

再装填機構を備えた能動緩衝外装を持つ  
等身大ヒューマノイドの実現に関する研究

小林 一也



## 目次



第1章	序論	9
1.1	本研究の背景	11
1.2	本研究の目的	12
1.3	本論文の構成	13
第2章	等身大ヒューマノイドにおける転倒緩衝のための外装と自己保護行動	15
2.1	はじめに	17
2.2	ヒューマノイドの損傷	17
2.3	ヒューマノイドの従来の緩衝外装と能動緩衝外装	19
2.4	能動的に形状・容積可変な能動緩衝外装の環境適応	23
2.5	等身大ヒューマノイドの能動緩衝外装を用いた自己保護行動アーキテクチャ	24
2.6	ヒューマノイドの全身能動緩衝外装の実装	28
2.7	能動緩衝外装を有する等身大ヒューマノイドの構成要素	31
2.7.1	能動緩衝外装ヒューマノイドの外装構造	32
2.7.2	能動緩衝外装ヒューマノイドの再装填機構	33
2.7.3	能動緩衝外装ヒューマノイドの排出機構	34
2.8	おわりに	34
第3章	能動的に形状・容積可変な緩衝外装の設計と開発	35
3.1	はじめに	37
3.2	柔軟素材 + 形状制限構造による外装	37
3.3	柔軟素材 + 形状制限 + 収縮構造による外装	41
3.4	等身大ヒューマノイドのための能動緩衝外装の構成法	43
3.5	低通気性素材による外装	46
3.6	低通気性素材 + 収縮構造による外装	52
3.7	おわりに	53
第4章	能動緩衝外装における再装填機構の設計と開発	55
4.1	はじめに	57
4.2	産業的あるいは既存のロボットにおける空圧システム	57
4.3	能動緩衝外装の空圧供給	58

4.4	都度圧縮式空圧供給源	58
4.5	化学反応式空圧供給源	59
4.5.1	パイロ式	60
4.5.2	ヴァルター機関	61
4.6	ストアードガス式空圧供給源	61
4.6.1	機械的イニシエータ	61
4.6.2	爆破弁イニシエータ	68
4.6.3	ハイブリッドイニシエータ	69
4.7	インフレータの採用	69
4.8	インフレータポンベの再装填方法	69
4.9	再装填のためのインフレータカートリッジの開発	70
4.10	再装填カートリッジの使用済判定	76
4.11	おわりに	77
<b>第5章</b>	<b>能動緩衝外装における排出機構の設計と開発</b>	<b>79</b>
5.1	はじめに	81
5.2	能動緩衝外装の排出機構の設計	81
5.3	一般的電磁バルブと能動緩衝外装のドレインバルブ	82
5.4	能動緩衝外装の大気開放のための流量設計	84
5.5	能動緩衝外装のためのドレインファンの種別と選定	88
5.6	ドレインファンの設計と決定	89
5.7	ドレイン配管の設計と開発	92
5.8	能動緩衝外装の負荷時自然排出機構	92
5.9	能動緩衝外装の装填・充填・排出動作とその再帰性の実現	93
5.10	おわりに	94
<b>第6章</b>	<b>能動緩衝外装による転倒時自己保護行動と再装填回復行動</b>	<b>99</b>
6.1	はじめに	101
6.2	等身大ヒューマノイドの転倒に伴う衝撃加速度の概算	101
6.3	能動緩衝外装ヒューマノイドの直立姿勢サーボオフ転倒	102
6.4	能動緩衝外装ヒューマノイドの前面部外力付加による転倒	112

6.5	能動緩衝外装の耐衝撃加速度評価 . . . . .	127
6.6	実地稼働する能動緩衝外装ヒューマノイドの耐衝撃加速度評価 . . . . .	127
6.7	能動緩衝外装ヒューマノイドの自己保護体幹ひねり転倒 . . . . .	128
6.8	能動緩衝外装のインフレーターカートリッジ再装填動作 . . . . .	138
6.9	おわりに . . . . .	145
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>147</b>
7.1	本論文の概要 . . . . .	149
7.2	結論 . . . . .	152
7.3	今後の展望 . . . . .	154
	謝辞	156
<b>付録A</b>	<b>電磁バルブ及び爆破弁インフレーター制御基板の設計</b>	<b>163</b>
A.1	はじめに . . . . .	165
A.2	気圧計測, 電磁バルブ制御基板の概観 . . . . .	165
A.3	気圧計測, 電磁バルブ制御基板の通信 . . . . .	166
A.3.1	OutPacket : 送信フォーマット . . . . .	167
A.3.2	InPacket : 受信フォーマット . . . . .	167
A.4	おわりに . . . . .	168
<b>付録B</b>	<b>能動緩衝外装を持つヒューマノイドNAOの転倒時自己保護行動</b>	<b>171</b>
B.1	はじめに . . . . .	173
B.2	NAOの転倒時自己保護: 柔軟素材 + 形状制限外装 . . . . .	173
B.3	NAOの転倒時自己保護: 柔軟素材 + 形状制限 + 収縮外装 . . . . .	180
B.4	NAOの外装物体適応: 柔軟素材 + 形状制限 + 収縮外装 . . . . .	185
B.5	NAOの外装衝撃緩衝・物体適応の評価 . . . . .	188
B.6	おわりに . . . . .	188
	参考文献	189
	発表文献	197





# 第1章

## 序論



## 1.1 本研究の背景

一般家庭環境あるいは瓦礫不整地などの未知環境で働くロボットには、人間や事前にモデル化できない環境との接触に関する問題が必ず付随し、多様な条件の元での接触行動を満たす必要がある。人間との近傍においては柔らかい接触を保つ必要があるが、その反面精密あるいは高出力な制御を必要とする作業においては確実な反力を保証する剛な接触状態が望ましいことも多い。より危険な接触としては、転倒転落などの予期せぬ接触や事故が挙げられ、ロボット自身の故障や当然人間にも危険が及ぶことが想定される。近年大きく関心が寄せられる災害対策ロボット、瓦礫不整地環境下で稼働するためのヒューマノイドをとっても、環境やタスクに応じて多様なロボット形状や接触状態を実現し、人間・環境との物理的接触を如何に扱うかは依然大きな問題とされている。

ロボットと環境・物体との間における物理的接触、密着、相互関係の研究としては、まず剛体接触による物体把持・物体操作モデルの研究 [1] がなされ、また柔軟皮膚やその中の接触センサ [2]、環境・人間に対する全身インタラクションを行う柔軟外装を有するロボット [3, 4, 5]、関節トルク制御によって柔らかな駆動を実現するロボット [6]、空気圧柔軟アクチュエータによる対人インタラクションロボット [7] などが挙げられる。しかしながらこれらの様々な剛または柔な接触は、本来別個に想定されるべきものではない。試験・実験的環境と異なり、一般家庭環境あるいは瓦礫不整地環境において、ロボット身体・体表面への要求機能は時々刻々と変化していくものであり、環境接触状態やロボット身体形状は容易に一意に定められるものではない。

破壊的な環境接触、衝突事故を防ぐ第一の方法は、「転倒しない」ヒューマノイドであることである。ロボット、特に二足歩行ヒューマノイドの歩行研究においては、過去より数多くの先行研究がなされ [8, 9, 10]、着地衝撃を緩和するパラレルリンク脚ロボット [11]、環境状態を考慮した起動生成法 [12] などが発表されている。

接触事故を未然に防ぐこれらの歩行システムは、実環境で稼働するロボットにとって当然最も重要な要素の一つであるが、研究開発者がヒューマノイドを管理している実験環境下においてさえ、等身大二足歩行ヒューマノイドは歩行失敗・転倒を繰り返しているのが実情であり、そのためほとんどの等身大ヒューマノイドは安全吊り具 (クレーン、テザー) の保護下にあるとあってよい。まして環境モデルが事前に準備されず、かつ種々のセンサにおける認識行動も完全とは言いがたい災害救助環境・瓦礫不整地環境に投入さ

れるヒューマノイドには、「転倒しない」ことのみならず、「転倒しても安全である」ためのアーキテクチャが期待される。

環境やタスクに応じて能動的に身体やその剛性を変化させる先行研究としては、中井らによる低融点金属を用いた適応変形ロボット [13] が挙げられるが、瞬間的な環境適応は実現されておらず、またヒューマノイドのような複雑な構造を持つ場合への適用が困難である。

また、ヒューマノイドのバランス制御のみならず、背面や膝部に柔軟材を設置し、緩衝外装を転倒方向に向けて利用する転倒姿勢シミュレーション [14][15] もなされている。さらに、藤原・金広らのヒューマノイドの転倒・回復に関する研究 [16][17] では、ヒューマノイドの転倒は避けえないものとして捉え、臀部・背面部柔軟外装での地平面との接触状態遷移を考慮しつつ転倒衝撃を最小限に抑え、かつ転倒後の姿勢回復動作を実現することで、「転倒した場合でも、回復し再び活動を継続できるヒューマノイド」という新しいロボットアーキテクチャを提案している。しかしながら、受動的なヒューマノイド身体・体表面だけでは、数々の環境に適応することができない。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、このような転倒・復帰可能なヒューマノイドアーキテクチャに強く影響を受けつつ、等身大ヒューマノイドが自ら身体形状を制御し、能動的な身体変形行動を取り、自己保護行動をなす全く新しいヒューマノイド能動緩衝外装を実現し、その構成法を提案する。言い換えるならば、従来必須であった安全吊り具に保証された安全性からヒューマノイドを解放する構成法を示し、その応用可能性を与えるものである。

本研究で実現される等身大ヒューマノイドは、転倒行動時にのみ超高压インフレーターシステムにより一瞬で動作する巨大緩衝外装を持ち、また元の状態へ回復・復帰することができる。この新しい緩衝外装はいわゆる「エアバッグ」のような一回性のものではなく、ヒューマノイドが自ら空圧源(インフレーターカートリッジ)を再装填し、外装を収縮させ、元の行動やタスクに復帰することで自身の外装構造や骨格構造を保持しつつ、人間の介助無しに実地で活躍できるヒューマノイドが実現される。従来、ロボットの制御論や環境接触論は、多自由度ロボットであればその自由度空間で定義され、議論されてきたが、能動的に変形可能な外装という新しい自由度を加えることでそれらの道を大きく拓くものである。

### 1.3 本論文の構成

本論文は全7章と付録2編から構成される。

第1章「序論」では、本博士研究の背景と目的について述べた。また本論文の構成についても述べる。

第2章「等身大ヒューマノイドにおける転倒緩衝のための外装と自己保護行動」では、提案する能動緩衝外装の研究背景、さらにロボットの外装に関する研究と環境接触、自己保護行動について議論し、それらを可能とする全く新しい能動的に変形可能な物理的緩衝としての柔軟外装を有するヒューマノイド、そのアーキテクチャ、アプローチの構成法について議論する。

第3章「能動的に形状・容積可変な緩衝外装の設計と開発」では、小型ヒューマノイドから等身大ヒューマノイドに至るまで、様々な能動緩衝外装の設計、実装について検討・議論する。また本研究で実際に開発した能動緩衝外装を用いて等身大二足歩行ヒューマノイドの転倒試験を行い、その自己保護性を検討・評価する。

第4章「能動緩衝外装における再装填機構の設計と開発」では、市販されている自動車や二輪車運転者、または危険環境労働用エアバッグジャケットのインフレーター(ガス発生器)との性能・要求性の相違について触れながら、実地的環境・研究者が介在しない環境下においてもヒューマノイドが自ら能動緩衝外装を有効に利用するために必須となる、空圧的システムの構成法、カートリッジ化されたインフレーター再装填機構、その設計論と実装について述べる。

第5章「能動緩衝外装における排出機構の設計と開発」では、ヒューマノイド外装の排出・再収縮・復帰動作について述べる。また第3章、第4章にてそれぞれ述べた能動緩衝外装、再装填機構と併せて、ヒューマノイドが自ら身体表面形状を変形させ、自己保護行動をとり、また復帰するため外装制御システムについて述べる。

第6章「能動緩衝外装による転倒時自己保護行動と再装填回復行動」では、本研究で開発するヒューマノイドと能動緩衝外装を用いて、実際に直立姿勢からの転倒転落、自己保護行動のための瞬間的かつ能動緩衝外装の充填展開、またそれに伴うインフレーターカートリッジの排莢・再装填行動、復帰行動を実現する。

第7章「結論」では、本研究の結論、今後への展望について述べる。

付録A「電磁バルブ及び爆破弁インフレータ制御基板の設計」では、小型ヒューマノイドの空圧制御及び等身大ヒューマノイドのインフレータ着火制御に用いるパワー FET 及び気圧センシング基板の仕様について述べる。

付録B「能動緩衝外装を持つヒューマノイド NAO の転倒時自己保護行動」では、第3章で述べる外装を有する小型ヒューマノイド NAO の転倒緩衝実験について詳細に述べる。

## 第2章

### 等身大ヒューマノイドにおける転倒緩衝 のための外装と自己保護行動





## 2.1 はじめに

本章では、等身大二足歩行ヒューマノイドの様々な損傷回避のために、「転倒しないヒューマノイド」あるいは「転倒しても回復できるヒューマノイド」として種々の行動論が存在する中で、従来の多関節ヒューマノイドの自由度空間にとらわれない能動的に形状・容積可変な緩衝外装の位置付けを議論する。また従来の柔軟外装の構成法において、ヒューマノイドの物理的接触特性と汎用行動性を共に満足するための設計選択余地が非常に小さかったことを説く。

さらに、提案する能動緩衝外装の背景について様々な先行研究の観点から論じ、全身に分布した能動緩衝外装を利用することで可能となる自己保護行動について議論する。重要な先行研究として「転倒しても回復できる等身大ヒューマノイド HRP-2」などの既存のヒューマノイドへの実装論と転倒行動アーキテクチャを引用しつつ、能動緩衝外装を用いて「緊急行動」ではなく従来の「通常行動」と同列に自己保護行動を可能とする新しい等身大ヒューマノイドアーキテクチャについて議論し、本研究でのアプローチについて示す。

## 2.2 ヒューマノイドの損傷

ヒューマノイドは個別部品の巨大な集合体であり、色々な損傷が起きうる。

- 電装系損傷
- 締結の不備
- 外乱による物理的破壊
  - － 電子部品 (センサ・カメラ等の精密機器, 内部マシン基板)
  - － 骨格部品
  - － 関節構造 (モータ, ギア類)

歩行中の過負荷におけるモータドライバの損傷, ロボット内部マシンのボードの接続不具合といった電装系の破壊や, 最も大きくヒューマンエラーに関わる締結不備 (締結ト

ルクの不足，締結固定剤の不備)，さらに外乱荷重による物理的破損<sup>1</sup>などが代表的な損傷として挙げられる．

本研究では特に，外乱に伴う物理的破壊，さらにいえば転倒に伴う損傷とその自己保護行動について論じる．近年，災害救助環境や瓦礫不整地環境で活躍できるヒューマノイドの需要が高まりつつあるが，事前にモデル化できない未知環境下，かつ研究開発者の介助に頼ることのできない瓦礫不整地環境で，少なくともハードウェア面において自律して継続的に稼働でき，自在に与えられたタスクをこなすために，ヒューマノイドには様々な環境接触や接触事故に対してハードウェア・ソフトウェア両面から頑健であることが求められている．多くは安全吊り具（クレーン）に吊られた状態で研究開発が進められているヒューマノイドを実地に投入するためには，現在まで主流であった「転倒しない」ためのヒューマノイドのみならず，「転倒に対応できる」ヒューマノイドの実現こそが欠かせない必須条件であって，今までにない大荷重・大衝撃環境接触を想定しそれらへの対応を考慮せねばならない．

現在まで，等身大ヒューマノイドを設計・製作するにあたり耐衝撃加速度はあまり重要なファクターとして考慮されていない場合があるが，このようにヒューマノイドに与えられる衝撃荷重を見積もるためにまず，それぞれ電子部品・骨格・関節構造などのスペックとして規定されている耐衝撃度を考慮し<sup>2</sup>，それらのデータシートから，安全率として例えば3を加味しつつヒューマノイド全体の耐荷重・耐衝撃目標を設定すべきである．さらに，既に述べたように各部品の締結部分にも十分に設計段階から注意する必要がある．

不整地でのヒューマノイド行動論としては，現在までに，

- 転倒しないヒューマノイドとして：
  - － フットステッププラン，短周期オンラインでの歩行軌道の生成と補償
  - － 環境支持による転倒防止
  
- 転倒できるヒューマノイドとして：

<sup>1</sup>基板間接続によく用いられる PCI スロットは，片側に締結ネジを備えているが，耐衝撃性は非常に低い．衝撃方向や PCI ボードの大きさにもよるが，規定の締結だけでは 10G～20G 程度で接触不良を起こすことが大いにありうる．

<sup>2</sup>特にセンサ類は，壊れやすくかつコストが大きい上に，ロボットから外環境に向けて実装されている場合が多く，破損事故を招きやすい．

- (受動) 柔軟外装の利用
- ブレイカブルカバーの破壊エネルギーによるヒューマノイド全体の保護
- 転倒姿勢生成・制御

などの手法が考案され、研究が進められてきた。これらはいずれも多関節ロボットの自由度空間で定義されてきたものであるが、現在までに等身大ヒューマノイドの実際の転倒に十分対応できているとは言いがたい。

また大規模な柔軟外装は、統合ソフトウェアシステム・通信システムなどの不備不調に依存せず環境との物理的接触性能を直接ヒューマノイドに与えるハードウェアソリューションとして数多くの研究が為されてきたが、後述するようにヒューマノイド自体の汎用性を著しく損ないやすいために、多方面に有効な柔軟外装の実現が困難であった。

そこで本研究では、現在までのヒューマノイドの自由度を越えた、能動的に形状・容積可変な外装を用いて転倒時に瞬間的に自己保護のための身体変形行動を可能とするヒューマノイドを実現し、その構成法を示す。

## 2.3 ヒューマノイドの従来の緩衝外装と能動緩衝外装

### 必要性アプローチからの緩衝外装

ヒューマノイド柔軟外装の必要性アプローチをとれば、汎用性・行動範囲を求められるヒューマノイドには、頑健な歩行 [18][19] やタスク・行動に不必要なものが実装されることは決して好まれない。しかしこれらの「非転倒性」は実験・試験環境に依存したものであり、瓦礫被災地などの実不整地環境での運動はいまだ十分に検討されているとは言えない。また浦田らの不意の外乱大衝撃を補償するフットステップを生成する非転倒性二脚ヒューマノイド [20] においても、緩衝外装は考慮されなにかあるいは膝部などに最小限の範囲で検討されてきた。

しかし、これらのヒューマノイドの安全性と自己保護性は、安全吊り具に保障された転倒しない為の歩行行動の範疇にあり、実際に転倒することは考慮されていない。実際の不整地環境での外乱などはモデル化や予測が困難であり、どれだけ十分な歩行ソフトウェアを充実させたとしても、不意の転倒・転落事故を完全に防ぐことは非常に困難であると言わざるをえない。

### 十分性アプローチからの緩衝外装

筆者の研究グループでは、分厚い柔軟素材で構成されたロボットの対人・対環境インターフェース部を「肉」と呼び、厚肉外装を全身に有するヒューマノイドロボットを開発し、その密着インタラクション、センシングについて議論してきた [5, 21, 22, 23, 24]。その中には柔軟厚肉外装と外装下層の接触センサ、過負荷から関節駆動モータを保護する脱臼機構を持ち、身体の箇所ごとに適切に要求機能を実現する分布型厚肉外装ロボットによる自己保護行動 [25][26] も挙げられる。

ロボットの物理的な接触性に注目し、ロボットの骨格上あるいは表面上に各種の柔軟素材を配置する試みは数多く行われてきた。Aonoらは、機構と意匠を分離して追求するために多関節ロボット全身の外装の成形・構成法の提案 [27] を行っている。向井らによる介護用柔軟外装ロボット [28] は、抱き上げた人間と安全・快適に接触できるように形状や構造材が検討された優れた柔軟素材を有する。また高密度に分散配置した柔軟触覚センサを用いて押し込み・せん断・捻りを検出し、物体との接触状態の認識や人間とのインタラクションを実現する全身被覆外装 [29] は、環境や物体との接触状態をセンシングし制御するための外装の先行研究であるといえる。

ヒューマノイド外装の設計論を、ヒューマノイド自身の汎用性と人・環境に対する物理的接触性という、ヒューマノイド体表面の柔軟素材の質と量に関する必要性と十分性の設計の交点、すなわちトレードオフポイントの決定であると捉えるとき、筆者らの研究開発してきた分布型柔軟外装 [25, 26, 30] はこの設計解選択領域を押し広げるものである。それは柔軟厚肉外装を持ち、かつ関節脱臼機構（トルクリミッタ）[31][32] を活用し関節部を保護しつつもヒューマノイドの駆動性・転倒時姿勢制御性を実現してきた。

しかしながら、外装を有しないヒューマノイドと同等の関節可動域や駆動性、あるいは物体操作に関するような複雑なタスクは依然として満たされておらず、耐衝撃性に関しては歩行転倒時の 10G の衝撃加速度を半減させるなど厚肉外装の有用性を示したものの、家庭環境での小型ヒューマノイドの最大危険衝撃のひとつとして設定した机上からの転落実験においては、危険関節については過トルク脱臼機構を活用し保護させてなお、体幹には 25～30G という危険衝撃加速度を計測した。さらに、付録 B にも示す通り身長 57cm 重量 5.2kg の小型ヒューマノイド NAO [33]

でさえ全く転倒対応を行わない場合の着地において 15G 近い転倒衝撃加速度を計測するという試験結果は、等身大ヒューマノイドの自己保護に求められる緩衝外装は、普段からそこにあれば明確に通常行動を阻害してしまう程のサイズ・厚みが必要であることを強く示唆している<sup>3</sup>。現在等身大ヒューマノイドは、実験の中でさえハードウェア的に種々の環境・タスクに対して十分な適応が出来ているとは言いがたく、研究開発者や安全吊り具に頼らず瓦礫不整地環境で実用に足るヒューマノイド外装構造の研究革新が期待される。

#### 転倒可能かつ回復できるアーキテクチャ

Goswami らによるバックパック型柔軟外装を用いたヒューマノイドの転倒 [14][15] では、シミュレーション転倒中の角運動量を制御し、転倒方向を判定し、瞬間的に身体全身をひねることで最も安全に背面のバックパックから着地するような姿勢を生成している。これは転倒を認めるヒューマノイドの実現のための先行研究例である。ただし、柔軟素材による従来型柔軟外装であるため、制御によって完全な面着地 (Flat Contact) を実現することは困難であるとも説いている。

藤原らのヒューマノイドの転倒・回復 [16][17] では、転倒中の地平面と臀部外装のなす角度に応じて瞬間的にヒューマノイドがとるべき姿勢制御の状態遷移を定義し、転倒時姿勢の半径の瞬間的制御、衝撃加速度が去った後の二次被害を防ぐための予後動作なども含めながら、背面部・臀部の柔軟外装を用いた実機での転倒行動・転倒回復行動を実現させ、また転倒姿勢から再び通常の直立姿勢へ戻ることを実現している。すなわちこれは実際に未知の外乱を想定し、それに依りて瞬間的な転倒行動を行い、また起き上がることで元の姿勢・状態に復帰可能なヒューマノイドである。

また、ヒューマノイド以外の分野においても、HIC 法 [34](頭部損傷基準値<sup>4</sup>) などが事故における頭部に対する損傷の基準値として研究されている。ヒューマノイドの身体にとって最も保護すべきは頭部とは限らないが、実地で行動するヒューマノイドにおいて研究開発者が介在しない環境下で複数回の転倒・転落衝撃を受けることを想定し、通常重力加速度や歩行において床から受ける加速度を取り除いた上

<sup>3</sup>転倒時の衝撃加速度はヒューマノイド自身の重量  $\propto r^3$  に対し、柔軟外装の大きさは表面積  $\propto r^2$ 、あるいは着地衝撃時間  $\propto$  外装厚さ  $\propto r$  によって吸収されるものだからである。

<sup>4</sup>Head Injury Criterion. 人身事故の際、頭部への衝撃加速度を冪の 2.5 乗することでノイズを取り除き有効な損傷度を計算する。

で転倒衝撃加速のみを累積評価していく手法が今後重要になると考えられる。

不慮の物理的接触に対する自己保護に限らず、外装において環境やタスクに応じた剛柔を兼ね備えた設計はロボットに必須となるものであるが、しかしそれらは現在まで特定の環境・タスクに特化した一意の既定外装かつごく部分的(背面部・臀部)に留まっており、ここには受動的な外装の耐衝撃性と一般汎用性の衝突が認められる。すなわち汎用行動性と自己保護性の両立の観点から、柔軟・緩衝外装の設計構成法の選択余地は限りなく小さい。

また多くの先行研究では障害物の無い平地が想定されており、瓦礫不整地での複雑な転倒・衝撃のための考察は十分に為されていない。特に実不整地環境で様々なタスク・行動の阻害(関節可動域阻害や、過重量過体積など)を防ぎつつ、剛柔を兼ね備える接触行動の連続的・逐次的な実現を満たすことは容易ではない。

#### 変形・変態ロボットとしての能動緩衝外装

能動外装を変形・変態ロボット、すなわちロボットの駆動・運動系とは別系統に自由度を有するロボットとして捉えると、先行研究としては構造材剛性と目標形状変形・行動目的変形の両立のため低融点合金を用いて身体変形させる中井らのロボット[13]、リンク長変形により子どもから大人まで成長する身体の模倣を行った高信らのヒューマノイド[35]、Nakaokaらによる表情動作のための柔軟アクチュエータ[36]などが挙げられる。無論、骨格の外に柔軟な皮膜を有するロボットもある種環境適応のための自由度を有するといつてよい。

しかしいずれの変形ロボットも、変形・変態には無視できない時間を要し、ヒューマノイドの緊急身体変形、特に転倒時の適応はいまだ実現されていない。

このように、柔軟外装の大きさ、厚みを際限無く大きくすることは、ヒューマノイドの自己保護性能を向上させたとしても、ヒューマノイド本来の汎用性・実用性を大きく損なう。反面、安全吊り具に支持された歩行実験を阻害しないように突出部(膝部、臀部等)のみに柔軟材を配置することも、実地での自己保護性を十分に満たすことはないように思われる。このように、等身大ヒューマノイドでの外装設計において、両者を共に満たす構成法は定まらないように思われるが、本研究ではこの「柔軟外装の設計解」を、ヒューマノイド自身が外装を変形・変態させることで転倒転落に際して瞬間的かつ能動

的に決定する，すなわち自由度を有し自ら能動的に変形していく外装を有するヒューマノイドの構成法を提案する．

## 2.4 能動的に形状・容積可変な能動緩衝外装の環境適応

これまでの研究では，いずれも，ヒューマノイドの転倒の瞬間のような極々短時間(0.5～1秒等)で能動変形する瞬間的動作を生み出しうるものではなく，また等身大二足歩行ヒューマノイドをクレーンに保証された非転倒性から解放することも実現できていない(転倒着地に伴う衝撃加速度の大きさの見積もり評価や実測値については第6章にて述べるが，等身大ヒューマノイドが無防備に転倒した場合～60G程の着地加速度が発生しうる)．

第1章においても述べた通り，本研究の目的は，環境や要求に応じて自己身体を主体的かつ瞬間的に変形させ，自己保護行動を可能とする全く新しいヒューマノイド外装  
能動緩衝外装 の構成法の提案である．

このヒューマノイドは能動的機構を用いて外装の形状・柔軟性を変形させ，変化していく環境との接触状態を推定し連続的・主体的に適応することを実現してゆくものである．また自身の身体表面を能動的に変形させ，人間や環境に対して高い親和性を持つヒューマノイドの発展にも広く波及される．本研究では，クレーンによる非転倒性を廃し，環境や物体との接触状態を能動的に制御し，従来の関節自由度空間で定義されてきた適応論・制御論にとらわれないヒューマノイドの外装における新しい自由度を提案するものである．

ここで，環境接触状態の推定とは，不意の外乱や環境接触に際しても

- 加速度センサによる転倒判定
- 目標姿勢角 / 運動量 / 角運動量との誤差を用いた退避方向 / 転倒可否 / 転倒方向判定
- ビジョンアプローチによる，環境運動と自己運動分離推定 [37] による判定
- 姿勢保持関節のモータドライバ等の監視による，姿勢保持可能限界の見極めと転倒判定

等により転倒姿勢や転倒方向判定を行うことを意味する。これらの判定結果に応じて、全身の外装構造の内どのモジュールを充填展開させどの方向に向けるべきか、転倒方向に向かって着地支持多角形を大きくとるように転倒するには外装モジュールのうちどれを利用すべきか、ヒューマノイド自身がオンラインで選択可能であることが、実地不整地環境においても自律的に行動できるヒューマノイドの環境適応である。

このように、全身の能動緩衝外装を用いて転倒・転落における損傷を回避するために、新たな能動的な外装モジュールとしては

- 後方転倒の為に体背面大規模外装
- 膝環境支持の為に膝部膨張外装
- 転落時衝撃防止のための膝裏打ち合わせ緩衝外装
- 剛性で精密なハンドの利用と矛盾しない、ハンドを包み込むように展開する手先外装

を実現できる能動的に形状・容積可変な外装が考えられる。ハンドを包む形状については、あらかじめ最大形状を立体的に縫合し、かつ負荷に耐えうる素材(第3章)を用いることによって、立体的指向性膨張外装が実現可能であると考えられる。

全身の緩衝外装を考える時、横方向転倒の先行研究がほとんど無いことは、重要なアクチュエータである腕部に現時点では等身大ヒューマノイドを保護しうる外装をつけようがないことを示唆していると捉えるべきである。そこで能動的に変形・制御可能な外装を実装することで、このような場合にも対応可能となり、任意の形状でロボット自身を損傷から守る自己保護行動が可能となる。この時既に述べた通り、構成部品の耐衝撃スベックと安全率から、ヒューマノイド全体の耐衝撃度を設定し能動的に変形する外装を実装することが必要であり、そのために第3章にて示すような緩衝外装の形状・サイズ的设计手法を用いて等身大ヒューマノイドの能動緩衝外装を構成することが求められる。

## 2.5 等身大ヒューマノイドの能動緩衝外装を用いた自己保護行動アーキテクチャ

本研究では、特にヒューマノイドの損傷を防ぐために能動的に身体を変形させる環境適応行動を自己保護行動 (Self-Protective Behavior) と呼ぶ。



現在，事前にモデル化できず研究開発者の介助に依存することもできないような災害救助環境・瓦礫不整地環境を想定した場合，不意の外乱荷重・外乱運動量に対してヒューマノイドが自身を転倒損傷から保護する行動としては，外乱の小さいものから順に

1. その場に留まるスタビライザ制御 (ZMP 変位や体幹傾斜角補償)
2. 変位方向への転倒判定，踏み出し [18, 38, 39]
3. 変位方向へのフットステップ
4. 環境接触動作・転倒動作 [14][15] (運動量制御 [40] など)

などが考案され，実機ロボット，シミュレーションを含め，多くの転倒防止動作生成法が研究されているが，実際に転倒する際の行動論については十分ではない．

これらがいわば不整地でのヒューマノイドの非転倒性による自己保護として現在与えられている選択肢であるが，ここで，瓦礫不整地環境で実際に転倒するヒューマノイドを考えると，「転倒する際にはどう行動すべきか」を考え，設計する必要がある．本研究では，ヒューマノイドに形状・容積可変な能動感想外装を有することで，主体的に変形できる外装を用いた新たなヒューマノイドアーキテクチャが確立できる．

新たに能動緩衝外装を有するヒューマノイドの自己保護行動と復帰行動は，常に選択肢としてヒューマノイド自身に与えられるべきものであり，また実地不整地環境で活躍できる等身大ヒューマノイドの実現のために，従来の通常行動と同列に定義されるべきである (図 2.1) ．

すなわち，実際に不整地にて転倒することを許容する等身大ヒューマノイドが選択できる行動として，

1. 通常・従来のタスクあるいは安定・安全状態
2. (不意の外乱，環境接触等)
3. 転倒の判定と転倒姿勢制御，能動外装の瞬間的膨張展開による自己保護行動
4. 外装の回復・復帰行動
5. 1に戻る (以降繰り返し)

