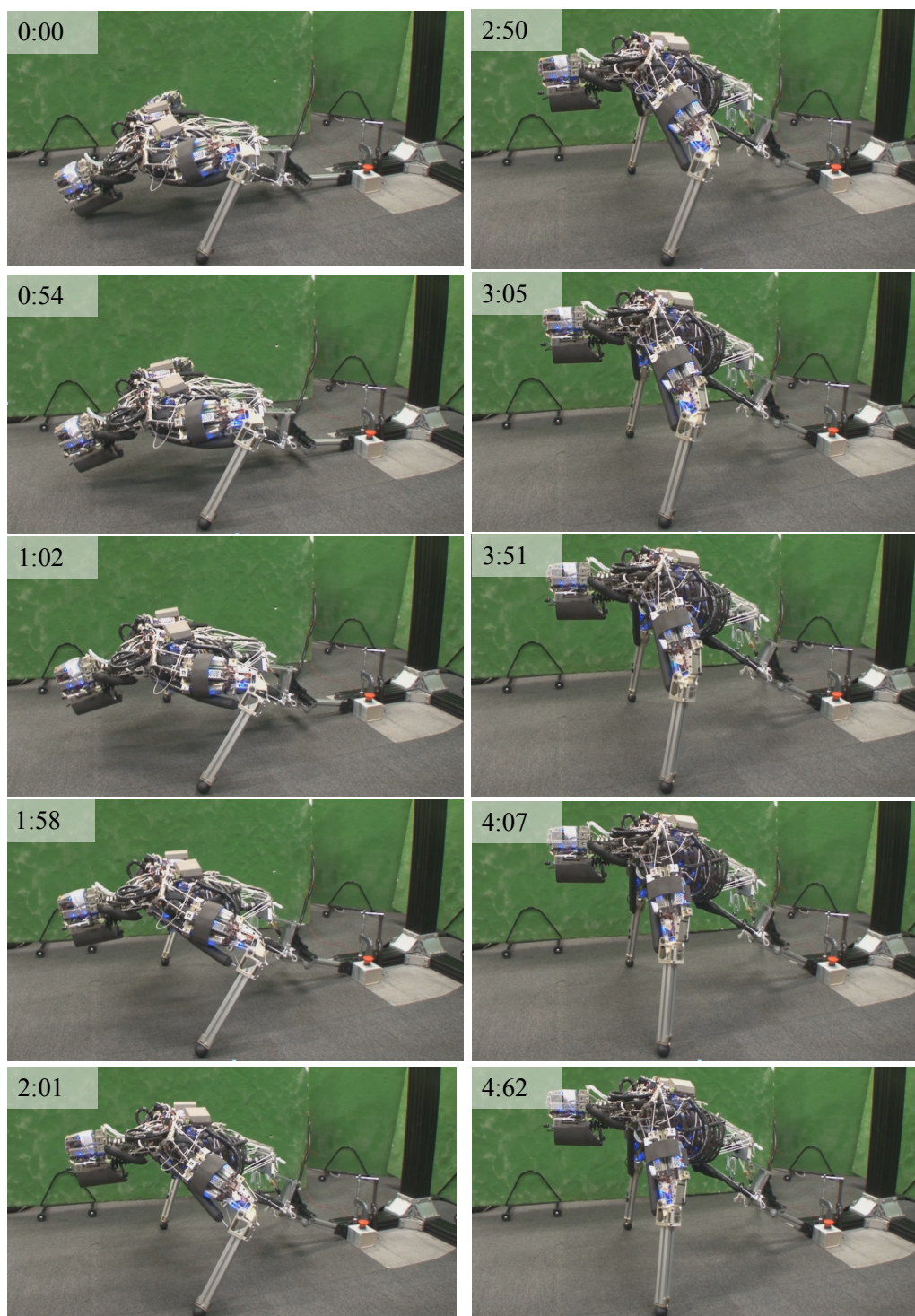


図 7.13: Push up motion by Kengoro upper half of the body.

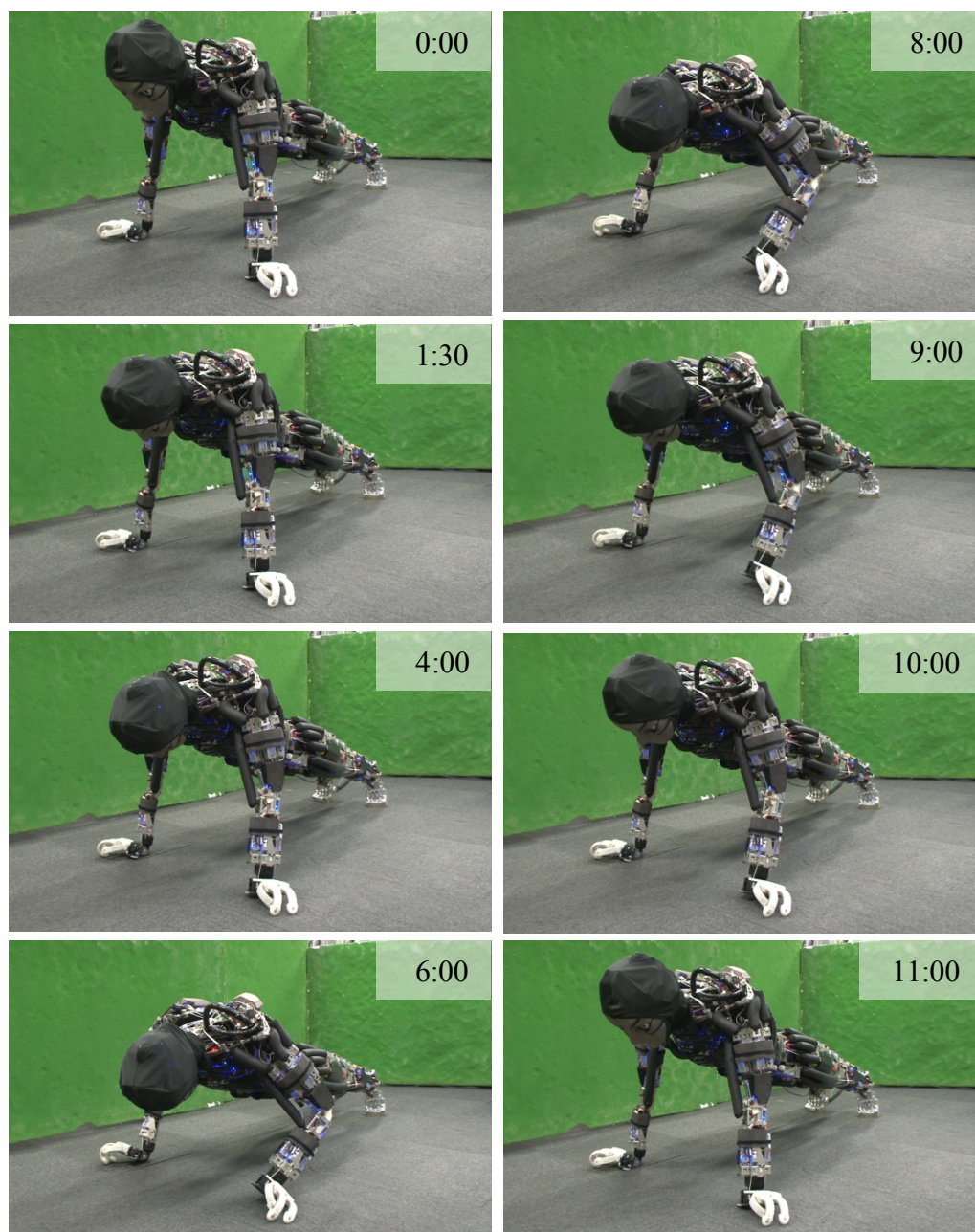


図 7.14: Push up motion by Kengoro.

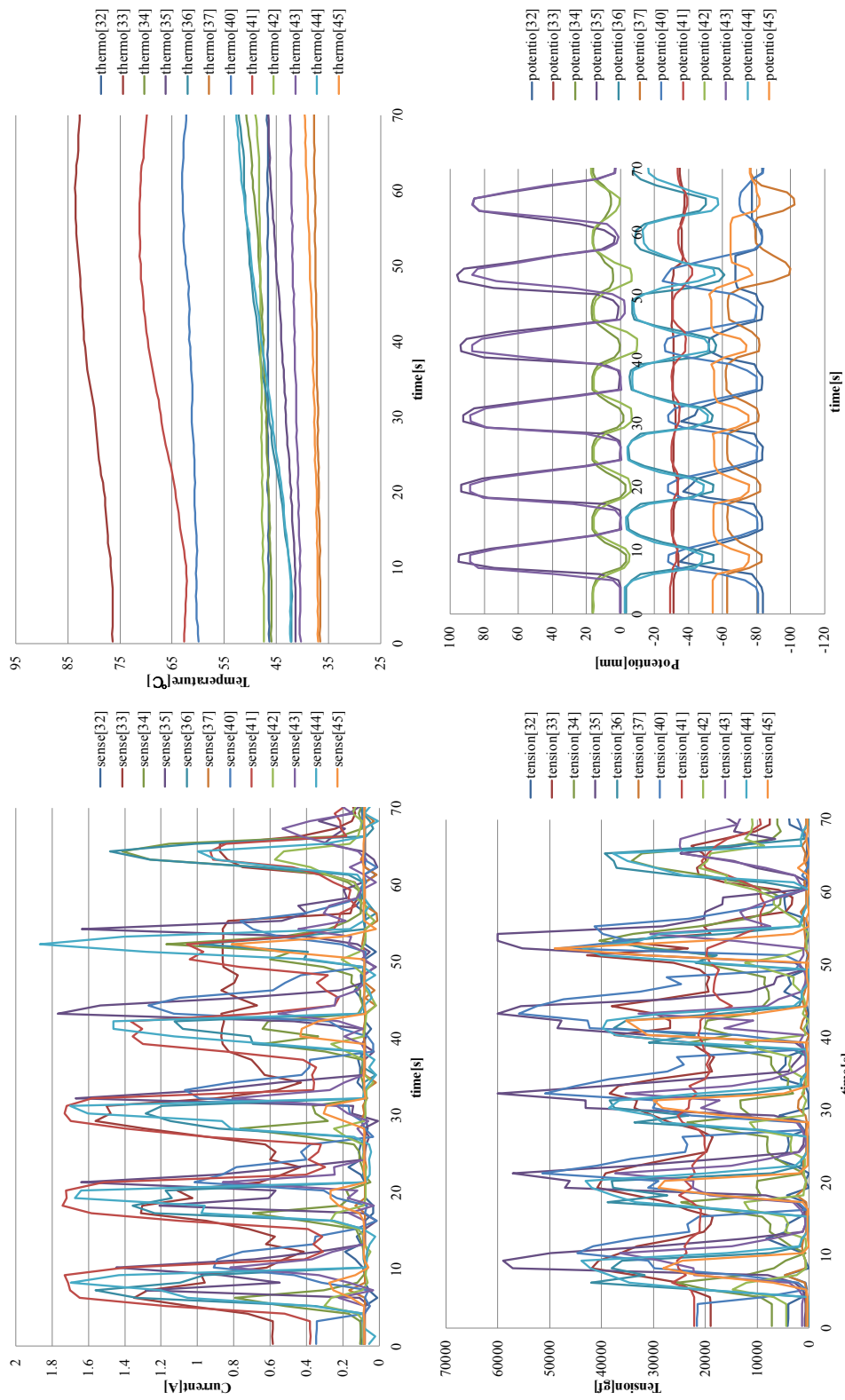


図 7.15: Log of upper limb during push ups. The skeletal frame and the actuation unit proved to have enough strength for the motion. Judging from the surface temperature of the motors, it could be said that the motors would have burned out had it not been for the proposed cooling method.

7.3 関節駆動構造における機能統合構成法による全身柔軟動作

7.2 節では提案する設計によって発揮可能となる運動性能についての評価を行った．本章では多様な動作実現を目的として，関節駆動構造における機能統合構成法によって構築された腱悟郎について，全身で可能となった動作例についての紹介を行い，特定の用途に特化せず，多様な動作生成可能な身体構築が実現したことを示す．

7.3.1 全身の環境との接触を要する寝返り動作：

岩石智志と共著

実験概要

腱悟郎は関節構造，身体寸法が人体構造に近く，人間と同等の可動範囲内で駆動可能であり，全身で環境接触可能なよう外装設計も行われている．人体を模擬し，全身で環境との接触が可能な柔軟性を有する身体構造によって可能になる動作の例として寝返り動作に取り組んだ．

ヒューマノイドに求められる役割は，用途ごとに特化した専用ロボットとしての作業ではなく，汎用的で多様な適応性を持った仕事であり，そのためには人間と共存可能な環境において多様な動作を生成可能としなくてはならない．本実験はヒューマノイドの，人間のような自然な動作獲得の第一歩としたいと考える．

実験設定

厚さ 100[mm] の発砲ウレタンマットの上に腱悟郎を設置し，これを KHR を利用したマスター・スレーブシステムにより操縦する [91]．仰向け姿勢で開始し，うつ伏せ姿勢への姿勢遷移を目標とした．

実験結果・考察

本実験の様子を図 7.16 に示す．寝返り動作が実現されたことが分かる．以下，実現を可能にしている身体構成についての考察を行う．

1. 寸法構成が人体に近い

- ・肩甲上腕関節に球関節を採用しており，上腕の回転軸についての輪郭ラインが凹凸が少なく滑らかで対称性が高い。²
- ・外形が連続的になるような筋腱複合体ユニットの配置により四肢の凹凸が少なく動作中にその部位が引っかかることが起こりにくい。
- ・スリムな寸法のため，自己干渉による動作障害が起こりにくい。

2. 環境接触中に自己破壊しない

- ・張力制御による駆動により，負荷が特定の筋に集中せず駆動系が破損しない。
- ・多節脊椎構造，肩関節等のような多自由度身体のため環境との接触時，特定の関節に負荷が集中しにくく，筋への負荷も分散される。
- ・多節脊椎構造，肩関節等のような多自由度身体のため環境との接触時，同時に多くの身体部位が接触可能（環境中での多点接触）となり，安定的なバランスが得られるとともに，自重を支える接触反力の集中を回避することが出来るため，身体部品を破損しにくい。
- ・全身に配置された外装により，電装系部品が十分に保護されている。

3. 人間と似た形状のため直感的な操縦が有効

- ・関節自由度，リンク長，各リンク重量が非常に人間に類似しているため，ある姿勢の時に自分であつたらこう動く，といった直感的な操作入力をロボット操縦に反映可能である。

7.3.2 全身の環境との接触を要する起き上がり動作

7.3.1 節と同様の条件で環境との接触を要する起き上がり動作についての実験に取り組んだ様子を図 7.17 に示す。前節での考察に加え，各四肢についての質量配分が人体構成に近いという身体特徴によって，KHR での直感的な操作によって起き上がり動作が実現できた。

²既存の軸にモータを設置する 3 軸直交関節タイプのヒューマノイドでは，それぞれの軸について，交線は 1 点で交わるものの駆動部は分散する形態となるため概してモータ・ギア配置の構成上凹凸が多くなるものが多い

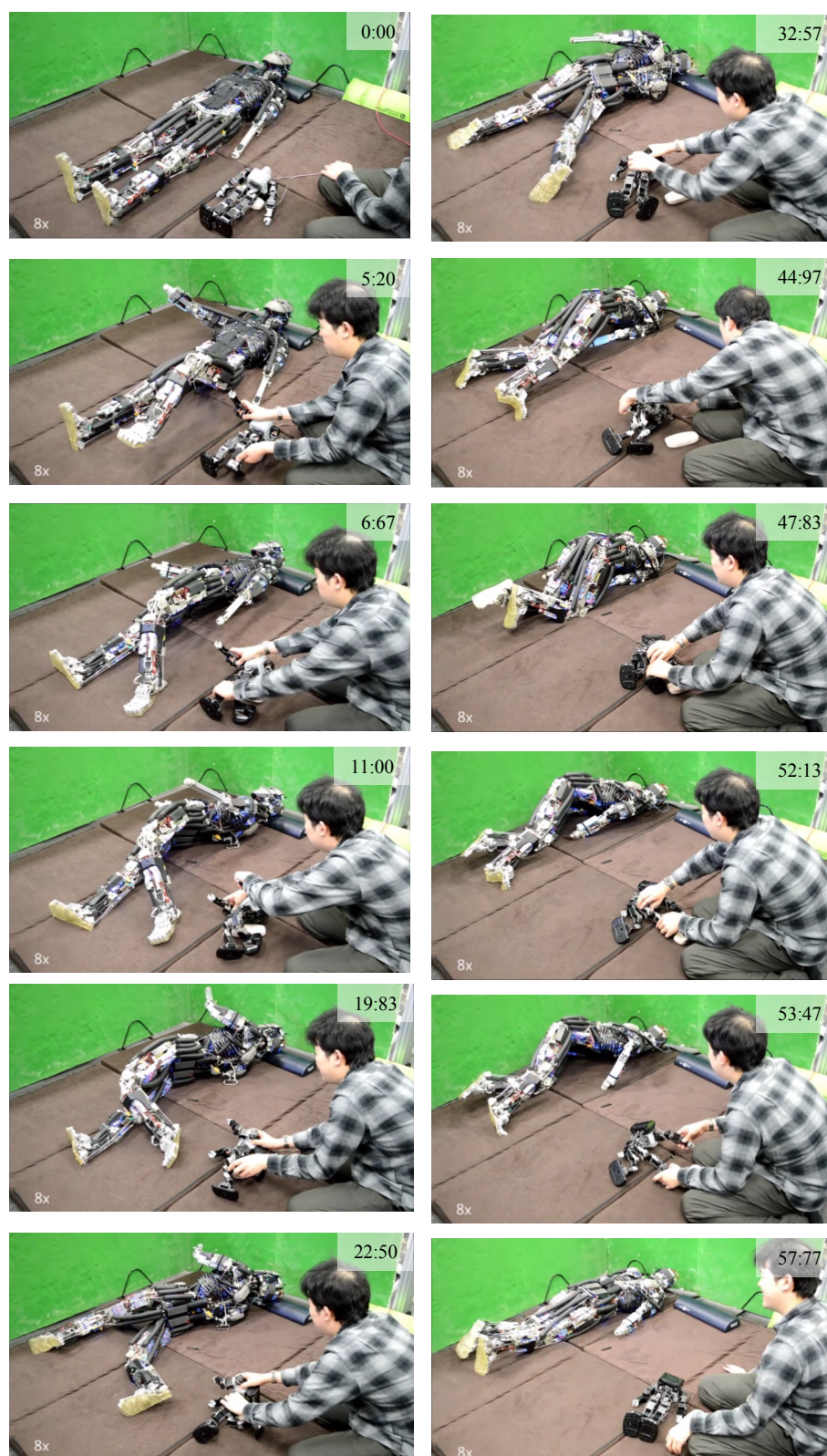


図 7.16: Rolling over motion by Kengoro using bi-lateral control using KHR.