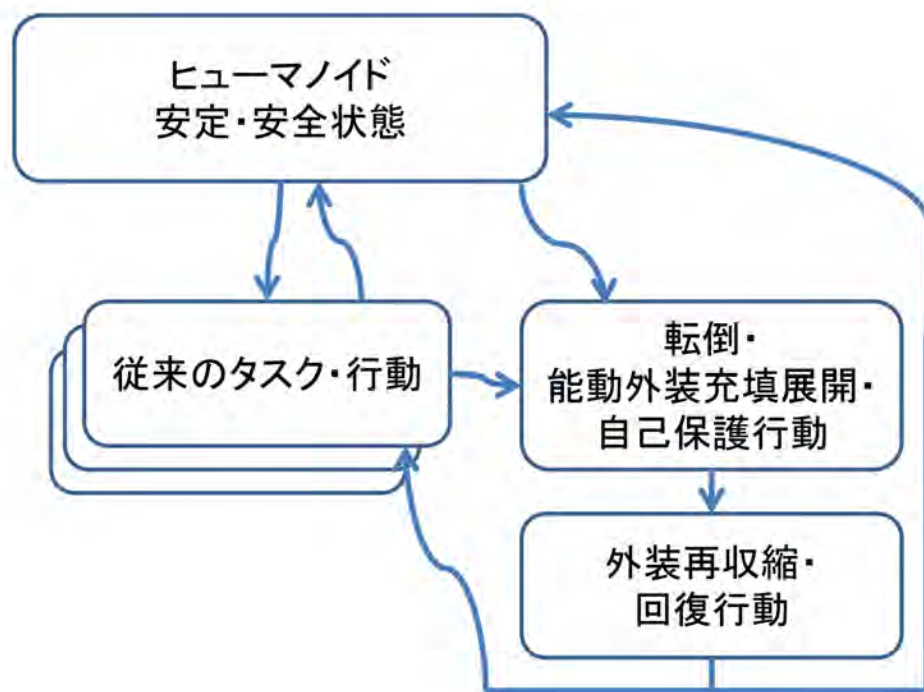


図 2.1: 非常用ではなく，通常行動として常に自己保護行動が可能なハードウェアとソフトウェアを有するヒューマノイド

を従来行動と同等に扱い選択できるヒューマノイドアーキテクチャが求められる．本研究ではそのために，瓦礫不整地環境においても転倒行動を可能とし，能動的かつ瞬間的に「エアバッグの様に」充填展開しまた何度でも「繰り返し利用可能」な能動緩衝外装を等身大ヒューマノイドに与える．

現在，乗用車用あるいは人間用ジャケットとしてのエアバッグは，「非常時・緊急時」に展開作動するものとして定義され，用いられている．ゆえにそれらは一回性のものであり，連続使用は不可能であって，利用後の排出機構や，空圧供給源の再装填機構は考慮・実装されていない．エアバッグ・エアバッグジャケットのこのような性質は，与えられる転倒事故の頻度に対する認識を顕著に示している．

部分的柔軟外装を用いたヒューマノイドの転倒 [14, 15, 16, 17] では，実際にヒューマノイドが転倒する際の行動論を視野に入れ新しいヒューマノイドアーキテクチャを提案している．これらの先行研究では転倒姿勢の瞬間的な状態遷移を考慮することで安全な着地動作・回復動作を実現させたり，あるいは転倒時の角運動量制御により全身を使っ

て転倒方向へ身体をひねりバックパック外装を転倒方向へ押し出すことで転倒時の自己保護行動をシミュレーションしている。

本研究では、ヒューマノイドの転倒・また全身の能動外装の膨張展開は「非常時」ではなく「常に起こりうる」通常行動のひとつとして捉え、能動緩衝外装を用いた上での転倒対応が通常行動制御に含まれるようにヒューマノイド行動論を再定義し、自由に変形させた能動緩衝外装を外乱荷重に応じて必要な転倒方向へ向け利用するような等身大ヒューマノイドの新しい外装構成論と自己保護行動を提案する。さらに、能動緩衝外装利用後の再収縮・空圧供給源カートリッジの再装填を実現させることで、一回性のエアバッグのような利用法でなく、必要性に応じて何度でも利用できる行動論を提案する。

ヒューマノイドの実際の転倒動作の研究 [16] においては、転倒時の状態を次のように定義している：

*SQUATTING State*

*EXTEND1 State*

*TOUCHDOWN State*

*EXTEND2 State*

*FINISH State*

すなわち、(1) 転倒判定が為され、バランス制御系のモジュールをオフ、着地準備姿勢 (2) 転倒角度に従って、最も安全な姿勢をとる (3) モータのサーボトルクをオフとし、着地 (TOUCHDOWN) する (4) サーボ再開と予後動作 (5) 起き上がりに備える (FINISH)

といったような転倒状態の分類である。この定義に従い、新たに能動緩衝外装を用いた自己保護行動を定めれば、

#### (1.5) ACTIVE DEFORM State

転倒方向に適した能動緩衝外装モジュールを展開する

#### (6) RECOVER State

能動緩衝外装モジュールを収縮・収納する

という状態を含むヒューマノイド行動論となる。

さらに「完全な体幹転倒」を防止する動作，すなわち三次元的縫製により柔軟に膨張展開し精密ハンドを覆い隠す腕部/手先モジュールによる環境支持や，膝着地支持により体幹着地を防ぐ動作，全身を丸め突起部を可能な限り無くしつつ臀部・背面部（ごく短時間での転倒の場合は，この順番で）の大転倒着地の選択，各能動外装モジュールの充填展開順序を考慮するシチュエーションへの対応も必要とされ，また不整地環境において等身大ヒューマノイド実機において選択可能とすべきである。

また，ヒューマノイドは全身の背面・臀部・腕部・手先部・膝部・膝裏部などそれぞれの能動外装モジュールを適材適所に用いるべきであり，外乱があったからといって全身の能動外装をフルに動作させるべきではない。これは平地でない限りは，二次的転倒や二次的被害を招く恐れがあるという理由による。

能動緩衝外装を用いた自己保護行動については第6章においても論じる。

## 2.6 ヒューマノイドの全身能動緩衝外装の実装

等身大ヒューマノイドにおいては，

- 背面緩衝外装（後方転倒）
- 臀部緩衝外装（後方転倒）
- 前面緩衝外装（前方転倒）
- 膝部緩衝外装（前方転倒，及び膝環境支持動作等）

等の実装が有効である。またロボットの性能・構造・形状に応じて，

- 前腕/上腕/ハンド部の保護緩衝外装（横方向転倒，及び腕部環境支持動作等）
- 膝裏緩衝外装（転落サーボオフ時の，膝関節モータ/ギアの対過トルク保護）

を必要とする。また体背面あるいは体幹部の一部が突出している場合<sup>5</sup>には，外装による衝撃緩衝が無為とならないよう，フレーム構造などを用いた体型の整形（第5章にて，HRP-2の背面フレーム構造を用いた能動外装モジュールを示す），あるいは臀部外装の大

<sup>5</sup> 計算機や，電装部品，バッテリー搭載などの都合による

規模化／突出化(外へ向かってオフセットを付ける)，充填膨張した外装最大形状・位置の確認が必要となる．

また衝撃加速度以外にも，ヒューマノイド保護の為に考慮すべきは，力積の総量である．転倒方向やその姿勢によっては関節に過トルクがかかる．緩衝外装は環境衝突時間を延ばすことで撃力の最大値を低減することに多大な効果があるものの，荷重そのものを消去するわけではないので，耐荷重・耐過トルクの観点からもヒューマノイド保護を考える必要がある．過トルクに関してボトルネックとなりやすいのは関節機構だが，弾性要素などを用いた関節モータ／ギア保護構造も考慮に入れる必要がある．

小型ヒューマノイドに対しては，その身長・体格に対して，着地衝撃加速度及び大規模(ヒューマノイドに比して)外装の困難さが小さくなるため，比較的能動外装を設置しやすい．

- 背面緩衝外装(後方転倒)
- 前面緩衝外装(前方転倒)

その他，ヒューマノイドによっては横方向転倒の為に

- 前腕～ハンド部緩衝外装(横方向転倒)

が有効となる．

また小型ヒューマノイドについても関節構造があまり頑健でない場合が多く考えられるので，関節脱臼・回復機構 [26] や弾性要素などによる関節モータ／ギアの保護機構も有用である．

膝／肘／ハンドによる環境支持や転倒防止が不可能で，かつ，転倒姿勢が制御可能な限りにおいて，これらロボットは最も有効である大規模外装(多くは，背面外装あるいは臀部外装等)を用いるように転倒動作と着地姿勢制御を取るべきであるが，その方向にさらに障害物がある場合，あるいは通信系の不調などによりソフトウェアからのサポートが困難である事を想定し，全方位への安全な転倒をハードウェアレベルから保証する(=背面，前面のみならず，腕部等の外装をも考慮し，実装する)ことが重要である．このように，環境や状況に応じて，外装そのものに自由度を付加する，いわば「能動緩衝外装変形プランニング」ともいうべき行動が，瓦礫不整地環境において研究開発者に見守られることなく稼働するヒューマノイドに必要である．

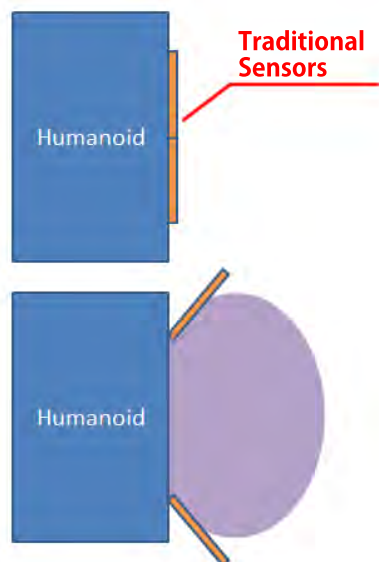


図 2.2: 既存の体表面センサと能動外装の実装

次に、ここで全身外装の実装にあたり考えられる弊害について議論する。

- 既存の接触センサとの干渉

ヒューマノイドの体表面に新たに能動外装を実装することで、体表面でのセンサと干渉する場合、すなわち、ヒューマノイドに硬質かつ一意な体表面が必要とされる場合は、乗用車のハンドルやダッシュボードのように、能動外装をあらかじめプラスチック製等のカバーで蓋しておき、それを開くことで充填展開する構造が考えられる(図 2.2)。第 5 章で詳細に述べるが、能動外装は利用後に外装内排出を行い再収縮するので、硬質カバーで蓋をしておくことは可能である。

- モジュールが過重となる場合

能動外装本体は軽量である布製(第 3 章)だが、その排出機構(第 5 章)にはドレインバルブ・ドレインファンを含むため、ヒューマノイドにとって新たな重量となる。そのためヒューマノイドの転倒頻度、転倒姿勢からの姿勢回復時間を見積もり、排出機構のドレインバルブの大きさ( $\propto$  排出流量断面積  $\propto$  排出速度)やドレインファンの選定をする必要がある。また、いくつかのモジュールで排出機構を統合することで全体の軽量化も図ることができる。

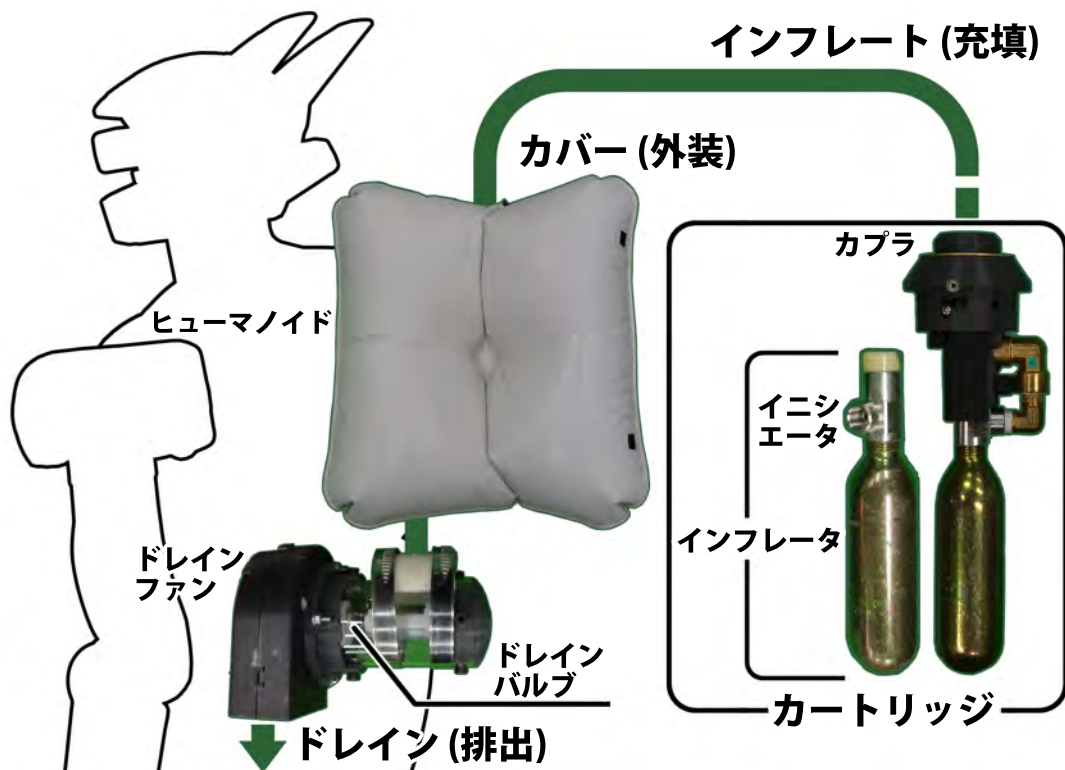


図 2.3: 実装される能動緩衝外装の各機構

特に過重となりやすい小型ヒューマノイドにおいては、例えば背面・臀部・前面の能動外装の排出機構は一本化可能であると予想される。

## 2.7 能動緩衝外装を有する等身大ヒューマノイドの構成要素

図 2.3 に、以降で用いる用語として、本研究で実装される能動緩衝外装の各機構を示す。

カバ- Active Cover

エアバッグ素材織物による能動緩衝外装本体。本研究では明言無き時、外装と呼ぶ場合は緩衝外装、特に能動緩衝外装を指す。

充填 Inflate

能動緩衝外装を瞬間的に膨張させる動作。瞬間充填，充填展開とも呼ぶ。

#### カートリッジ Cartridge

能動緩衝外装に瞬間充填するための使い捨てガスボンベカートリッジ。  
特に、複数回利用可能なことを指して再装填(リロード)、排莢(パージ)と呼ぶ。

#### インフレーター Inflator

ガス発生器。(本研究では、圧縮CO<sub>2</sub>ガスボンベを採用する)

#### イニシエータ Initiator

インフレータの瞬間開栓部分。(本研究では、爆破弁を採用する)

#### カプラ Coupler

空圧・油圧危機に用いられるワンタッチ継手。本研究では、カートリッジの簡易脱着のために使用する。

#### 排出 Drain

充填展開した能動緩衝外装から高速排出する機構。下記収縮と併せ、復帰動作と呼ぶ。

#### 収縮 Shrink

外装内排出した際、カバーが小さく縮むための機構。

以上のように、本研究では自己保護行動として、空圧型外装を充填展開し、緊急環境接触・転倒を実現させ、外装再収納を行い、また空圧供給源の再装填も行う。

### 2.7.1 能動緩衝外装ヒューマノイドの外装構造

能動的、かつ瞬間的に形状を変形させる安全用柔軟機構としては、まず、産業機械分野では車両に装備されているエアバッグが挙げられる。エアバッグに関しては後にも触れるが、その特性を挙げれば、

- (2-1) 衝撃吸収効果に比して、通常時は小型・軽量に収納されている
- (2-2) 収納された状態から、瞬間的な充填膨脹を行っても破裂せずその組織を保つ
- (2-3) 非常時にのみ動作し、その動作頻度は極めて低く、使いきりである



ということができるだろう。

体表面に空圧式膨張機構による外装構造を有し、かつ、瓦礫不整地の走破、与えられた災害対策・救助タスクを自律的に達成するヒューマノイドの実現のためには、既に述べた通り、研究開発者が介在・管理しない環境下でも高頻度で安全な転倒行動・転倒回復行動が必須である。すなわち、要求(2-1)(2-2)は当然ながら、加えて

- (2-3') 不意の外乱や環境接触時に動作し、その動作頻度は高い
- (2-4) 利用後は再度利用可能な状態に戻る

以上が要求される。

ゆえに本研究では、次のような機械設計指針を立て、能動緩衝外装を有する等身大ヒューマノイドを設計する。

- 転倒衝撃に耐えうる大規模外装へと瞬間充填展開しても破裂せず組織を保つ能動緩衝外装本体の開発(第3章)
- 各種空圧供給源の検討、そのカートリッジ化と再装填機構の設計と開発(第4章)
- 能動緩衝外装内の排出、自動復帰動作の実現(第5章)

### 2.7.2 能動緩衝外装ヒューマノイドの再装填機構

ヒューマノイドが実不整地環境などで緊急転倒に対しても頑健であり、適応可能であるためには、能動緩衝外装の展開が非常時ではなく定常的に起こりうるものであり、それを利用する自己保護行動をヒューマノイドが有しているべきであるという枠組みが重要となることは既に述べた。

その為、安全に保管可能でありかつ等身大ヒューマノイドの大規模な能動外装へと転倒時間に勝る速度で充填展開可能なインフレーター(ガス発生器)の検討と、常に再利用可能な状態に戻る能動緩衝外装へ容易にリロード(再装填)・パージ(排莢)ができるインフレーターカートリッジの開発が必須である。この簡易カートリッジ化(押し込む/引き抜くだけで装填/排莢可能)によって、最低限ものを掴むことのできるハンドがあれば、転倒転落の都度空圧供給ステーションなどに赴くことなく、自身やそばにいる他ロボットによる再装填と既存行動・作業の復帰再開が実現できる。

これは第4章において詳細に述べる。

### 2.7.3 能動緩衝外装ヒューマノイドの排出機構

転倒時自己保護行動のために大規模変形する能動緩衝外装が必要であるのは、ひとえにその大規模緩衝外装が従来の制御、行動やタスクを阻害しないためである。これを実現するため、転倒・転落において有効に利用された能動緩衝外装は、利用後には再び元の最小形へと復帰する構造を持つことが必須である。

ゆえに能動外装モジュールの内には、外装本体と同時に、外装内気体（インフレータから充填されたもので、安全なCO<sub>2</sub>あるいは少量のN<sub>2</sub>）を迅速に能動的な大気開放（強制排出）するための空圧機構、ドレインバルブとドレインファンが必要である。

これは第5章において詳細に述べる。また、実際にヒューマノイド自身による再装填・排出動作については、第6章にて実現する。

## 2.8 おわりに

本章では、等身大二足歩行ヒューマノイドの様々な損傷回避のために、「転倒しないヒューマノイド」あるいは「転倒しても回復できるヒューマノイド」として種々の行動論が存在する中で、従来の多関節ヒューマノイドの自由度空間にとらわれない能動的に形状・容積可変な緩衝外装の位置付けを説いた。また従来の柔軟外装の構成法において、ヒューマノイドの物理的接触特性と汎用行動性を共に満足するための設計選択余地が非常に小さかったことを説いた。

さらに、提案する能動緩衝外装の背景について様々な先行研究の観点から論じ、全身に分布した能動緩衝外装を利用することで可能となる自己保護行動について議論した。重要な先行研究として「転倒しても回復できる等身大ヒューマノイド HRP-2」などの既存のヒューマノイドへの実装論と転倒行動アーキテクチャを引用しつつ、能動的な外装を用いて「緊急行動」ではなく従来の「通常行動」と同列に自己保護行動を可能とする新しい等身大ヒューマノイドアーキテクチャについて議論し、本研究でのアプローチについて示した。

## 第3章

# 能動的に形状・容積可変な緩衝外装の 設計と開発



### 3.1 はじめに

本章では，空気圧システムを用いた能動緩衝外装モジュールの議論と開発について述べる．小型ヒューマノイドから等身大ヒューマノイドに至るまで，様々な方式で開発した能動緩衝外装の設計，実装について検討・議論する．また実際に，任意のヒューマノイドが与えられた時，その体幹サイズと着地姿勢許容角から能動緩衝外装の必要サイズを見積もる手法を示す．またこの能動外装モジュールに弾性要素で構成された収縮機構を備え，排出時に外装構造を収縮させる動作を示す．

### 3.2 柔軟素材 + 形状制限構造による外装

図 3.1 に，検証試行した外装構造の分類を示す．

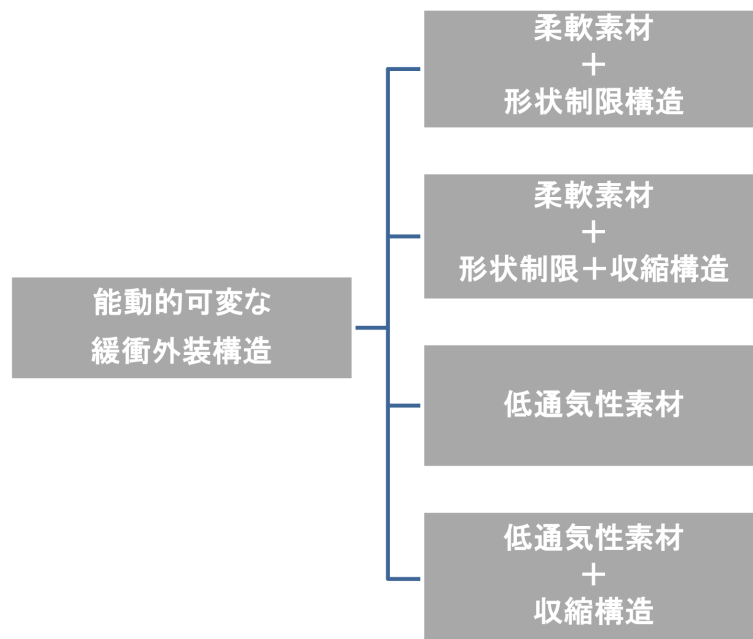


図 3.1: 能動緩衝外装構造の分類

まず，最も単純な能動外装の構成として，外装本体をゴムのような柔軟素材で構成し，さらに膨張時の形状を制限する繊維性（スリーブ）構造を開発し，この「柔軟素材 + 形状制限」構造による能動緩衝外装を小型ヒューマノイド NAO の臀部に装着させ，後方転倒試験を行った（本節の内容は，著者論文 [41] にて発表済み）。

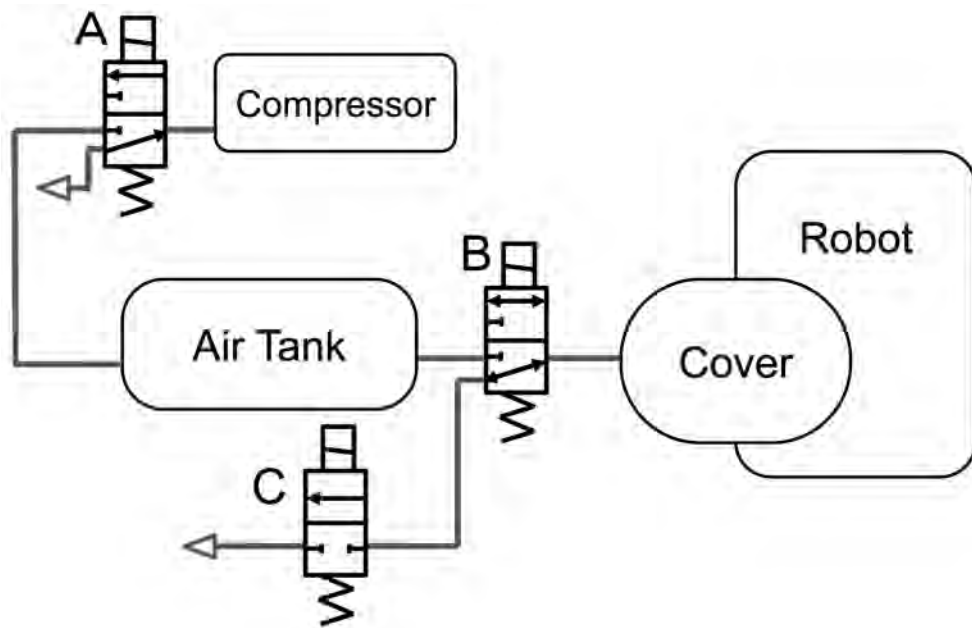


図 3.2: NAO 臀部能動緩衝外装のための電磁弁制御．電磁弁 A: 中継タンク加圧; 電磁弁 B: 外装充填展開; 電磁弁 C: 外装排出 (大気開放) (著者論文 [41] より引用)

図 3.2 にこの空圧システムを示す．表 3.1 にここでの電磁弁諸動作に要する時間を示す (電磁バルブの記号は対応)．

表 3.1: NAO 臀部外装充填展開を用いた転倒動作のための電磁バルブ制御; 励磁=1, 消磁=0, don't care=X

電磁バルブ動作	バルブ A	バルブ B	バルブ C
タンク圧縮	1	0	X
外装充填展開	X	1	0
外装保持	X	0	0
外装排出	X	0	1

また表 3.2 に本試験において重要な所要時間を示す．

図 3.3 に、本実験の概観を示す．コンプレッサ (圧縮機) により中継タンクに 4 気圧<sup>1</sup>まで加圧し、瞬間的に電磁バルブを開弁し外装充填展開を行う．この実験では、臀部外装

<sup>1</sup>本研究では厳密な圧力管理は不要であるから、以降では  $0.1\text{MPa} = 1\text{atm} = 1$  気圧として設計・実験の記述、文献の参照を行う．

表 3.2: NAO 転倒動作に関わる諸時間

動作	所要時間 (ms)
最上位制御ループ (EusLisp)	25~
バルブ操作 (外装充填展開/保持等)	15~30
外装充填展開	~250
NAO の後方転倒	500~

充填展開を用いなかった場合に最大約 14G ( $G$  は重力加速度、 $9.8\text{m/s}^2 = 1G$ ) に対し、外装充填を行うことで約 5G まで低減することが確認できた。

本試験により、まず空圧システムを用いたヒューマノイド能動緩衝外装の最小構成を示した。この最小構成を用いて転倒時に瞬間的に外装変形を行うことにより、大幅に転倒衝撃を緩和できることが示された。しかし繊維型スリーブ構造だけでは、動作終了後に再び外装を収縮・収納することができず、転倒動作前の状態への復帰が実現できない。よって、空圧排出時に自動的に収縮・収納される構造が次の課題となる。

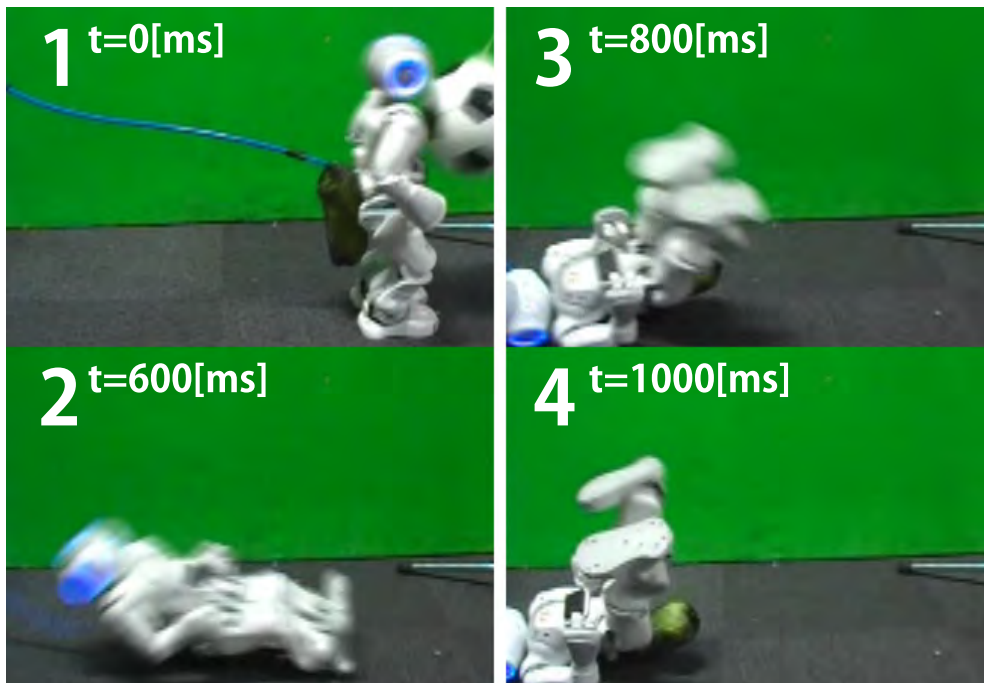


図 3.3: 能動的に形状・容積可変な緩衝外装 (柔軟素材 + 形状制限構造) を持つ NAO の転倒動作 (概要); 詳細は付録 B にて述べる .



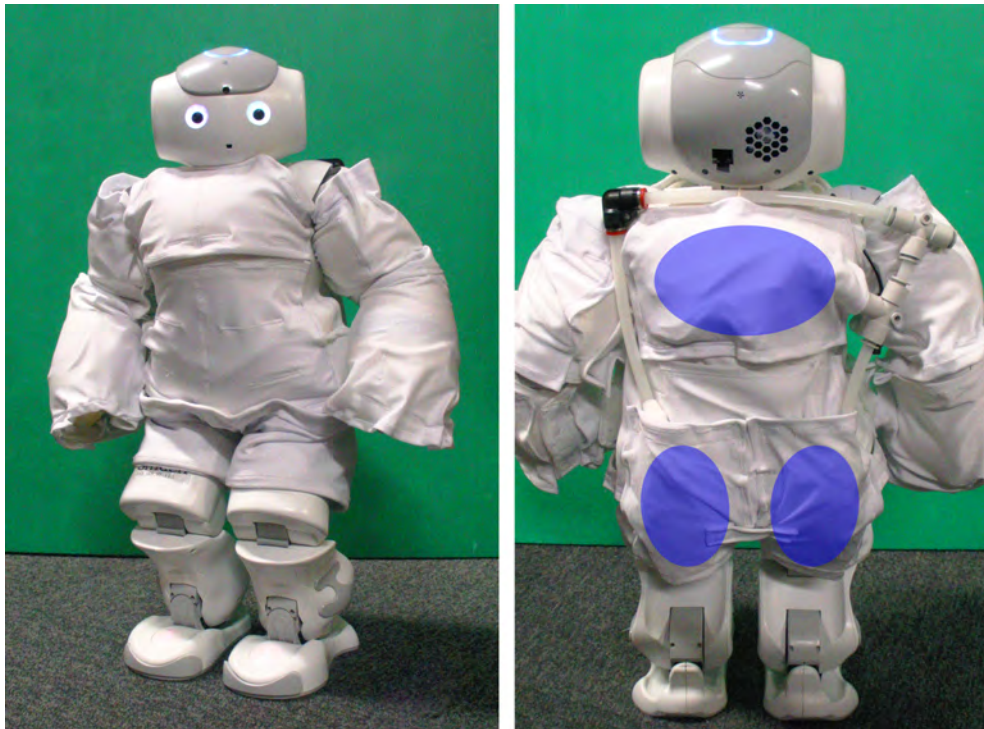


図 3.4: 柔軟素材 + 形状制限 + 収縮構造による NAO 能動緩衝外装 (概要) ; 詳細は付録 B にて述べる .

### 3.3 柔軟素材 + 形状制限 + 収縮構造による外装

次に、外装内空気を大気開放した際に自ら収縮する構造を併せ持つ能動緩衝外装（「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」構造）を考案した（図 3.4）。

この実験では、臀部外装変形を用いなかった場合に最大約 14G に対し、外装充填展開を行うことで半減できるだけでなく、転倒時以外には自ら収縮する構造を有する外装を示した。ヒューマノイド NAO の転倒実験について詳細は付録 B において述べる。

しかしながら、伸縮性素材（ニット素材）の伸縮性には制約があり（およそ ~ 200 % 程度）、等身大ヒューマノイドに応用するには限界がある。ヒューマノイドが転倒した際の衝撃荷重は簡易にはその重量、すなわちサイズの 3 乗に比例するのに対し、着地時に衝撃を緩和する緩衝外装の面積は 2 乗でしかないことから、より大きな（すなわち、「膨張」率の高い）外装構造が必要である。また、伸縮性素材の張力による収縮構造だけでは、完全排出には至らず、外装内気体が残留することも確認されたことから、排出設計に関し

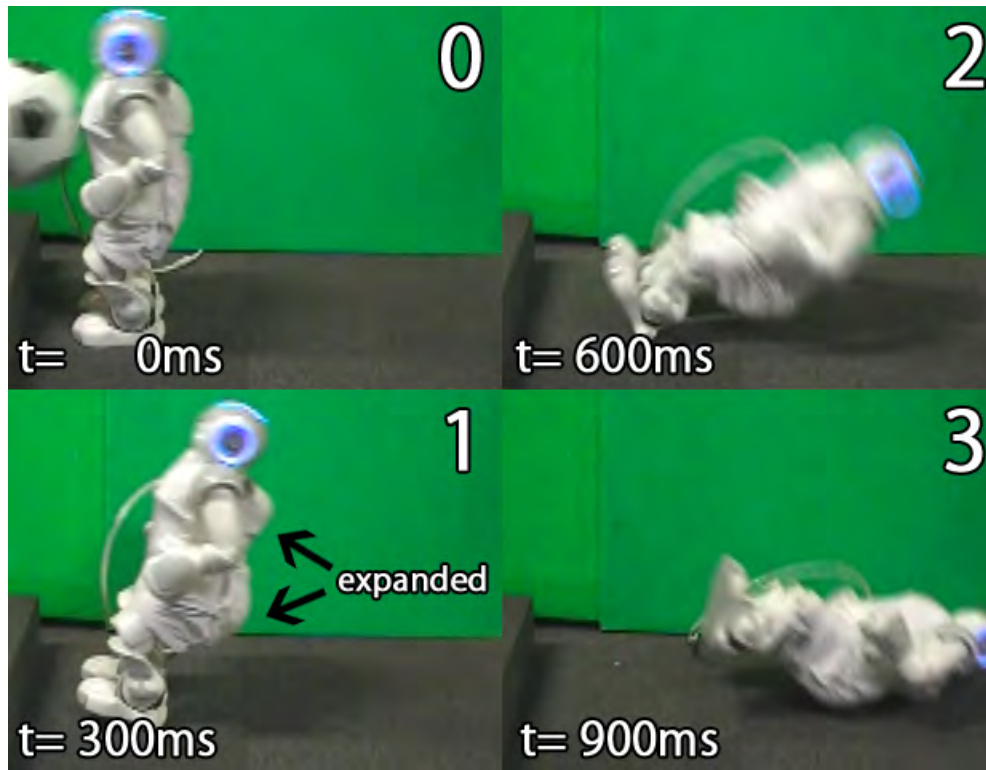


図 3.5: 柔軟素材 + 形状制限 + 収縮構造による NAO 能動緩衝外装を利用する転倒動作 (概要); 詳細は付録 B にて述べる .

ては収縮だけでなく能動的に大気開放を行う必要性も示された .

### 3.4 等身大ヒューマノイドのための能動緩衝外装の構成法

本節以降では、能動的に形状・容積可変な構造を有する等身大ヒューマノイドのための外装モジュールの開発について述べる。

まず、等身大ヒューマノイドのための能動的に可変な緩衝外装の設計構成論について述べる。図 3.6 に、本研究の転倒試験で扱う等身大二脚ヒューマノイドと、能動緩衝外装の概観を示す。実際に転倒動作を試行し、第 6 章では腰臀部ではなく体幹背部に能動緩衝外装を設置している。

前節まででは、伸縮性素材に含まれたゴム状素材によって能動緩衝外装を設計してきた。ゴム素材は過内圧によって無制限に膨張する為、等身大ヒューマノイドの能動緩衝外装を構成するに不十分である。本節以降ではゴム素材の代わりに低通気性素材<sup>2</sup>を用いて外装本体を構成する。一般的な綿や絹素材の強度  $3 \sim 5\text{g/d}^3$  に対し低通気性素材は  $10\text{g/d}$  程度の強度を持ち、これを用いて能動緩衝外装を構成すれば等身大ヒューマノイドの能動緩衝外装を十分に実現できる。また実際に過負荷に対して脆弱となるのは縫合部であるから、縫合糸も同等の強度を有していることや縫合部の接着密封も重要である。この素材の難燃性・摩擦に対する強さも大きなメリットである。

それでも内圧が高くなり過ぎた時、縫合部から少量内部気体が漏出したり、最悪の場合破裂しうる。繊維の破壊や破裂を防ぐためには接地表面積を大きくとること、過内圧時に内部気体を自然排出するような構造(第 5 章においても議論)が必要となる。また瓦礫不整地環境では鋭利な突起物が散乱していることも想定できるため、防刃軍手のような表面素材も有用となるだろう。

<sup>2</sup>多くは強力ナイロン製織物で、耐熱・難燃性であり、表面に非通気性コーティング等が為されている。その性能は織密度、目付(単位は  $\text{g/m}^2$ )、通気度 ( $\ell/\text{cm}^2/\text{min}$ ) で示される。

<sup>3</sup>d とはデニールのことを指し、繊維の太さの単位であって  $9000\text{m}$  当たりの質量で表される。このデニール当たりの破断荷重 ( $\text{g}$  重) をもって繊維の強度を表す。



図 3.6: 等身大二脚ヒューマノイドと能動緩衝外装；転倒動作試行の結果第 6 章では腰臀部でなく体幹背面部に設置している。

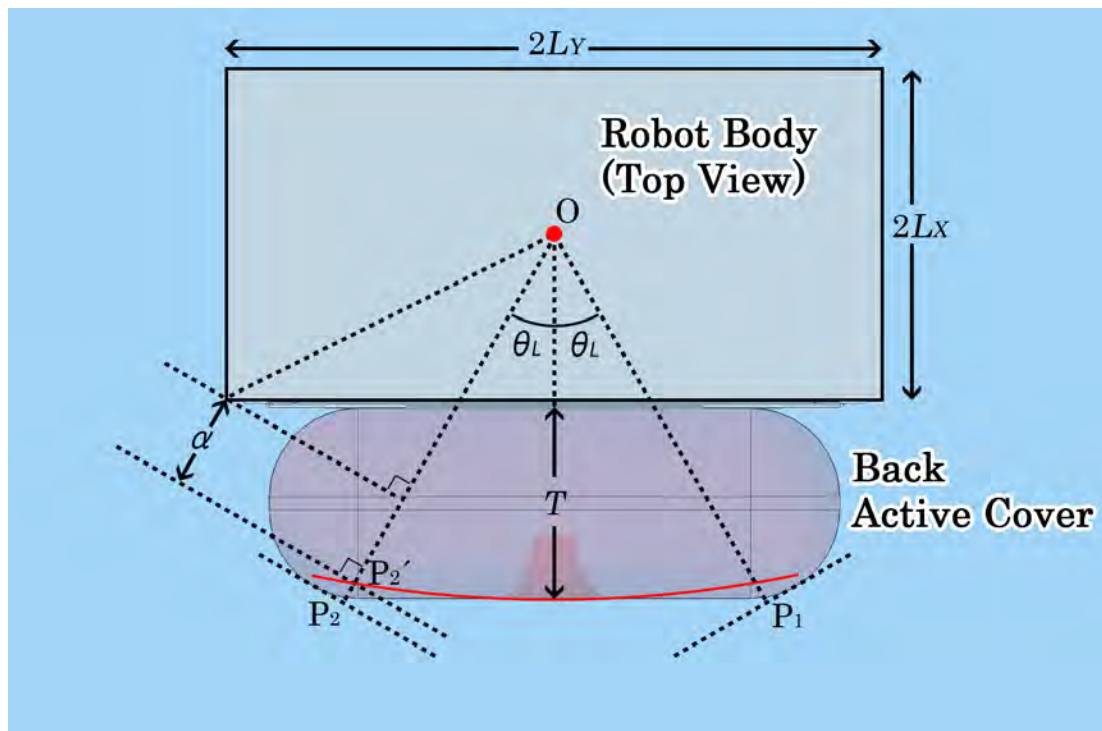


図 3.7: 能動緩衝外装構造の設計

次に、この大規模能動緩衝外装の設計論について述べる。まず、縦方向と横方向に関しては、転倒に対して十分に体幹を保護し環境接触させないことが必要であるから、最低サイズとして体幹とほぼ同程度の縦・横サイズが必要である(図 3.6)。さらに、転倒接触平面が完全な平面でない場合や、障害物が存在する場合にも対応するために転倒姿勢角に幅を持たせる必要がある。ヒューマノイドの重心は体幹の中心にあると仮定した上で、転倒姿勢角許容誤差  $\theta_L$  を設定することで、縦方向・横方向の必要形状を概算できる( $P_1, P_2$  点からの接触・図 3.7)。

さらに、この  $\theta_L$  から能動緩衝外装の厚みも見積もることが可能である。環境接触によって能動緩衝外装は変形し、転倒姿勢角誤差  $\theta_L$  時の環境接触点  $P_2$  ではなく  $P_2'$  となることが考えられるが、ここでは簡単のため両者をほぼ等しいと仮定する。

転倒角  $\theta_L$  をもって転倒・平面接触した場合のヒューマノイドと平面の距離  $\alpha$  は、ヒューマノイド体幹の厚み  $2L_X$ 、幅  $2L_Y$ 、能動緩衝外装の厚み  $T$  として

$$\alpha = L_X + T - \sqrt{L_X^2 + L_Y^2} \sin\{\theta_L + \arctan(\frac{L_X}{L_Y})\} \quad (3.1)$$

ヒューマノイド体幹が直接環境接触される境界条件として  $\alpha \geq 0$  とすれば、式 3.1 より

$$T \geq \sqrt{L_X^2 + L_Y^2} \sin\{\theta_L + \arctan(\frac{L_X}{L_Y})\} - L_X \quad (3.2)$$

と算出できる。以上の条件式及び安全率 3~ を加味することで、能動緩衝外装の厚みも設定できる。

本研究第 6 章で用いる二脚ヒューマノイドの場合、転倒姿勢許容角  $\theta_L = \pi/6$  と設定し、 $2G_X = 260\text{mm}$ 、 $2G_Y = 520\text{mm}$  から  $T \geq 58\text{mm}$  と算出できる。これに安全率を加え外装厚みはおおよそ 200mm と設定した。

### 3.5 低通気性素材による外装

図 3.8 は、以上の設計に基づき、幾度かの転倒試験によってその形状・実装位置の試行を行い、等身大ヒューマノイド背面のために開発した平面型の緩衝外装本体である。表側と裏側の 2 枚構造で、周辺部を縫合及び接着密封している。裏面（ヒューマノイド側）上部中央には、注入口（Inlet hole）、その左右に 2 ケの特注排出口（Outlet holes）を備えている（それぞれの詳細については注入口 = 第 4 章、排出口 = 第 5 章において述べる）。中央の最大径の貫通穴は形状保持のための固定具である。

裏面の 2 ケのゴム伸縮帯は、実際には一辺から対向辺へ「十字」の形に張られた状態で使用される。本体の容量は 30 ℓ である。外装製作は株式会社プロップに外注した。なお以降の章でも重要となるが、同社によれば許容体積はおおよそ + 10 %、すなわち 30 ℓ ~ 33 ℓ である。注入体積が + 20 % になると、縫合部などから内気体が漏出し、最悪の場合破裂に至る<sup>4</sup>。それゆえ、本外装を再装填可能な能動緩衝外装として用いるためには、一度活用した後に内容気体の能動的かつ完全な排出（第 5 章）が必須となる。

次に、この等身大ヒューマノイド用能動緩衝外装に対して、外装素材と伸縮構造を明確に分離する設計を与える必要がある。すなわち、等身大ヒューマノイドの転倒衝撃に耐えうるような「エアバッグ」用の低通気性素材と、それを折り畳む設計の分離である。

<sup>4</sup>本素材は非通気性素材にコーティングがなされており、実際には縫合部や締結部等からの漏れが支配的である。

通常，乗用車のエアバッグは

- 衝撃吸収効果に比して，通常時は小型・軽量に収納されている
- 収納された状態から，瞬間的な充填膨張を行っても破裂せずその組織を保つ
- 非常時にのみ動作し，その動作頻度は極めて低く，使いきりである

という特性を有するが，本研究ではこれに完全排出（ドレイン），再装填（リロード）機構を備え，必要とされる状況で何度でも利用可能なヒューマノイドの能動緩衝外装を開発する．本節ではまず，低通気性素材を用いたヒューマノイド外装の開発と検証について述べる．

低通気性素材による緩衝外装の概観に関しては，図 3.6 において既に示した．

図 3.9 ~ 図 3.10 に，この平面型外装の展開の様子を高速度カメラで撮影した様子を示す．およそ 0.3 秒で 30ℓ の展開が完了するが，0.3 秒を待たなくとも，充填展開を開始した緩衝外装は転倒衝撃に対し効果を発揮することが期待できる．緩衝外装本体とインフレータの間に様々な配管・機構（第 4 章）を経由した場合は若干の注入速度の阻害が想定されるが，実際の試験でも 0.3 秒以内の充填が確認されている．充填膨張の瞬間には，各部に負荷がかかっていると考えられるが，エアバッグ用の低通気性素材で構成しているために破裂することなく充填が可能である．

図 3.11 に，緩衝外装を有する等身大ヒューマノイドの転倒実験の様子を示す．直立姿勢から全身関節をサーボオフする際に能動緩衝外装を充填展開した試験では着地衝撃およそ 5G，同様に人間に押し倒された場合に外装を非展開 / 展開した試験ではそれぞれおよそ 60G / 30G を計測した．これらの実験内容，実験結果については第 6 章にて詳細に述べる．

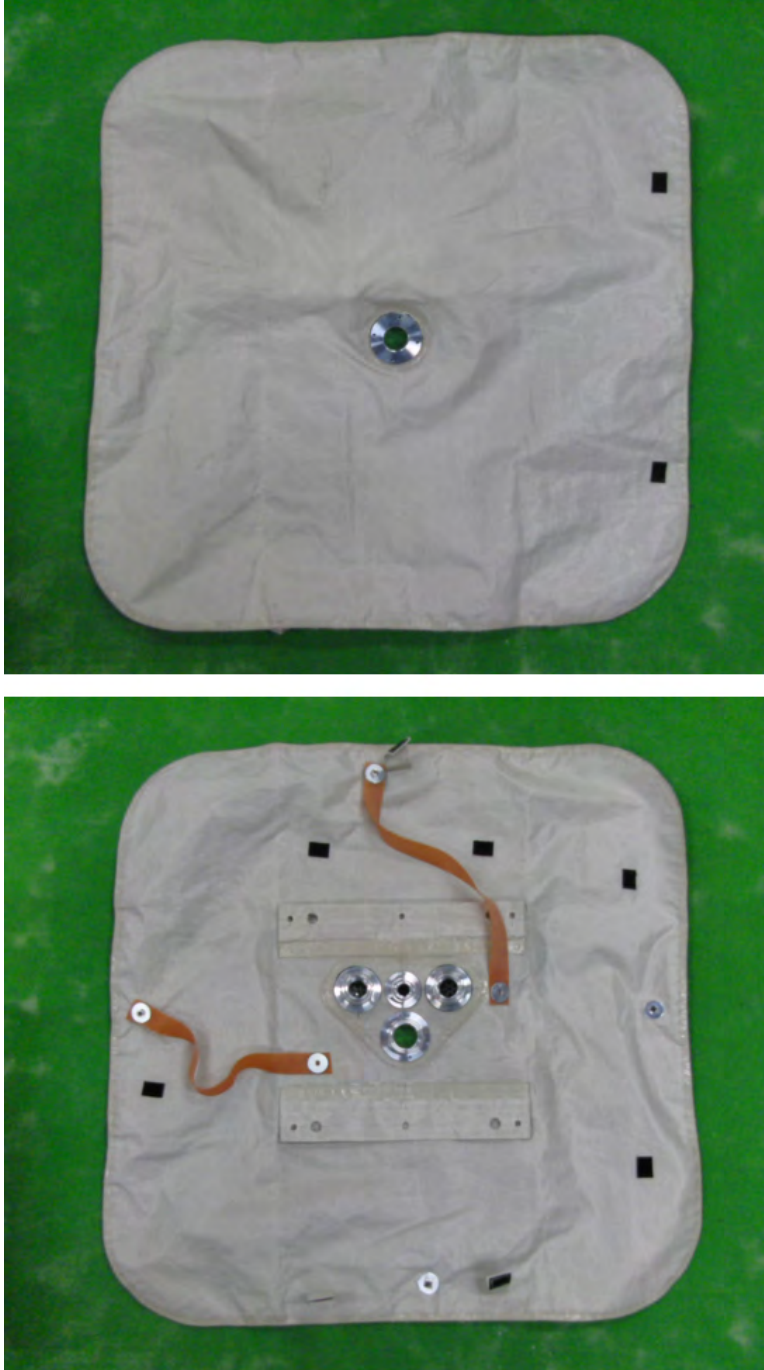


図 3.8: 低通気性素材による緩衝外装と弾性要素収縮構造の表側と裏側；裏面（ヒューマンノイド側）上部中央には，注入口，その左右に2つの特注排出口を備える。





図 3.9: 低通気性素材による緩衝外装の展開速度 (1/2) ; 0.2 ~ 0.3 秒で展開が完了する .



図 3.10: 低通気性素材による緩衝外装の展開速度 (2/2)

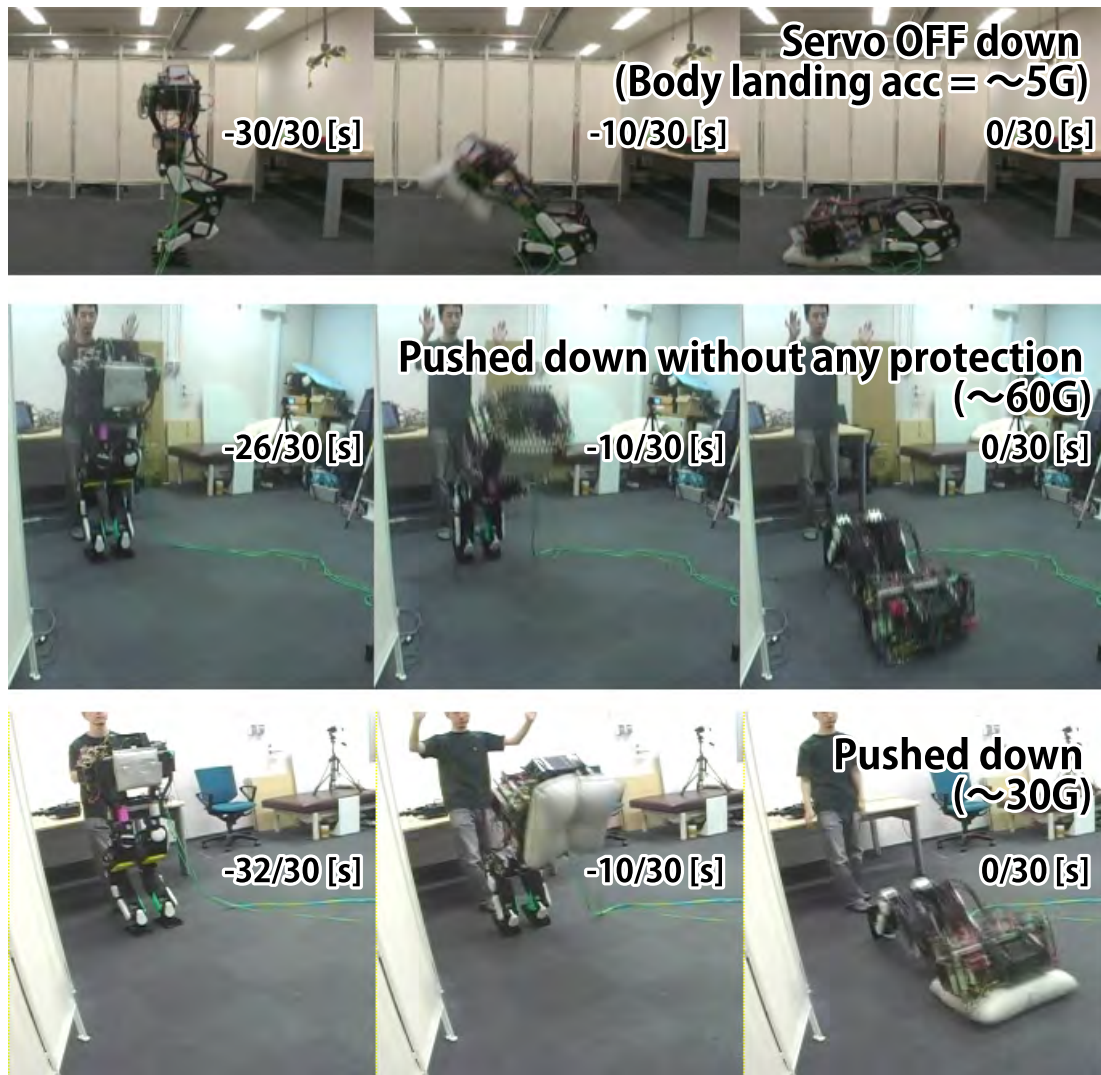


図 3.11: 低通気性素材による緩衝外装を有する等身大ヒューマノイドの転倒・自己保護行動実験 (概要)

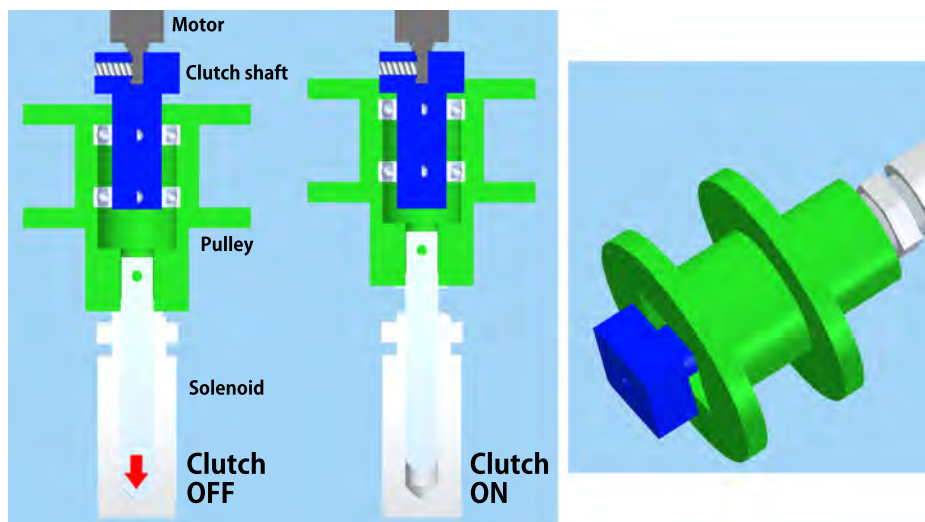


図 3.12: 腱駆動 + 電磁クラッチプーリによる巻き取りと瞬間リリース方式；ソレノイドがプルした場合のみプーリがリリースされる。

### 3.6 低通気性素材 + 収縮構造による外装

以上のように低通気性素材で構成された外装に，収縮構造を持たせることが必要である。

図 3.8 では，裏面には高伸縮性ゴム帯を用いた収縮機構を備えている。

その他の収縮機構としては，

- 腱駆動 + 電磁クラッチプーリ式 (図 3.12)
- 形状記憶合金式

などが考えられる。腱駆動 + 電磁クラッチプーリ式構造とは，膨張展開した後の外装を引っ張って収縮させる紐巻き取り式の腱駆動式プーリと，巻き取った後にクラッチオフすることでプーリを瞬間リリースする (図 3.12 右) 電磁クラッチによる収縮方法の構成である。また形状記憶合金によって展開後の外装を抱え込むように押さえつけることで最小形に留める手法も考えられる。しかしながら，剛性的収縮機構は次回充填に支障をきたす恐れがある<sup>5</sup>ことから，弾性要素のみで収縮するゴム帯弾性要素式を採用する。

<sup>5</sup>例えば，形状記憶合金方式では加熱により「収縮」が実行された後，十分に冷却されるまでデッドタイムが生じる。クラッチプーリ式では，転倒に伴う衝撃でクラッチが引っ掛かり，充填膨張を阻害する場合が考えられる。

図 3.13 に、弾性要素のみを用いた収縮構造によって排出時に外装構造を収縮させる動作を示す。外装構造が周辺物と接触することでヒューマノイドの復帰動作や復帰後の従来行動を阻害しないよう、排出時に自然と小さく収まる構造が実現できた。排出構造に関しては第 5 章にて述べる。

### 3.7 おわりに

本章では、空気圧システムを用いた能動緩衝外装モジュールの議論と開発について述べた。小型ヒューマノイドから等身大ヒューマノイドに至るまで、様々な方式で開発した能動緩衝外装の設計、実装について検討・議論した。また実際に、任意のヒューマノイドが与えられた時、その体幹サイズと着地姿勢許容角から能動緩衝外装の必要サイズを見積もる手法を示した。転倒試験の詳細については付録 B(小型ヒューマノイド)、第 6 章(等身大ヒューマノイド)で述べる。この外装構造へ充填するための空気圧供給源については、第 4 章にて述べる。またこの能動外装モジュールに弾性要素で構成された収縮機構を備え、排出時に外装構造を収縮させる動作を示した。

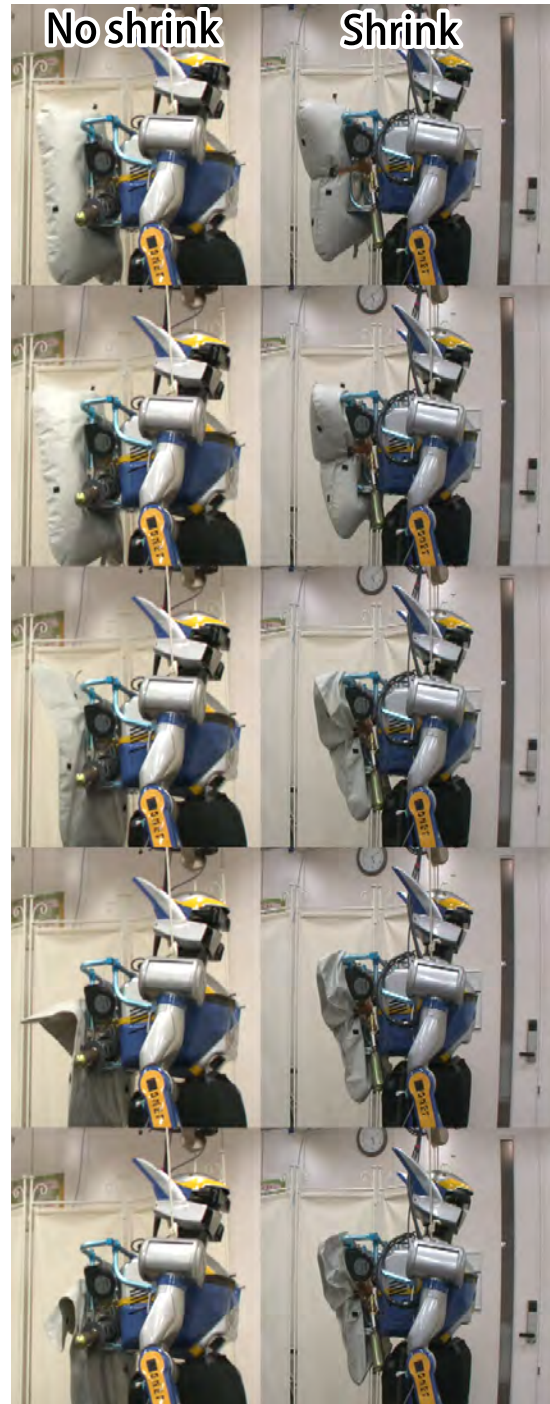


図 3.13: 高伸縮性ゴム帯弾性要素のみを用いた収縮動作 (左: 収縮構造無し; 右: 収縮構造有り)

## 第4章

# 能動緩衝外装における再装填機構の 設計と開発





## 4.1 はじめに

本章では、まず従来の空圧・油圧ロボットやエアバッグとの、能動外装システムの相違について述べ、本研究での空圧機構の要求性について議論する。その上で、能動緩衝外装へガスを供給する方法論とそのカートリッジの設計について議論する。市販されている自動車や二輪車運転者、または危険環境で働くためのエアバッグジャケットのためのインフレーター（ガス発生器）について触れながら、それらとの性能・要求性の相違について述べ、都度圧縮式から、化学反応式、ストアードガス式までその諸特性を示し、等身大ヒューマノイド能動外装への充填に最も適した爆破弁インフレーターを選定する。

カートリッジ機構においては、まずヒューマノイドのインフレーター装填方法について論じ、簡易なハンドでも利用可能なカートリッジ化の重要性を説く。そして実地的環境・開発者が介在しない環境下においてもヒューマノイドが自ら能動緩衝外装を有効に利用するために必須となる、空圧的システムの構成法・カートリッジ化されたインフレーター再装填機構、その設計論と実装について述べる。さらに、ヒューマノイド自身によるカートリッジの使用済み／未使用の判定法についても論じる。

## 4.2 産業的あるいは既存のロボットにおける空圧システム

ロボット以外の分野でも、空圧システム、電磁バルブと組み合わせたブローワーク<sup>1</sup>、あるいは大型機械において油圧シリンダなどが幅広く使われている。より人間に近い空圧機器としては、後述するような二輪車用タイヤ充填インフレーターポンペ、自動車用エアバッグ、人間用エアバッグ内蔵ジャケット、緊急膨張式救命胴衣などが挙げられるだろう。

空圧・油圧駆動を用いたロボットとしては、様々な研究成果が数多く為されている。ヒトの筋骨格系を模した、13自由度空気圧人工筋を用いた二足歩行ロボット [42][43]、足首部に弾性構造「blade feet」を有するスプリント・アスリートロボット [44] などがある。これらは駆動のための空気圧・油圧ロボットであり、その配管密閉性、制御性、精密性が重要であった。しかしながら本研究の空圧構造は、従来のロボットとは全く異なる。

第2章にて述べたエアバッグと本研究の空気圧モジュールの要求性の相違と同様に、従来の空圧ロボットとの相違をまとめれば、表 4.1 のようになる。

<sup>1</sup>コンベア（搬送機械類）と組み合わせ、ノズルから噴射することで部品の仕分けや包装を行う工場機械。

表 4.1: 従来のロボットと能動緩衝外装の相違

	従来の空気圧・油圧駆動ロボット	本研究の能動緩衝外装
駆動圧力	一定圧力 (10 気圧 ~ 等) が 常圧として必要	瞬間的に超高压が必要 外装本体はほぼ大気圧
気密	漏れ無きこと	瞬間充填以外を考慮せず
制御	必要	充填信号のみ
配管構造	制御電磁弁等必要	不要

またリンク長を変形させ、子供から大人まで成長する身体の模倣を行う、高信らのヒューマノイド [35] は、液圧を駆動以外に利用する先行研究として挙げることができる。

### 4.3 能動緩衝外装の空圧供給

以上から、ヒューマノイド能動緩衝外装の空圧供給源としては、

- 外装本体に加圧するのは低圧である (1 ~ 1.1 気圧程度) が、高速充填を要する
- 供給源は可能な限り小さく、また交換可能である
- 安全である (災害現場などでの使用を想定)

などの要求条件が挙げられる。

ヒューマノイドの能動緩衝外装は、単にエアバッグを搭載したものではない。ヒューマノイドが自在に能動緩衝外装を利用できるためには、外装設計そのもの (第 3 章) のみならず、この充填方法の設計と排出機構の設計 (第 5 章) が必須となる。

図 4.1 に、ヒューマノイド能動外装の空圧供給源の分類を示す。またそれらを高速充填性・小型交換性・安全性の観点から諸特性をまとめたものを表 4.2 に示す。

以下、これらの空圧供給源について検討の結果を述べる。

### 4.4 都度圧縮式空圧供給源

都度圧縮式とは、コンプレッサ (圧縮機) を用いて中継タンクに圧縮空気を準備しておき、要求に応じて瞬間的に電磁バルブを開閉することで能動緩衝外装へガスを送り込む

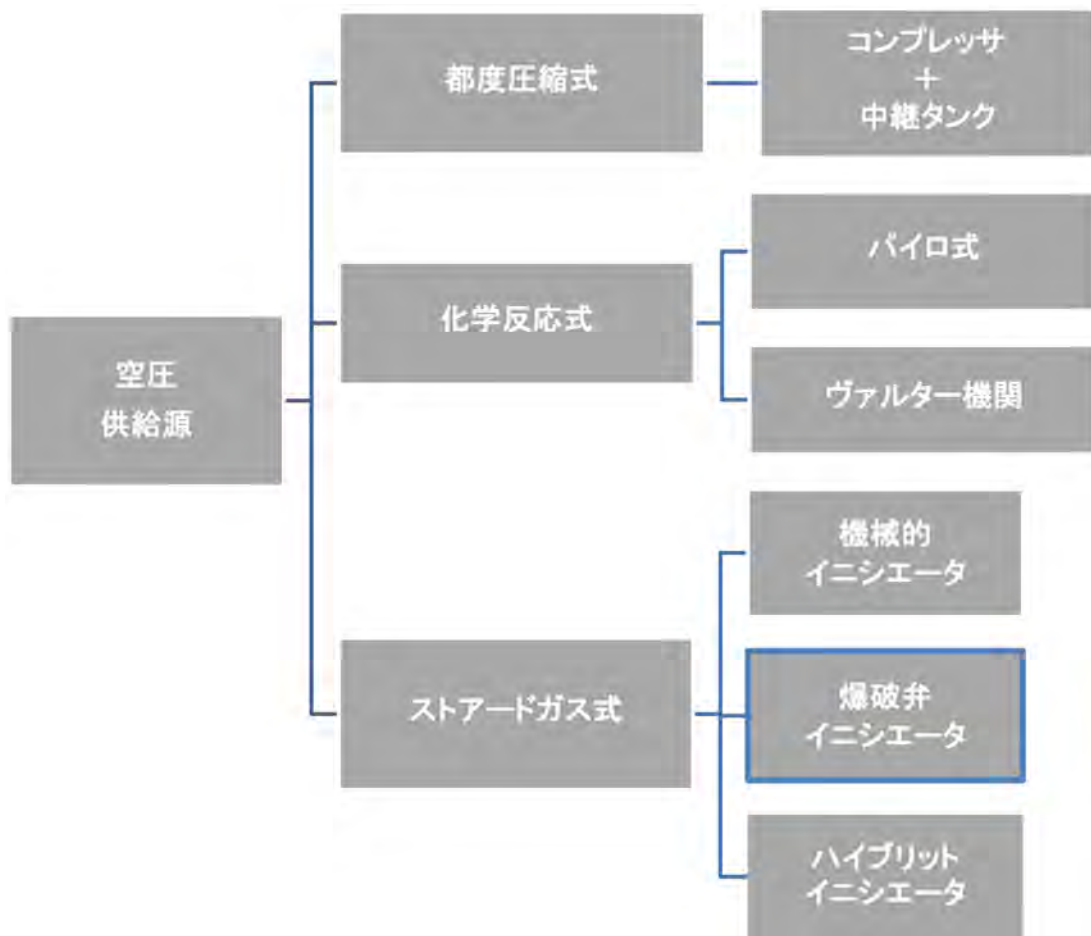


図 4.1: 瞬間充填の為の空圧供給方式の分類

方式である(表 4.3)。また、コンプレッサの代わりに、後述するような小型のストアードガスポンプを用いて中継タンクに加圧する方法もある。

Nao を用いた小型ヒューマノイド用能動緩衝外装試験ではこれを用いた。

#### 4.5 化学反応式空圧供給源

次に、種々の燃焼材に着火・化学反応を起こすことで気体を得る化学反応式が考えられる。

表 4.2: インフレータ特性の総括

種別		高速充填	小型・交換性	安全	備考
都度圧縮	コンプレッサ式	×	×		室内限定適用
化学反応	パイロ式			×	爆発危険性
	ヴァルター機関		×	×	爆発危険, 大ボンベ
ストアード	機械事前開栓	×			低圧低容量
	機械瞬間開栓	×			低圧低容量
	爆破弁開栓				(採用)
	ハイブリット			×	爆発危険性