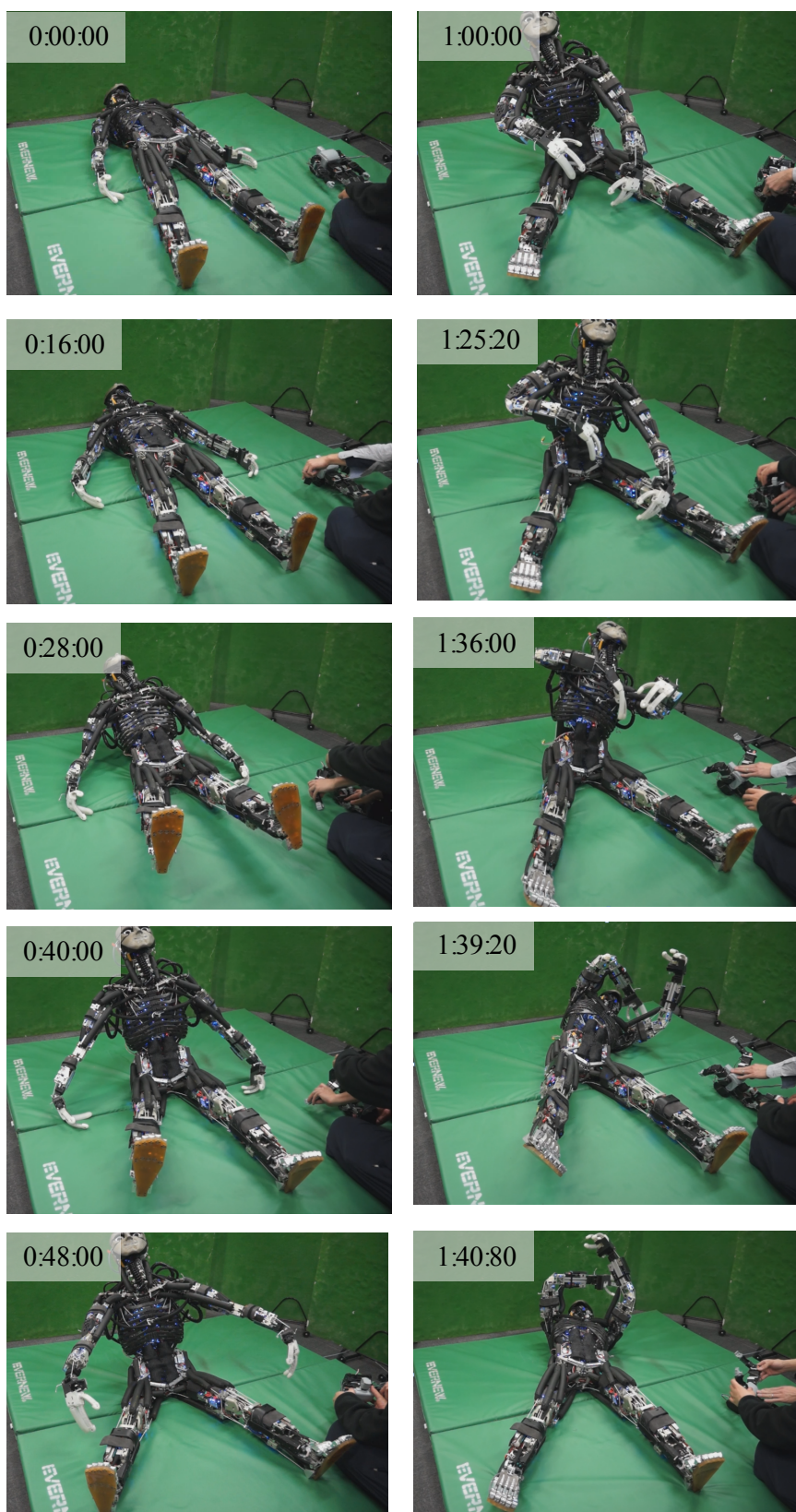


図 7.17: Sitting up motion using KHR.

7.4 本章のまとめ

本章では、第3章-第5章で提案した要素技術を統合し構築された腱悟郎を用いた動作実験を行った。

人体模倣筋骨格ヒューマノイドとして自由度が多く、これを駆動するためのモータの占有空間だけでも大きな割合を占めてしまう中、骨格要素・駆動要素・熱対策等といった関節駆動構造における諸要素についての機能統合を進めることで人体寸法を模擬した構成を崩さずに動作生成可能な身体が構築可能となったことを示した。

これらが、外力に対する柔軟応答と、高負荷動作が両立可能な構成となっていることを示し、また応用実験として全身柔軟性を発揮した環境触動作を行い、筋骨格ヒューマノイドとして特定動作に特化しない汎用的な動作が可能な身体が構築されていることを示した。

第8章

結論と展望

8.1 結論

本研究では、はじめにヒューマノイドによる幅広い動作生成に必要な機能とその実装課題を考察した。従来のヒューマノイドの設計アプローチは、既存の個別最適化された要素部品を組み合わせるに留まっており、求められる機能数に比例し必要な構成要素数が増加し、ハードウェア構成の煩雑・大型化につながっている、もしくは、特定用途に特化した要素技術の提案に留まり、全体のシステム統合まで十分に想定・考慮されていないと考えられた。ここに幅広く多様な動作生成ができない従来のヒューマノイドの原因があると考え、ハードウェアシステム構成の課題を指摘した。

ヒューマノイドが多様な動作生成を実現するには、様々な機能を有することと同時に、人としての形状を保ち限られた空間制約下に収まっていることが必要であり、現構成法ではこのトレードオフを解決することができない。これを解決するための手法として、ロボット身体を構成する各要素について素材、形状、特性等を多面的に捉え複数の機能を満足するように設計を行いそれぞれの構成要素を多機能化させる「機能統合構成法」の考え方を提案した。

現状のヒューマノイドによる多様な動作を実現する上での最大の課題の一つとして環境との接触があり、柔軟性の獲得が生成可能な動作の幅を大きく広げる足がかりになると考え、これに必要な機能を整理し、機能統合構成法を筋骨格ヒューマノイドの関節駆動構造へ適用し以下の設計提案・実装・検証を進めた。

- 広可動域・多自由度駆動のための筋骨密着型関節構造の構成法 (第3章)

人間は身体を骨から形成される多自由度構造を筋肉の収縮によって駆動する。従来この仕組みを取り入れたヒューマノイドでは筋と骨の密接した関係を十分に再現できておらず、骨が構造として力を支えるだけにとどまっていた。実際の人体構造では骨は構造として力を支えることに加え、筋の付着点としての機能、筋が巻き付く表面の機能、関節としての機能、と様々な機能を同時に実現している。これを工学的に表現する場合に機能単位での切り分けをするだけでは、機能の数だけ要素数が必要となってしまうため、筋骨密着構造による設計を取り入れ多自由度・広可動域構造の駆動を可能にした。

- 可変剛性関節駆動のための筋腱複合体制御システムの構築 (第4章)

筋骨格構造の駆動系に柔軟性を取り入れるにあたり，人体の筋腱複合体の仕組みを，筋肉の拳動を張力制御駆動のモータと，腱の拳動を非線形バネによる組み合わせで表現することを提案し，張力制御時のワイヤのたるみが柔軟駆動での支障となるためこれを抑制する制御構成に取り組んだ．更には全身でモータが100にも及ぶ分散制御構成を考慮し，骨格を駆動する上で必要最小構成の単位について外装まで含めたモジュールという形で機能統合を進めた．

- ポーラス構造による伝熱・排熱機能を統合した骨構造の構成法 (第5章)

柔軟な筋骨格ヒューマノイドの駆動を進める上でモータの低ギア比化の必要があるが，熱対策のための要素を追加することが空間制約上厳しいということがいえる．また既存のヒューマノイドでは骨格は構造体として力を伝える役割しかなく，内部の体積や表面積は十分に利用されていないことから内部を水路とし，表面で気化熱による冷却が可能な骨格として伝熱・排熱機能を統合する設計を行い，簡易な構成での十分な熱対策が可能となったことを示した．

これらの要素技術を踏まえ，等身大としての全身構成を考慮しこれらを統合することで，人体模倣型柔軟環境接触筋骨格ヒューマノイド「腱悟郎」を構築し総合実験にて，外力に対する柔軟応答が可能であること，連続的な力強い動作が可能であること，環境との多点接触条件下で連続的に柔軟動作が可能であることを検証し，限られた空間制約の中で十分に柔軟な動作生成が可能な筋骨格ヒューマノイドの構築を実現したことを示した．

本研究では，工学的に複雑システムを構築する際の課題を解決する手法として機能統合構成法を提案し，解決手法を想起するための思考フローを示すことで体系化し，これに従い可能となった提案を実例とともに示している．この手法を筋骨格ヒューマノイドの関節駆動構造に適用し，要素・機能選定とシステムアーキテクチャの考察を繰り返すことで，環境中での柔軟動作が可能な身体設計を可能にする技術的解決法を示すとともにその検証を行い原理を考察することで工学的な知見を得た．

8.2 考察と展望

本研究では人のような多様な動作生成が可能なヒューマノイドの構築を目的とし，柔軟な動作生成可能な身体構成を取り上げ，機能統合構成法を筋骨格ヒューマノイ

ドの関節駆動構造へ適用した。これは人体模倣筋骨格ヒューマノイドの小型・軽量という制約条件の中で、多自由身体構築、柔軟性獲得、熱対策といった課題に対する解決策を提案するものである一方で、こうした身体各構成要素の多機能化の思想は本論文の、関節構造を表現する接合部品一体型のバネ構造、ケーブルの煩雑さを回避する骨格中のバイパス、にも現れ、醍醐の身体構築にも貢献している。

熱対策については今回は骨格中の水路を採用したが、熱はロボット外部へ追い出すべきものであることや今後の防塵・防水の対策を考えると、柔軟な外装素材に水管を通し排熱するといった応用法も考えられる。さらにはヒューマノイドが人間環境で我々同様に多様な動作を実現するには本研究で提案した柔軟性の実現だけでは不十分であり、多様なセンサシステムや、環境との激しい接触が可能な外装といった様々な課題はまだ解決されていない。これらの機能を実現するには更に現状の身体構成に加え、センサ・外装等の要素を搭載していくことは不可欠である。

機能統合構成法の哲学は、ロボット身体構成要素を効果的に利用するために、従来限られた機能しか有していない要素に別の機能を付加するものであり、これに従い現構成のヒューマノイド身体構成要素の機能を見直すことで、センサ・外装に限らず様々な機能を追加していくことが可能である。本研究で提案する機能統合構成法は、要素の高集積化ではなく、機能の高集積化を可能にする考え方であり、今後機械要素、駆動要素、電装要素等が形を変えていったとしてもシステム設計のプロセスの中で簡易なシステムを構築する上で有用であり、今後様々な場で活躍可能なヒューマノイドを実現する挑戦の足場の一つとなることを期待する。

謝辭

本論文は筆者が東京大学工学系研究科知能機械情報学専攻に在学中、稲葉雅幸教授の御指導のもとで行なった論文です。修士課程・博士後期課程の合計5年はあまりにも早く過ぎてしまいましたが、入室前に稲葉先生に「覚悟はあるか」と言われたことを今でも覚えています。5年間に渡り様々なことを学ぶ機会を与えて頂きありがとうございました。

岡田慧准教授には研究の根本的な考え方について度々厳しくご指導頂き、自分の取り組む研究内容の意義や手法についての考え方を勉強させていただきました。

中西雄飛元助教授には、筋骨格ヒューマノイドのヴィジョン、作り方、動かし方と一から全てを学ばして頂き、研究の進め方に限らず大変お世話になりました。

一見、夢のある未来の技術を生み出すヒューマノイドロボットに関する研究はそ
の実、広範囲に渡り膨大な基礎知識を要し勉強することは尽きず、研究内容は地道な試行錯誤の繰り返しの茨の道でした。未来の形態を創造するというヒューマノイドシステムの構築を共に進めことが出来たすべての方々、お世話になりました。ありがとうございます。

最後に、自分を支えてくれた家族に感謝します。お陰様で研究に没頭し充実した博士課程を送ることが出来ました。

2015 年 12 月 11 日 上月 豊隆

参考文献

- [1] 山野直哉, 細田耕. 肩甲骨を有する人間型筋骨格系ロボットアームの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2010.
- [2] Atsushi Sugahara, Yutaka Nakamura, Ippei Fukuyori, Yoshito Matsumoto, and Hiroshi Ishiguro. Generating circular motion of a human-like robotic arm using attractor selection model. In *Journal of Robotic and Mechatronics*, p. Vol.22 No.3, 2010.
- [3] Hugo Gravato Marques, Michael J. Bunt, Steffen Wittmeier, Owen Holland, Cristiano Alessandro, Alan Diamond, Max Lungarella, Rob Knight. Ecce1: the first of a series of anthropomorphic musculoskeletal upper torsos. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2010.
- [4] 坂井伸朗, 村上輝夫, 澤江義則. ヒト肩関節を規範としたロボットアーム関節機構の開発. バイオメカニズム, Vol. 17, pp. 143–155, 2004.
- [5] Tomoaki Yoshikai, Ikuo Mizuuchi, Daisuke Saito, Shigenori Yoshida, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue. Behavior system design and implementation in spined muscle-tendon humanoid "kenta". In *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2003.
- [6] I. Mizuuchi, T. Yoshikai, Y. Sodeyama, Y. Nakanishi, A. Miyadera, T. Yamamoto, T. Niemelä, M. Hayashida, J. Urata, Y. Namiki, T. Nishino, Masayuki Inaba. Development of musculoskeletal humanoid kotaro. In *Proceedings of The 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 82-87, 2006.
- [7] I. Mizuuchi and Y. Nakanishi, Y. Sodeyama, Y. Namiki, T. Nishino, N. Muramatsu, J. Urata, K. Hongo and T. Yoshikai, and M. Inaba. An advanced musculoskeletal humanoid kojiro. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2007.
- [8] Yuto Nakaniishi, Tamon Izawa, Masahiko Osada, Nobuyuki Ito, Shigeki Ohtsuka, Junichi Urata, and Masayuki Inaba. Development of musculoskeletal hu-

- manoid kenzo with mechanical compliance changeable tendons by nonlinear spring unit. In *Proceedings of The 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics -IEEE-ROBIO2011-*, 2011.
- [9] 松村譲児. イラスト解剖学, 第5版.
- [10] Yoshito Ito, Shunichi Nozawa, Junichi Urata, Takuya Nakaoka, Kaoru Kobayashi, Yoichiro Nakanishi, Kenichi Okada, and Masayuki Inaba. Development and verification of life-size humanoid with high-output actuation system. In *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 3433–3438. IEEE, 2014.
- [11] 川村政貴, 朝岡忠, 熊倉翔平, 水内郁夫. 1a1-l09 コンプレッサ搭載型空気圧駆動筋骨格ヒューマノイド *buenwa* の開発 (ヒューマノイド (1)). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2012, , 2012.
- [12] 畑村洋太郎. 実際の設計 機械設計の考え方と方法.
- [13] 上月豊隆, 茂木陽太郎, 白井拓磨, 浅野悠紀, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸. 筋骨密着構造に着目した人体模倣筋骨格上肢構造の設計. 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 9, pp. 704–711, 2015.
- [14] 中西雄飛. 超多自由度冗長筋骨格ヒューマノイドの全身強調実現システムの構成法. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 博士論文, 2009.
- [15] 袖山慶直. 筋骨格ヒューマノイドにおける多自由度柔軟肩構造と行動実現研究. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 博士論文, 2009.
- [16] Ravi Balasubramanian and Yoky Matsuoka. Biological stiffness control strategies for the anatomically correct testbed(act) hand. In *In Proceesings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 737–742, 2008.
- [17] Ryuma Niiyama, Satoshi Nishikawa, and Yasuo Kuniyoshi. Athlete robot with applied human muscle activation patterns for bipedal running. In *Proc.*

- IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2010)*, pp. 498–503, Nashville, Tennessee USA, Dec. 2010.
- [18] Ashish D Deshpande, Zhe Xu, Michael J Vande Weghe, Benjamin H Brown, Jonathan Ko, Lillian Y Chang, David D Wilkinson, Sean M Bidic, and Yoky Matsuoka. Mechanisms of the anatomically correct testbed hand. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 18, No. 1, pp. 238–250, 2013.
- [19] Ravi Balasubramanian and Yoky Matsuoka. Biological stiffness control strategies for the anatomically correct testbed (act) hand. In *Robotics and Automation, ICRA IEEE International Conference on*, pp. 737–742. IEEE, 2008.
- [20] Vande Weghe M., Rogers M., M. Weissert, and Y. Matsuoka. The act hand: design of the skeletal structure. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation Conference(ICRA)*, 2004.
- [21] Zhe Xu, Weghe M.J.V., Brown B.H., J. Ko, Chang L.Y., Wilkinson D.D., Bidic S.M., and Matsuoka Y. Mechanisms of the anatomically correct testbed(act) hand. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 2011.
- [22] Michael Jantsh, Steffen Wittmeier, Konstantinos Dalamagkidis, and Alois Knoll. Computed muscle control for and anthropomorphic elbow joint. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp. 2192–2197, 2012.
- [23] C. Chou and B. Hannaford. Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles. In *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996.
- [24] Keita Ogawa, Kenichi Narioka, and Koh Hosoda. Development of whole-body humanoid "pneumat-bs" with pneumatic musculoskeletal system. In *Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011.