表 4.3: 都度圧縮式の諸特性

最大圧力	10 気圧制限
充填方式	電磁バルブ
容量	タンク容量に依存

#### 4.5.1 パイロ式

パイロ式とは、いわゆる燃焼材に着火し、その燃焼ガスを利用するインフレータ方式である。専用容器の中に燃焼材が詰められており、その中央にイグナイタ(発火剤)が備わっている。このイグナイタに着火することで、燃焼ガスを瞬間的に得るものである。ストアードガス爆破弁式と並んで、一般自動車に搭載されているエアバッグの空圧源として広く利用されており [45]、パイロ式は軽量化に向いているとされる。

しかし、パイロ式燃料材は大変危険であり、爆発物としての危険性を有する。一般に乗用車では車載ネットワークである CAN<sup>2</sup>及びそのサブネットである LIN<sup>3</sup>通信ネットワーク下で厳密に管理されており、CAN, LIN 通信の制御下及び複数の衝突センサからの信号以外では動作しないようになっている<sup>4</sup>。このパイロ式インフレータを等身大ヒューマンノイドや他のロボットなど車載以外に用いるには今後の技術規定、法規定が必要となる。

<sup>2</sup>Controller Area Network; 差動信号式ラインバス型ネットワーク (ISO 11898 及び ISO 11519 標準)。基本的にはシリアル通信であるが、各種電子機器から送信されるデータ群に優先度を付与し通信し、また厳密なエラー検出・処理を行う。

<sup>3</sup>Local interconnect Network; CAN 通信の下位ネット。通信速度や正確性をそれほど要求されないパワーウィンドウ、シート駆動、ライトなどの制御を行う。

<sup>4</sup>衝突センサとしては、機械式あるいは電子式加速度センサがフロントボディに搭載されており、セーフティロック機構を有する複数のセンサ群の論理積判定によってエアバッグを作動させる。

表 4.4: ストアードガス，機械的イニシエータ (事前開栓) 式の諸特性

圧力	10 気圧 ~
充填方式	機械的 (事前開栓)
容量	SATP(標準状態) 約 8 ℓ (製品に依る)

#### 4.5.2 ヴァルター機関

ヴァルター機関とは，高濃度過酸化酸素を推進剤としてロケットエンジンを駆動する方式である [46][47]．ロサンゼルスオリンピック (1984) 開会式での，人間が背負う「Bell Rocket Belt」のデモンストレーションなどが有名だが，化学的燃焼材の取り扱いに危険が伴うこと，過酸化酸素タンクが巨大であることなどからロボットに搭載するには不向きである．

### 4.6 ストアードガス式空圧供給源

第三に，あらかじめ高圧空気を充填したボンベ (いわゆる，ストアードガス) インフレーターを使った方式が考えられる<sup>5</sup>．ボンベに加圧された気体 (多くは不活性で安全な CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>) に蓋し，様々な方法で開封する方式といえる．

まず，ストアードガスボンベのイニシエータに機械的構造を有するものである．以下のように小型のものが一般に市販されている．

#### 4.6.1 機械的イニシエータ

機械的イニシエータの中でも，事前開栓式と瞬間開栓式が挙げられる．

図 4.2 ~ 図 4.3 は，二輪車のタイヤがパンクした際に用いられる CO<sub>2</sub> ストアードカートリッジであり，機械的イニシエータにより展開する．その諸特性は表 4.4 の通りである．このボンベは使用する際にイニシエータ (図 4.3) をねじ込んで装着した際に開栓され (事前開栓)，以後自身の内圧で気密を保っており<sup>6</sup>，手動スイッチにて適宜少量ずつ噴出する．事前開栓であることから明白である通り低圧であって，かつ二輪車タイヤに充

<sup>5</sup>10 気圧以上の加圧は「高圧ガスの製造」にあたり，所属する自治体に認可された業者のみが法律，法令に従って行うことができる．高圧ガスを 1 気圧まで膨張展開させることは「高圧ガスの消費」に当たり，許可は不要である．

<sup>6</sup>メーカにより市販されるイニシエータは様々であるが，基本的に同様の構造となっている．



図 4.2: 多数のメーカーから市販される機械的イニシエータ (事前開栓) 式によるインフレーター

表 4.5: ストアードガス, 機械的イニシエータ (瞬間開栓) 式の諸特性

圧力	60 気圧
充填方式	機械的 (瞬間開栓)
容量	SATP 約 4 ℓ (製品に依る)

填する作業に都合がよいようごく小流量断面積・ごく低流速であるから, 本研究では採用しない。

一方機械的イニシエータ (瞬間開栓) としては, 図 4.4 ~ 図 4.5 のような, 電光株式会社製ライダー装着用膨張ジャケット「hit-Air」用のインフレーターが挙げられ, 安価に販売されている。内圧は約 60 気圧である。

ここでは鋼鉄製のペネトレータ (貫通器) が押しばねによりセットされており, 二輪車に接続・固定された球体ストッパが引っ張られ外れた際に瞬間的に開栓する。その諸特性は表 4.5 の通りである。ストッパの引っ張り荷重は 30kg 重とされており, ヒューマノイド搭載のイニシエータとしては扱いが難しく, また機械的摺動性のため連続使用に向きである。

また図 4.6 に示すのは, 水難事故用自動膨張救命胴衣のための同様の瞬間開栓式インフレーターである。鋼鉄小径ペネトレータがレバー構造に接続されており, ひもを手動で

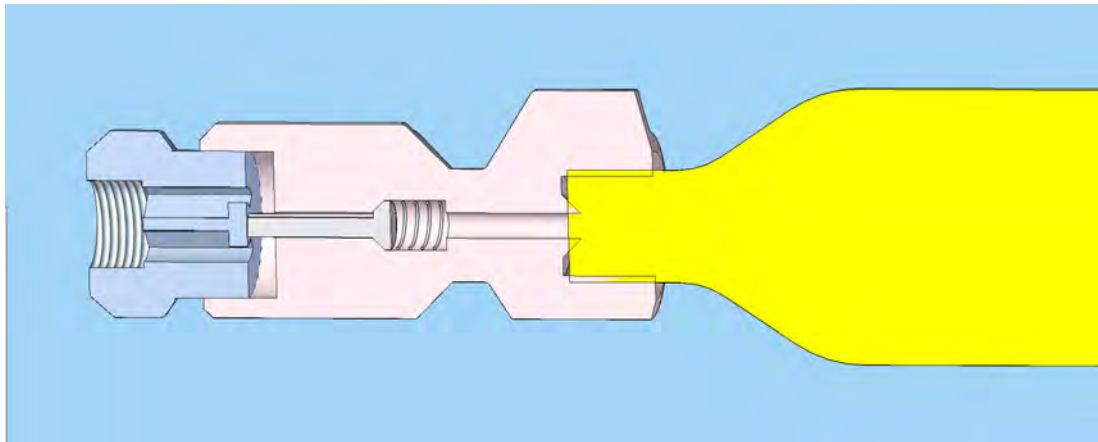


図 4.3: 機械的イニシエータ (事前開栓) 式による二輪車パンク時緊急装填用インフレータの簡略図

引っ張ることで機械的開栓・ジャケット展開を行う。また水没センサも装填されており、センサが濡れることで圧縮ばねの固定が外れ自動展開する (図 4.7)。

これら瞬間開栓式をヒューマノイド用に应用するため、サーボモータと偏心ベアリングカム構造によってペネトレータを押し出すイニシエータも試作したが、

- 機械的イニシエータ構造では開栓部流出有効断面積に限界がある (ペネトレータパイプ 4 肉厚  $t=0.5$  として、 $7\text{mm}^2$  程度)
- インフレータそのものの内圧が低い (60 気圧)

の 2 点から、開栓のための機械的駆動に 0.2~0.3 秒、さらに噴出にも数秒を要する (図 4.7) ことが明らかになった<sup>7</sup>。これは等身大ヒューマノイドの転倒時に瞬間的に動作する大容量な能動緩衝外装の供給源としては致命的である。

しかし、これら低圧低容量のガスインフレータの将来性については検討の余地があり、転倒のような大容量展開速度を要求するモジュール以外には利用価値が残る。すなわち、肘部、膝部、ハンド部などにおける環境支持や物体把持のような継続的な外装充填保持、稼働範囲を限られた小型ロボットへの用途が考えられる。これについては第 7 章「今後の展望」や付録 B において触れることとする。

<sup>7</sup>瞬間的な流量速度の計算は非常に煩雑であるが、本研究のような場合には、近似的には有効断面積に比例し、圧力差の平方根に比例する。本研究の充填方式では高压側の容量が十分に大きくないため、当然ながら瞬間的に変動する。

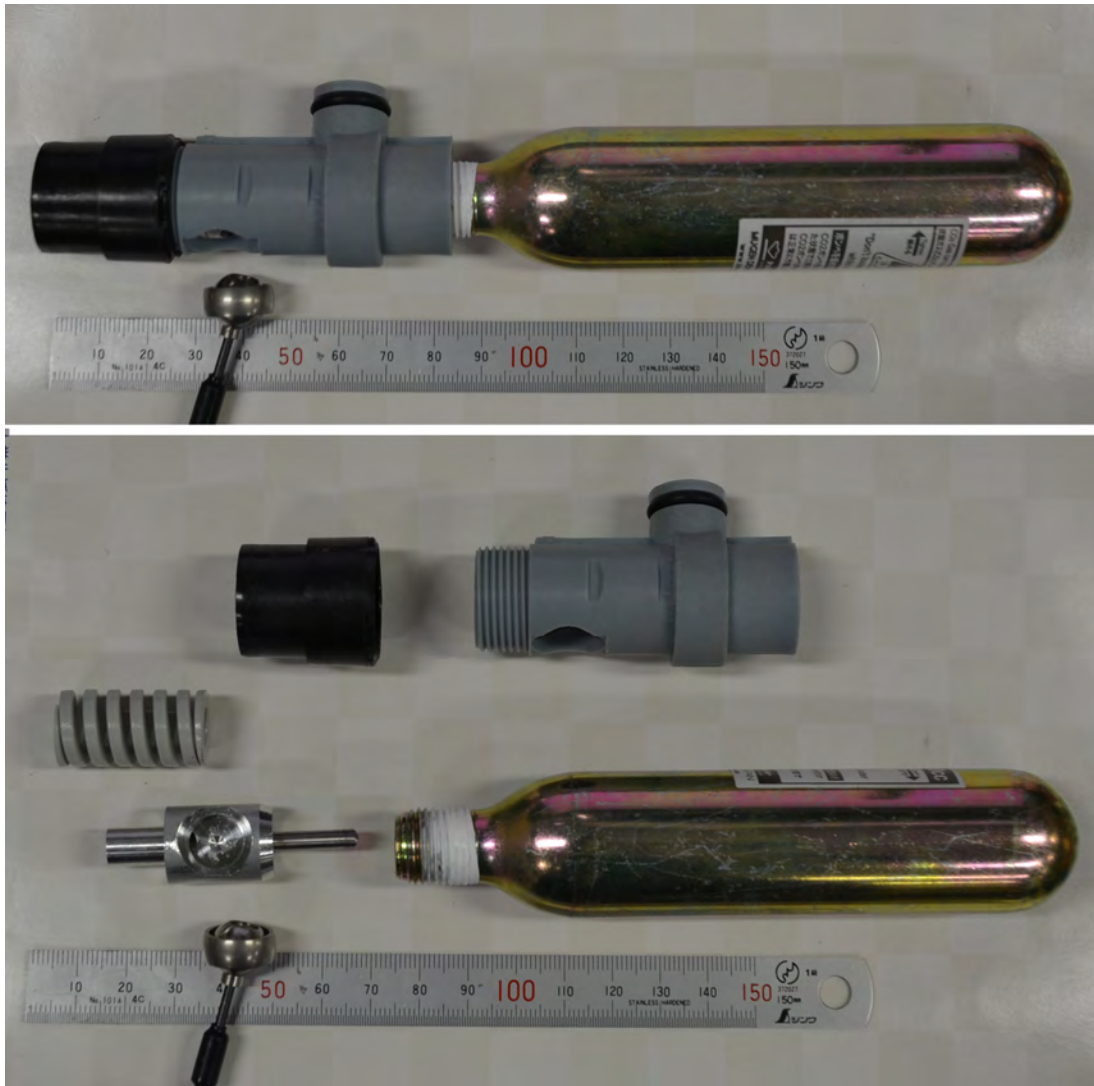


図 4.4: 機械的イニシエータ (瞬間開栓) 式による電光株式会社製ライダージャケット「hit-Air」用インフレーター



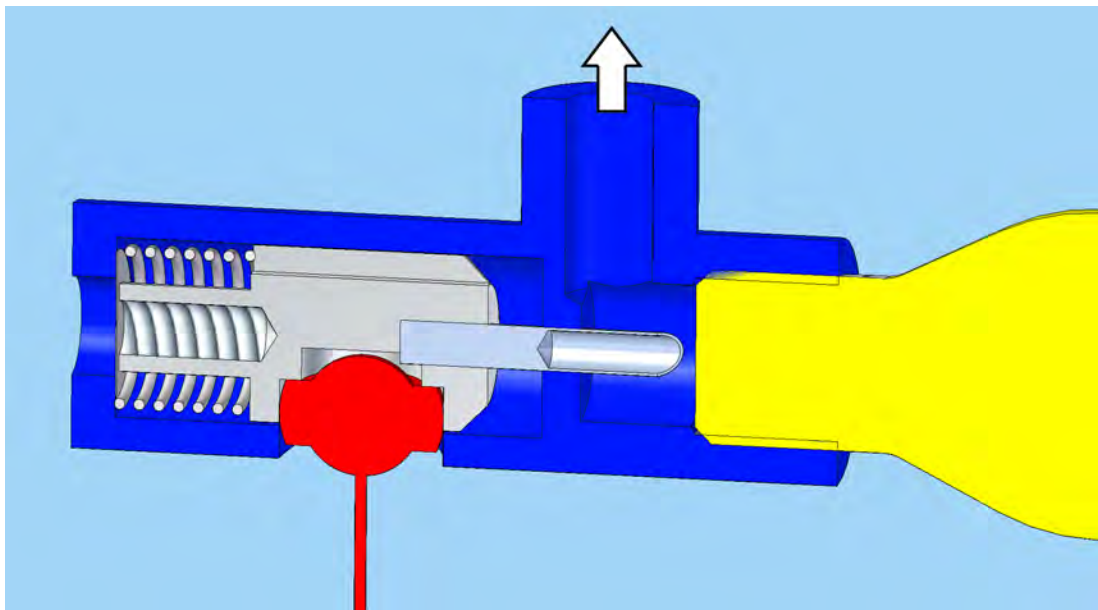


図 4.5: 機械的イニシエータ (瞬間開栓) 式による「hit-Air」用インフレータの模式構造；球体部 (図中赤部分) がストッパであり，この紐が二輪車へ直接固定される．事故の際ライダーが二輪車から吹き飛ばされると，紐が引っ張られることによりストッパが外れペネトレータ (貫通器) が開栓する．



図 4.6: 機械的イニシエータ (瞬間開栓) による OnSUPPLY 社製自動膨張式ライフジャケットのインフレーター；手動ひも展開と水没センサ自動展開の 2 種類で展開する．中央は交換用水没センサ



図 4.7: 機械的イニシエータ (瞬間開栓) による OnSUPPLY 社製自動膨張式ライフジャケットのインフレーター展開の概観 .



図 4.8: 株式会社プロップ製，超高压 CO<sub>2</sub> インフレーター

表 4.6: ストアードガス，爆破弁イニシエータ式の諸特性

圧力	250 気圧
充填方式	爆破弁開栓
容量	SATP 約 30～33 ℓ

#### 4.6.2 爆破弁イニシエータ

本節で示すのは，開栓速度・流量速度において他方式に圧倒的に勝るストアードガス着火式イニシエータによるインフレーターである．その密封栓にごく少量の火薬を乗せ，着火により蓋を爆破する方法，すなわち「爆破弁」インフレーターである．この方式のインフレーターは，パイロ式と同様一般自動車でも利用されている．

図 4.8，表 4.6 は，株式会社プロップの販売する「人間用エアバッグ付きジャケット」に用いられている超高压インフレーターである．このイニシエータの火薬量は約 0.1g である．気体としては主に CO<sub>2</sub> で，内圧 250 気圧で内封されており，爆破弁に 6V～の電圧をかけることで開栓し，0.2～0.3 秒で 30～33ℓ に展開する．本機構による着火・外装充

填展開実験の概要は第3章に既に示した。超高压であることから外装への注入速度、展開後の容積に利点があり、本研究では以降このストアードガスポンペを「インフレーター」として採用し、ヒューマノイド外装に用いるためのカートリッジ化を行う。

#### 4.6.3 ハイブリッドイニシエータ

最後に、乗用車エアバッグ用によく用いられているインフレーターとして、パイロ式と爆破弁ストアードガス式を組み合わせたハイブリッドインフレーターも使用されている。形状としては爆破弁インフレーターとほぼ同様の円筒形状であるが、内部には着火剤が2種類備わっている。すなわち、貯蓄した高压ガスを爆破弁で開栓すると同時に、さらに別の火薬の着火によってガスの膨張を図るものである。貯蔵内圧は300気圧に及ぶ[45]。しかし、パイロ式と同様に加熱推進剤、着火剤が必要であり、ロボットへの応用に難があることから本研究では採用しない。

### 4.7 インフレータの採用

今まで述べてきたインフレータの性能のまとめは表4.2に既に示した。本章冒頭で述べたように、本研究ではこれらを高速充填可能かつ小型であること、また交換可能性や安全性によって評価している。

本研究では、爆破弁インフレーターを採用している。しかし、小型ロボットや、等身大ロボットの小型膝部モジュールなどに対しては、高速充填性の要求を下げたインフレーターでも活用の幅はあるだろう。

### 4.8 インフレーターポンペの再装填方法

以上のように等身大ヒューマノイドの大規模外装に適したインフレーターを選定したが、ヒューマノイドが瓦礫不整地環境でインフレーターを供給するにはいくつかの方法が考えられる。

- ヒューマノイドが自ら排莢・再装填する
- 直近のヒューマノイドに排莢・再装填を依頼する

- 供給ステーションの利用

ヒューマノイドがインフレータを扱えない場合は、供給ステーションによる自動再装填を利用する他ない。しかし、災害・救助環境で逐一作業を中断してステーションに戻るものの非合理性・作業非効率性から、可能な限りヒューマノイド自身あるいは直近の他のロボットの手によってインフレータを供給することが望ましい。

このため、簡易な「ものを掴める」ハンドのみで取り扱えるインフレータのカートリッジ化と、容易に交換可能なカートリッジ構造の設計が必要となる。

#### 4.9 再装填のためのインフレータカートリッジの開発

本節では、プロップ社製インフレータと迅速継手（以下、単にカブラ）を用いて容易に交換可能なカートリッジを設計・製作する。

まず、カブラの選定について述べる。一般にカブラは耐圧力の観点から低圧～中圧仕様（多くは空圧・水圧、～20気圧）と高圧仕様（多くは油圧、300気圧など）に分けて考えられる。多くの場合使用上の相違点として押し込むだけのワンタッチ方式とスリーブを引きながら接続する方式（以下、単にスリーブプル）が存在する。また分離もスリーブプルによって行われる。

表 4.7: 耐圧とスリーブ構造によるカブラの分類

タイプ	1	2	3
耐圧	低・中	高	
スリーブプル	不要（自動）		手動

耐圧力とスリーブプル構造に従ってカブラを簡易に分類すれば、表 4.7 のようになる。

##### タイプ1

低圧～中圧仕様で、多くは～20気圧までの耐圧力となる。カブラ押し込み力は小さく、スリーブプルも自動で簡易であるが、上述の通り同インフレータは内圧250気圧であるため<sup>8</sup>、本研究ではインフレータカートリッジへの使用に耐えない。

<sup>8</sup>当然ながらこの値は常圧ではなく、また配管内で圧力損失が起こると考えられるが、実際に20気圧仕様では数回の使用でスリーブ構造が破損した

### タイプ2

油圧などの高圧仕様においても、複雑な内部構造をもってスリーブプルが不要な製品も市販されている（セイン社製 26x シリーズ等）。しかし構造が複雑な上に流量が小さく、必要な押し込み力が非常に大きい。またカブラ分離時にスリーブを回しながらプルする等の動作が必要となる。

### タイプ3

高圧仕様の中でも比較的構造が簡易だが、接続時に手動でスリーブプルを必要とする（図 4.9）。

本研究では、タイプ3式のカブラ内分離時防止漏れバルブ<sup>9</sup>を取り外した上で、要求仕様に耐えうる高圧用カブラとして日東工器 HSP カブラシリーズ（プラグ側 = 2HP，ソケット側 = 2HS）を選定した。そしてスリーブプル状態でカートリッジとして保管できるよう、図 4.10 ~ 図 4.11 に示すようなヒューマノイド用インフレーターカートリッジを開発し、カブラの接続押し込み力の低さと耐圧力の両立を実現した。図 4.12 ~ 図 4.14 では、インフレーターカートリッジ全体と、挿入・排莢の様子を示している。

このカートリッジは、ソケット（図 4.10 で赤色系）内のスリーブにロックシリンダ（同図黄色部）がスリーブプル状態でロックすることができ、この状態では回転や衝撃・外力に対して脱落しない。挿入時のみ、プラグ側の押し込み構造（同図、上部の青色）により自動的にスリーブがひねられ、正常に接続される。実際にヒューマノイドが自らハンドで掴み、挿入と排莢をする場合には掴みやすいよう全体に円筒形部を取り付ける必要がある（図 4.13）。プラグ側とソケット側は円錐形状になっており、リロード・パーズが容易である（図 4.14）。また電極が配置されており、正しく挿入された場合にのみ、電気的にも接続される。グラウンド電圧は配管である。

このインフレーターカートリッジのリロード・パーズ動作、ヒューマノイド自身による操作は第6章において示す。

<sup>9</sup>一般に、高圧用カブラは油圧仕様が想定されている為、ソケット・プラグ両側に分離時液漏れ防止用キャップ機構が備わっていることが多い。本研究では、瞬間的にはインフレータの圧力に耐える構造を必要とするものの流体は CO<sub>2</sub> のみであるから、大流量優先のため液漏れ防止構造は要求されない。

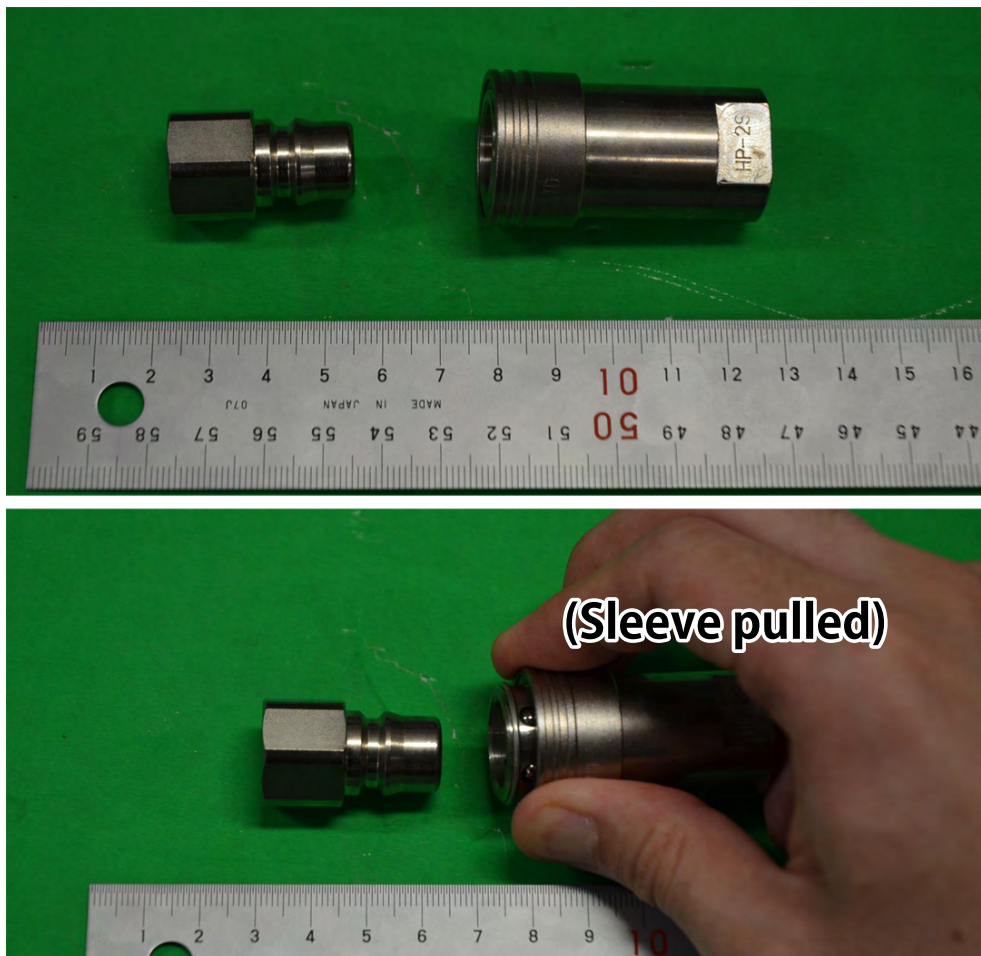


図 4.9: カプラ (タイプ 3) のスリーブプル; 接続するためにプルした状態で押し込む必要がある .



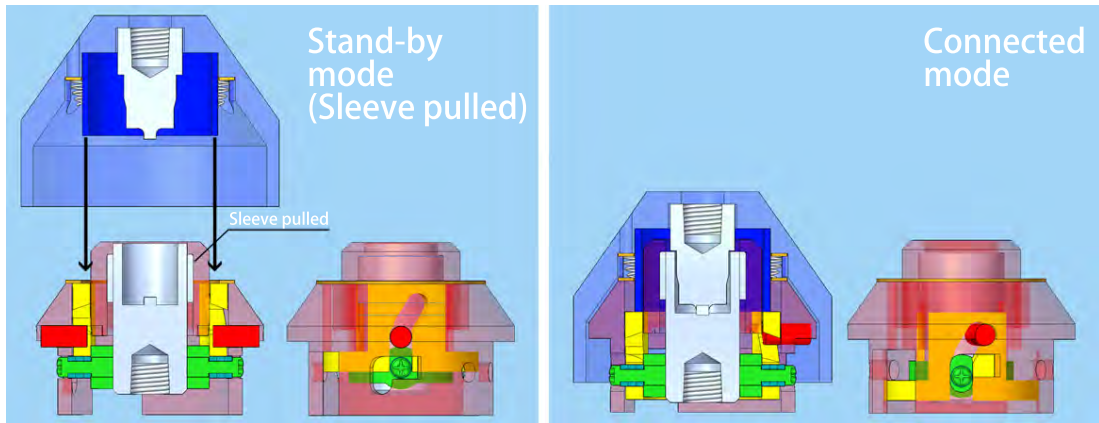


図 4.10: ヒューマノイド再装填用カートリッジの構造図

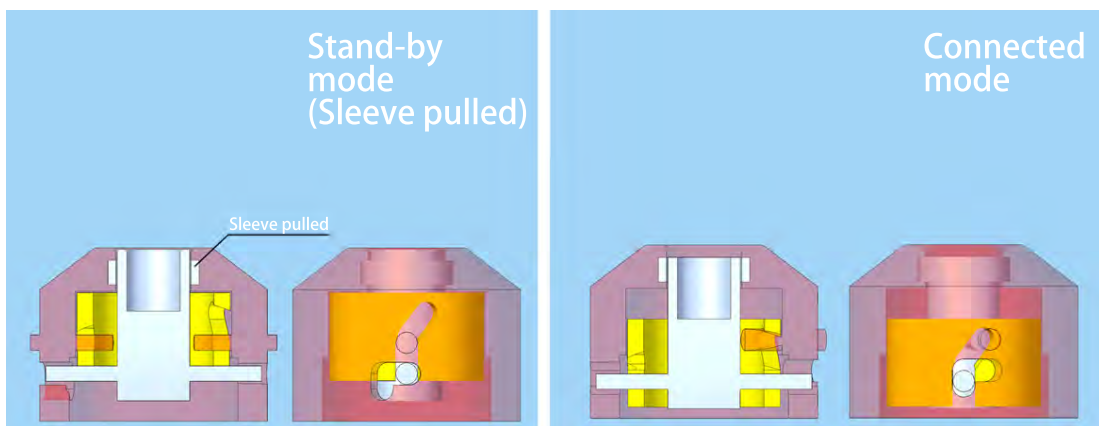


図 4.11: ヒューマノイド再装填用カートリッジの構造図 (簡易); 外形 (赤色) とスリーブは剛に接着されている。左図でソケット (銀色) 本体に対しスリーブはプルされた状態で固定されている。挿入に伴い、ロックシリンダ (黄色) が押し込まれ、ソケット (銀色) と外形 (赤色) は相対的に回転し、従ってスリーブは元に戻る。

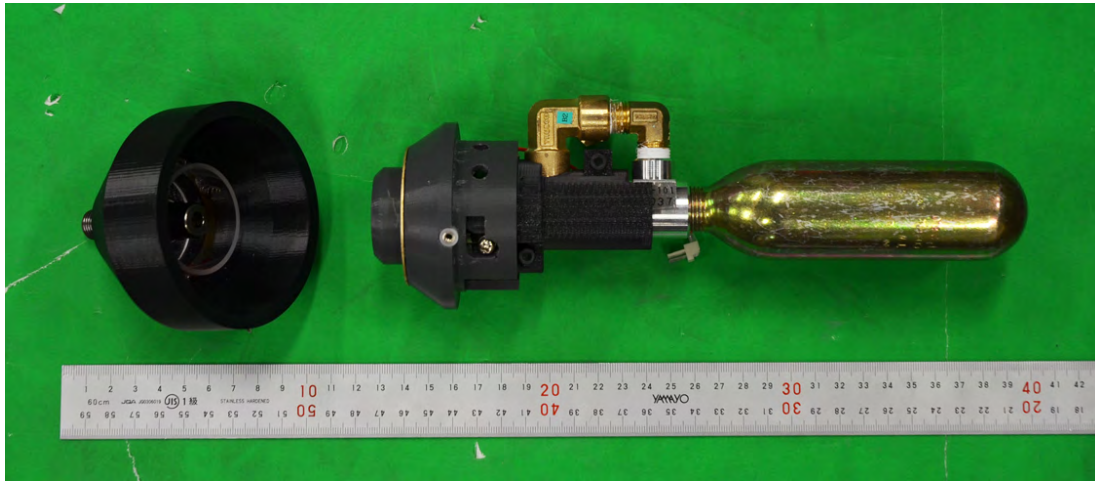


図 4.12: プロップ社製インフレータを用いたヒューマノイド自動再装填用カートリッジ

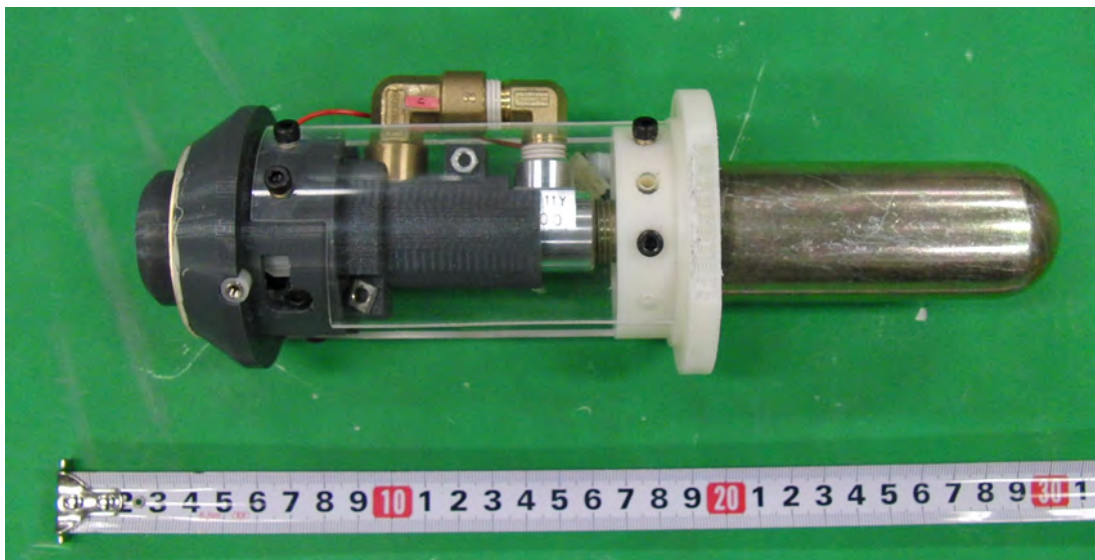


図 4.13: 自動再装填用カートリッジ ; ヒューマノイドが操作しやすいよう全体に円筒掴み部を取り付けたもの .

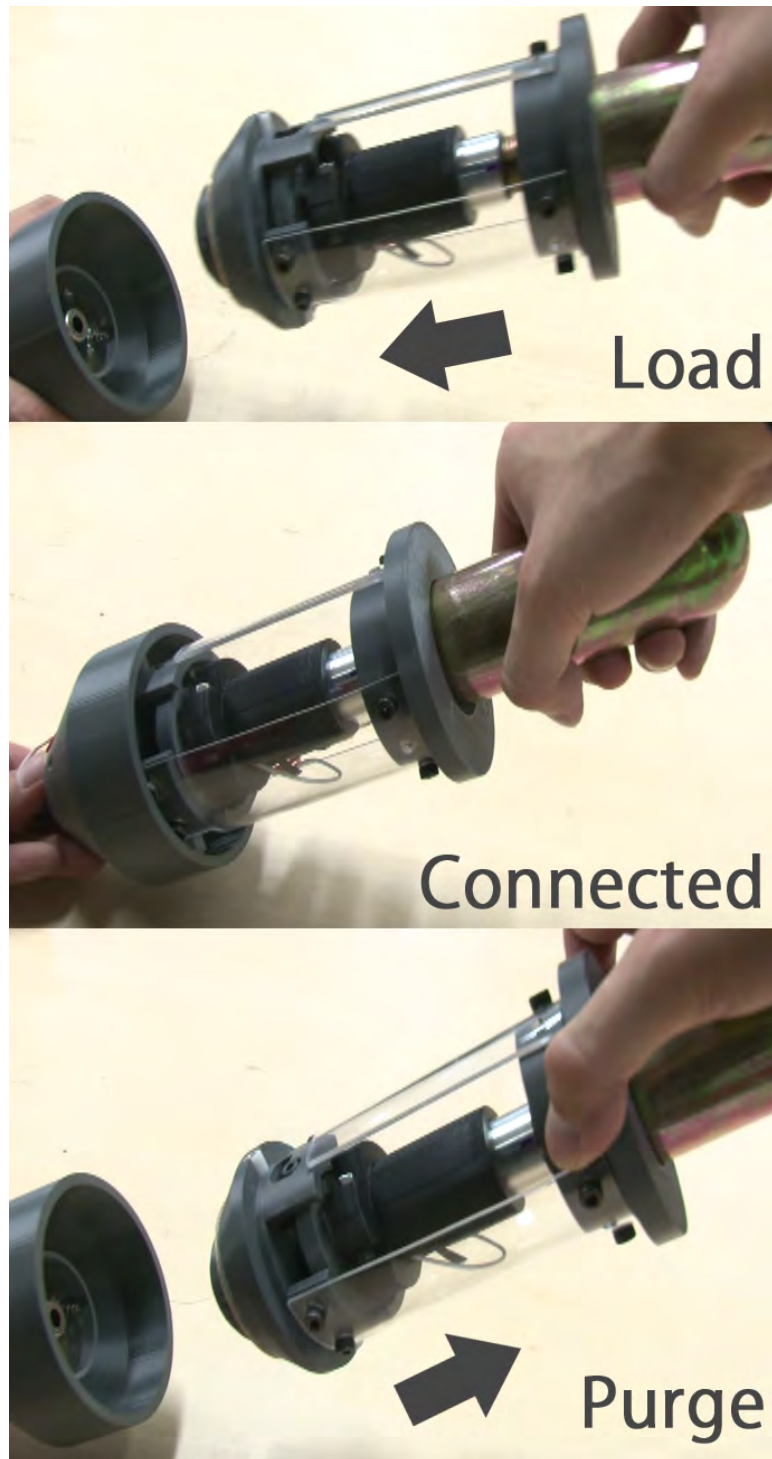


図 4.14: カートリッジの自動再装填；ロード時は押し込みのみ，パージ時は外縁部の引っ張りのみで脱着可能

## 4.10 再装填カートリッジの使用済判定

実瓦礫被災地環境において、ヒューマノイドが自らカートリッジを交換するにあたっては、その使用済み/未使用品をヒューマノイド自らが識別、判定する必要がある。ここではその判定方法について議論する。

- ID タグによる判定

現在、印刷機のインクカートリッジなどに用いられている手法。ヒューマノイド側にもマイコン等電子機器を置き、ICチップのIDタグにより使用済み/未使用を判定する。

- ヒューマノイドの目視による判定

- 空圧発生による識別

そのカートリッジに多量の空圧移動があったことを利用する識別方法。出口に目視しやすいテープを貼っておく（充填の際に瞬間的に切れる）ことで、使用済み/未使用を判定する。ただし、カプラを用いる場合はその接続を阻害しないような極薄のシールや貼付方法が必要である。

- 温度変化による識別

不可逆性温度検知シール<sup>10</sup>によって、カートリッジが低温になったことがあるか否か判定する（厳密には、気温に依存せず温度変化を観るべきである）。一般に、インフレータの充填は瞬間的であって、断熱膨張となるから、急速に熱エネルギーが奪われる。従って低温となるため、これを不可逆性の温度センサシールによって判定する。

ただし、爆破弁インフレータの場合は、火薬の着火に伴って爆破のエネルギーが加わる為この限りでない。

- 温度変化に伴う結露による識別

急速な温度低下に伴う結露を利用して、不可逆性の水没センサシールを用いてこれを識別する。ただし、爆破弁インフレータの場合はこの限りでない。

<sup>10</sup>所定の温度になると変色し、元に戻らないセンサシール。

#### 4.11 おわりに

本章では、まず従来の空圧・油圧ロボットやエアバッグとの、能動外装システムの相違について述べ、本研究での空圧システムの要求性について議論した。その上で、能動緩衝外装へガスを供給する方法論とそのカートリッジの設計について議論した。市販されている自動車や二輪車運転者、または危険環境で働くためのエアバッグジャケットのためのインフレーター（ガス発生器）について触れながら、それらとの性能・要求性の相違について述べ、都度圧縮式から、化学反応式、ストアードガス式までその諸特性を述べ、等身大ヒューマノイド能動外装への充填に最も適した爆破弁インフレーターを選定した。

カートリッジ機構においては、まずヒューマノイドのインフレーター装填方法について論じ、簡易なハンドでも利用可能なカートリッジ化の重要性を説いた。そして実地的環境・開発者が介在しない環境下においてもヒューマノイドが自ら能動緩衝外装を有効に利用するために必須となる、空圧的システムの構成法・カートリッジ化されたインフレーター再装填機構、その設計論と実装について述べた。さらに、ヒューマノイド自身によるカートリッジの使用済み／未使用の判定法についても論じた。



## 第5章

# 能動緩衝外装における排出機構の 設計と開発





## 5.1 はじめに

本章では，等身大ヒューマノイド能動緩衝外装に必要な形状復帰のための外装排出・再収縮動作について述べる．またこれまでにそれぞれ論じた能動緩衝外装，再装填機構と併せて，ヒューマノイドが自ら身体表面形状を瞬間的に膨張変形させ，また元の形状に復帰するため外装制御システムについて述べる．

また，市販の電磁バルブと本研究で必要となる大流量電磁バルブの気密性・応答性・動作頻度等の要求仕様の相違について触れながら，気密性よりも 30ℓ の排出速度を優先する専用ドレインバルブの設計論について論じる．また，ドレインファンとして種々のファンを挙げ，それぞれの圧力損失に対する耐性を述べ，ファンの選定方法を論じる．さらに，注入口・排出口それぞれの特性のために内側に装着する注入 / 排出キャップの有効性について述べる．

また，第 3 章，第 4 章，第 5 章にてそれぞれ論じた外装本体，再装填機構，排出機構を用いて，

- 装填 (カートリッジロード)
- 自己保護行動 (充填展開 = 爆破弁インフレーター着火による外装注入)
- 復帰動作 (能動的排出・再収縮)
- 再装填 (リロード)

を繰り返し連続で行うことのできる能動外装モジュールを等身大ヒューマノイド HRP-2 の背面に構成する．

## 5.2 能動緩衝外装の排出機構の設計

ヒューマノイドが能動緩衝外装を利用する上で，利用後の再収納構造が非常に重要であることは第 2 章より既に述べてきた．ドレイン (排出) の方法としては，

- ドレインバルブ開放  
+ 収縮構造

充填加圧が取り除かれた場合に，強力な伸縮性皮膜等で強制的に外装を縮め，排気する (付録 B にて，小型ヒューマノイド NAO の能動外装で開発，検証)

- 負圧コンプレッサ
- ドレインバルブ開放
  - + ファンによる強制排出
  - + 収縮構造

などが挙げられるが、バルブ開放 + 収縮構造のみに関しては、0 ℓ までの完全排出が非常に困難であること、負圧コンプレッサは排出時間が多大にかかる<sup>1</sup>ことから、採用しない。本研究では、専用のドレインバルブとドレインファン、さらに収縮構造による能動的排出構造を開発した。

排出時間の制約としては、ヒューマノイドのタスクを阻害しないことを考慮すれば「転倒姿勢からヒューマノイドが起き上がるまで」であるが<sup>2</sup>、転倒回復行動中にも不整地や瓦礫に引っ掛かるなどしないよう、可能な限り迅速な排出が要求される。これは背面外装に限らず、全身に分布した能動外装モジュール群を展開したままでは、狭所でのヒューマノイド姿勢回復動作を阻害するためである。本研究では 10 秒での完全排出を目標と設定した。

### 5.3 一般的電磁バルブと能動緩衝外装のドレインバルブ

能動緩衝外装を充填展開させた後に用いる、外装内排出のための専用電磁バルブ（以下、単にドレインバルブ）としては、流路のオープン/クローズを行う 2 ポート弁が適当であろう。

配管内の流速の計算は、高低の差圧、有効断面積、単位長あたりの内壁摩擦が影響するため厳密な計算は困難である（実測された排出時間は後述する）。しかし流速は配管内有効断面積にほぼ比例するため、ヒューマノイドが転倒に成功した後、中途であった何らかのタスク・行動への復帰を阻害しないよう、配管内有効断面積の計算に基づき十分な排出機能を持つドレインバルブを選定する必要がある。

ところで一般に、電磁バルブは定格最大気圧<sup>3</sup>に対して

<sup>1</sup>もっとも、空圧機器（流体機械）の観点からは、コンプレッサ・ブロウ・ファンの厳密な区別は無い。一般に圧縮比（ここでは、高低圧力比にほぼ等しい）2 以上のものを圧縮機（= コンプレッサ）、それ以下は送風機（特に 1.1 以上のもの = ブロウ、それ以下を想定されたもの = ファン）と呼ぶ事が多い。本研究では、排出は外装内気体の大気開放であるから配管内の圧力損失分のみが圧力差となる。コンプレッサは流量が少なすぎ、逆にファンは圧力比に耐えないため、ファン～ブロウに該当するものが最も効率が良い。

<sup>2</sup>ヒューマノイドや転倒姿勢にも大きく依存するが、一般に 1 分～数分程度と考えて差し支えないだろう。

<sup>3</sup>空圧用の多くは 0～7 気圧仕様、弁なども最大 20 気圧が通例である

- 高い気密性
- 高い応答速度
- 高速な動作頻度

の要求を満たすことを最優先設計としている。機種にもよるが具体的には応答速度～20ms，動作頻度5Hz～などである。

「JIS規格：空圧・油圧機器」[48]によれば，2ポート弁の気体漏れ量は最大でも0.050 l/min，本研究で用いるような配管や継手類のサイズオーダーでは0.025 l/minと定められており，実際に市販されている電磁バルブはさらに高气密性を保証するよう製造されている。そのため，配管よりも有効断面積が極端に小さく，排出口の末端に電磁バルブを取り付けば電磁バルブの有効断面積がボトルネックとなり，流量速度を大きく損じる。

ところが，ヒューマノイド能動外装に対するドレインバルブを考えるとその要求仕様は既に述べた一般用空圧電磁バルブとは大きく異なる。

- 気密性  
ヒューマノイド転倒の際，外装本体及び機構部が完全破損する事を避ければよい。外装内圧を大気開放するダンパ効果の方が支配的である
- ～20msの応答速度  
必要ではない。ドレイン動作自体に～10秒程度を要するため(実際の動作検証実験は第6章にて後述)。
- 5Hz～の動作頻度  
必要ではない。ヒューマノイドの転倒頻度と同一であるため。

また，一般空圧用電磁バルブの中でも，パイロット式電磁バルブ<sup>4</sup>を用いることで軽量ながらも大きな流量速度を得る事は可能であるが，依然有効断面積は配管内断面積を下回り，排出を阻害する。また，主圧力とは別系統に安定なパイロット圧を用意するのは，実環境で自律的に活動するヒューマノイドへの搭載・運用の上で望ましくない。

そこで本研究では，気密性の追及を廃し，能動緩衝外装内に注入された30 lの迅速な排出のために，流量断面積を最優先とした超大流量ドレインバルブを設計，開発した。気

<sup>4</sup>流体とは別に制御用圧力源(パイロット圧)を用意することで，ソレノイド重量(=バルブ全体の重量)に比してバルブ特性が高く設定されたもの。トランジスタによる電流増幅作用と同様。

密性よりも大流量を優先させることで、流量断面積  $400\text{mm}^2$  ~ を有しかつこの流量に比して通常の電磁バルブにより非常に軽く設計することができる。本研究では以下の設計で  $350\text{g}$ (ドレインバルブ・ドレインファン含む) のドレイン機構を設計した<sup>5</sup>。

#### 5.4 能動緩衝外装の大気開放のための流量設計

ここでは、ドレイン構造の設計について述べる。様々なスケールのヒューマノイド・能動緩衝外装に対して、使用する配管の有効断面積を計算した上でその値に十分な安全率を加味し、かつ電磁ソレノイドの駆動安全率<sup>6</sup>を考慮することで (1) 能動緩衝外装の全容量排出 (2) ヒューマノイドの転倒回復動作中で要求される外装収縮期間 を満たすように排出機構を設計可能である。

まず、一般に市販されており入手が容易なチューブの中で最も口径の大きな外径  $16\text{mm}$  内径  $11\text{mm}$  チューブあるいはおねじ  $R1/2$  鋼管 (内径  $12\text{mm}$ ) を使用すると仮定し、その断面積  $S_{tube}$  は、 $S_{tube} = (11/2)^2\pi \text{ mm}^2$  と計算できる。

この配管実断面積とその流量速度を阻害しないためのドレイン機構を設計する。さらに、高速排気のために複数の配管を並列 (少なくとも 2 本) 接続することと、ドレイン機構内及び接続継手内の流体摩擦・圧力損失を考慮し、本ドレイン機構が満たすべき有効断面積  $S_{drain}$  の計算に対する安全率を 5 と設定すれば、 $S_{drain} = S_{tube} * 5 \simeq 475 \text{ mm}^2$  と決定できる。

図 5.1 により、電磁ソレノイドの動作ストローク  $T$  として、バルブ排出口直径  $R_{out}$  は

$$S_{drain} = \pi R_{out} T \quad (5.1)$$

を満たす。

電磁ソレノイドとしては、新電元メカトロニクス社製チューブラソレノイドシリーズを採用することとする。これは小型かつ円筒形のソレノイドがドレイン管内に適しているためである。同シリーズはその多くが最大ストローク  $12\text{mm}$  を有するが、ソレノイドを用いた設計として安全率 2 を考慮し、ここで  $T = 6\text{mm}$  と設定し式 5.1 により、 $R_{out} \simeq 25\text{mm}$

<sup>5</sup>製品にもよるが、既存の電磁バルブでは有効断面積  $\sim 8\text{mm}^2$  仕様でも  $300\text{g}$  ~ 程度必要なものもある。

<sup>6</sup>プッシュ・プル型電磁ソレノイドの有効ストロークは、最低でも安全率 1.5、可能な限り 2 以上とすることが望ましい。

と試算できる．この排出口を励磁 / 消磁により開閉するバルブキャップの直径は，排出口よりわずかに大きく， $R_{cap} = 28\text{mm}$  と決定した．同キャップ周りの流体流れは直線的でなく圧力損失・流量損失を含むと予想されるが，既に述べた安全率をもって十分に補填されると考えた．

さらに，構造材の断面積  $S_s \simeq 770\text{ mm}$ (図 5.1 断面 B-B) より，ドレインユニット管直径  $R_{cyl}$  は

$$S_{drain} \geq \left(\frac{R_{cyl}}{2}\right)^2 \pi - S_s \quad (5.2)$$

を満たすように  $R_{cyl} \geq 40\text{mm}$  と算出される．本章では構造材やその締結の設計上， $R_{cyl} = 46\text{mm}$  として設計している．実際に開発したドレイン機構を図 5.2 に示す．

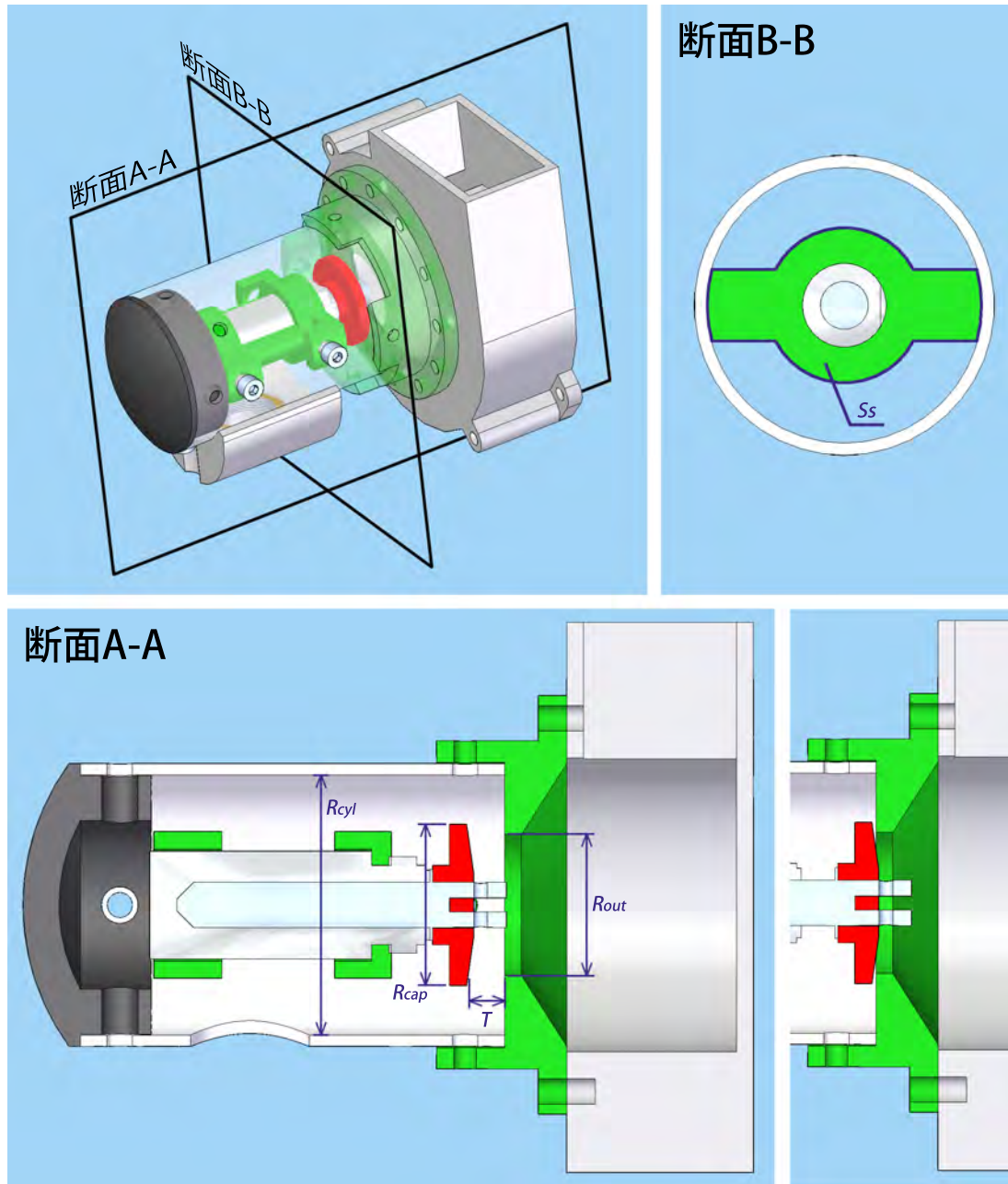


図 5.1: 超大流量ドレインバルブの設計；バルブキャップの有効断面積とバルブ管内の有効断面積；電磁ソレノイドのストローク長 (図下左右) はごく軽い押しばねにより平時は閉鎖 (図右下) されている。

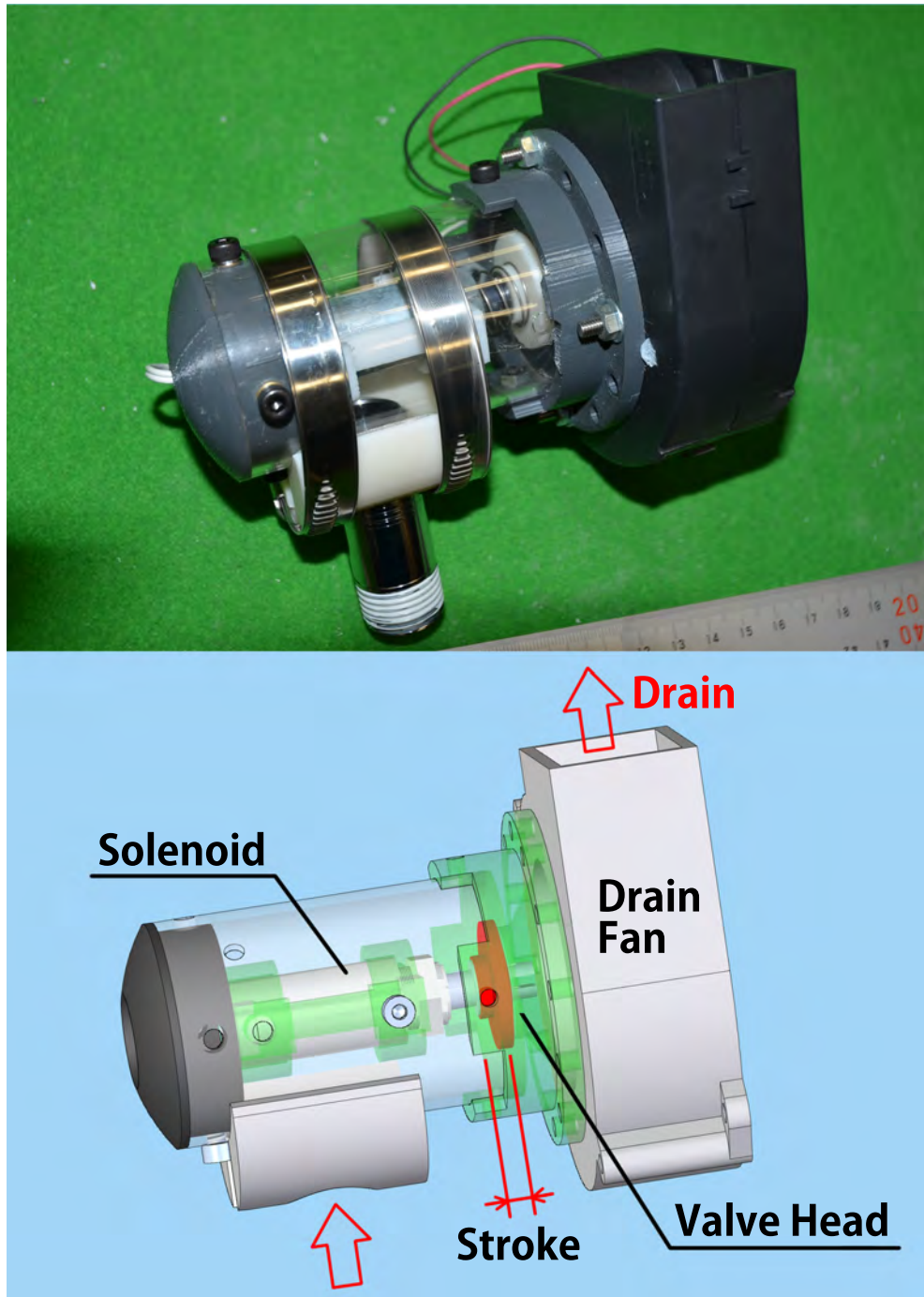


図 5.2: 超大流量ドレインユニットの概観と CAD 設計



図 5.3: 様々な送風機 (ファン); 左から DC ファンモータ (180g), シロッコファン (180g), ダクテッドファン (240g) の例 .

## 5.5 能動緩衝外装のためのドレインファンの種別と選定

ファンとしては、最も安価かつ様々なサイズ・容量の選定が容易であるのが平面ファンモータであるが、ファンモータは排出に伴う圧力損失が生じる場合にその性能を発揮できない。

従ってドレイン用にはシロッコ (多翼) ファンあるいはラジコン飛行機等に用いられるダクテッドファンなどが適している (図 5.3)。配管内の圧力損失の計測は極めて煩雑であるため、ヒューマノイドの背面等を実装する観点から容積・重量を鑑みて大まかに種別を選択し、実際に平ファンモータ、シロッコファン、ダクテッドファンを用いて、外装 30ℓ の排出時間を計測した (図 5.4)。

図 5.4 の通り、一般的な平型ファンモータは公称流量こそ大きいものの、配管内の圧力損失によってその性能を大きく損なう (一般には、差圧 ~ ミリ気圧のオーダーで動作保証)。一方シロッコファンも公称差圧 2 ~ 3 ミリ気圧程度であるが、圧力損失に対しても流量を確保することができ、デュアルドレイン機構により 10 秒での完全排出が実証できた (実際の検証は後述する)。軽量・低消費電流であるシロッコファンに対し、ダクテッドファンは重量が大きく、また消費電流が 1 個につき 0.8A ~ と著しく大きい。その反面やや省スペースでもある。また排出方向に関しても、直線方向・ラジアル方向などファ



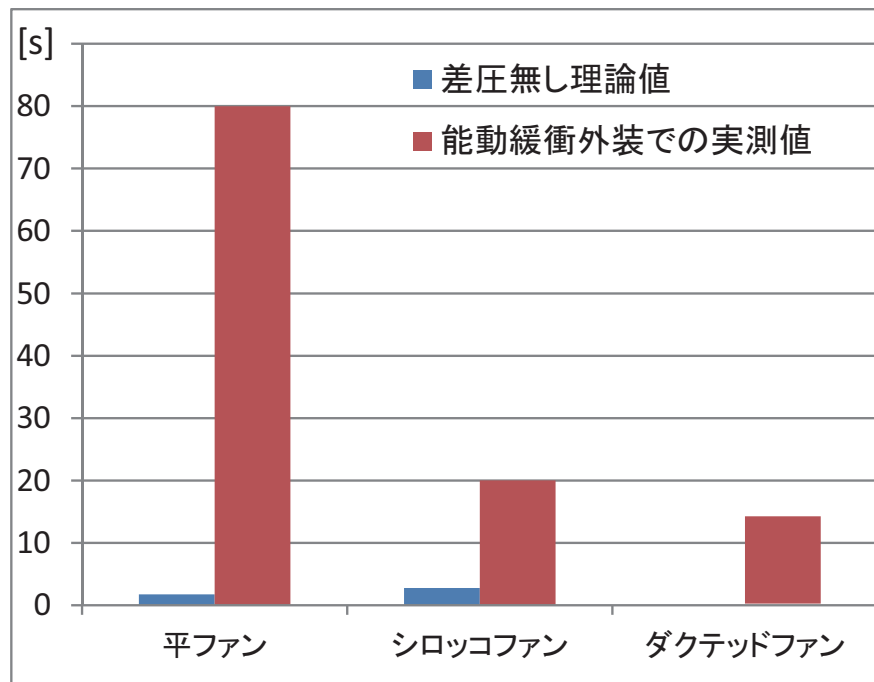


図 5.4: 種々の配管・ファンを用いたドレイン流速；能動外装 (30 ℓ) からの完全排出時間の実測概算．デュアル経路にすれば排出時間はほぼ半分となる．

ンによって異なるから，ヒューマノイド自身へ排出方向を向けて非効率となったり，基板類へ吹きこまないよう設計上注意を要する．

## 5.6 ドレインファンの設計と決定

本研究では機構配置・設計の観点から，シロッコファン式を採用する．

ファンの選択と設計に際して，考慮されるべきは以降の項目である．

- 消費電流量

本研究で使用するヒューマノイドでは，十分な電力が得にくい為，以降の実験ではドレイン機構には外部安定化電源から供給するが，将来のスタンドアローンなヒューマノイドでは消費電流量は大きな課題となると予想される．

- 排出流量速度

現在，転倒したヒューマノイドが直立姿勢へ復帰するためには，数分のオーダーで

時間を要する。しかし転倒回復時は最も環境との不意の接触が多くなり、充填膨張した外装が他物体に引っ掛かる恐れが大きいため、迅速な排出と収縮が必要になる。本研究では排出時間を 10 秒と設定したが、ドレイン機構の重量の大部分を占めるは電磁バルブであるため、ヒューマノイドと要求仕様 (排出速度、すなわち有効断面積) に応じてバルブの選定も必要となるだろう。

既に述べた通り、能動緩衝外装のためのドレインバルブの設計は、気密性を必要としない。実際に要求されるのは電磁バルブのストローク量である (図 5.1 ~ 図 5.2, 式 5.1)。

- 排出方向

ドレインファンからヒューマノイド自身へ排出方向を向けて非効率となったり、基板類へ吹きこまないよう設計上注意を要する。外装内の気体は安全な CO<sub>2</sub> であり、ドレインファンの使用頻度はヒューマノイドの転倒・転落の頻度に従うため常時作動しているわけではないが、実際の瓦礫不整地環境において粉塵を含む大気を基板類に吹き込むのは好ましくない。

- 環境接触面への露出

能動外装の最小収縮形状よりも内部に置くように設計する。これは転倒・転落に際して能動緩衝外装よりも先に環境接触を起こし破損することを防ぐためである。

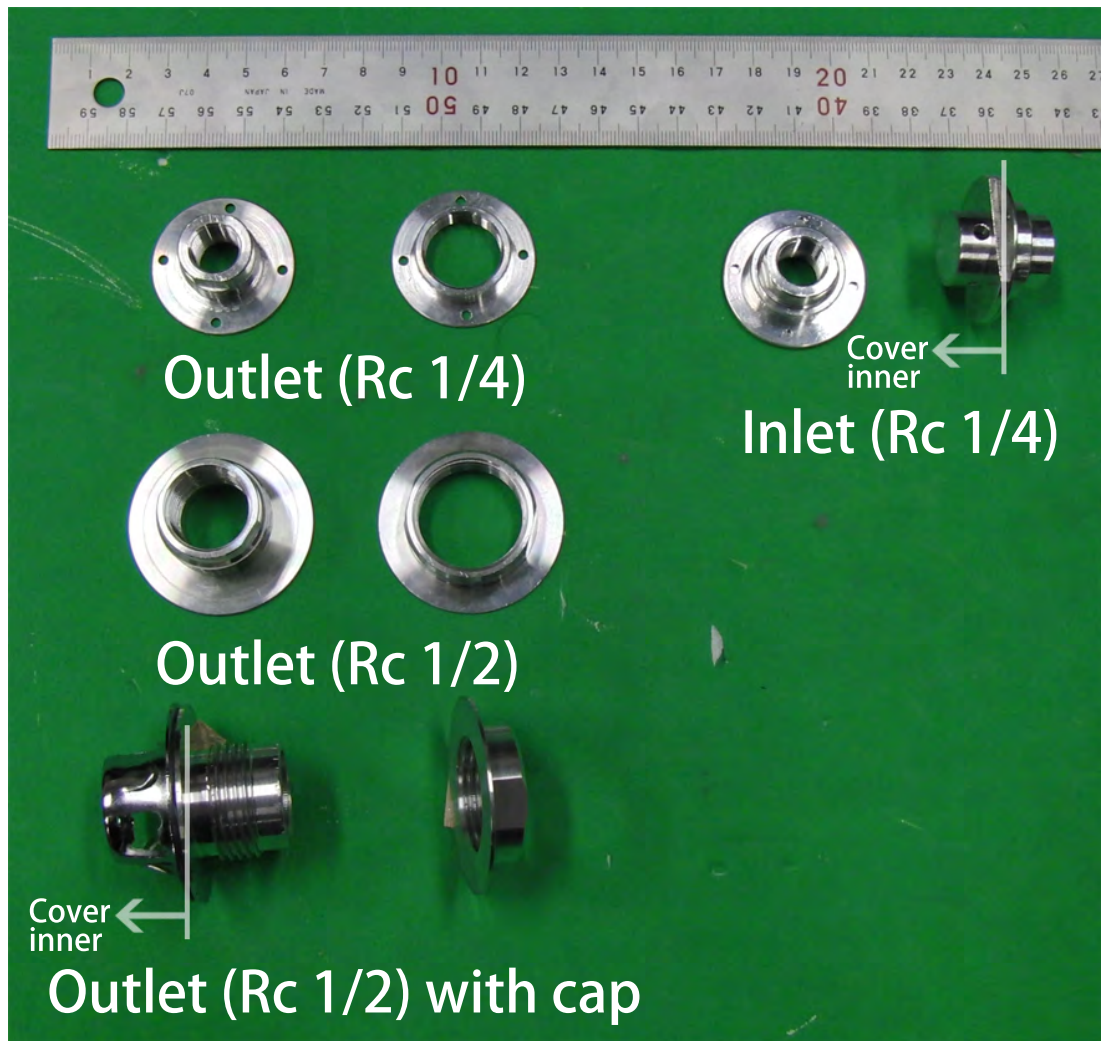


図 5.5: 注入口 Rc1/4 めねじ径 (右) ; 排出口 Rc1/4 径 (左上) ; 大流量のための Rc1/2 径 (左中央) ; 張り付き防止キャップを装着した状態 (左下) .