- [25] Shuhei Ikemoto, Yoichi Nishigori, and Koh Hosoda. Adaptive motion of a musculoskeletal robot arm utilizing physical constraint. In *International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 2011.
- [26] Gill A Pratt and Matthew M Williamson. Series elastic actuators. In *Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 399–406. IEEE, 1995.
- [27] N.G. Tsagarakis, M. Laffranchi, Bram Banderborght, and D.G. Caldwell. A compact soft actuator unit for small scale human friendly robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation Conference(ICRA)*, 2009.
- [28] Sebastian Wolf, Oliver Eiberger, and Gerd Hirzinger. The dlr fsj; energy based design of a variable stiffness joint. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation Conference(ICRA)*, 2011.
- [29] M. Brady et al. Compliant motion, robot motion. In *MIT Press*, 1982.
- [30] N. Hogan. Impedance control -an approach to manipulation pt.1-. In *ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, 1985.
- [31] M.G. Raibert and J.J. Craig. Hybrid position/force control of manipulators. *ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, 1981.
- [32] Thomas Wimbock, Christian Ott, and Gerd Hirzinger. Impedance behaviors for two-handed manipulation: Design and experiments. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation Conference(ICRA)*, 1996.
- [33] Gabe Nelson, Aaron Saunders, Neil Neville, Ben Swilling, Joe Bondaryk, Devin Billings, Chris Lee, Robert Playter, and Marc Raibert. Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing. *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 4, pp. 372–377, 2012.

- [34] 伊東信之. 柔軟さに力強さと素早さを備えた等身大腱駆動ヒューマノイドアームの設計と実現. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 修士論文, 2011.
- [35] D. J. Braun, F. Petit, F. Huber, S. Haddadin, P. van der Smagt, A. Albu-Schaffr \ddagger , S. Vijayakum. Optimal torque and stiffness control in compliantly actuated robots. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, 2012.
- [36] 浦田順一. すばやさとし強さを備えるロボットののための電力系設計と実現. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 博士論文, 2012.
- [37] J. Urata, T. Hirose, N. Yuta, Y. Nakanishi, I. Mizuuchi, and M. Inaba. Thermal control of electrical motors for high-power humanoid robots. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp. 2047–2052, 2008.
- [38] Hashimotoand K., Takezakiand Y., Hattoriand K., Kondoand H., Takashimaand T., and Takanishi A. A study of function of foot’s medial longitudinal arch using biped humanoid robot. In *Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.
- [39] Changhyun Chung and Motomu Nakashima. Development of the upper body of an underwater humanoid robot for research of unsteady fluid forces acting on a swimmer. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on*, pp. 701–706. IEEE, 2012.
- [40] 文部科学省. http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/chousa05/hoken/kekka/k_detail/1303380.htm.
- [41] 経済産業省. 学校保健統計調査 - 平成 22 年度結果の概要. <http://www.meti.go.jp/press/20071001007/20071001007.html>.

- [42] 小原二郎. 人間工学からの発想. 講談社, 1982.
- [43] Yuto Nakanishi, Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Hironori Mizoguchi, Yotaro Motegi, Masahiko Osada, Takuma Shirai, Junichi Urata, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Design concept of detail musculoskeletal humanoid "ken-shiro" - toward a real human body musculoskeletal simulator -. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 1–6, 2012.
- [44] 上月豊隆. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 修士論文, 2013.
- [45] 溝口弘悟. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 修士論文, 2013.
- [46] 浅野悠紀. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 修士論文, 2013.
- [47] A.I.Kapandji, 塩田悦仁. カパンディ機能解剖学 (脊柱・体幹・頭部). 医歯薬出版株式会社, 2008.
- [48] A.I.Kapandji, 荻島秀男, 嶋田智明. カパンディ関節の生理学 (下肢). 医歯薬出版株式会社, 1996.
- [49] A.I.Kapandji, 荻島秀男, 嶋田智明. カパンディ関節の生理学 (上肢). 医歯薬出版株式会社, 1996.
- [50] Shuhei Ikemoto, Fumiya Kannou, and Koh Hosoda. Humanlike shoulder complex for musculoskeletal robot arms. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp. 4892–4987, 2012.
- [51] Toyotaka Kozuki, Hironori Mizoguchi, Yuki Asano, Masahiko Osada, Takuma Shirai, Junichi Urata, Yuto Nakanishi, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Design methodology for thorax and shoulder of human mimetic musculoskeletal

- humanoid kenshiro -a thorax with rib like surface-. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp. 3687–3692, 2012.
- [52] Yoshihiko Nakamura, Katsu Yamane, Ichiro Suzuki, and Yusuke Fujita. Dynamic computation of musculo-skeletal human model based on efficient algorithm for closed kinematic chains. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 2003.
- [53] Kawato M. *From "Internal models for motor control and trajectory planning"*. Current opinion in Neuroscience, Elsevier Science Ltd, 1999.
- [54] Keitaro Kubo, Hiroaki Kanehisa, and Tetsuo Fukunaga. Gender differences in the viscoelastic properties of tendon structures. *European journal of applied physiology*, Vol. 88, No. 6, pp. 520–526, 2003.
- [55] Keitaro Kubo, Yasuo Kawakami, and Tetsuo Fukunaga. Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *Journal of applied physiology*, Vol. 87, No. 6, pp. 2090–2096, 1999.
- [56] K Kubo, H Kanehisa, Y Kawakami, and T Fukunaga. Growth changes in the elastic properties of human tendon structures. *International Journal of Sports Medicine*, Vol. 22, No. 2, pp. 138–143, 2001.
- [57] AV Hill. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, Vol. 126, No. 843, pp. 136–195, 1938.
- [58] Felix E Zajac. Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control. *Critical reviews in biomedical engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 359–411, 1988.
- [59] Scott L Delp and J Peter Loan. A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement. *Computing in Science & Engineering*, Vol. 2, No. 5, pp. 46–55, 2000.

- [60] J M Winters. *Hill-based muscle models: A systems engineering perspective*. Multiple muscle systems: Biomechanics and movement organization, 1990.
- [61] Masahiko Osada, Nobuyuki ito, Yuto Nakanishi, and Masayuki Inaba. Realization of flexible motion by musculoskeletal humanoid “ kojiro ” with add-on nonlinear spring units. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2010 10th IEEE-RAS International Conference on*, pp. 174–179. IEEE, 2010.
- [62] T Miura, TATSUYA Shirai, and TAKUMI Tomioka. Proposal of joint stiffness adjustment mechanism sat. *Nippon Kikai Gakkai Robotikusu, Mekatoronikusu Koenkai Koen Ronbunshu*, Vol. 2002, No. Pt 1, p. 1A1, 2002.
- [63] 上月豊隆, 白井拓磨, 茂木陽太郎, 浅野悠紀, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸. ヒトの筋腱複合体を模した張力制御筋と非線形バネ腱の統合機構による筋骨格ヒューマノイドのコンプライアンス動作の実現. pp. 37–42, 3 2014.
- [64] Toyotaka Kozuki, Takuma Shirai, Yuki Asano, Yotaro Motegi, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Muscle-tendon complex control by “ tension controlled muscle ” and “ non-linear spring ligament ” for real world musculoskeletal body simulator kenshiro. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on*, pp. 875–880. IEEE, 2014.
- [65] 茂木陽太郎, 川崎宏治, 上月豊隆, 白井拓磨, 浅野悠紀, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸. 筋骨格ヒューマノイドにおける頸部筋群負荷を支持可能な剛性可変脊椎構造の開発. *日本ロボット学会誌*, Vol. 32, No. 7, pp. 615–623, 2014.
- [66] Koji Kawasaki Yuki Asano Takuma Shirai Soichi Ookubo Yohei Kakiuchi Kei Okada Toyotaka Kozuki, Yotaro Motegi and Masayuki Inaba. Development of musculoskeletal spine structure that fulfills great force requirement in upper body kinematics. In *IROS2015*, pp. 2768–2773, Oct 2015.
- [67] Johan Davidsson. *BioRID II final report*. Chalmers University of Technology, 1999.

- [68] A Nouredine, A Eskandarian, and Kennerly Digges. Computer modeling and validation of a hybrid iii dummy for crashworthiness simulation. *Mathematical and computer modelling*, Vol. 35, No. 7, pp. 885–893, 2002.
- [69] Feng Luan, King H Yang, Bing Deng, Paul C Begeman, Scott Tashman, and Albert I King. Qualitative analysis of neck kinematics during low-speed rear-end impact. *Clinical Biomechanics*, Vol. 15, No. 9, pp. 649–657, 2000.
- [70] 深代千之. ダイナミックなスポーツ動作を支える反動動作. 体育の科学, Vol. 62, No. 1, 2012.
- [71] Soichi Ookubo Koji Kawasaki Takuma Shirai Kohei Kimura Kei Okada Yuki Asano, Toyotaka Kozuki and Masayuki Inaba. A sensor-driver integrated muscle module with high-tension measurability and flexibility for tendon-driven robots. In *IROS2015*, pp. 5960–5965, Oct 2015.
- [72] 大久保壮一. 筋骨格写像を学習する全身力制御型腱駆動ヒューマノイドの実現に関する研究. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 修士論文, 2015.
- [73] 金子真, 和田充雄, 前川仁, 谷江和雄. ワイヤ駆動ロボットハンドのカサバ系に関する考察駆動系の伝達特性とカサバ系への影響. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 4, pp. 437–444, 1991.
- [74] Werner Kraus, Volker Schmidt, Puneeth Rajendra, and Andreas Pott. System identification and cable force control for a cable-driven parallel robot with industrial servo drives. In *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 5921–5926. IEEE, 2014.
- [75] 京極秀樹. 積層造形技術の現状と応用展開. スマートプロセス学会誌, Vol. 3, No. 3, pp. 148–151, 2014.
- [76] 松浦機械製作所. LUMEX Avance-25, 2015.8.31.
<http://www.matsuura.co.jp/japan/>.

- [77] NASA's Marshall Space Flight Center. Successful NASA Rocket Fuel Pump Tests Pave Way for 3-D Printed Demonstrator Engine, 2015.8.31. <http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2015/successful-nasa-rocket-fuel-pump-tests-pave-way-for-3-d-printed-demonstrator-engine.html>.
- [78] Junichi Urata, Yuto Nakanishi, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Design of high torque and high speed leg module for high power humanoid. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 4497–4502. IEEE, 2010.
- [79] 浦田順一, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸. 高速・高トルク動作のための大出力 2 脚ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 865–871, 2010.
- [80] 上月豊隆, 廣瀬俊典, 中島慎介, 浅野悠紀, 大久保壮一, 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸. 機電要素一体設計に基づく気化熱冷却可能な機能組織体設計法. 第 16 回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要, pp. 2I1–3, 2015.
- [81] 庄司正弘. 伝熱工学. 東京大学出版, 2005.
- [82] 国峰尚樹, 藤田哲也, 鳳康宏. 熱設計の本. 日刊工業新聞社, 2012.
- [83] Nobuo Kimura. Disaster-preventing robot at petroleum production facilities. In *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on*, pp. 309–314. IEEE, 1991.
- [84] Linlin Hou, Joshua Hagen, Xiao Wang, Ian Papautsky, Rajesh Naik, Nancy Kelley-Loughnane, and Jason Heikenfeld. Artificial microfluidic skin for in vitro perspiration simulation and testing. *Lab on a Chip*, Vol. 13, No. 10, pp. 1868–1875, 2013.
- [85] 化学工学会. 化学工学便覧. 丸善株式会社, 1999.

- [86] 川村将矢. 腱駆動ヒューマノイドにおける剛性制御における環境接触適応行動の実現に関する研究. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 学士論文, 2016.
- [87] 長田将彦. 筋骨格ヒューマノイドの多節脊椎体幹の設計と面状筋駆動による強くしなやかな動作実現. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 修士論文, 2012.
- [88] 浅野悠紀. 人体模倣筋骨格ヒューマノイドにおける脚構造の構成法と動作実現. 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 博士論文, 2016.
- [89] 住友電装株式会社. <https://www.sws.co.jp/product/wireharness/>.
- [90] Markus Grebenstein, Alin Albu-Schaffer, Thomas Bahls, Maxime Chalon, Oliver Eiberger, Werner Friedl, Robin Gruber, Sami Haddadin, Ulrich Hagn, Robert Haslinger, Hannes Hoppner, Stefan Jorg, Mathias Nickl, Alexander Nothhelfer, Florian Petit, Josef Reill, Nikolaus Seitz, Thomas Wimbock Sebastian Wolf, Tilo Wusthoff, and Gerd Hirzinger. The dlr hand arm system. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation Conference(ICRA)*, 2011.
- [91] 岩石智志, 室岡雅樹, 植田亮平, 佐藤顕治, 岡田慧, 稲葉雅幸. 物体認識に基づく操縦補助ソフトウェアとヒューマノイド型入力デバイスを統合したタスク実現システム. 第 15 回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要集, Dec 2014.
- [92] Kaneko Kenji, Kanehiro.F, Mitsuharu Morisawaand Kazuhiro, Go.Mand Atsushi.H, and Noriyuki Kanehira. Humanoid robot hrp-4 -humanoid robotics platform with lightweight and slim body-. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2011.
- [93] Ltd Honda Motor Co. Honda new asimo. In *Press release information*, <http://www.honda.co.jp/news/2005/c051213-asimo.html>, 2005.

- [94] Giorgio Metta, Giulio Sandini, David Vernon and Lorenzo Natale, and Francesco Nori. The icub humanoid robot: an open platform for research in embodied cognition. In *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, 2008.
- [95] Iori Kumagai, Kazuya Kobayashi, Shunichi Nozawa, Youhei Kakiuchi, Tomoaki Yoshikai, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Development of a full body multi-axis soft tactile sensor suit for life sized humanoid robot and an algorithm to detect contact states. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2012 12th IEEE-RAS International Conference on*, pp. 526–531. IEEE, 2012.
- [96] Gordon Cheng Philipp Mittendorfer. From a multi-modal intelligent cell to a self-organising robotic skin. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2013.
- [97] Giorgio Cannata, Marco Maggiali, Giorgio Metta, and Giulio Sandini. An embedded artificial skin for humanoid robots. In *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008. MFI 2008. IEEE International Conference on*, pp. 434–438. IEEE, 2008.
- [98] Gerd Hirzinger, Norbert Sporer, A Albu-Schaffer, M Hahnle, R Krenn, A Pascucci, and Markus Schedl. Dlr’s torque-controlled light weight robot iii—are we reaching the technological limits now? In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA’02. IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp. 1710–1716. IEEE, 2002.
- [99] Johannes Engelsberger, Alexander Werner, Christian Ott, Bernd Henze, Maximo A Roa, Gianluca Garofalo, Robert Burger, Alexander Beyer, Oliver Eiberger, Korbinian Schmid, et al. Overview of the torque-controlled humanoid robot toro. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 916–923, 2014.
- [100] Sangok Seok, Albert Wang, David Otten, and Sangbae Kim. Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion. In *Intelligent*

- Robots and Systems (IROS)*, 2012 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 1970–1975. IEEE, 2012.
- [101] Neville Hogan. Impedance control: An approach to manipulation. In *American Control Conference, 1984*, pp. 304–313. IEEE, 1984.
- [102] Erico Guizzo and Evan Ackerman. How rethink robotics built its new baxter robot worker. *IEEE Spectrum*, 2012.
- [103] 兵頭和人, 小林博明. 非線形バネ要素を持つけん制御手首機構の研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 8, pp. 1244–1251, 1993.
- [104] Jin’ichi Yamaguchi and Atsuo Takanishi. Development of a biped walking robot having antagonistic driven joints using nonlinear spring mechanism. In *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 185–192. IEEE, 1997.
- [105] 伊藤佳人, 浦田順一, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸. 衝撃吸収のための腱駆動足首剛性可変機構を備えた大出力脚による跳躍着地動作に関する研究. 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp. 1C2–03, sep 2013.
- [106] Martin Grimmer, Mahdy Eslamy, Stefan Gliech, and André Seyfarth. A comparison of parallel-and series elastic elements in an actuator for mimicking human ankle joint in walking and running. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 2463–2470. IEEE, 2012.
- [107] S Hyon. A motor control strategy with virtual musculoskeletal systems for compliant anthropomorphic robots. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 14, No. 6, pp. 677–688, 2009.
- [108] Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, and Yasuo Kuniyoshi. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pp. 2546–2551. IEEE, 2007.

- [109] Ryuma Niiyama, Satoshi Nishikawa, and Yasuo Kuniyoshi. A biomechanical approach for open-loop bipedal running with a musculoskeletal athlete robot. *Advanced Robotics "Cutting Edge of Robotics in Japan 2012"*, Vol. 26, No. 3–4, pp. 383–398, 2012.
- [110] Ching-Ping Chou and Blake Hannaford. Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol. 12, No. 1, pp. 90–102, 1996.
- [111] Felix E Zajac. robot hand made of rubber. *Critical reviews in biomedical engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 359–411, 1988.
- [112] Shigeo Hirose and Yoji Umetani. The development of soft gripper for the versatile robot hand. *Mechanism and machine theory*, Vol. 13, No. 3, pp. 351–359, 1978.
- [113] Marika Hayashi, Takashi Sagisaka, Yui Ishiza, Tomoaki Yoshikai, and Masayuki Inaba. Development of functional whole-body flesh with distributed three-axis force sensors to enable close interaction by humanoids. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3610–3615. IEEE, 2007.
- [114] Shinya Takamuku, Atsushi Fukuda, and Koh Hosoda. Repetitive grasping with anthropomorphic skin-covered hand enables robust haptic recognition. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3212–3217. IEEE, 2008.
- [115] Felix E Zajac. soft robotics 的な something. *Critical reviews in biomedical engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 359–411, 1988.
- [116] Felix E Zajac. robot hand made of rubber. *Critical reviews in biomedical engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 359–411, 1988.