## 5.7 ドレイン配管の設計と開発

既に第3章で述べた，株式会社プロップ社製の外装本体は，注入口1ヶ，かつ筆者が設計した特注仕様により排出口を2ヶ有する(図3.8)．同社外装の注入口(内部向き図5.5右)は，爆破弁インフレータからの注入に伴う破片類の混入を防ぐため，平坦開口ではなく，注入方向に対してラジアル方向に小径穴が設けられており，混入物を通さないようになっている<sup>7</sup>．

他方，排出口にはその要求が無いいため，平坦開口に設計し実装された．また排出流量を大きくするためにテーパめねじを倍の大きさのRc1/2にさらに変更(図5.5左上段，左中央)している．

さらに，能動緩衝外装の排出に伴ってはその外装形状・ヒューマノイドの姿勢は不定であるから，単純に排出を行うと外装内部で「張り付き」が生じ排出速度を大きく損なう．このため排出口内部向き(図5.5左下，図5.6右，図5.7)には立体構造のキャップを備え，外装内部が張り付いても排出流量を妨げないよう設計した．

## 5.8 能動緩衝外装の負荷時自然排出機構

充填展開した後の能動外装内圧は，(1)大気圧+ (2)外装素材の張力相当の圧力に等しいため，充填体積を適切に選択すれば1気圧~1.1気圧程度である．また，空圧式の能動緩衝外装は，環境接触によって容易に変形するため，着地の瞬間であっても内圧が急激に上昇するわけではない．しかしながら，素材構造が耐えられない程の衝撃・外乱荷重を受けた場合には，素材縫合部などから破裂・破損する恐れがある．

このため，能動外装本体から配管が伸びている排出機構には，バルブでの制御排出口とは別に小径の排出口を用意し，外装内圧力が高過ぎる場合には自然に調整できるよう設計した．

またこの自然排出量は，着地衝撃の緩和にも影響を与えるパラメータである．一般のエアバッグジャケットや水難事故用ライフジャケットは，「充填展開されている時間を可能な限り大きくとる」ために自然排出は不向きであるから実装されないが，ヒューマノイドの一瞬の着地衝撃緩和に関して議論すれば，完全気密は決して最適解ではない．自

<sup>7</sup>同社によれば，爆破弁の欠片が直接外装内に混入すると，内部から外装を傷めまた破裂する恐れがあるため．



図 5.6: 注入口と排出口の外部からの概観；注入口(左)には直線的注入を防ぐ壁，排出口(右)には張り付き防止のためのキャップが備えられている。

然排出の最適流量に関しては，転倒時の衝撃のスケールに依るところが大きく，かつ着地衝撃時間（衝撃加速度の大きさを判定する許容期間）は限りなく小さく，制御による調整は難しいと考えられるため，自然排出機構は受動機構で構成されていることが望ましい．具体的には，通気度の定められた織物素材による排出口，ばね弾性を用いた排出口（内圧によって排出流量が調整される）などが機構的發展課題として挙げられるだろう．

## 5.9 能動緩衝外装の装填・充填・排出動作とその再帰性の実現

図 5.8 ~ 図 5.9 に，開発した HRP-2 用能動緩衝外装モジュールの概観を示す．図 5.8 (下) に示す通り，左右の排出穴にはドレイン機構が配置され，中央の注入口から延びる配管にはカートリッジを装填するための円錐形状のソケット構造が備わっている（同図下部の白い箇所は機構）．

このモジュールは上述したように，ヒューマノイド自身により装填（カートリッジロード），自己保護行動（充填展開），復帰動作（能動的排出・再収縮），再装填（リロード）を行い，ヒューマノイドが能動的に外装を緩衝変形させることが可能である．特にドレイン



図 5.7: 排出口内部に備えられた張り付き防止のためのキャップ

機能は、30 l を 10 秒で完全排出可能であることが可能である。第 6 章においてはこの動作を 2 回連続で行う実験の様子を示す。

## 5.10 おわりに

本章では、等身大ヒューマノイド能動緩衝外装に必要となる形状復帰のための外装排出・再収縮動作について述べた。また第 3 章、第 4 章にてそれぞれ論じた能動緩衝外装、再装填機構と併せて、ヒューマノイドが自ら身体表面形状を瞬間的に膨張変形させ、また元の形状に復帰するため外装制御システムについて述べた。

また、市販の電磁バルブと本研究で必要となる大流量電磁バルブの、気密性・応答性・動作頻度等の要求仕様の相違について触れながら、気密性よりも 30l の排出速度を優先する専用ドレインバルブの設計論について論じた。また、ドレインファンとして種々のファンを挙げ、それぞれの圧力損失に対する耐性を述べ、ファンの選定方法を論じた。さらに、注入口・排出口それぞれの特性のために内側に装着する注入/排出キャップの有効性について述べた。

また、第 3 章、第 4 章、第 5 章にてそれぞれ論じた外装本体、再装填機構、排出機構を用いて、

- 装填 (カートリッジロード)
- 自己保護行動 (充填展開 = 爆破弁インフレーター着火による外装注入)
- 復帰動作 (能動的排出・再収縮)
- 再装填 (リロード)

を繰り返し連続で行うことのできる能動外装モジュールを等身大ヒューマノイド HRP-2 の背面に構成した。

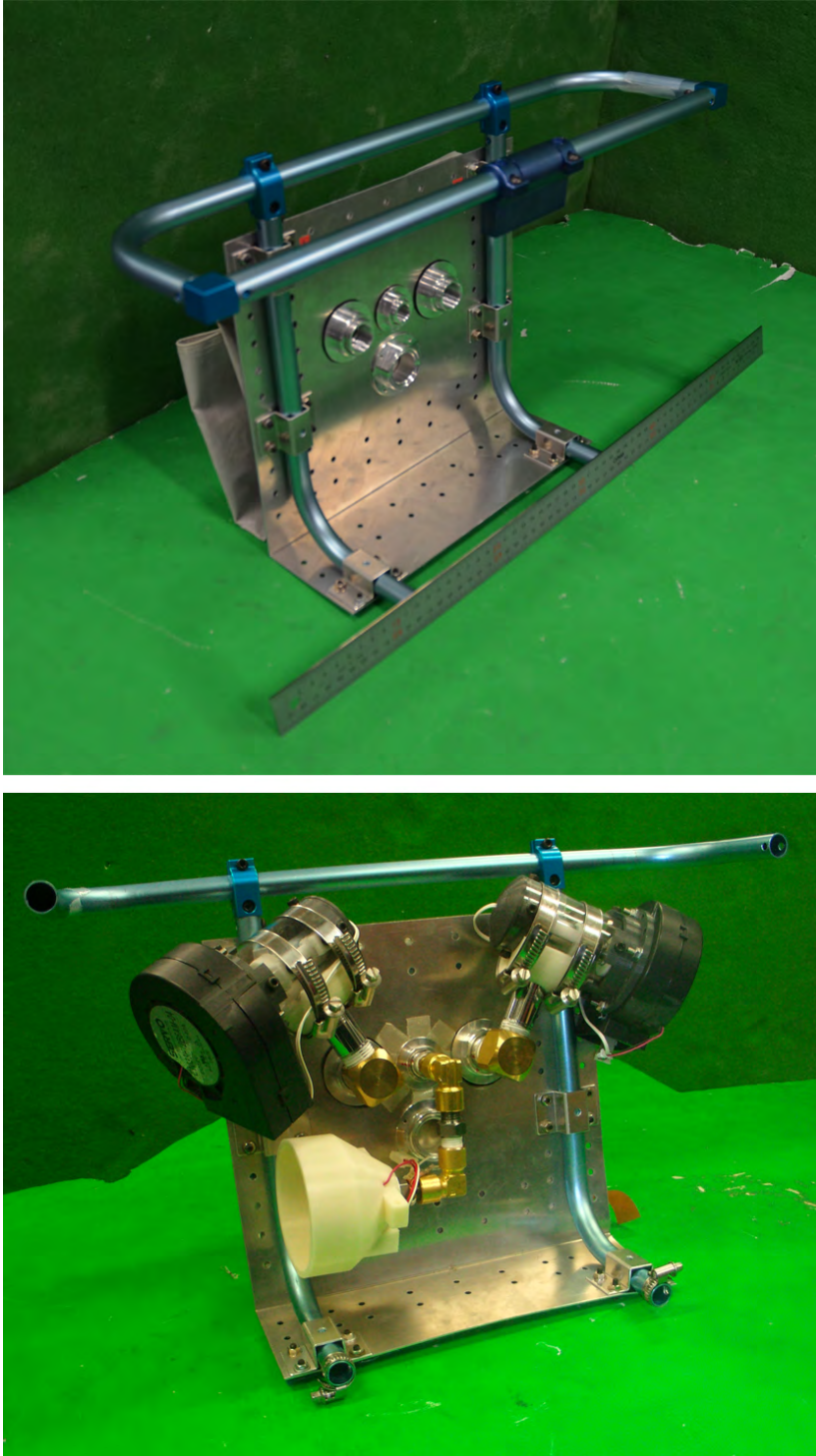


図 5.8: HRP2 背面フレーム状能動緩衝外装モジュール内部の概観



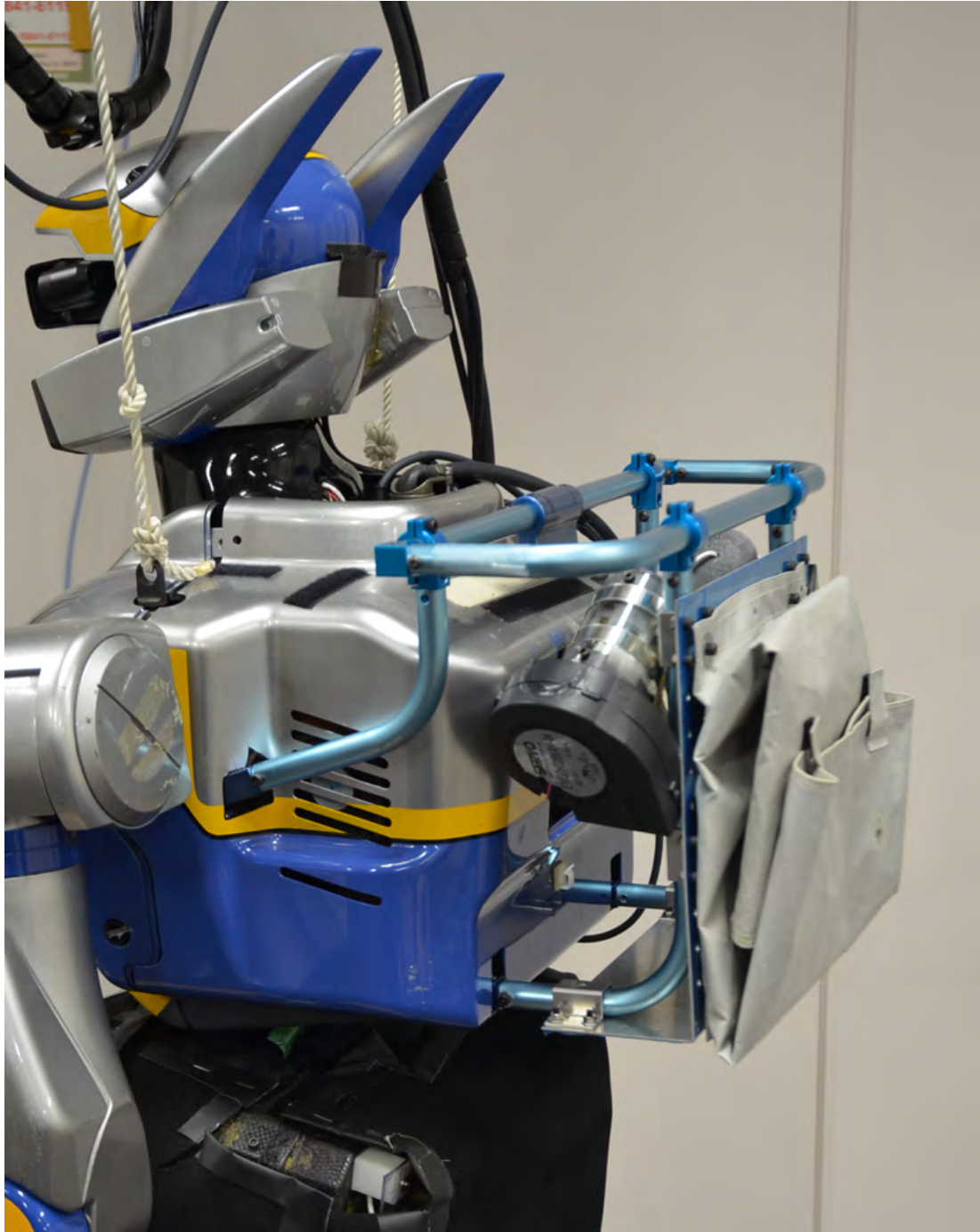


図 5.9: HRP2 背面と能動緩衝外装モジュール



## 第6章

# 能動緩衝外装による転倒時自己保護行動と 再装填回復行動



## 6.1 はじめに

本章では、まず転倒衝撃に伴う衝撃加速度を力積の理論式から計算し、衝突時間に反比例してヒューマノイドに印加される転倒衝撃加速度を導出する。またヒューマノイド安定化制御の中で、能動緩衝外装を用いた着地姿勢制御の位置付けを述べる。

その上で、HRP-2及び本研究で開発された等身大二足歩行ヒューマノイドを用いて、

- 直立姿勢からの瞬間的かつ能動緩衝外装の充填展開
- 転倒方向判定によって能動緩衝外装を利用するための自己保護行動
- 外装充填展開と排出再収縮動作の繰り返し動作実証
- インフレータカートリッジの交換・再装填動作

を実現する。

転倒実験では、直立姿勢からサーボトルクをオフとすることで膝裏打ち合わせから転落する動作において能動外装を用いて着地衝撃を緩和し、また外乱転倒実験では能動外装を利用しなかった場合の着地衝撃約60Gに対して能動外装を利用して半分以下に抑えるなど、その有用性、理論値との比較、評価方法について議論する。

ヒューマノイド HRP-2 を用いた転倒実験では、転倒中に転倒方向と転倒角度を計測し実際に体幹をひねることで転倒方向に能動緩衝外装を押し出す動作を実現する。

さらに、ヒューマノイド自身によってインフレータカートリッジの再装填試験を行い、最低限ものを掴むことのできる簡易なハンドがあれば、繰り返し能動緩衝外装を利用できることを示す。

これらにより瞬間転倒時の能動外装利用による自己保護行動、またカートリッジの排莢・再装填と外装再収縮による回復・復帰行動を実際に示し、実際に瓦礫不整地環境で稼働するヒューマノイドの耐衝撃性の評価方法についても議論する。

## 6.2 等身大ヒューマノイドの転倒に伴う衝撃加速度の概算

まず、等身大ヒューマノイドが無防備に転倒した際の衝撃加速度を概算する。等身大ヒューマノイドを質量  $M$  の1質点(重心高さ  $h$ ) と仮定し、直立状態から地面に衝突するとして、その地平面衝突速度  $v_L$  は  $Mgh = \frac{1}{2}Mv_L^2$  より最大で

$$v_L = \sqrt{2gh} \quad (6.1)$$

ヒューマノイドが地面から受ける力積  $F\Delta t$  は、運動量の差で表されるから、転倒したヒューマノイドが地面と完全非弾性衝突するとおけば

$$\int F\Delta t = M\sqrt{2gh} \quad (6.2)$$

ここで、衝突時間は非常に短く、衝撃加速度はインパルス的であるから、力積を正規分布ではなく三角形型で近似する。式 6.2 左辺は三角形面積であるから、最大力積を  $F_L$  として

$$\frac{1}{2}F_L\Delta t = M\sqrt{2gh} \quad (6.3)$$

さらに、衝撃加速度を  $a_L$  として  $F_L = Ma_L$  から

$$a_L = \frac{2\sqrt{2gh}}{\Delta t} \quad (6.4)$$

等身大ヒューマノイドの重心高さ 100cm と仮定すれば、衝撃加速度は図 6.1 のようになり、衝突時間 0.02 / 0.03 / 0.04 / 0.05 秒で瞬間衝撃加速度はおよそ 45G / 35G / 25G / 20G と見積もることができる。

緩衝外装を用いた場合や、あるいは多少の弾性跳ね返り (反発係数  $e$ ) があることを考慮すれば、式 6.4 の右式に  $(1+e)$  が加わる為、瞬間衝撃加速度は  $(1+e)$  倍に計算される。

### 6.3 能動緩衝外装ヒューマノイドの直立姿勢サーボオフ転倒

能動緩衝外装の充填展開トリガは、姿勢変化、加速度変化、ビジョンベースの姿勢異常検知などが考えられるが、ここでは簡易のため、加速度ベクトルの大きさが重力加速度の 10% 以上、すなわちヒューマノイドに印加されている加速度ベクトルを  $G_h$  として  $\|G_h\| > 1.1 \times 1G = 1.1 \times 9.8\text{m/s}^2$  とした。これは本節の実験ではサーボトルクオフによる転落動作中の膝裏打ち合わせに伴う衝撃によって与えられる。

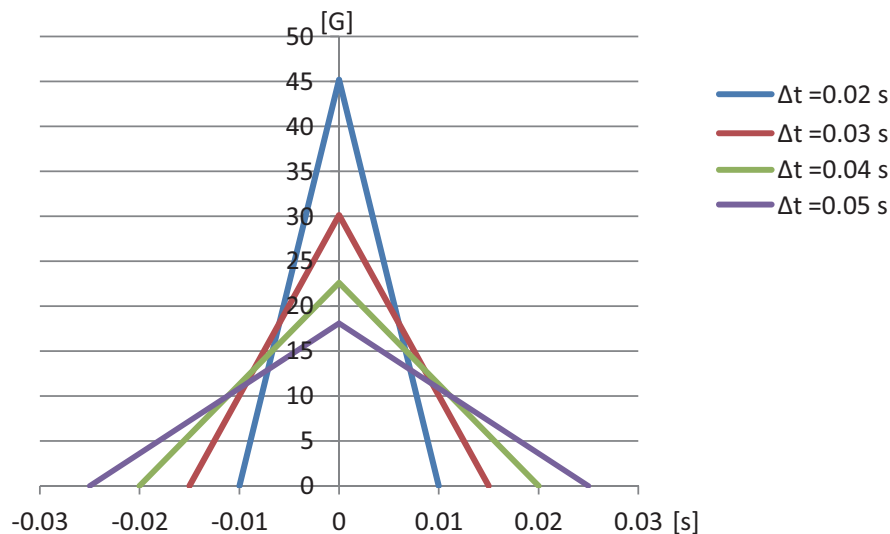


図 6.1: 衝突時間から概算される最大着地衝撃加速度

インフレータカートリッジの充填展開は、付録 A に示す通り、USB 通信によって外部制御マシンからコマンドを送っている。これは以降の実験でも同様である。

本研究の転倒着地衝撃測定としては、ヒューマノイド体幹に設置した加速度センサによって行うが、得られたデータはここでは HIC 法 (第 2.3 節) では評価しない。これはほとんどの衝撃加速度が既にインパルス的であるためである。実験の概観を図 6.2 ~ 図 6.7 に示す。時刻 0 を一次着地の瞬間としている (以降の実験でも同様)。また、ヒューマノイドに印加された加速度を図 6.8 に示す。

本節では衝撃加速度センサは INTERSENCE 社製「NavChip NC-1001」を使用した。センシングレンジは  $\pm 8G$  である。

本節の実験では、サーボオフに伴い垂直に体幹落下した際、膝関節裏を打ちつける際にセンサレンジ ( $+8G$ ) を超えている。その後着地衝撃加速度として約  $5G$  が計測された。これは本ヒューマノイドにとって十分安全な衝撃加速度である。

本実験から、直立姿勢から何らかの異常で通信が断絶し、サーボオフしたと想定すれば、

- 着地衝撃 ( $5G$ ) については、能動緩衝外装によって十分に緩和可能である
- 体幹垂直落下時の膝関節の打ちつけ ( $\sim 20G$  程度と予想される) が危険衝撃加速度として支配的である

ことが示された。

現在、当ヒューマノイドは膝裏と大腿部裏に小規模な緩衝材を装着することで運用されているが、様々な歩行動作に際して膝部周りの大規模柔軟外装が忌避されるだけに、能動緩衝外装モジュールを膝裏に実装することが今後の課題として有用と考えられる。その場合には、背面外装に比して膝裏部モジュールは少量配置であることから、第4章でその性能を示しながらも却下した中容量のインフレーターにも有用性が高まるだろう。

図6.2～図6.7の連続写真においては、重要である部分にマーカーを付け、図6.8のグラフに示された加速度の遷移からマーカーの対応を取った(以下の実験も同様にマーカーのポイントを取っている)。本実験では、“A”点で直立姿勢をとっており、“B”で膝裏の打ち合わせが起き、“C”点で着地衝撃、“D”点で二次着地衝撃を計測している。





図 6.2: 背面緩衝外装を用いたサーボオフ転倒・背面より (1/2)

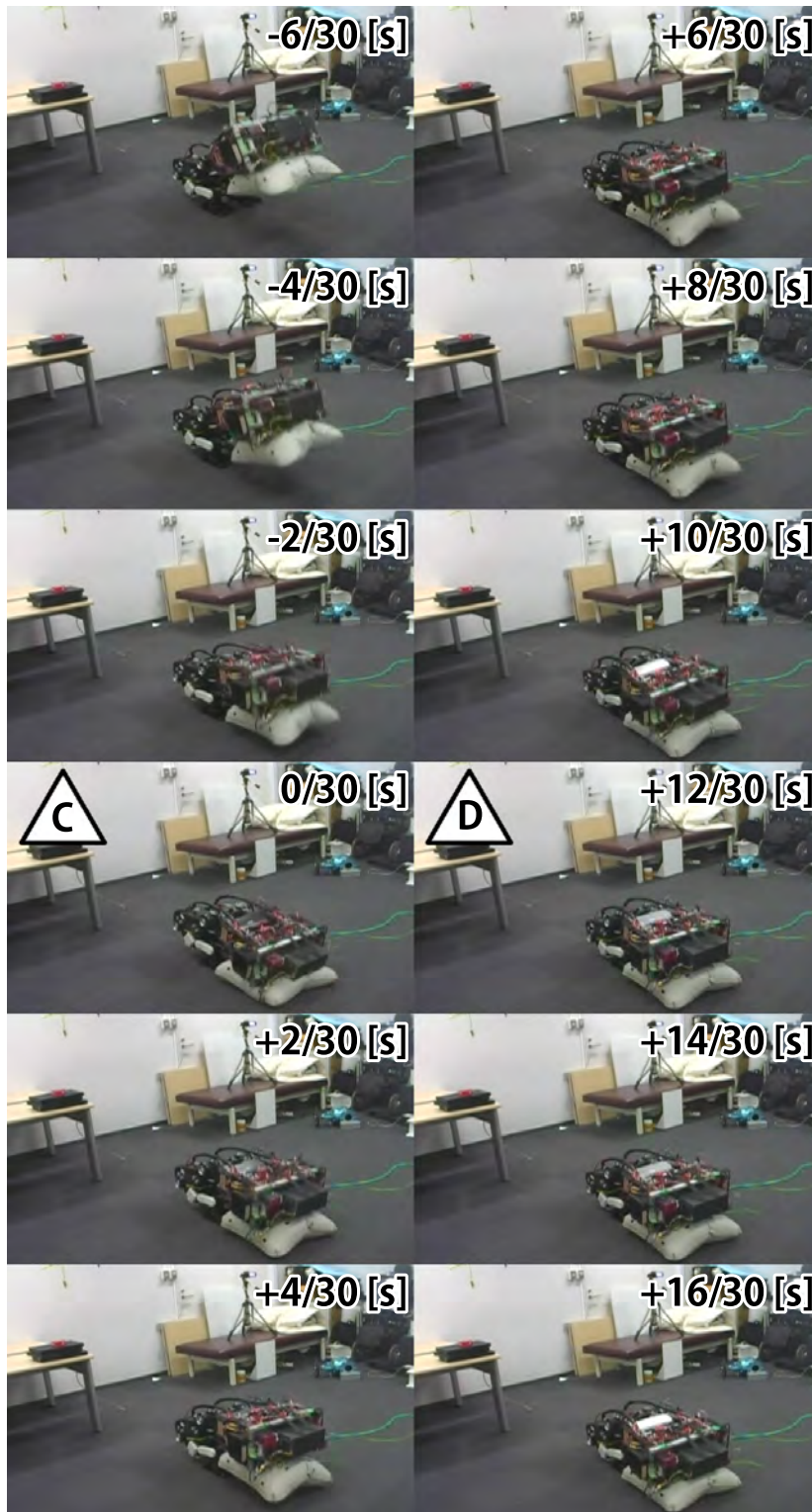


図 6.3: 背面緩衝外装を用いたサーボオフ転倒・背面より (2/2)

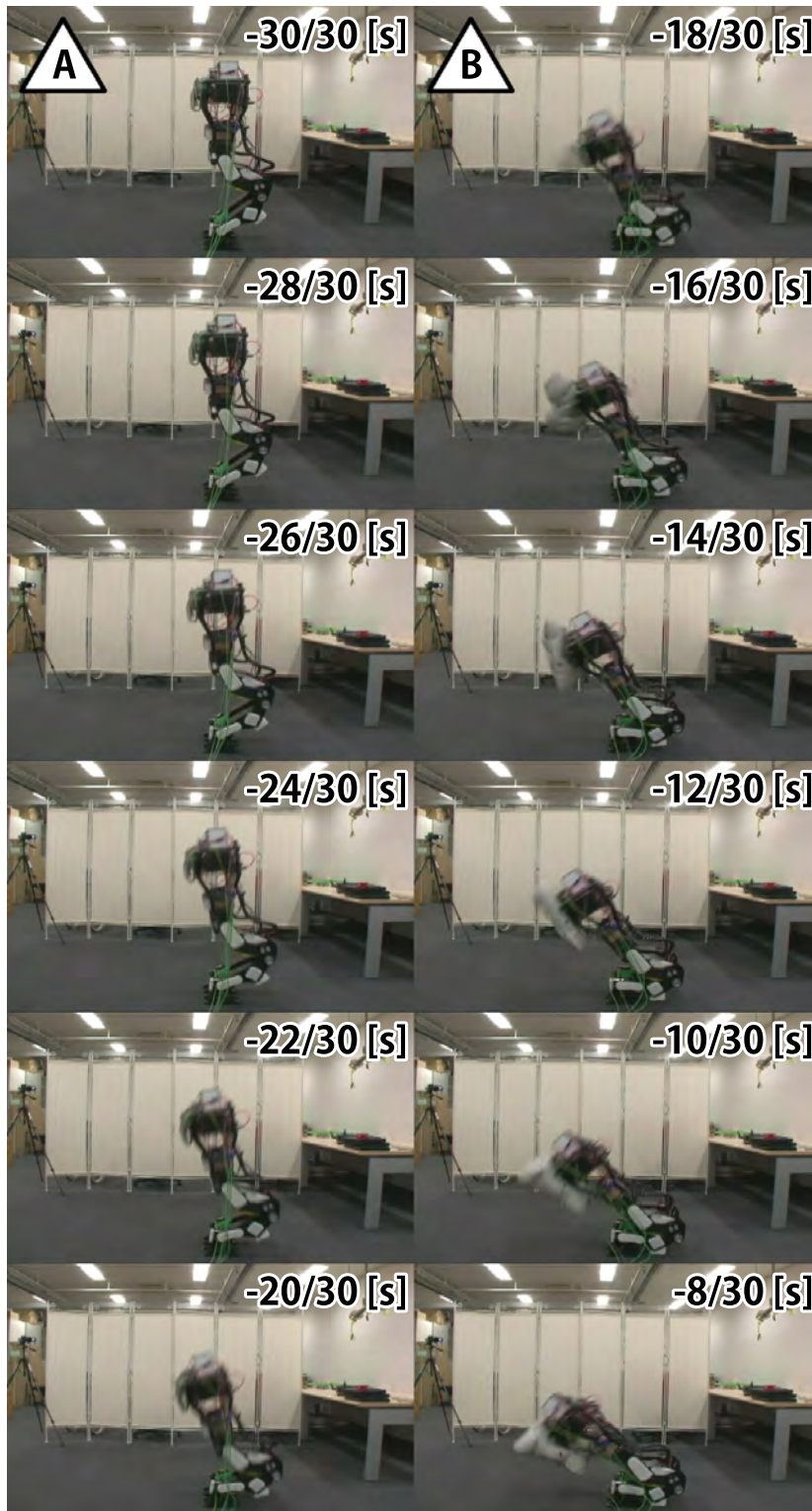


図 6.4: 背面型緩衝外装を用いたサーボオフ転倒・側面より (1/2)