付 録 A

業績リスト

A.1 学術雑誌

[1] 上月豊隆, 茂木陽太郎, 白井拓磨, 浅野悠紀, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸: 筋骨密着構造に着目した人体模倣筋骨格上肢構造の設計, 日本ロボット学会誌, Vol.33 No.9, p50-57, 2015

A.2 国際学会

[1] Toyotaka Kozuki, Hironori Mizoguchi, Yuki Asano, Masahiko Osada, Takuma Shirai, Junichi Urata, Yuto Nakanish, Kei Okada and Masayuki Inaba: Design methodology for thorax and shoulder of human mimetic musculoskeletal humanoid kenshiro -a thorax with rib like surface- in Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1295–1302, 2012.

[2] Toyotaka Kozuki, Yotaro Motegi, Takuma Shirai, Yuki Asano, Junichi Urata, Yuto Nakanish, Kei Okada and Masayuki Inaba: Design of Upper limb by Adhesion of Muscles and Bones -Detail Human Mimetic Musculoskeletal Humanoid Kenshiro- in Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.935–940, 2013.

[3] Toyotaka Kozuki, Takuma Shirai, Yuki Asano, Yotaro Motegi, Yohei Kakiuchi, Kei Okada and Masayuki Inaba: Muscle-tendon complex control by “ Tension controlled Muscle ” and “ Non-linear Spring Ligament ” for real world musculoskeletal body simulator Kenshiro” in Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.875–880, 2014.

[4] Toyotaka Kozuki, Yotaro Motegi, Koji Kawasaki, Yuki Asano, Takuma Shirai, Soichi Ookubo, Yohei Kakiuchi, Kei Okada and Masayuki Inaba: Development of Musculoskeletal Spine Structure that Fullfills Great Force Requirements in Upper Body Kinematics” in Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.5960–5965, 2015.

A.3 国内学会

[1] Toyotaka Kozuki, Yuki Asano, Yotaro Motegi, Takuma Shirai, Junichi Urata, Yuto Nakanish, Kei Okada and Masayuki Inaba: Kenshiro:Full body Tendon-driven Musculoskeletal Humanoid Robot in 第 19 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.37-42, 2014.

A.4 シンポジウム

[1] Toyotaka Kozuki, Yuki Asano, Yotaro Motegi, Takuma Shirai, Junichi Urata, Yuto Nakanish, Kei Okada and Masayuki Inaba: Design and Control approach for Measuring Biological Information by Detail Human Mimetic Musculoskeletal Humanoid Kenshiro, in Singapore-Japan Workshop for Young Robotics Researchers, in Singapore, 2014

[2] Toyotaka Kozuki, Yuki Asano, Yotaro Motegi, Takuma Shirai, Junichi Urata, Yuto Nakanish, Kei Okada and Masayuki Inaba: Kenshiro:Full body Tendon-driven Musculoskeletal Humanoid Robot, in Robots on Tour, Zurich, 2013.

A.5 受賞

[1] Toyotaka KozukiIEEE Robotics and Automation Society (RAS) Japan Chapter Young Award,in Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation

付 録 B

ロボット基礎技術論

ロボットとは大まかに言ってそれを支える構造体，駆動するためのアクチュエータ，制御するための回路・ソフトウェアからなる．高度に多様な部品を集積し構築されるロボットは，一般的に

- 小型化の要求が大きい
- 自由度수에比例しケーブリングが増加する

といったことから，比較的様々な機械要素の安全率が犠牲にされがちである．これは恒常的に運用可能なシステムからかけ離れ，往々にして短命なロボットの研究開発に結びついてしまっているという事が出来る．本章では本研究において遭遇した課題，その対策等ロボットの基礎的な技術についての商會を行う．¹

¹ 定格値とは何か：

メーカ保証の定格値というのも特定条件下での検証結果を受け導きだされた推奨値であることに違いはない．そのため，利用する条件まで厳密に制御し・チューニングし，定格以上で性能を引き出すという上級者の利用法も存在する．例えば urata システムでは FET の定格が流れる電流によって生じる熱によって決まることを受け，水冷式冷却システムにより常に FET の温度を低く保つことで長時間の高負荷運用を可能にしている．

また異分野での話になるが，工作機械では加工軸周りの軸受を定格回転数以上で利用する場合がある．一般的には高速回転には非接触すべり運動の空気軸受，磁気軸受等が良いとされるが，とある工作機械メーカでは，加工時の剛性確保の観点から転がり運動のアンギュラ玉軸受 2 個を対向させ利用するという手段を採用している．主軸回転速度が数万 [min⁻¹] という高速回転を常時続けることに加え大きな負荷に耐える設計を実現するために，組立温度環境・圧入する機械加工精度の緻密な調整をすることで，定格を超えた軸受の利用を可能にしている例も存在する．

B.1 ケーブリング

特にこれは人体構造を極限まで追求し設計された臆志郎について言うことが出来る．既存の電子回路等では厳密に定義された利用に関する規格が存在するが，これに従わない範囲での利用法はノイズ，過電流，機能不良といったバグの温床となりえ，システム全体の信頼性低下につながる．

特にケーブルは非常に重要な役割を担う．以下の図 B.1 図 B.5 に本研究で設計し特注したケーブルの図面を示す．

B.1.1 サーボ線

本節では本研究で設計した，以下の要求仕様を満たすケーブルについて述べる．

1. 細い；線径が可能な限り細いものがよい
2. 柔軟性：取り回しが簡単のように柔らかさを有するもの
3. 耐熱性：過負荷時，高温部品との接触時に被覆が溶けにくいもの
4. 耐摩耗性：他のケーブル・部品との摺動を繰り返しても大丈夫なもの

以上の使用から選定されたケーブルを図 B.1 に示す．

芯線についてはその線径によってケーブルの許容電流は決定するが，本システムでは 1 モータモジュールの定格電流を $5.0[\text{A}]$ と設定し，これを満たす 0.3sq のケーブルを選んだ．

またケーブルの柔軟性は芯線を構成する束状導線の線径 1 本 1 本の径，被覆素材に依存する．組み立て時の作業性を考え $0.08[\text{mm}^2]$ を 60 本のもの，被覆素材は耐熱・耐摩耗性を有しつつ PTFE より柔軟な ETFE を採用した．²

² $0.08[\text{mm}^2]$ を下回る線径の導線はワイヤーストリップ時に容易に破断しやすく，人的ミスにより返ってケーブルの抵抗値を上げる要因になると考えこの径とした．

2014/11/25

許容電流表 (空中一条敷設の場合)

製品記号	EFK-1	導体外径(標準値)	0.7 mm
芯線構成	60/0.080	導体直流抵抗値(標準値)	62.73 Ω /km
芯線材質	TA	ケーブル芯数	1 芯
絶縁体	ETFE	定格温度(設定値)	150 $^{\circ}\text{C}$
仕上外径(標準値)	1.1 mm		

周囲温度($^{\circ}\text{C}$)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
許容電流(A)	10.00	9.70	9.30	8.90	8.60	8.20	7.70	7.30	6.80	6.30	5.80

周囲温度($^{\circ}\text{C}$)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
許容電流(A)	5.10	4.40	3.60	2.50	0.00						

周囲温度($^{\circ}\text{C}$)	220	230	240	250
許容電流(A)				

注意：本データは、計算値であり、保証値ではありません。
 使用の際には、安全値の設定をしてください。
 関連公的規格 (JSC 168-E)

Ver. 1.6 11.07.01

2014/11/25

許容電流表 (空中一条敷設の場合)

製品記号	EFK1-2C	導体外径(標準値)	0.7 mm
芯線構成	60/0.080	導体直流抵抗値(標準値)	62.73 Ω /km
芯線材質	TA	ケーブル芯数	2 芯
絶縁体	ETFE	定格温度(設定値)	150 $^{\circ}\text{C}$
仕上外径(標準値)	1.1 mm		

周囲温度($^{\circ}\text{C}$)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
許容電流(A)	6.00	5.80	5.60	5.30	5.10	4.90	4.60	4.40	4.10	3.80	3.40

周囲温度($^{\circ}\text{C}$)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
許容電流(A)	3.10	2.60	2.20	1.50	0.00						

周囲温度($^{\circ}\text{C}$)	220	230	240	250
許容電流(A)				

注意：本データは、計算値であり、保証値ではありません。
 使用の際には、安全値の設定をしてください。
 関連公的規格 (JSC 168-E)

Ver. 1.6 11.07.01

☒ B.1: Custom ordered servo cable.

B.1.2 信号線

本節では本研究で採用した信号線用のケーブル・コネクタについて述べる。

旧来の問題

本論文で取り扱うロボットシステムを構築する上では USB ハブ間，USB-H8 間，H8-FPGA 間 (FPGA 間) の 3 種類ケーブルが存在し，基本的に GND，VCC，差動信号線ペア，リセット線から構成されるが，ケーブルの小型化ばかりが注目された結果，多種多様な問題からロボットの低信頼性につながるという問題を抱えていた。

むやみに細いケーブルが利用され，カシメの組立ミス，誤配線，コネクタハウジングの規格外ケーブルの使用といった人為的なミスが図 B.2 JST³への調査結果から判明した。

また，ドライバ基板搭載の電圧センサの値を計測した結果図 B.4 の結果が得られ，各基板の電圧不足による起動失敗，供給電力不足によるエラーが結論づけられた。また接触不良に起因し，実験中の振動が与える信号線のセンサ値の暴走，基板のリセット，通信トラブルと言った問題も発生しておりこの解決が望まれていた。

特注ケーブル 1:AWG28:導体 0.3mm

これらの問題を受け，FPGA01D で利用している SH コネクタの規格通りの正しい線形のケーブル (導体 AWG28，線形 0.8[mm]) を設計し，これに変更し，コネクタへのパテ盛りによる耐振動性対策をした結果 USB ハブ間，USB-H8 間，H8-FPGA01D 間 (FPGA 間) の通信は圧倒的安定性が確保されるようになった。しかし依然デジチェーン方式で電源供給される FPGA01D の末端部の電圧降下は完全に解決するには至らなかった。

特注ケーブル 2:AWG26:導体 0.5mm

前節の終わりで述べた問題の原因の一部は SH コネクタ自体にあるといえた。また張力計測用のロードセルのアナログ信号の振動時の値の不安定さを受け，FPGA01D

³日本圧着端子製造株式会社
<http://www.jst-mfg.com/>

で採用されていた SH コネクタは全廃することを決定し、代わりに FPGA02D では GH コネクタを採用することとした。これにより通信安定性、アナログ信頼の振動時の不安定性は全て解消されることとなった。図 B.5 に示す本ケーブルは、導体の線径は GH の規格に合わせ構成し、差動信号線ペアはノイズ対策としてアルミポリエステル膜を巻き、そのノイズエネルギーをドレイン線を通じてグラウンドに落とす利用をする利用法とした。

JST

(4/6)

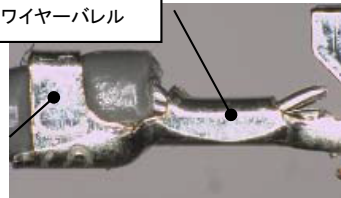
抵抗値の異常発生極についてハウジング内部のコンタクトを取り出し、外観確認を行った結果、以下の異常が認められた。

また、適用電線がテトロン糸入りめっき無し銅線であることが確認された。

※心線径 0.074(×7 本)より AWG #32 相当。

インシュレーション
パレル

ワイヤーパレル



参考: 正常品の圧着外観

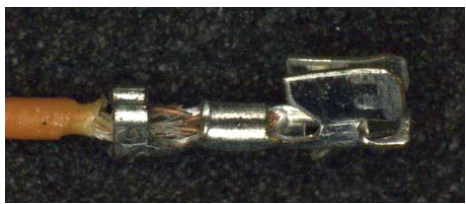
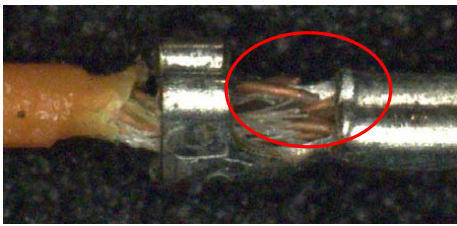


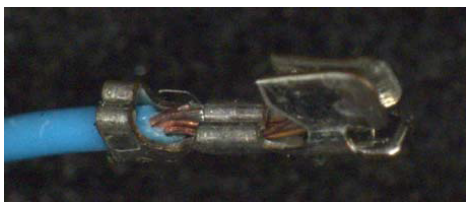
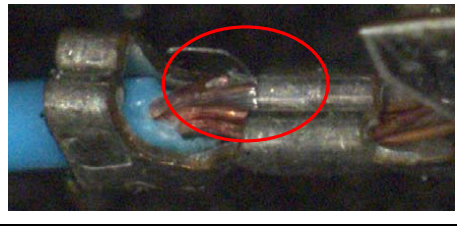

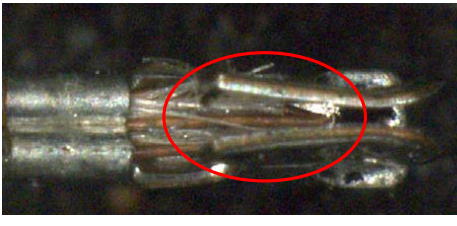
不具合現品① A側 茶色	拡大写真
	
※赤丸部に導体の心線切れが認められる。また、インシュレーションパレルから被覆が外れている。	
不具合現品① B側 青色	拡大写真
	
※赤丸部に導体の心線切れが認められる。また、インシュレーションパレルから被覆が外れている。	
不具合現品② A側 青色	拡大写真
	
※赤丸部に導体の心線切れが認められる。	
不具合現品② A側 白色 3	拡大写真
	
※心線の突き出しが長く、嵌合部内まで達している。また、インシュレーションパレルから被覆が外れている。	

図 B.2: Survey results from JST. The cause of bad electrical contact has been detected.

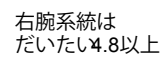
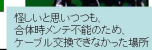
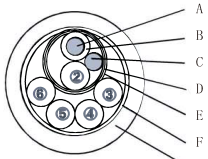




Figure B.3: Measured voltage of each FPGA in Kenshiro upper half of body. Bad cables, connectors leading to lower voltage supply to the boards can be seen.



☒ B.4: Measured voltage of each FPGA in Kenshiro lower half of body. Bad cables, connectors leading to lower voltage supply to the boards can be seen.

試作設計No.	X-62229	品 名	SOF-1PWW-4WV AWG26	ユーザー名	東京大学
[断面図] 	特 性	規 格 値		作成日	2014/9/10
				原資料No.	414300248-01
				営 業	鬼崎 (東京)
				見積ロット	NEV単価
	定格温度			200m	
	定格電圧				
	見積承認	出図承認	設計者		
				最低単価	
				見積番号	
	構 造				
A	導体	スチメット軟銅線 28/0.08			0.5
B	絶縁体	軟質フッ素樹脂 0.15mm 白, 緑, 黒, 赤, 黄			0.8±0.1
C	撚り	2C+Dレイ線 (スチメット軟銅線28/0.08) ①白②緑			1.6
D	テープ	アルミ箔 リエステル			1.7
E	テープ	ポリエステル			1.8
	撚り	1PWW-4C(S) ③黒④赤⑤赤⑥黄			2.9
F	テープ	紙 0.05			3.1
G	シース	PVC 0.4mm			3.9±0.5

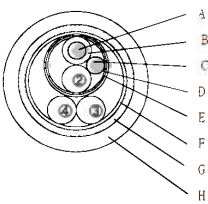
試作設計No		X-62780	品 名	SOF-1PWW-2WV AWG26	ユーザー名	東京大学
<div>[断面図]</div> 			特 性	規 格 値	作成日	2015/1/9
					原資料No	414300368-00
					営業	鬼崎 (東京)
					見積ロット	NEV単価
			定格温度		100m	
			定格電圧			
			見積承認	出図承認	設計者	
				技術 2015/01/09 加藤	技術 2015/01/09 岩瀬	
					最低単価	
					見積番号	
構 造						外径(MM)
A	導体	スチメット軟銅線 28/0.08				0.5
B	絶縁体	軟質フッ素樹脂 0.15mm 白, 緑, 黒, 赤				0.9±0.1
C	撚り	2C+Dレイ線 (スチメット軟銅線28/0.08) ①白②緑				1.6
D	テープ	アルミ箔 リエステル				1.7
E	テープ	ポリエステル				1.8
	撚り	1PWW-2C(S) ③黒④赤				2.6
F	テープ	紙 0.05				2.8
G	テープ	スチメット軟銅線 16/0.08				3.2
H	シース	PVC 0.4mm				4.0±0.5

図 B.5: Custom ordered H8-FPGA/FPGA-FPGA cable, USB cable.