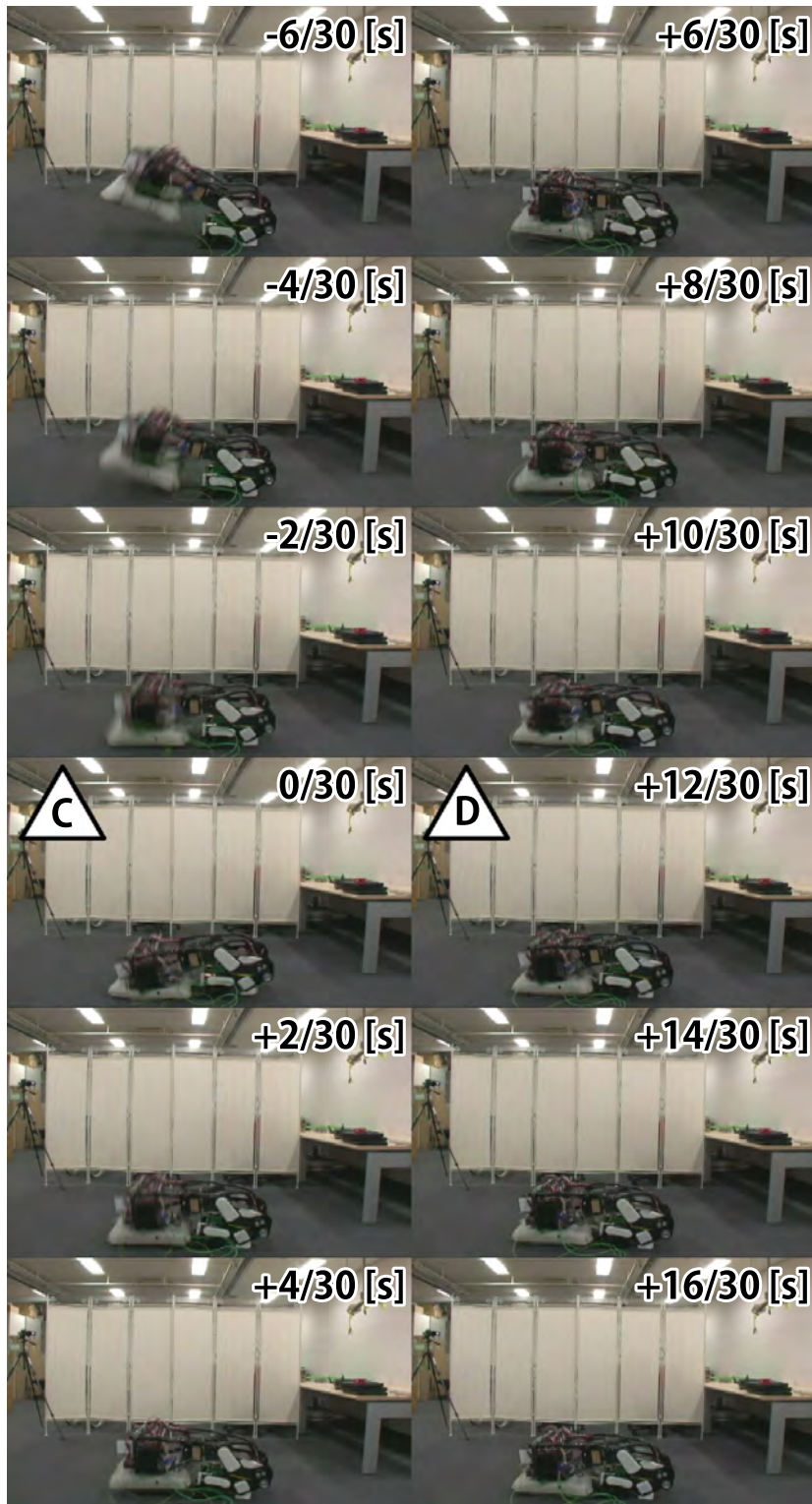


図 6.5: 背面緩衝外装を用いたサーボオフ転倒・側面より (2/2)

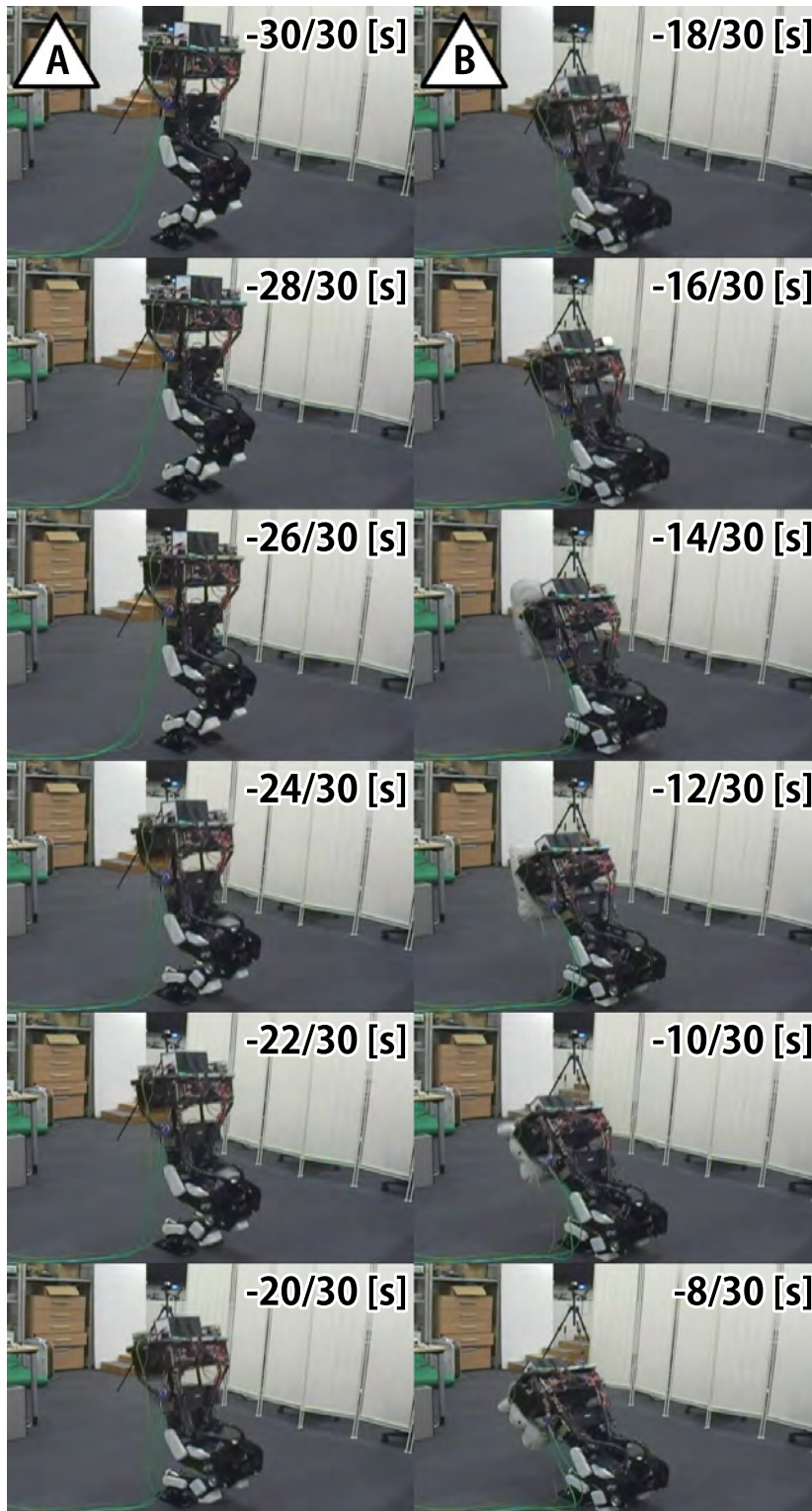


図 6.6: 背面緩衝外装を用いたサーボオフ転倒・前面より (1/2)



図 6.7: 背面緩衝外装を用いたサーボオフ転倒・前面より (2/2)

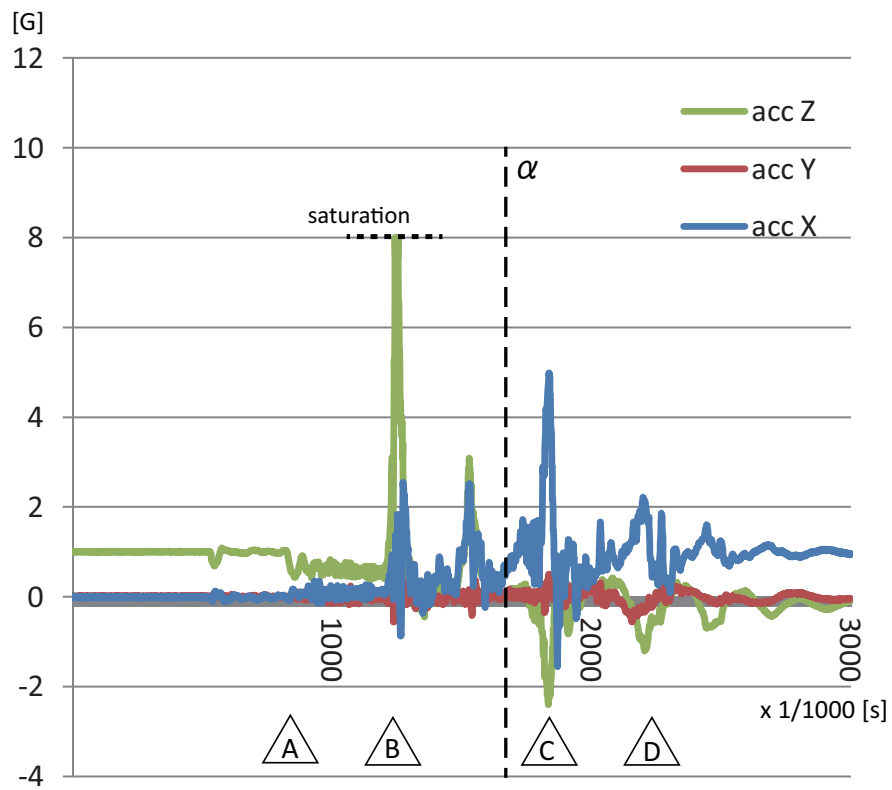


図 6.8: 背面緩衝外装を用いたサーボオフ転倒での着地衝撃加速度; “ $\alpha$ ” はインフレーター着火タイミング.

## 6.4 能動緩衝外装ヒューマノイドの前面部外力付加による転倒

図 6.9 ~ 図 6.14 に，二脚等身大ヒューマノイド前面部に力を加え後方転倒をさせた実験の概観を示す．本節では，転倒トリガは同様に  $\|G_h\| > 1.1G$  とした．これは人間による外乱により与えられる．地平面は一般的カーペットである．

本節では着地衝撃加速度が大きく，前述の「NavChip」センサの計測レンジを超えるため，外乱の計測には「NavChip」を，着地衝撃の計測には Logical Product 社製「9軸ワイヤレスモーションセンサー」を用いた（着地衝撃の計測に関して以下同様）．着地衝撃加速度は 500Hz で得られ，計測レンジは  $\pm 80G$  である．実験ではどちらの加速度センサも体幹腰部に取り付け，ヒューマノイド前面方向に X 軸，直立姿勢鉛直下向きに Z 軸とした．“E” 点で外乱が加わり転倒開始し，“F” 点で着地衝撃を計測，“G” 点で二次的着地を行っている．





図 6.9: 背面緩衝外装を用いた外力転倒・背面より (1/2)

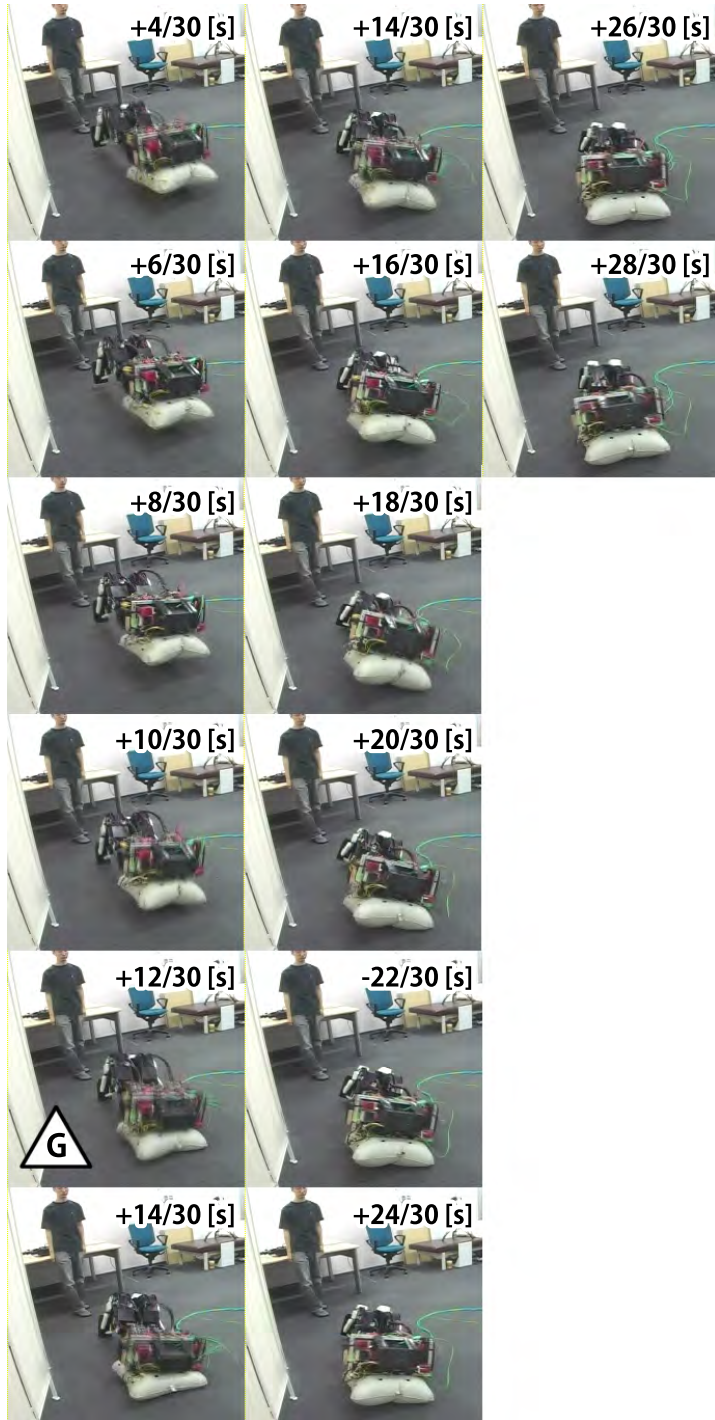


図 6.10: 背面緩衝外装を用いた外力転倒・背面より (2/2)

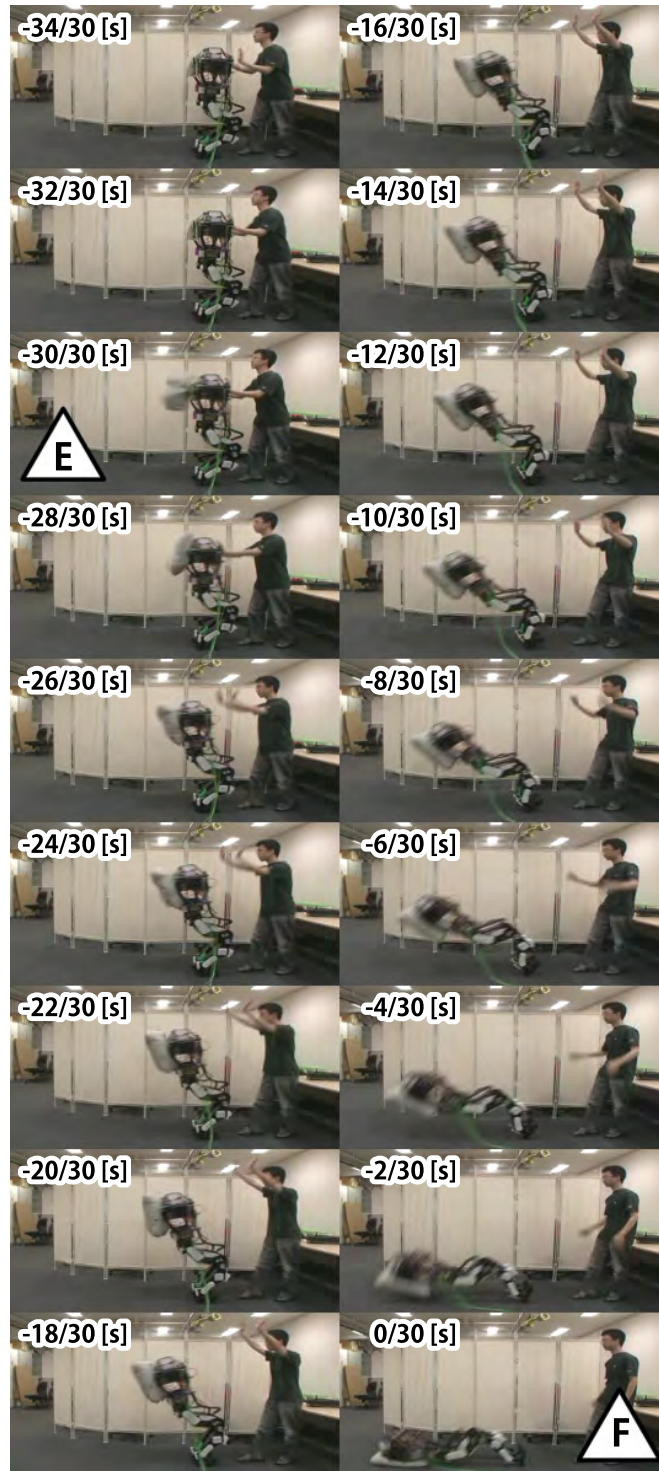


図 6.11: 背面緩衝外装を用いた外力転倒・側面より (1/2)

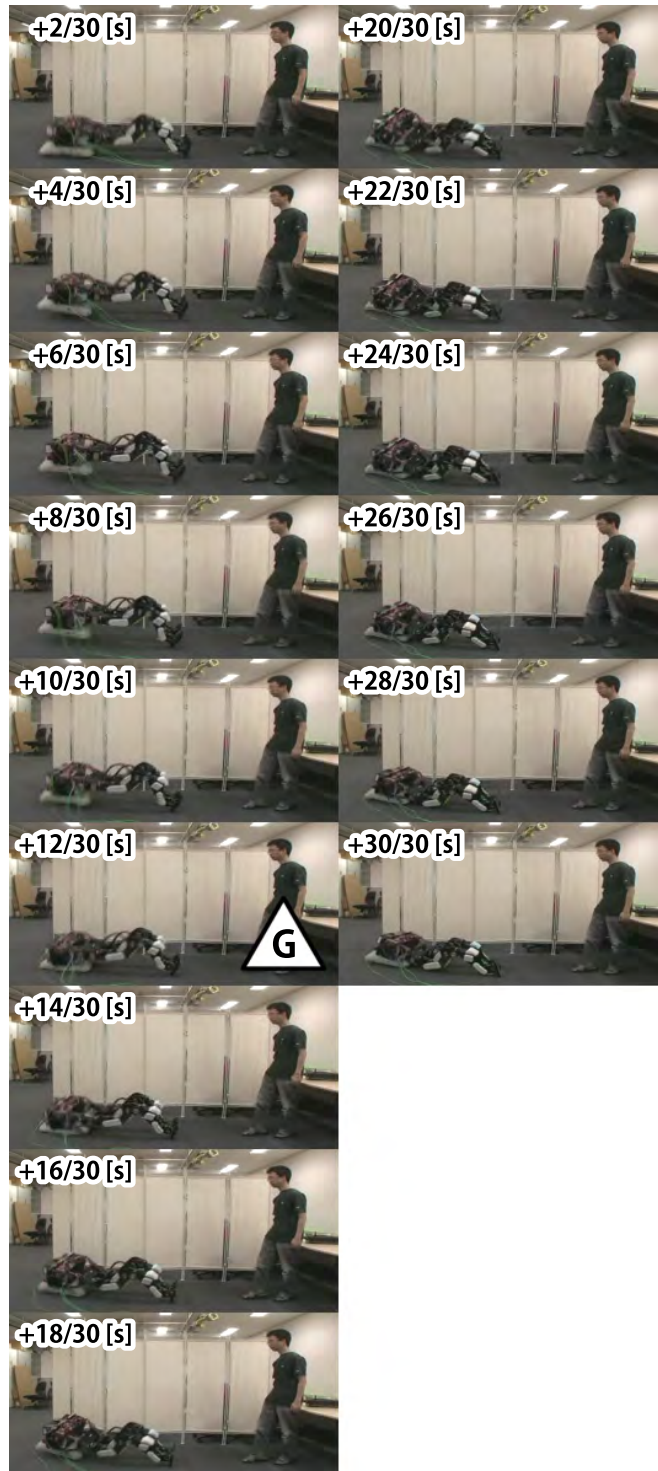


図 6.12: 背面緩衝外装を用いた外力転倒・側面より (2/2)



図 6.13: 背面緩衝外装を用いた外力転倒・前面より (1/2)



図 6.14: 背面緩衝外装を用いた外力転倒・前面より (2/2)

能動緩衝外装の効果として低減される着地衝撃加速度を図 6.15 に示す。ここではヒューマノイド X 軸方向に外乱が加わり、重力加速度が印加されていた Z 軸方向から転倒していく様子を読み取ることができる。

次に、同様のセッティングで、能動緩衝外装の充填展開を用いず転倒した場合を図 6.16 ~ 図 6.19 に示す。この実験はインフレーターカートリッジの装填ミスによるものであり、ヒューマノイドを損壊することを目的としたものではないことに留意されたい。能動緩衝外装を「用いない」場合の転倒衝撃加速度を図 6.20 に示す。前実験と同様、ヒューマノイド X 軸方向に外乱が加わり、重力加速度が印加されていた Z 軸方向が転倒していく様子が示されている。上述の「能動緩衝外装の充填展開」の場合の着地衝撃加速度 (図 6.15) が、能動緩衝外装を利用することで最大ピーク値を大きく低減していることが示された。「能動緩衝外装の充填展開」ではおおよそ「-30/30s」~「-28/30s」の時点で人間の手により押され転倒が始まっており、これは「能動緩衝外装を用いない」場合でもほぼ同じタイミングとなっている。すなわち、2つの比較実験は外装制御以外はほぼ同じ転倒動作であると考えられる。

「充填展開」を用いる場合では地面接触に伴う弾性係数が上がったことにより二次的着地が起きていることに比べ、「用いない」場合は完全非弾性衝突に近く、ごくわずかに跳ね上がるのみであった。ここでは位置エネルギーが転倒によって衝突エネルギーに変わったと仮定しているため、ヒューマノイド X 軸方向の衝撃加速度の第一次ピークと第二次ピークから反発係数を求めれば「外装充填展開」の場合およそ  $e = 0.4$ 、「用いない」場合  $e = 0.07$  相当と概算できる。ただし、第 5 章でも述べたように空圧外装の完全気密による弾性は最適解ではないため、理想的には衝撃加速度を吸収しつつ二次着地を防ぐことが望ましい。

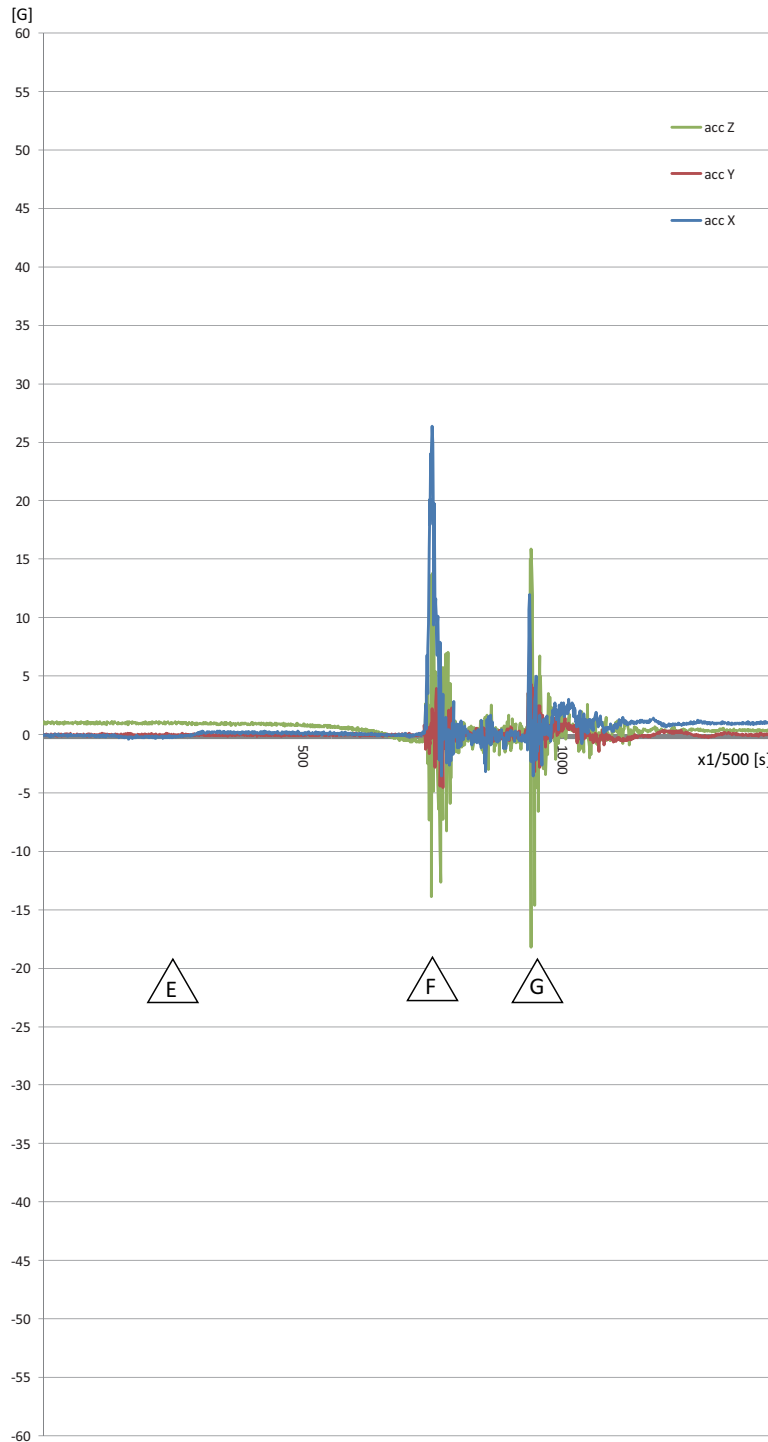


図 6.15: 背面転倒事故着地衝撃 ; 能動緩衝外装利用



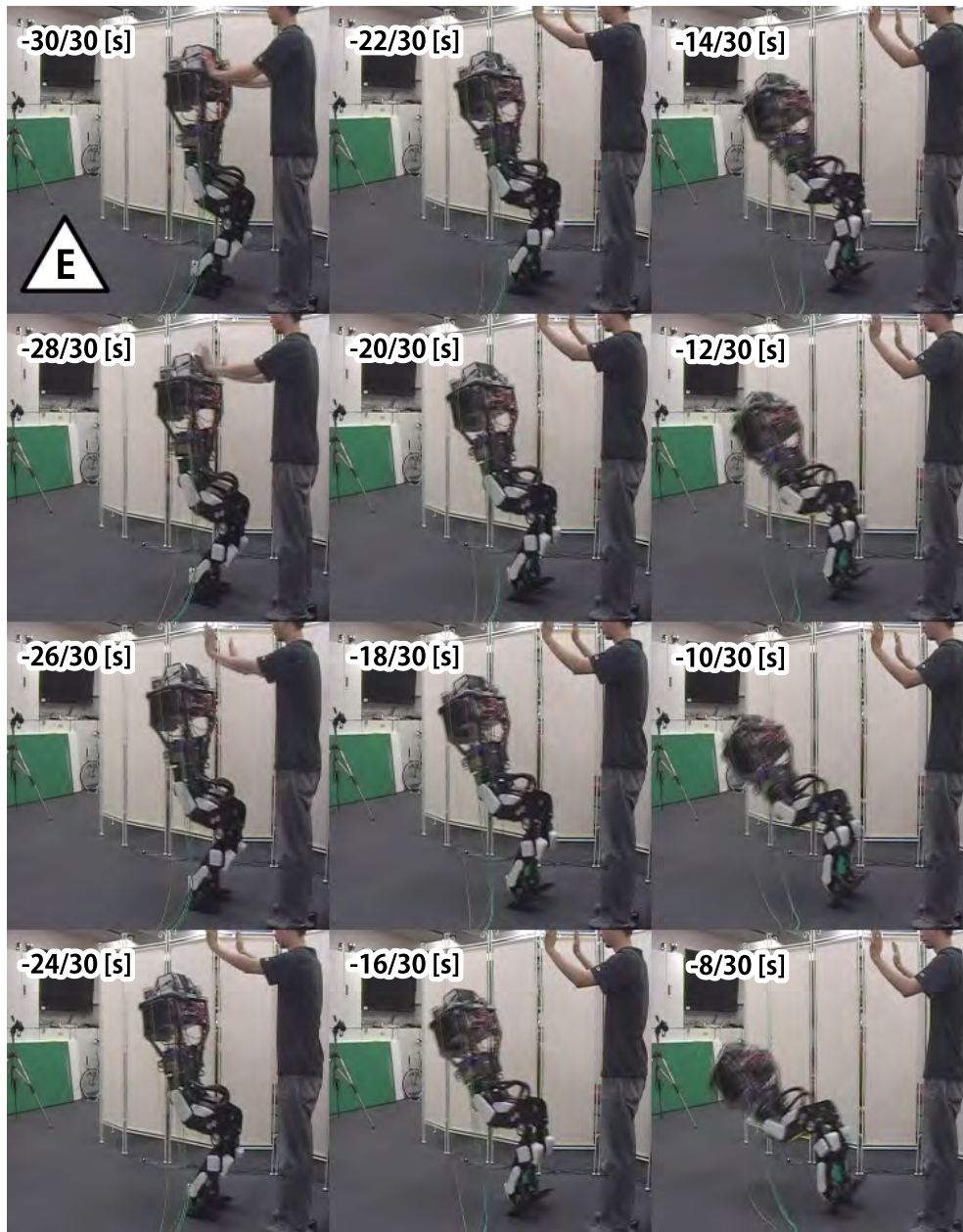


図 6.16: 背面緩衝外装を用いない転倒事故・前面より (1/2)

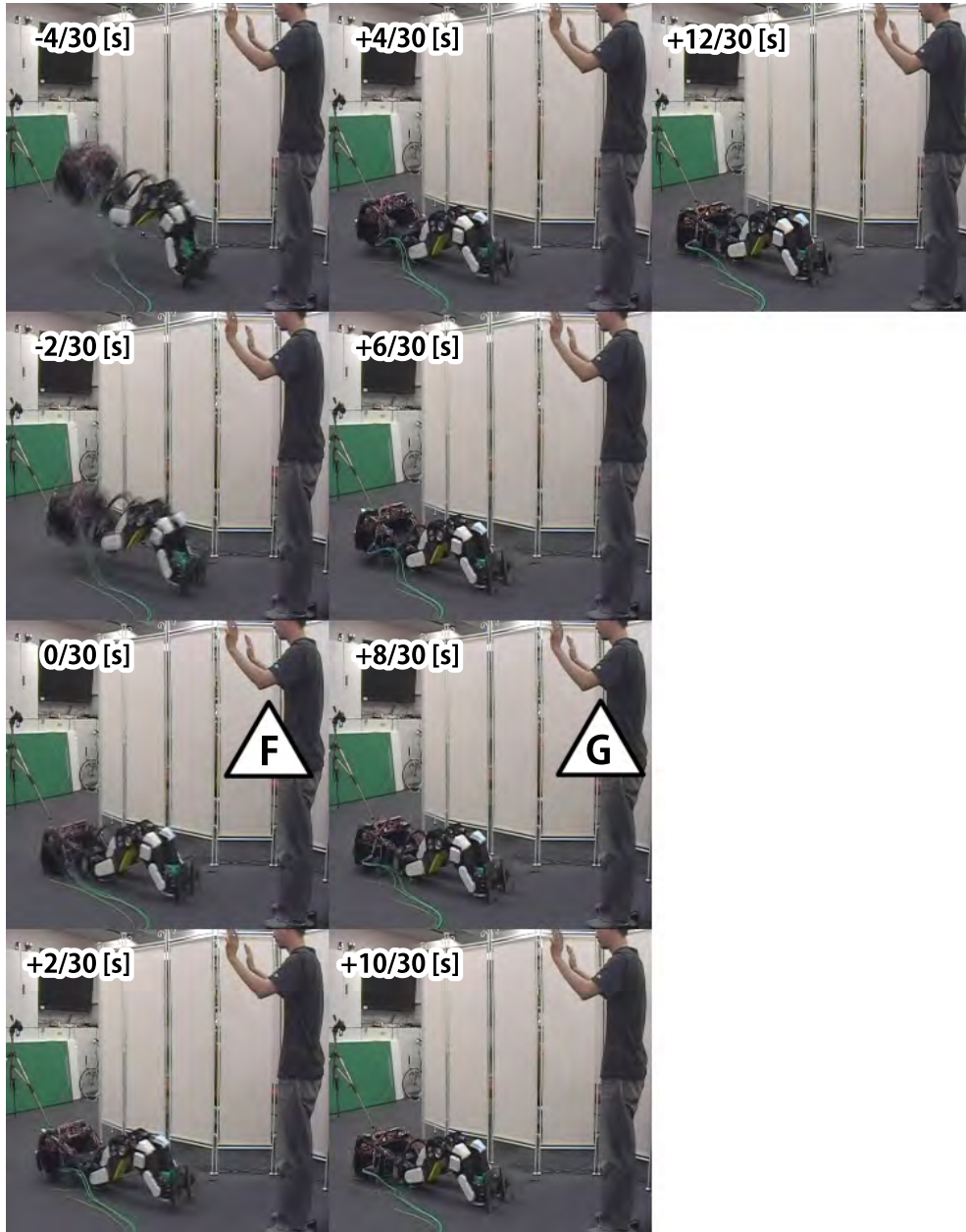


図 6.17: 背面緩衝外装を用いない転倒事故・前面より (2/2)