B.1.3 アナログセンサのコネクタ選定

ケーブルと同様に，コネクタについても等身大の筋骨格ヒューマノイドに必要な信頼性の確保をすべく再選定を行った．信号線についてはSH コネクタ (AWG28) を廃止し，GH コネクタ (AWG26) と ZH コネクタ (AWG26) を採用することで信頼性の確保を図った．

FPGA01D 構成の腱志郎では張力制御の際には，動作時の振動により張力値の振れ，計測不良，暴走が問題となっていた．またロードセルのアナログ生値の経時変化が問題となっており，1 週間ごとにキャリブレーションが必要ということが問題となっていた．GH コネクタ化を始めとした 4.4 節で述べた改良により，実験中に安定した超緑値の計測，経時変化の異常変化のない安心した運用が可能になった．図 B.6 にテスト運用したロードセルのセンサ生値とキャリブレーション後の張力値の経時変化の関係を示す．新構成の FPGA02D では 6 ヶ月後も異常な変化がなく運用可能なことが確認された．

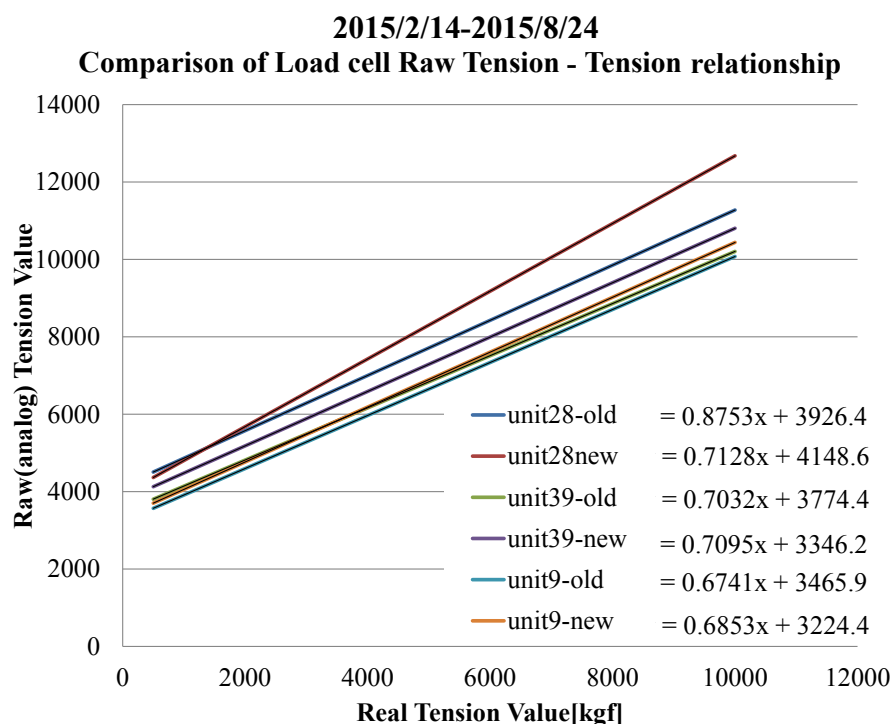


図 B.6: Six examples of analog value(Raw Tension) and Real tension value(Tension). Line with "-old" represents the measured result from 2015/2/14, and line with "-new" represents the measured result from 2015/8/24.

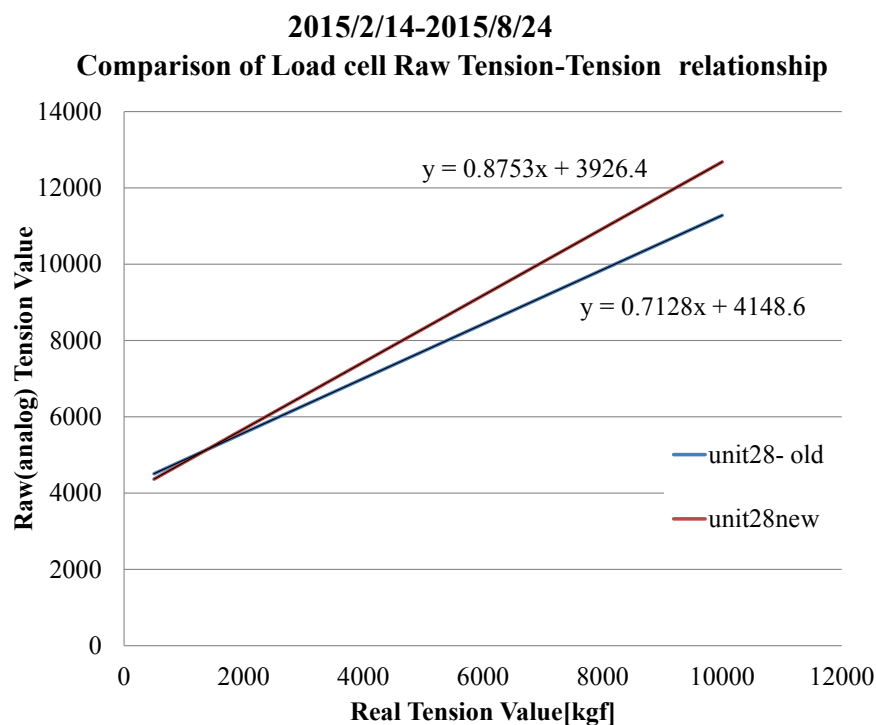


図 B.7: One example of one of sensor value that changed over time. As the relation between Raw Tension and Tension around low tension region does not have large margin, safe operation can be guaranteed.

B.2 低ギア比化への要求

高ギア比構成では，高い応答性が求められる場合に速度に限界が有り追従できない．モータの低ギア比化，低い時定数モータを選定することにメリットがある一方で，発熱による熱損をしやすいというデメリットもある．

モータ選定時定数的観点

機械的時定数 τ : 規定負荷回転数の 63.2% に達するまでの時間

慣性モーメント : J

抵抗値 : R

トルク定数 : K_t

逆起電力定数 : K_e

とした場合に , $\tau = JR/K_t K_e$

$\tau_m = JR/K_t K_e$

と表される．

表 B.1: Characteristic of Motor

type of motor	EC22 100W 24V
Time constant	1.84 [ms]
maximum idling speed	29500 [rpm]
Torque constant	7.75 [mNm/A]
type of motor	EC22 90W 24V
Time constant	1.48 [ms]
maximum idling speed	16300 [rpm]
Torque constant	14 [mNm/A]
type of motor	EC22 120W 24V
Time constant	1.65 [ms]
maximum idling speed	16900 [rpm]
Torque constant	13.5 [mNm/A]

GP22HP: 腱志朗, 腱悟朗で採用のギアヘッド

最大効率 70%(3 段だと 59%)

連続最大トルク 2.4[Nm]($T=51.02[\text{kgf}]$ の張力)

断続最大トルク 3[Nm]($64.8[\text{kgf}]$ の張力は 1 秒以内なら OK)

プーリ径を考慮しこれが発揮可能な最大張力は以下の式から計算される . $T \cdot r (6 \cdot 10^{-3}) \cdot 9.8 = 3[\text{Nm}]$

$T=51.02[\text{kgf}]$ ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot 10 = \text{Nm}$)

また, ここで例として腱志朗と腱悟朗の三角筋に利用されているモータ・ギアの構成から回転数を比較すると同じ電圧条件下で,

100W 128:1 は 230[rpm](144.4[mm/s])

90W 29:1 は 562[rpm](352[mm/s])

と 2 倍以上早いものとなっている .

付 録 C

柔軟性の定義とその採用法

駆動系・外装系がしっかりとしたシステムで、環境のセンシングが可能になることで初めてヒューマノイドロボットは様々な環境の中で動作生成が可能となるといえる。この自己の身体と環境との物理的な関わり合いで重要となる概念として「柔軟性」という言葉は理解することが出来、以下ではヒューマノイドが外力と向き合うにはこういった構成アプローチがあり、こういった構成要素を必要とするかについてその概要を紹介する。

C.1 センサフィードバックによるソフトウェア柔軟性

ヒューマノイドロボットが環境中での動作生成をする際には、ロボット自身の体内パラメータを把握すること、環境を把握すること、環境との間の運動を把握することが必要である。ロボットと環境との間に力学的なインタラクションが存在する場合、そのインタラクションによりロボット身体には接触力、内力が発生するが、必要な作業に応じてその力を制御する必要がある、そのためにロボットには環境検知のためのセンシングが必要となる。

HRP 系ロボット、ASIMO 等の既存の多くヒューマノイドロボット [92][93][94] は環境との接触を足と手で主に想定しており 6 軸力センサを各四肢に内蔵する形を取る。これは足や手からの力は精度よく計測できる一方、手先・足先以外からの環境反力を検出できず、それらの情報なしに環境中での多様な動作生成をすることは難しいといえる。

また、全身分布型のセンサをロボットの表面に設置することで、環境との接触を検出する手法も存在する。[95],[96],[97] これらは環境と接触の検知に優れ、ものを抱きかかえるような物体操作を実現可能な一方で、各関節のへ負荷を評価することは難しく、全身のダイナミクスを考える力制御のためにはまた別のセンシングが必要となる。

各関節にトルクセンサを設置した構成のロボットを利用することで、それぞれの関節トルクを高精度で計測する手法 [98][99] や、トルクセンサを用いずモータドライバの電流値で proprioceptive sensing することでトルクを計測する手法 [100] も存在し、このようにトルクを利用した外力に対する外力に対応するアプローチの研究も行われている。

C.2 ハードウェアによる駆動系の柔軟性

ヒューマノイドにおけるソフトウェアによる柔軟性で最も一般的なインピーダンス制御では外力に対するロボットの取る手先軌道を物理モデルにより記述することで過度な接触反力，関節負荷トルクを決定するものである [101]．ロボットに外力 f が加えられた時その位置応答 x は，以下で与える．

$$f = m\ddot{x} + \mu\dot{x} + kx \quad (\text{C.1})$$

ここで， μ は粘性抵抗， k は剛性抵抗と呼ばれ，これをラプラス変換すると

$$F = (ms^2 + \mu s + k)X \quad (\text{C.2})$$

$$(\text{C.3})$$

が得られ，

$$Z = \frac{F}{sX} = ms + \mu + \frac{k}{s} \quad (\text{C.4})$$

の Z をインピーダンス，

$$C = k^{-1} \quad (\text{C.5})$$

と C をコンプライアンスと呼ぶ．

式 C.3 に従い，ロボットの手先部がインピーダンス制御されているとした場合，初期の基準点での力 f_0 は δx だけ移動した場合 δf だけ増加する．ロボットのインピーダンスが小さい時 δf は小さく，環境からの反力により，ロボットは抵抗なく容易に動かせることを意味するが，現実的にはアクチュエータの出力，コンピュータの制御周期に限界があることからインピーダンスをゼロにすることは不可能である．

そのため，現在存在するヒューマノイドロボットの多くはアクチュエータにモータを用い，減速機にハーモニックギアを採用した既存の産業用ロボット技術を利用したことが多い [92][93][94] が，こうした構成に限らずロボットが環境と接触する際には

1. 関節トルクの過負荷による減速機の損傷

2. 関節トルクの過負荷によるアクチュエータの損傷

といったことが問題となる。

これを解決することを目的とした柔軟性実装のアプローチとしては、アクチュエータと動力伝達の間に直列に弾性要素を用いる手法や、コンプライアンスを有する駆動系にを用いる手法等があり、以下本節ではその手法について言及する。

C.2.1 力伝達要素のメカニカルな粘弾性要素による柔軟性

撃力や急激な力変化に対応する手段としてはアクチュエータと動力伝達の間に直列に弾性要素を用いる Series Elastic Actuator[26] が知られる。これにより撃力からのアクチュエータ、減速機への関節負荷トルクを軽減する手法が知られる。このアプローチによる柔軟性の獲得をする一方で、リンクの剛性が下がり位置制御性が難しいとされていたが近年多くの研究機関で様々な動作生成をするに至っている [27][90]。

またこの手法は関節負荷トルクの低減のみならず、有効なエネルギーの蓄積・開放や、力制御の高精度化・発振防止といったことを目的として幅広く利用されている [90][28][35] [27] [102]。

また、腱駆動方式における SEA の利用は、非線形バネを拮抗させることにより関節剛性を調整することが可能で、簡易な構成で関節剛性を制御することの出来る構成として知られている [103] [104] [8][105]。

これらはアクチュエータと直列に、力を伝えるリンクの間に弾性要素を設置する例であったが、人間の筋モデル [57][58] を参照するに人間の筋は粘弾性要素をアクチュエータ (収縮要素) と並列にも備えていることが知られており、歩行・走行等の動作の最大筋張力・消費エネルギーに影響を与えることが明らかになっている [106]。

1

¹ Energy, max tension trajectories comparing
1:Direct Drive, 2:SEA, 3:PEA, 4:SEA+PEA
<https://www.youtube.com/watch?v=iAsrOBm8uTI>

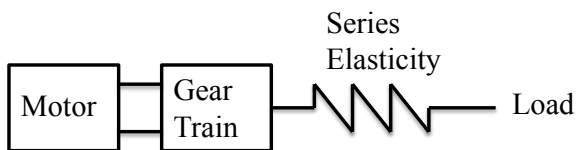


図 C.1: Block diagram of Series Elastic Actuator.

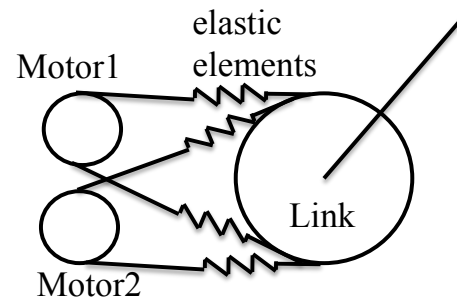


図 C.2: Bidirectional Antagonistic Variable Stiffness(BAVS) drive principle using tendons. One application of SEA.

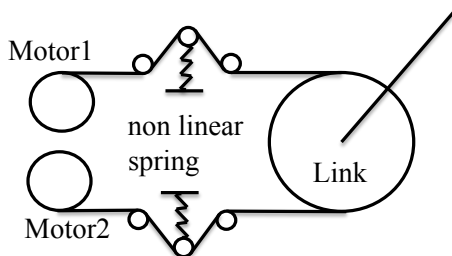


図 C.3: Mechanism of SEA in tendon driven mechanism using Non Linear Tensioner(NST).

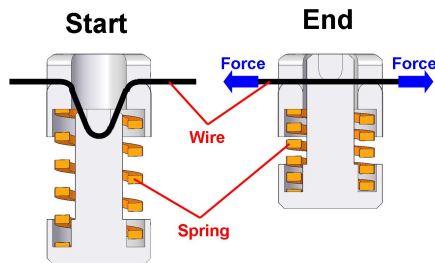


図 C.4: Mechanism of NST. The non linear specification of the spring enables adjustable stiffness performance of the link.

C.2.2 コンプライアンスを有するアクチュエータを利用する柔軟性

そもそもロボットの駆動に，アクチュエータ自体に粘弾性特性を有するものを用いることで急激な関節負荷トルクにより破損しにくい駆動系によるシステムを構築するという手法も存在する．

油圧を採用したヒューマノイドロボットアプローチはコンパクトにして減速機なしで高出力が可能な構成として知られ，外力に対してアクチュエータが破損しにくいとして知られる．その制御性が難しいとされてきたが，こちらも近年多くの研究機関で様々な動作生成・柔軟性の発揮をするに至っている [33][107]．

また空気圧人工筋を利用する手法は

- 優れた出力重量比
- 過負荷に優れ，高いコンプライアンスを有する
- アクチュエータ自体が軽量である
- 圧力制御により容易に力制御が可能

といった特性を持ち，これを利用した等身大ヒューマノイドによる様々なダイナミックな動作生成も実現している [108][109][24][50]．

一方で，コンプレッサやタンク等の周辺機器まで考慮すると重量が大きく自立型ロボットにするのが難しい，位置制御が困難，非線形性やヒステリシスにより制御が困難であるといった課題を有する．

発生力・内圧・長さ変位の関係は以下のように説明される [110]．

$$F = P(a(1 - \epsilon)^2 - b) \quad (\text{C.6})$$

$$= P\left(a\left(1 - \frac{L_0 - x}{L_0}\right)^2 - b\right)$$

$$= P\left(a\left(\frac{x}{L_0}\right)^2 - b\right) \quad (\text{C.7})$$

$$(\text{C.8})$$

ただし,

$$a = \frac{3\pi}{4} D_0^2 \cot^2 \theta \quad (\text{C.9})$$

$$b = \frac{\pi}{4} D_0^2 \csc^2 \theta \quad (\text{C.10})$$

$$\epsilon = \frac{L_0 - x}{L_0} \quad (\text{C.11})$$

式 C.7 を変位 x について偏微分することで, 剛性値 k が式 C.12 のように表される.

$$\begin{aligned} k &= \frac{\partial F}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} P \left(a \left(\frac{x}{L_0} \right)^2 - b \right) \\ &= \frac{2a}{L_0} P x \end{aligned} \quad (\text{C.12})$$

すなわち, 剛性 k は内圧 P と変位 x に比例し, 正圧駆動人工筋は一定内圧下で非線形ばねとして機能する. ただし, 各変数は表 C.1 のように定める.

表 C.1: Paramter involved in the equation.

Parameter	explanation
F	Contraction force
p	pressure
D_0	diameter of tube
θ	angle of filament with axial direction
l	length of rubber tube
l_0	initial length of rubber tube

C.3 多自由度・多節構造による柔軟性

ロボットの自由度を増やすことによって獲得される柔軟性も存在する. 前節のタコロボットの自由度は定義不可能であったが, 例としてヘビ型ロボット [111] について考える. これは複数の可動部を有する構造によって蛇の形状・運動を模擬するというものであるが, 多節構造によって運動時の関節負荷トルクは各関節に分散され,

また移動時の環境との接触面を考えると，複数のリンクを有することで接触点ごとの環境との接触反力を下げることが可能になっている．

また広瀬らのソフトグリップ [112] に注目すると，前述の原理をヒューマノイドロボットに応用した例であると言える．多自由度リンク構造の中でも末端のに行くに従い弱いトルクを発生させ物体を包みこむことで各接点での接触反力を均等に分散させ柔らかく物体を把持することを可能にするというものである．

人間の身体に注目すると，手首・足首のように複数の骨の連結により構成される関節は自由度の定義が難しいが，その自由度は全身で 200 程であると言われ，このように人体に習い，超多自由度構造を利用することで柔軟性の獲得につながると考えられる [43] ．

C.4 外装による柔軟性

自己身体の破損を防ぐことを目的としてロボットには外装が必要であり C.4 節で述べたように，

環境との接触時に考慮しなくてはならない問題として，いかに環境との接触するかという問題がある．従来ヒューマノイドロボットは床に足を着き，手でタスクをこなすという構成を取ることが多かったものの，人間のような環境と全身を接触させながらの運動を行う場合，その接触点における強度の確保，内部部品の保護法というのは重要な問題となる．特に限られた空間の中に骨格，アクチュエータ，センサ，電装系，ケーブル等を内蔵する必要があるヒューマノイドロボットは一般的に多様な部品が高度に集積される一方で小型化の要請が強く，強固で大きな外装は忌避されがちだが環境との多様な動作を行う上で外装は避けることが出来ない要素である．

身体の破損を防ぐことを目的としたロボット設計の手法としてはモノコック設計の強固な外板に，構造体・外装としての機能を持たせる手法 [10]，金属フレームを骨格に取り付けそれをハードポイントとする手法 [33] や固いシェルを保護したい部品を覆う形で設置する手法 icub[94] などが存在する．人との積極的なコンタクト，幅広い衝撃から身体を守ることを目的とし，全身の外装を発泡ウレタン・空気といった柔軟素材で構成する設計 [113][114] による柔軟性も存在する．これはロボットが

環境と接触する際に柔らかい外装の層によって、環境との接触面を広げ単位面積当たりの接触反力を下げ負荷を分散する同時に、外装による緩衝作用で関節負荷トルクを減少させることを可能にするものである。

C.5 身体変形を許すソフトロボティクスの柔軟性

これまで挙げた例を考えるに、そもそも骨格・駆動系に採用されるメカニズムは剛性が高いものが多いことが問題であるとするソフトロボティクスといわれるアプローチが存在する。変形するゴムを利用し身体を構成し、これに空気による圧をかけることで体を変形させ運動させる、生物のタコを模した構成 [115] を取ることで、構造体、アクチュエータ、外装の区別なくロボット身体を構成するというものである。²

ソフトロボティクスではないが、身体が変形することを許すとしてヒューマノイドロボットを構成するアプローチの例としては Darpa Hand [116] がある。これは関節部にゴム素材を用い、駆動に腱駆動を採用することで、過大な関節深トルクを受けても破損させないというものであり、簡易な構成により精密な機械工学に基づき設計されたアプローチ [90] 以上の柔軟性を獲得しているといえる。

C.6 連続的動作から表現される柔軟性

動きが連続的でそれ自体が滑らかという場合、一般的に柔軟な動きと表現される。

²ムカデの自由度は定義可能かもしれないが、タコ・ミミズの自由度は定義することが出来ない。まあ膝関節は膝をピッチ軸方向に曲げる角度によってその回転中心が移動していくが、これを1自由度としてしまうのもいささか強引である。そういった意味で自由度という考え方は実世界に存在するものの運動を記述する上で、情報を劣化させた非常に簡易化された概念なのかもしれない。

C.7 本研究で取り扱う人体構造に学ぶ柔軟性

これまで柔軟性とは何かを議論し，どのようにすればそれが実現可能かについて議論してきた．本研究は人体構成に学びヒューマノイドロボットを構築し，人間には可能であるもののヒューマノイドには実現されていない柔軟性を取り入れることによる動作実現を目指すものであり，本章での内容を踏まえ，1.2 節の柔軟性目標を設定している．

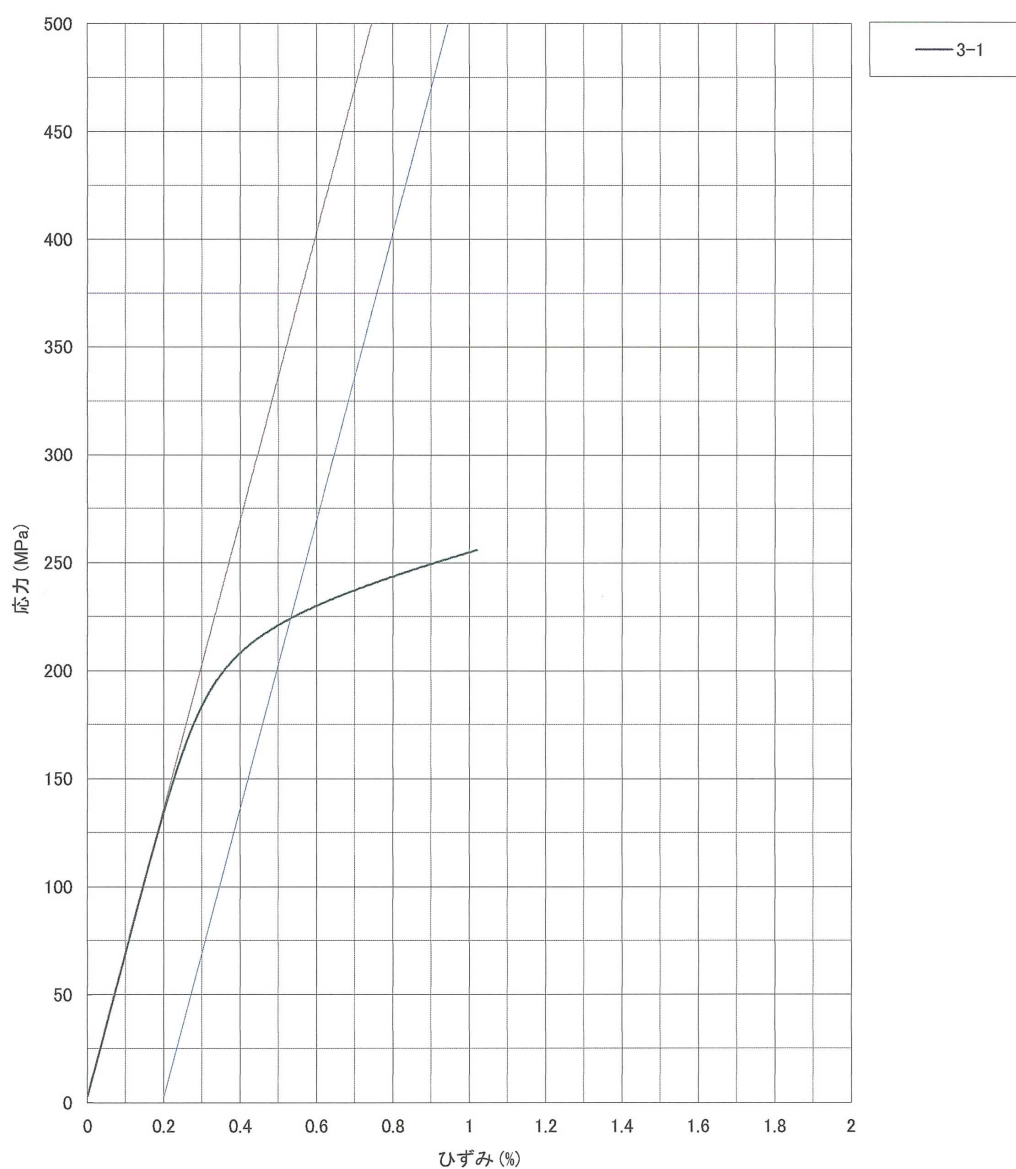
付 録 D

ポーラス構造の引張試験

本章では第 5 章にて試験し，構造体として用いることを決定したポーラス構造について，神戸工業試験場にて行った強度試験の結果を示す．

株式会社 神戸工業試験場
 茨城事業所試験課
 〒319-1231 茨城県日立市留町1007-1
 TEL(0294)-53-9142 FAX(0294)-53-8155

応力-ひずみ線図



コメント
 報告書番号 I115-0992
 試験機 5582Q1853 (E2-016)
 材質 Al-10% Si-0.3% Mg
 試験温度 R.T(23°C)
 試験速度
 耐力迄 10MPa/sec
 耐力以降 30%/min

図 D.2: Tensile test2.

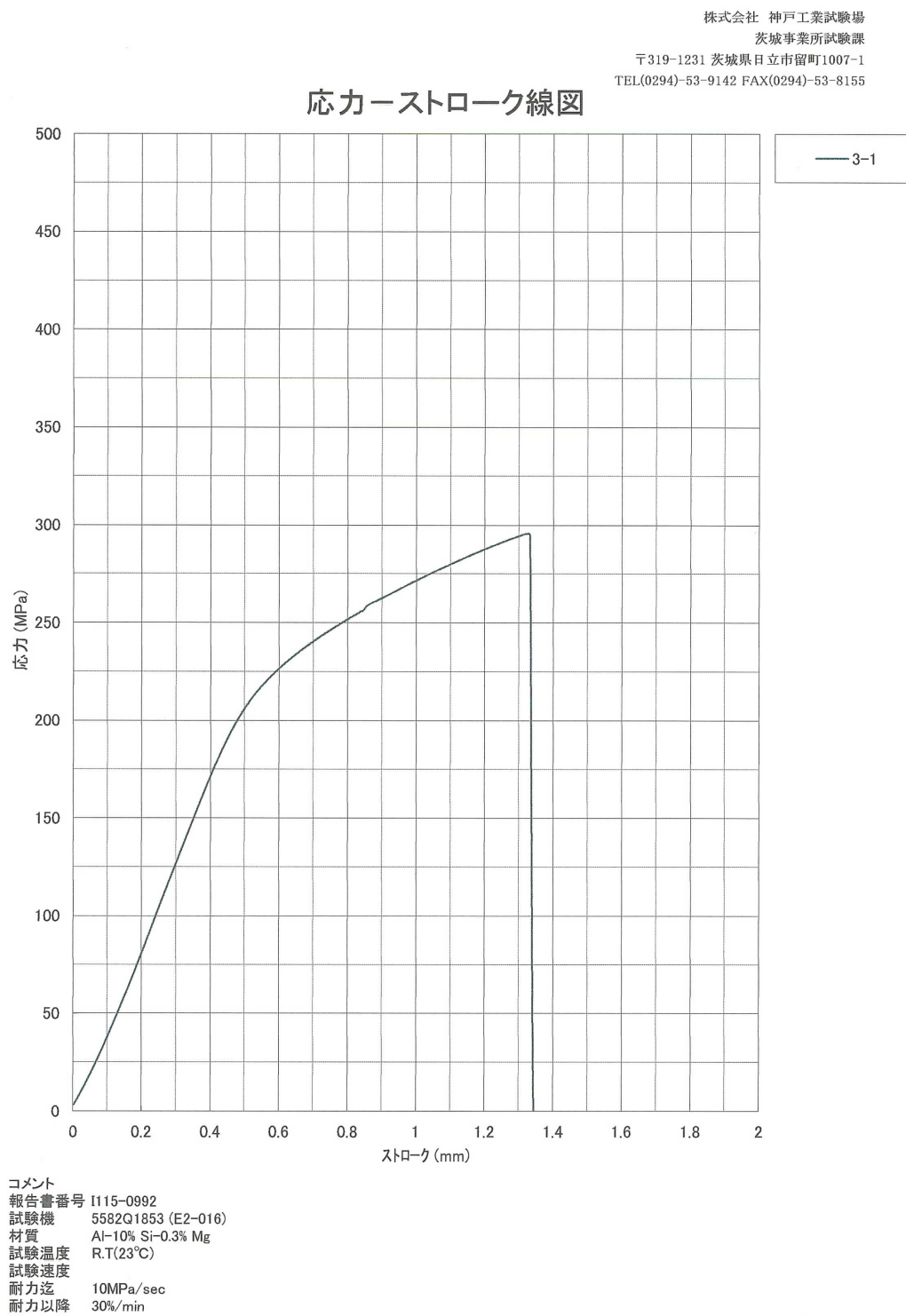


図 D.3: Tensile test3.

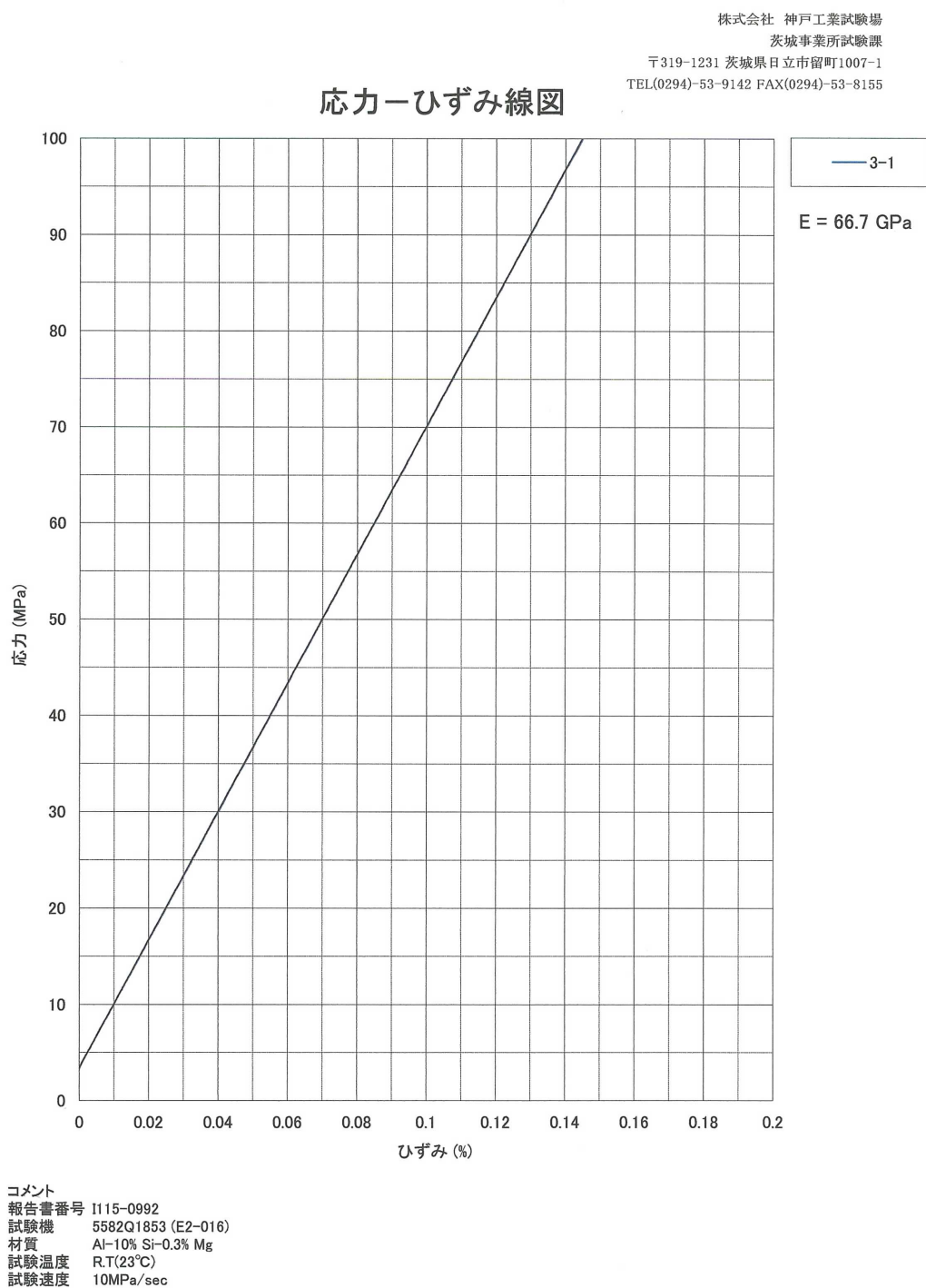


図 D.4: Tensile test4.

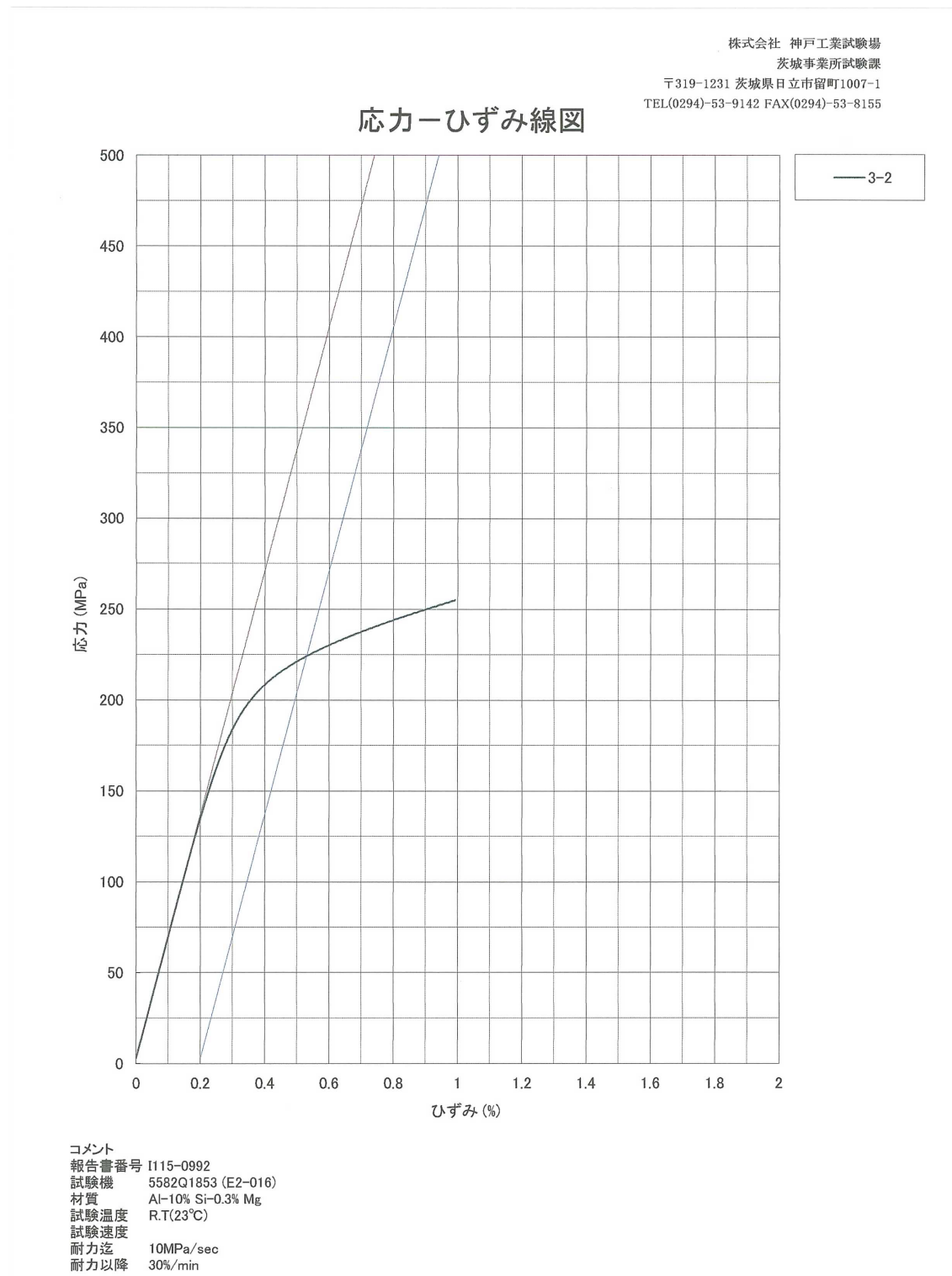
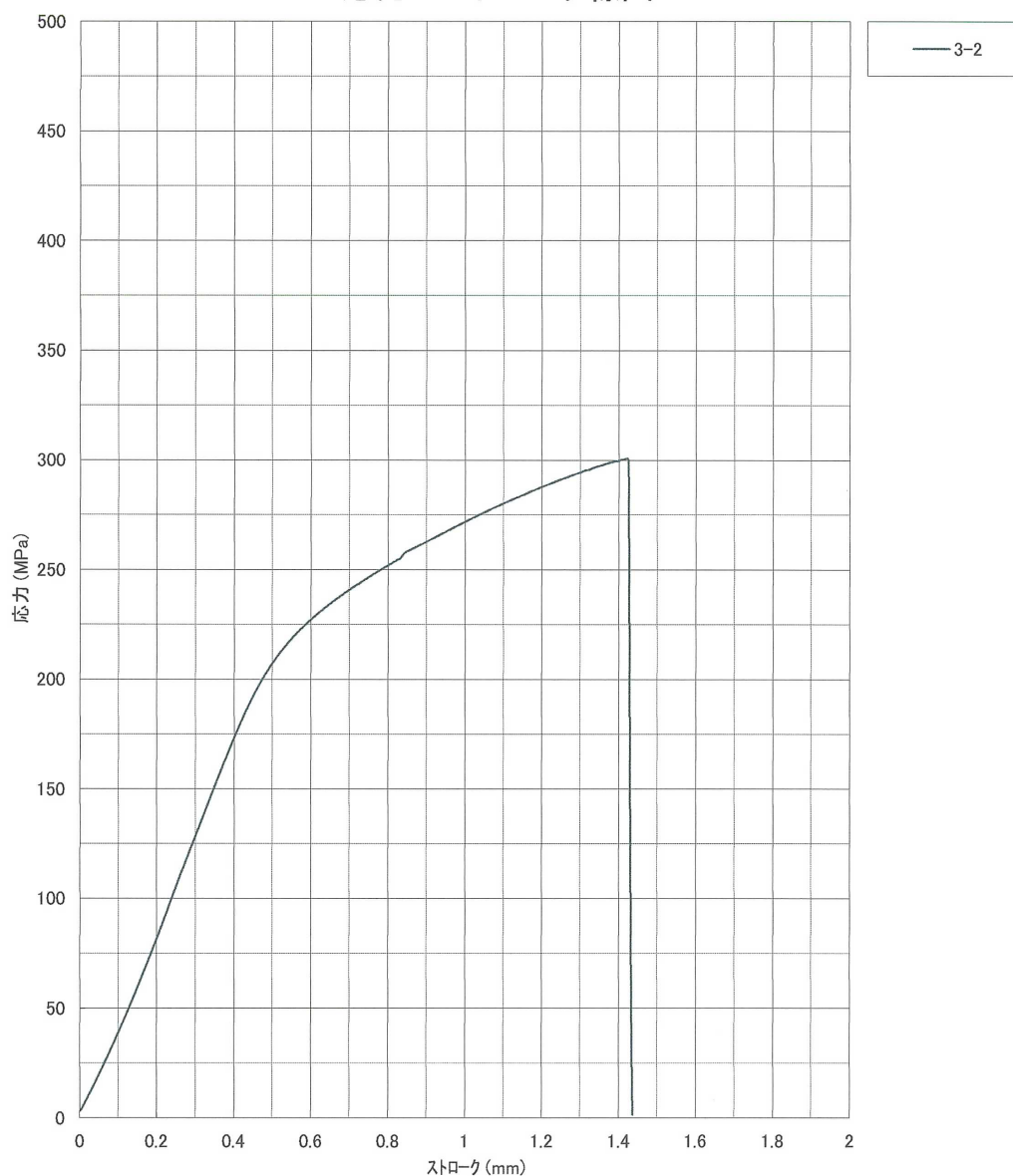


図 D.5: Tensile test5.

株式会社 神戸工業試験場
茨城事業所試験課
〒319-1231 茨城県日立市留町1007-1
TEL(0294)-53-9142 FAX(0294)-53-8155

応カーストローク線図



コメント
報告書番号 I115-0992
試験機 5582Q1853 (E2-016)
材質 Al-10% Si-0.3% Mg
試験温度 R.T(23°C)
試験速度 10MPa/sec
耐力迄 30%/min
耐力以降

図 D.6: Tensile test6.

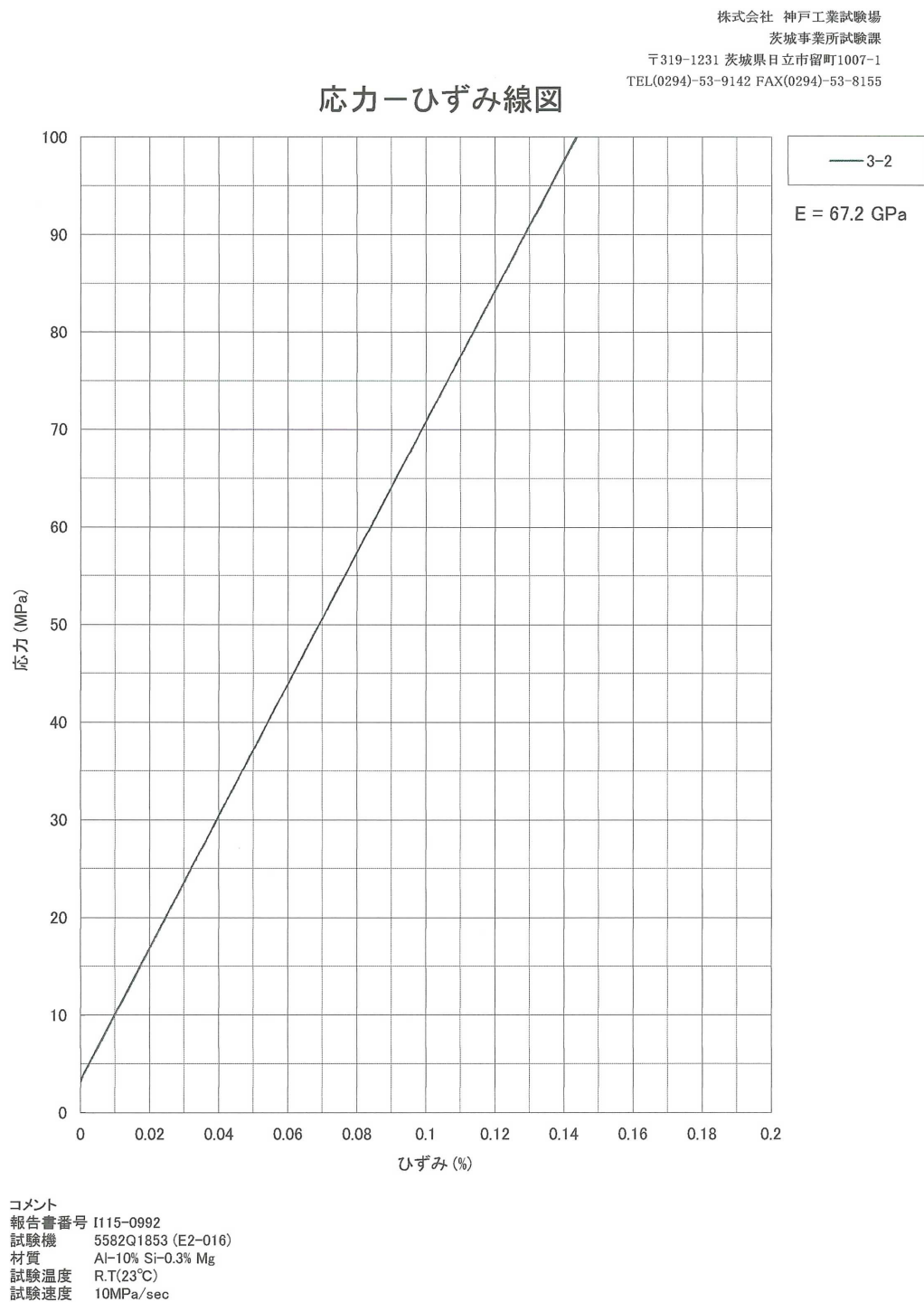
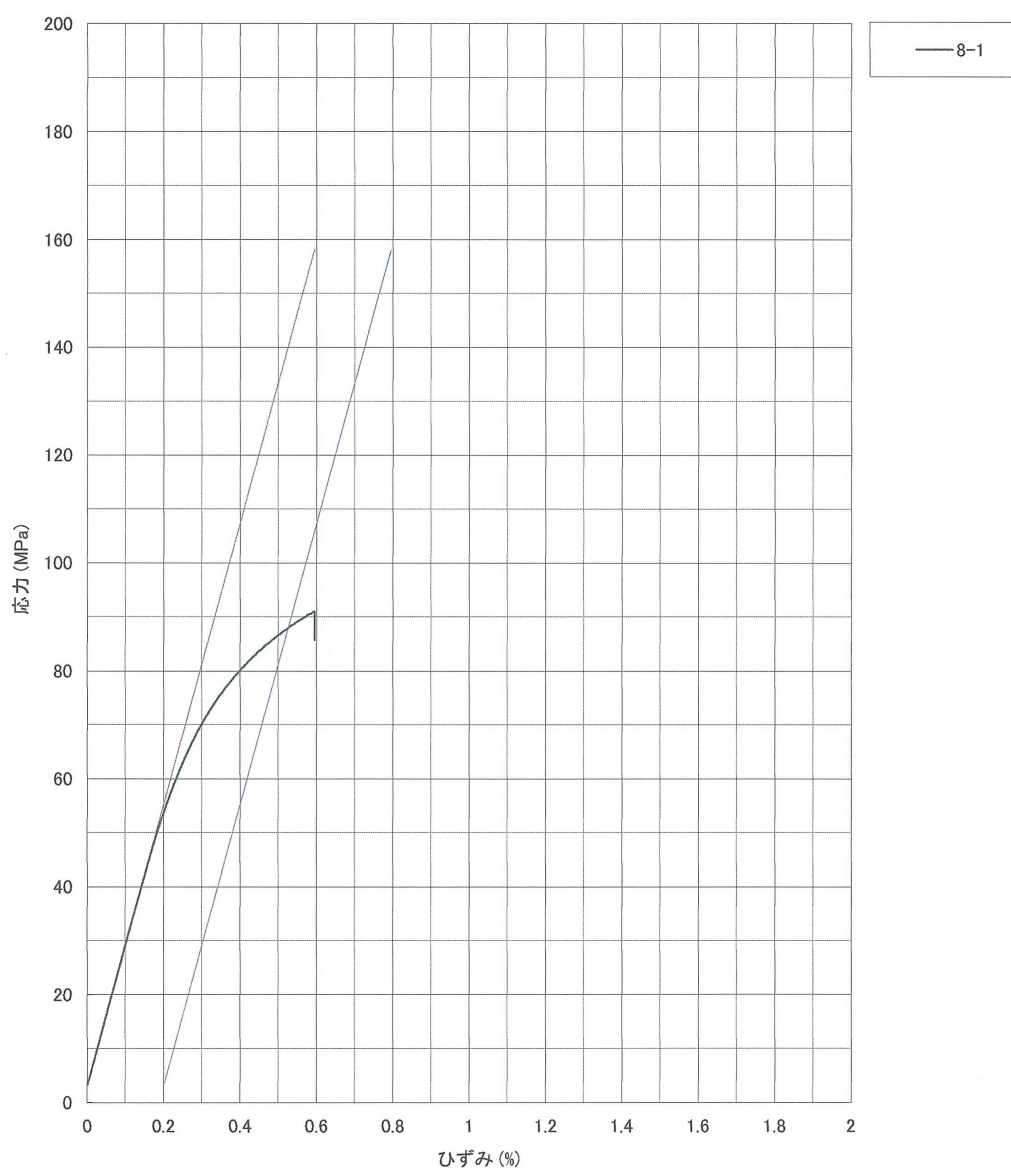


図 D.7: Tensile test7.

株式会社 神戸工業試験場
 茨城事業所試験課
 〒319-1231 茨城県日立市留町1007-1
 TEL(0294)-53-9142 FAX(0294)-53-8155

応力-ひずみ線図

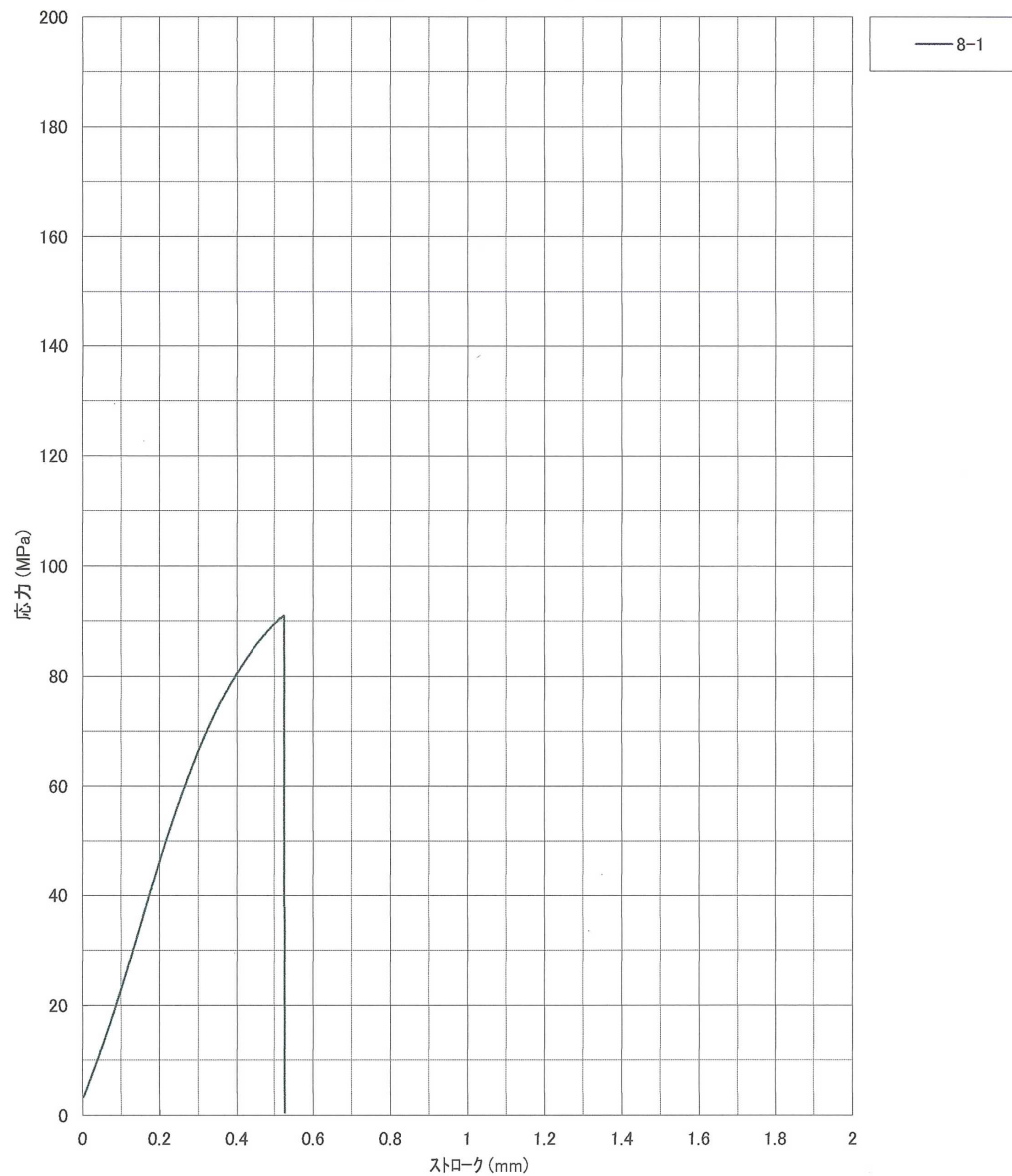


コメント
 報告書番号 I115-0992
 試験機 5582Q1853 (E2-016)
 材質 Al-10% Si-0.3% Mg
 試験温度 R.T.(23°C)
 試験速度
 耐力迄 10MPa/sec

図 D.8: Tensile test8.

株式会社 神戸工業試験場
 茨城事業所試験課
 〒319-1231 茨城県日立市留町1007-1
 TEL(0294)-53-9142 FAX(0294)-53-8155

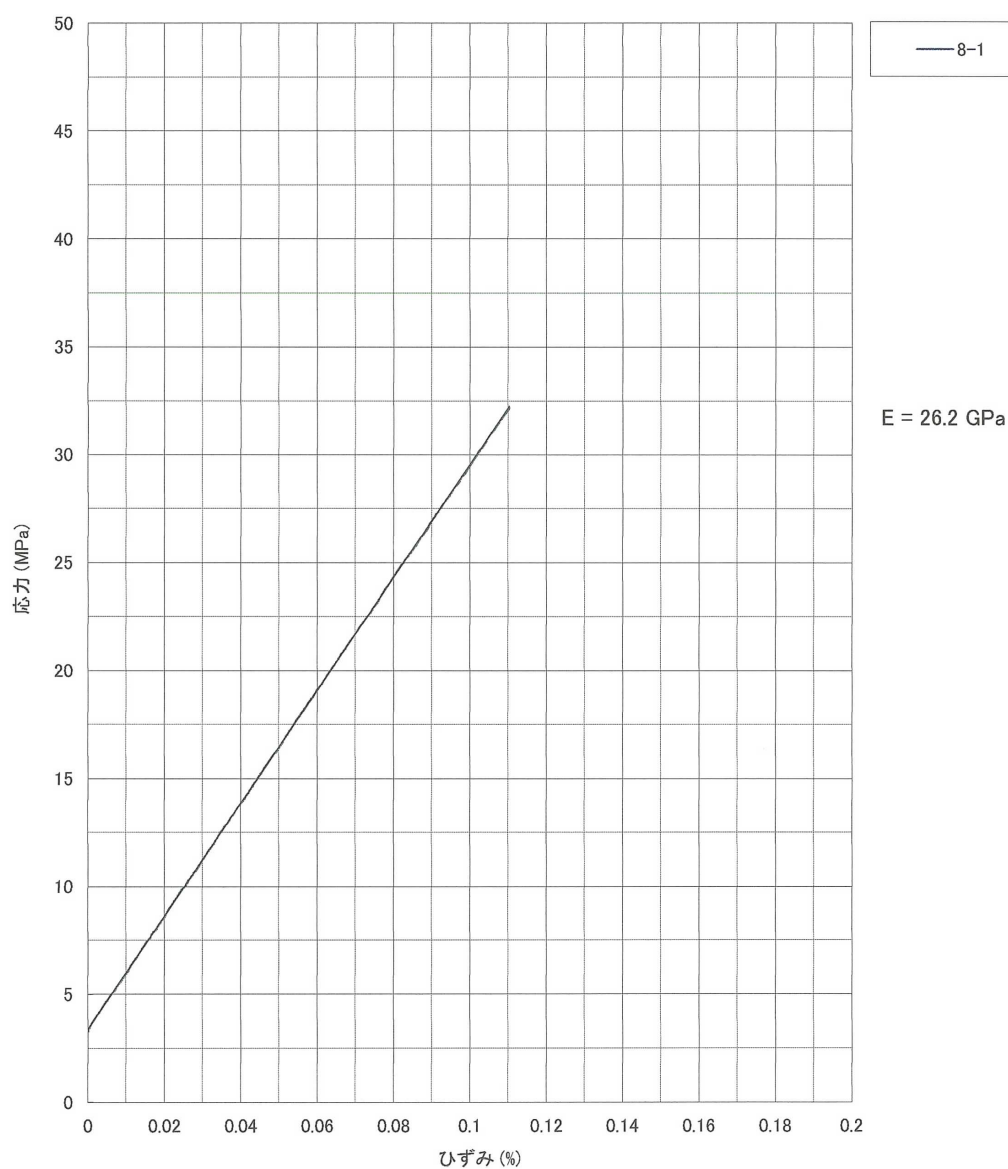
応カーストローク線図



コメント
 報告書番号 I115-0992
 試験機 5582Q1853 (E2-016)
 材質 Al-10% Si-0.3% Mg
 試験温度 R.T.(23°C)
 試験速度 10MPa/sec
 耐力迄

株式会社 神戸工業試験場
 茨城事業所試験課
 〒319-1231 茨城県日立市留町1007-1
 TEL(0294)-53-9142 FAX(0294)-53-8155

応力-ひずみ線図



コメント
 報告書番号 I115-0992
 試験機 5582Q1853 (E2-016)
 材質 Al-10% Si-0.3% Mg
 試験温度 R.T(23°C)
 試験速度 10MPa/sec

図 D.10: Tensile test10.

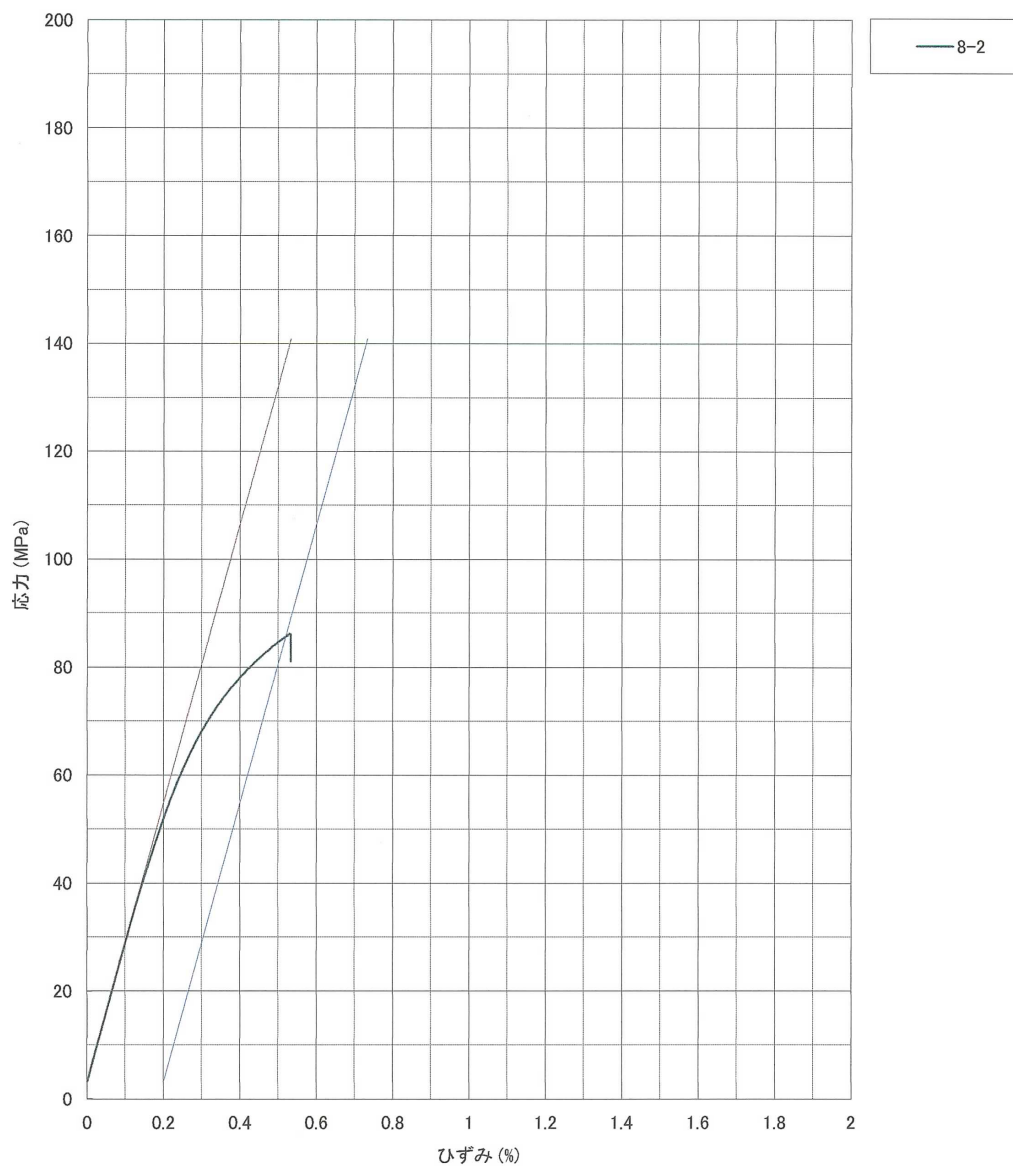
株式会社 神戸工業試験場

茨城事業所試験課

〒319-1231 茨城県日立市留町1007-1

TEL(0294)-53-9142 FAX(0294)-53-8155

応力-ひずみ線図



コメント

報告書番号 I115-0992

試験機 5582Q1853 (E2-016)

材質 Al-10% Si-0.3% Mg

試験温度 R.T(23°C)

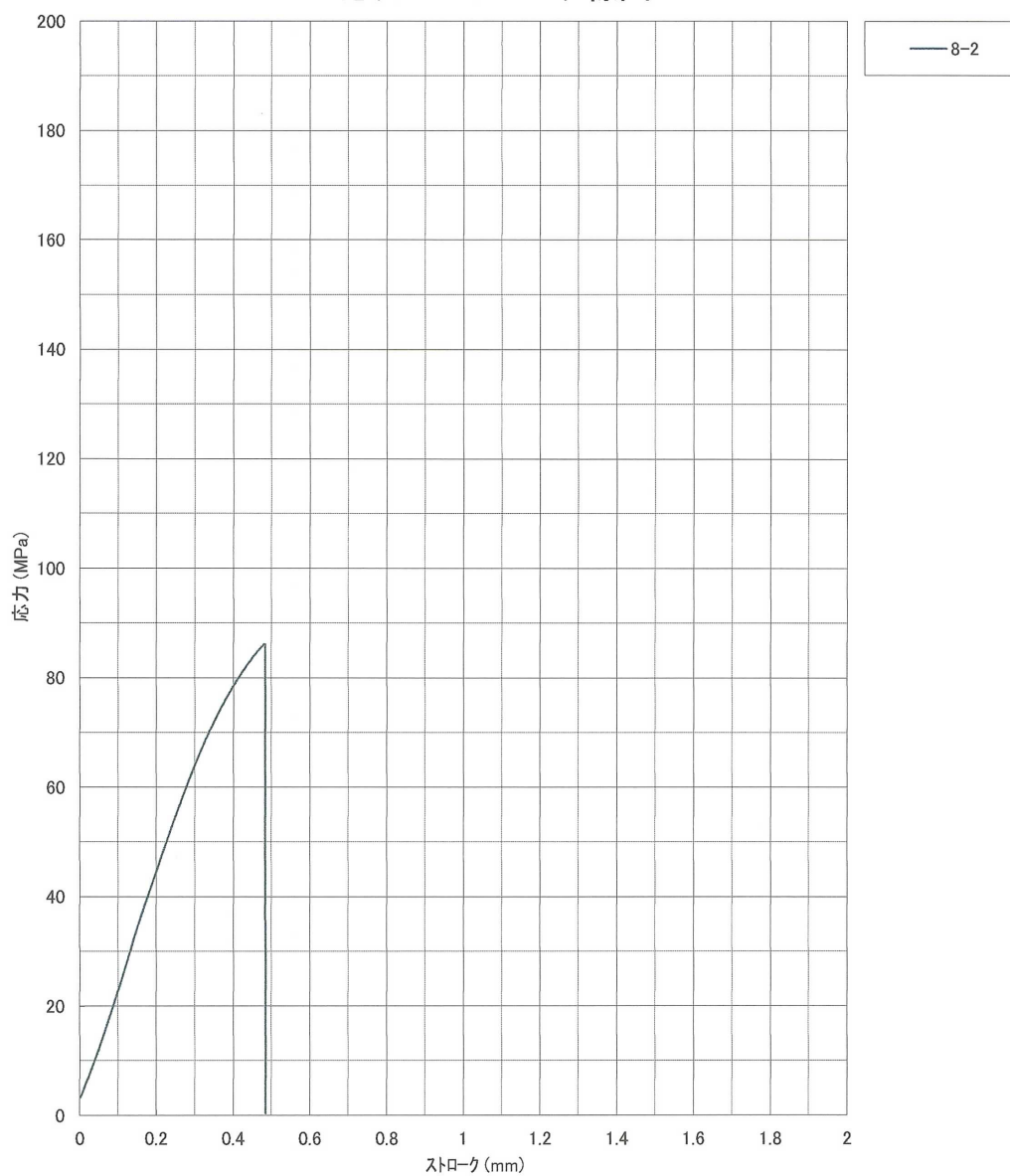
試験速度

耐力迄 10MPa/sec

図 D.11: Tensile test11.

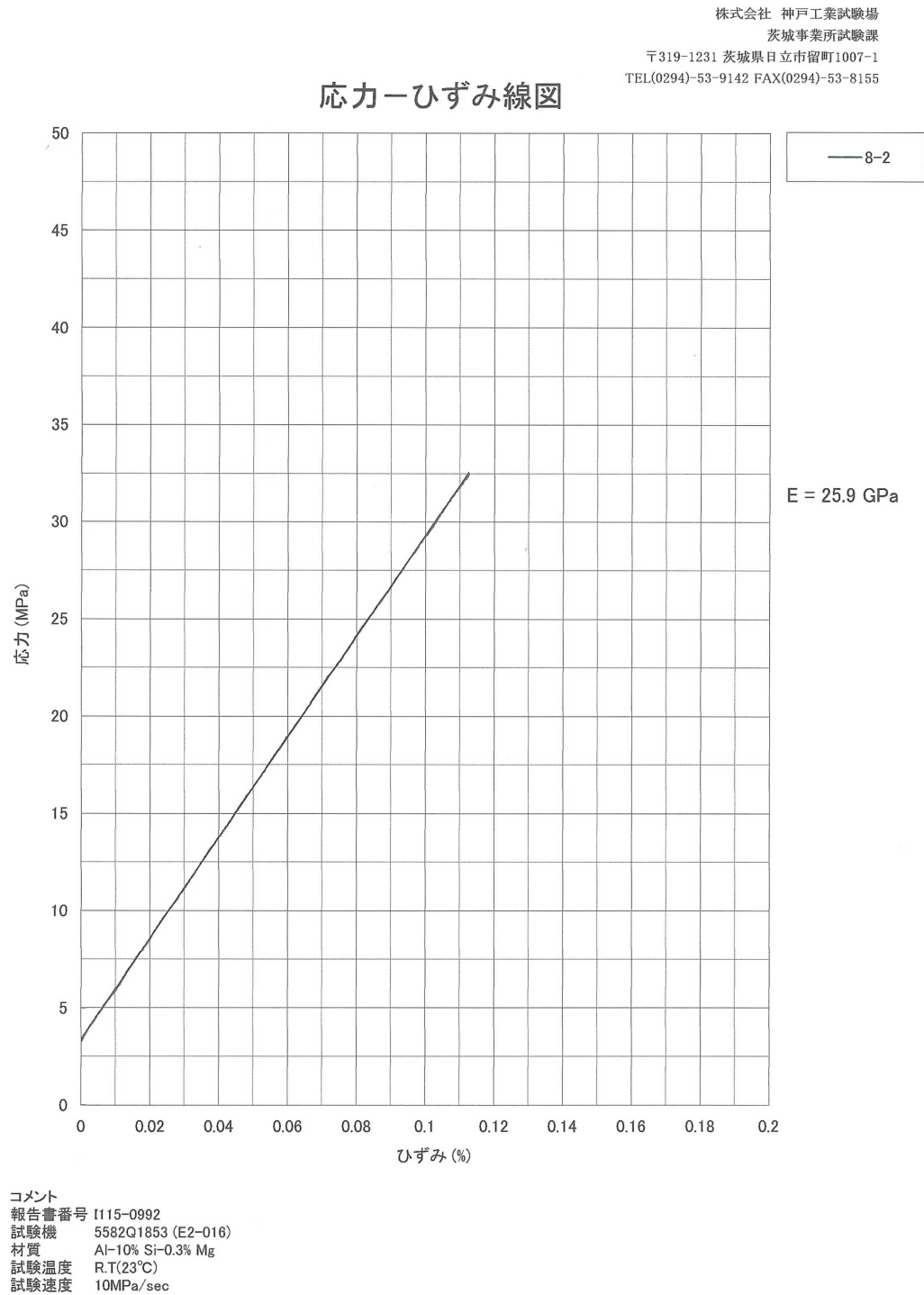
株式会社 神戸工業試験場
茨城事業所試験課
〒319-1231 茨城県日立市留町1007-1
TEL(0294)-53-9142 FAX(0294)-53-8155

応カーストローク線図



コメント
報告書番号 I115-0992
試験機 5582Q1853 (E2-016)
材質 Al-10% Si-0.3% Mg
試験温度 R.T(23°C)
試験速度 10MPa/sec
耐力迄

図 D.12: Tensile test12.



付 録E

筋骨格ヒューマノイドの多様な姿勢生成例

人体構造に近い多自由度身体を活かした多様な姿勢生成の例を示す．

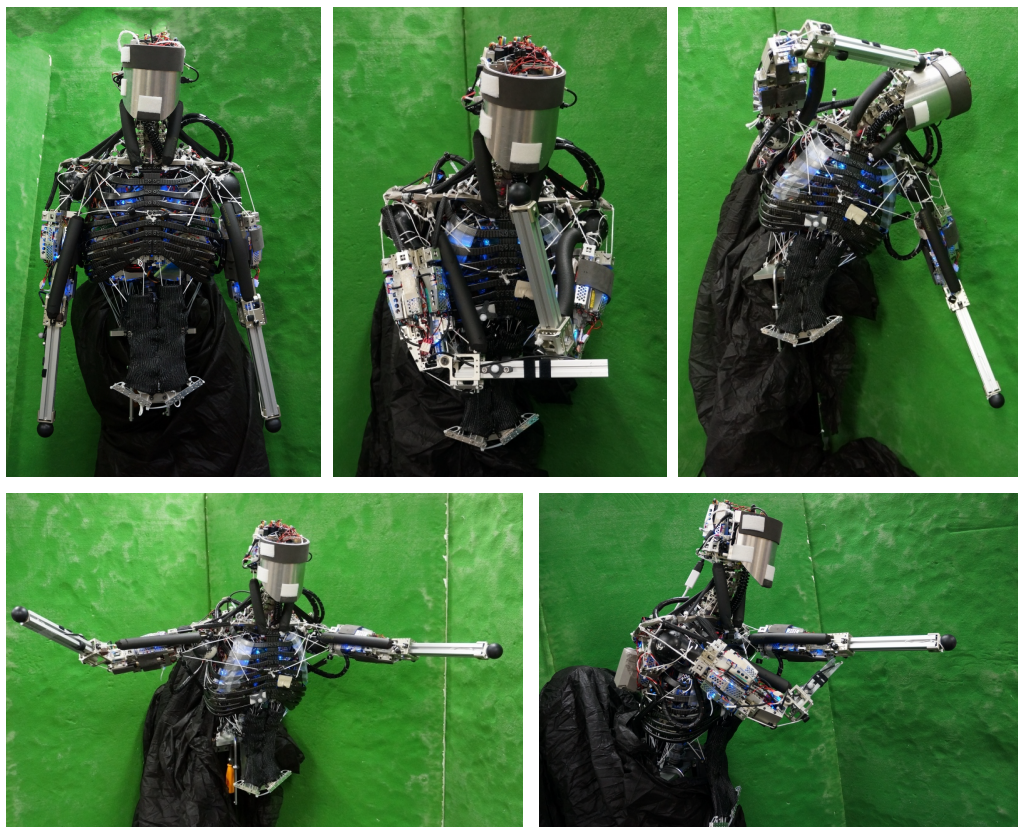


図 E.1: Example of various postures made by Kengoro's upper half of the body.



図 E.2: Example of various postures made by Kengoro.



図 E.3: Example of experiments conducted outdoors.

以上

1p ~ 260p 完

博士論文

平成 27 年 12 月 11 日提出

東京大学

情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

48137506 上月豊隆