図 6.18: 背面緩衝外装を用いない転倒事故・背面より (1/2)

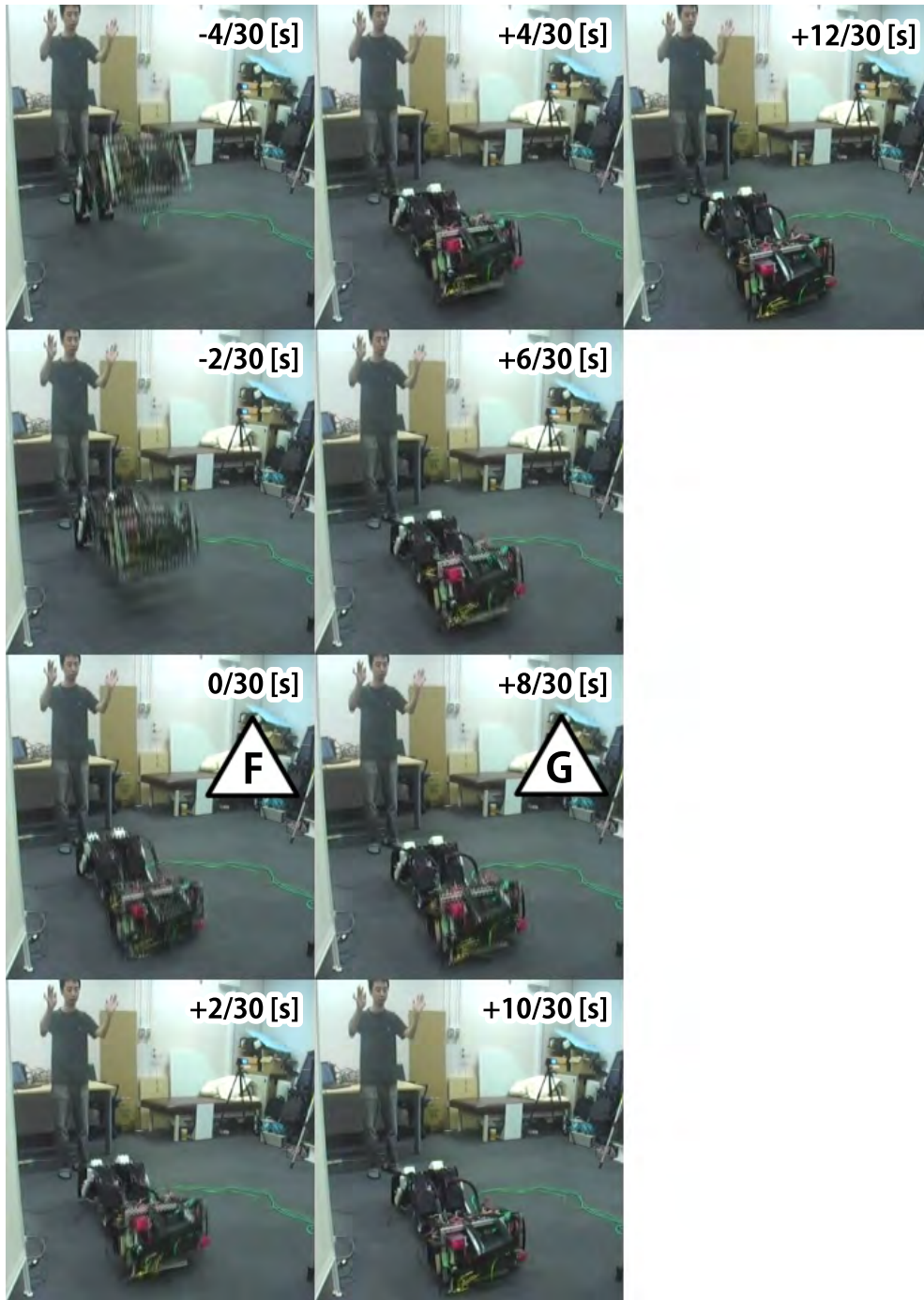


図 6.19: 背面緩衝外装を用いない転倒事故・背面より (2/2)

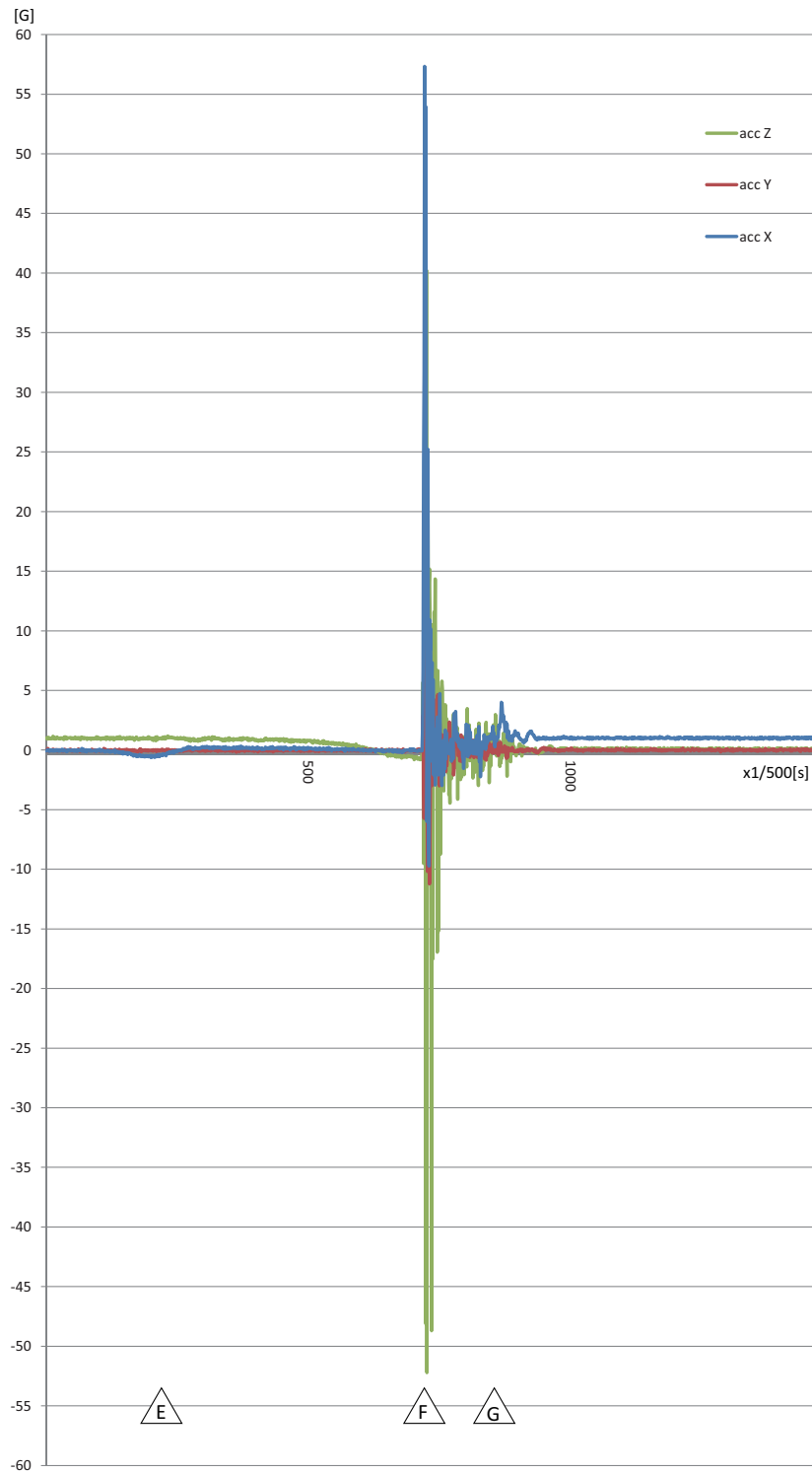


図 6.20: 背面転倒事故着地衝撃荷重；能動緩衝外装非利用

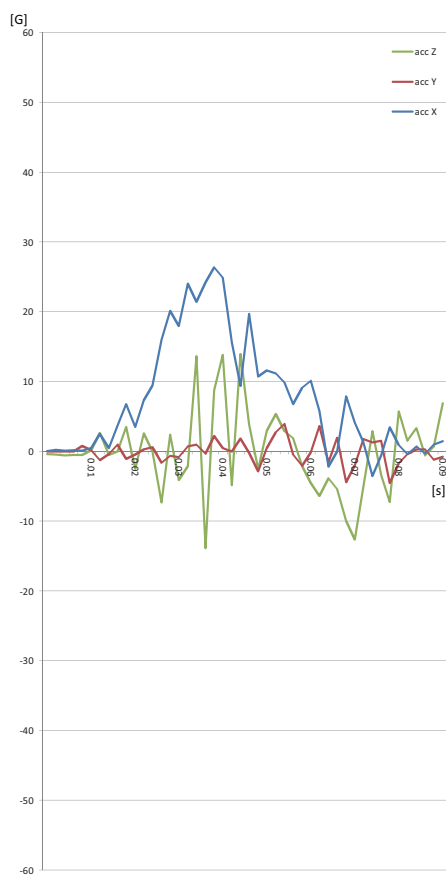


図 6.21: 転倒事故着地衝撃 (最大衝撃加速度部分の拡大); 能動緩衝外装利用の着地衝撃時間 (0.05 秒程度)

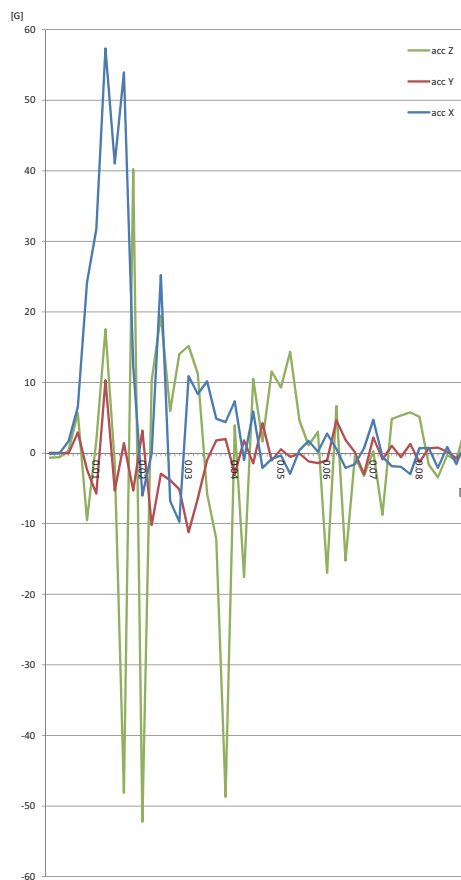


図 6.22: 転倒事故着地衝撃 (最大衝撃加速度部分の拡大); 能動緩衝外装非利用の着地衝撃時間 (0.02 秒程度)

またこれらの着地衝撃加速度のピーク部分の拡大図を図 6.21 ~ 図 6.22 に示す。無防備に転倒した場合着地により ~ 約 60G が印加されたのに対し、能動緩衝外装を用いることで半減以下 (約 25G) まで抑えることが実現できている。また図 6.1 で述べた通り、最大加速度ピークをおおよそ三角形で近似したことの妥当性が示された。

なお、この事故転倒では、ヒューマノイドの骨格・関節構造などに損傷は無かったものの、体幹内に配置されたモータドライバ基板類<sup>1</sup>が一部脱落するという損壊が確認された。

## 6.5 能動緩衝外装の耐衝撃加速度評価

本転倒実験では、事故転倒でおよそ 0.02 秒、能動緩衝外装の利用でおよそ 0.05 秒の衝撃時間となった。これは図 6.1 (0.02 / 0.05 秒で 45G / 18G) と比較し、多少の反発係数が加算されることを鑑みれば、それぞれ 60G / 25G という測定結果は概ね妥当といえる。この実験から得られた実測値を理論値で除算すれば、1.3 ~ 1.4 程度となり、すなわち逆算される反発係数は  $e = 0.3 \sim 0.4$  程度と概算できる。

最大転倒衝撃加速度の、実験測定結果との差異に関しては、

- 転倒動作では弾性跳ね返りを含み、弾性衝突である (実測の方が大きくなる)
- 着地衝撃の力積は完全な三角形ではなく、より複雑な分布となっている (実測の方が小さくなる)
- 仮定した重心位置と着地荷重位置の誤差 (実測の方が小さくなる)
- 実環境が不整地であることに伴う、予期できない硬接触 (実質的にヒューマノイドの損傷が大きくなる)

などの因子が考えられる。

## 6.6 実地稼働する能動緩衝外装ヒューマノイドの耐衝撃加速度評価

本転倒実験に搭載された加速度センサ (計測レンジ  $\pm 8G$ ) などから、耐衝撃加速度 100G とし、安全率 3 で除算してヒューマノイド全体の耐衝撃を 30G と設定した。本実験で直

<sup>1</sup>本ヒューマノイドは、基板類の交換性の為、基板をヒューマノイド体幹に剛に締結せず、いくつかの基板多層セットをスライド挿入し簡易に手動ロックする機構を備えていた。

立姿勢からの転倒に伴い30Gを下回る衝撃緩衝性能を発揮できたことから、本緩衝外装の形状や厚みを妥当な設計であると評価できる。

ヒューマノイドに限らず、ロボットの転倒・転落に伴う「衝撃加速度」の絶対的な評価は非常に困難である。HRP-2転倒に関する先行研究[16][17]では、HRP-2の耐加速度は10G程度に抑えるべきであると述べられている。その評価方法に則れば、本二脚ヒューマノイドは転倒に伴い「約25Gを受けても正常に動作する」ことが示されたが、実瓦礫不整地環境で働くヒューマノイドが幾度となく大衝撃荷重を受けるようになる時、この評価方法は十分であるとは言いがたい。HRP-2についても、おそらく10G以下であっても複数回印加されればヒューマノイドの破損を招くだろう。

将来的には、実環境で稼働するヒューマノイドに関しては、ヒューマノイドが転倒・転落によって受ける衝撃加速度・その頻度と、人間が介入してメンテナンスを行う頻度との比較によって評価すべきである。すなわちヒューマノイドに印加された衝撃加速度の累計であるが、この場合には「転倒事故に伴う大衝撃加速度」と通常の重力加速度・歩行に伴って印加される加速度などに重み付けをするため、HIC法と同様、適宜乗算された加速度で評価することが必要となる。

## 6.7 能動緩衝外装ヒューマノイドの自己保護体幹ひねり転倒

現在、不意の外乱荷重・外乱に対し、ヒューマノイドロボットの安定・非転倒行動としてはZMP規範の軌道生成や体幹変位補償、運動量制御などの手法が研究されていることは第2章にて述べた。また、能動外装を有する場合は、腕部/膝部などの環境支持を用いた大転倒防止動作や、さらに大きな外乱に対しては体幹での安全な大着地動作が必要であることも述べた。

すなわち、外乱や不意の接触に対して、安全な方向へのフットステップ動作生成などでも転倒・大荷重接触が避けられないと判定された場合には、地平面への転倒/安定物体への支持を目的として、自身の能動緩衝外装を展開し、望ましい方向へそれを向け、自己身体を保護する。ここでは、等身大ヒューマノイドHRP-2とその背面の能動緩衝外装を用いて、転倒方向へ背面を向け、背面着地による自己保護行動を実現する。

Goswamiらは、大型のバックパック外装を利用するため転倒着地方向へ向けて体幹を「ひねる」ことでより安全な転倒動作を実現[14][15]しつつも、着地時に背面平面での面



接触 (Flat Contact) を確実に実現させることは困難である (バックパックの角辺など, 線接触となる) と述べているが, 本研究の能動緩衝外装は空圧式であり, 受動的緩衝外装よりも遥かに着地角によって変形する為, この着地角度誤差はハードウェア的に十分吸収することが可能であると考えられる. 本節ではこの動作を能動緩衝外装とそれを有する HRP-2 実機 [49] にて実現する.

図 6.23 ~ 図 6.24 に, HRP-2 を用いた自己保護・体幹ひねり転倒動作を示す. またその転倒角, ひねり角の定義を図示したものが図 6.25 である. ここでは, 目標 Z 軸とヒューマノイド鉛直軸の差分を転倒判定トリガ「転倒角 ( $\theta$ : fall-down angle)」(以降表記は全て度数法) と設定した. 転倒角度は HRP-2 体内のプラグインから IMU の値を読み取り, 外部の制御用計算機で計算している. 本実験では  $\theta > \theta_{th} = 10$  の時に転倒と判断し, 転倒方向に向けて体背面を押し出すように腰 Yaw 軸をひねる ( $\phi$ : spin-angle) 動作を実現させた.

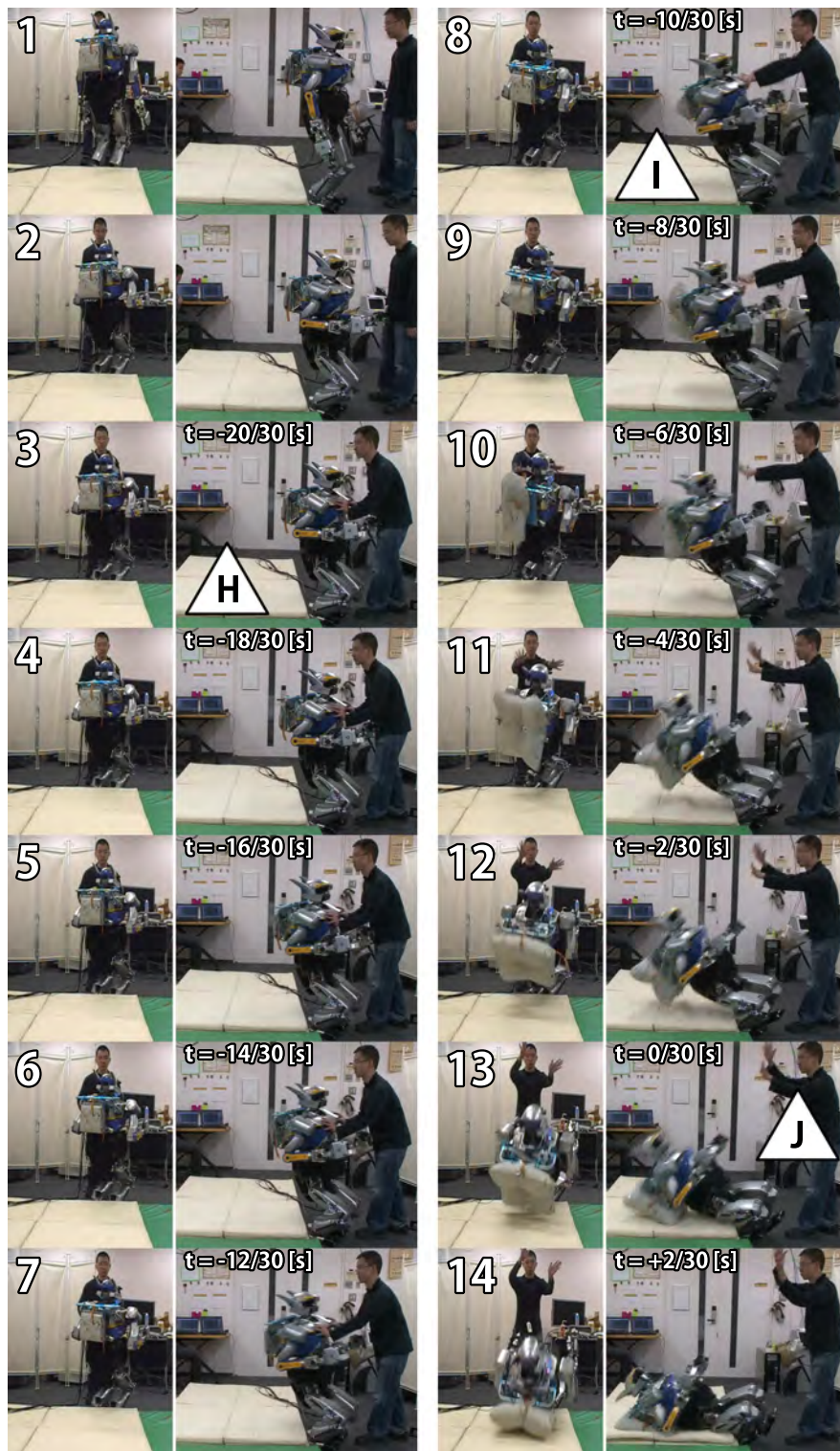


図 6.23: HRP-2 後方ひねり転倒動作 (1/2) ; 背面外装を展開しつつ体幹をひねっている .



図 6.24: HRP-2 後方ひねり転倒動作 (2/2)

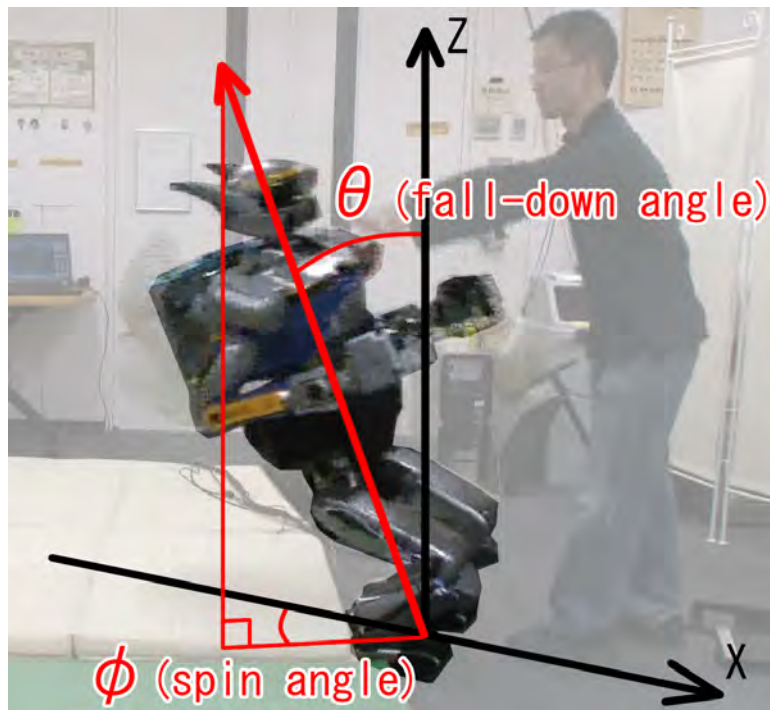


図 6.25: HRP-2 の転倒角とひねり角

HRP-2 は現在、体幹を用いた大衝撃着地 [16] に十分対応できるヒューマノイドとはいいがたい。これは脆く破損しやすいカバー類、内部マシン (基板同士の締結) の耐衝撃構造が十分になされていない為である。本実験では、転倒姿勢中での転倒方向の判定と自己保護行動に注目する為、転倒平面には柔軟マットを敷き、また下肢を折り畳み、初期姿勢の重心を 10 ~ 20cm 低く設定することで転倒衝撃を小さくするよう用意した。また、転倒動作に関係のない腕部に関してはトルク制御をかけ、実験中の挙動や着地接触に伴い関節への被害が極力起こらないよう留意した。床マットの厚みや体幹高さを調整しつつ、複数回試行を行った。

図 6.26 ~ 図 6.27 はこの試験の着地衝撃加速度である。複数回試行の結果、この試験では床マットの弾性や人間が与える外乱荷重のわずかな差異が支配的であり、能動外装利用 / 非利用の場合でどちらも 10G 前後となり、試行回によってばらつきがあり最大加速度に関して大きな差異は計測されなかった。ただし、能動緩衝外装を利用して衝突時間を長くすることで衝撃加速度のピークを分散させるような着地が可能となったことは確認できた。

また、図 6.28 に示す試行回では、能動緩衝外装と床マットの合計による弾性が大き過ぎ、さらにマット上で「跳ね返り回転」と二次的着地をしている (“J” 以降)。この試験では HRP-2 両腕の Pitch 軸にはトルク制御をかけており、関節角の損傷を防いでいたが、試験の結果 HRP-2 左腕の複数の関節角 (転倒前の姿勢で、Yaw 軸方向のもの。すなわち、肩 Yaw・手首 Roll) のギアが飛ぶという損傷が確認された。

図 6.29 は、この試行回の HRP-2 体幹内の IMU による姿勢角、また関節角度の値である。“T” 点で体幹をひねり、体幹ひねり角 ( $\phi$ ) を補償し、“J” 点でマット着地がなされ、Yaw 軸 (HRP-2 座標) 周りに跳ね返り、二次的着地を行っている。この時  $\phi=33^\circ$  であった。

このような床弾性が存在する状況のみならず、地面が完全な平面でない場合のような不整地環境においては、同様の二次的接触が起きうる。これを防ぐためには、

- 事前に環境情報を取得し、より安全な転倒が可能な方向を認識しておく
- 狭所にて体幹大着地を行う場合は、両腕の能動緩衝外装モジュールも展開しておき、着地の際の支持多角形を大きくとる
- 能動緩衝外装内圧過負荷時には、内気体を自然排出する構造を持つことで、着地衝撃によりなじんだ着地を実現する

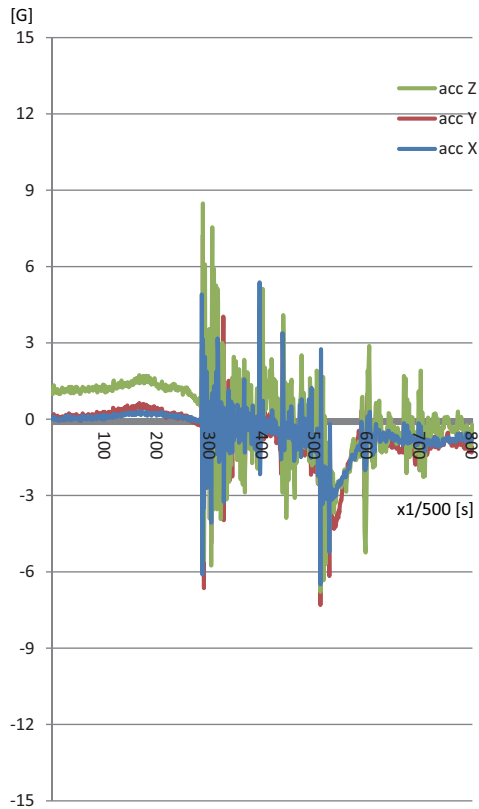


図 6.26: HRP-2 後方ひねり転倒着地衝撃・能動緩衝外装利用

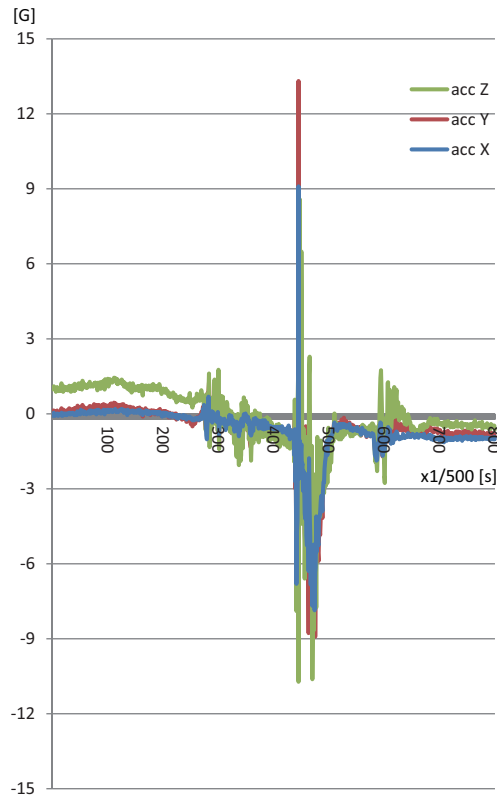


図 6.27: HRP-2 後方ひねり転倒着地衝撃・能動緩衝外装非利用

などの予防動作が考えられる。

HRP-2 体内計算機ではおよそ 5ms の周期で各種プラグインが動作し、IMU から姿勢角を取得している（ただし、外部に設けられた制御用計算機からこのデータ値を呼び出す周期についてはこの限りでない）。また EusLisp で実装される最上位制御層でも 25ms 程度の周期で制御を行っている。図 6.29 では、 $\theta > \theta_{th}$  によって転倒判定がなされてから実際に体幹をひねり始めるまでにおよそ 150ms を要しており、転倒中の大加速度などの要因により HRP-2 体内の制御ループに遅れが見られる。またこれは HRP-2 の各種関節角情報・センサ情報のログを取るプラグインがしばしば強制終了していることにも関連があるように考えられる。この遅れにより転倒判定から実着地までのおよそ 500ms の内、実際に HRP-2 が自己保護動作をとれたのは着地前 350ms の区間であった。この区間の内 250ms を用いて体幹ひねり動作を実現している。

能動緩衝外装の充填展開指令については、付録 A に示す通り外部制御用計算機から USB 通信によって行われるため、HRP-2 の遅れに関連なく事前検証の通り指令から 250ms 程度での展開が実現できており、図 6.23 ~ 図 6.24 から概算すれば着地に対して 130ms 以上の猶予があった。

また、通常 HRP-2 の稼働にはスタビライザ制御がかけられており、少量の外乱荷重に対しても転倒せずその場に踏みとどまることが可能であるが、転倒判定と体幹大着地判定はスタビライザ制御よりも後に決定される (第 2.5 節) ものであるから、本試験では転倒に際してスタビライザ制御はオフとしている。



図 6.28: HRP-2 後方ひねり転倒動作における二次的着地



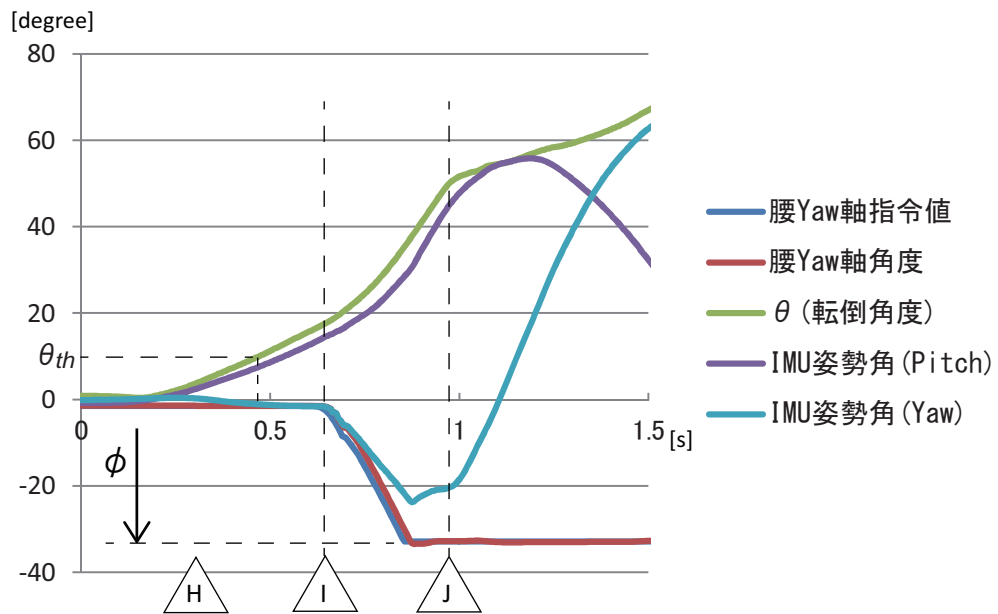


図 6.29: HRP-2 の後方ひねり転倒姿勢角；着地 (“J”) 以降に二次的跳ね返り回転をしている。

## 6.8 能動緩衝外装のインフレーターカートリッジ再装填動作

図 6.30 ~ 図 6.32 に、インフレーターカートリッジのロード(装填)・インフレート(充填)・ドレイン(排出)動作を2回連続で試行した実験の概観を示す。第5章に述べたドレイン機構により完全に外装内気体を排出することで、次回の充填が可能となることが示された。

また、図 6.33 に、等身大ヒューマノイドの腰部に取り付けられた配管とソケットの概観を示す。腰部背面にフレーム構造を設計し、そこに配置された能動緩衝外装モジュールから配管が延びており、カートリッジを挿入するソケットに接続されている。図 6.34 ~ 図 6.35 に、これを用いて等身大ヒューマノイド自身によるインフレーターカートリッジのリロード・パーズ動作を行った実験を示す。この実験では右ロボットハンドによりカートリッジを把持し、自身の腰部に設置されたソケットに挿入後、能動緩衝外装の膨張展開試験を行い、その後に再びカートリッジを把持し直し、パーズしている。

第4章でも述べた通り、このインフレーターカートリッジは高圧用カプラを用いて瞬間的圧力に十分耐えるように接続されており、また空圧的接続と同時に電気的接続も自動的になされる。従って、ものを掴めるだけのハンドがあれば、ヒューマノイド自身によりカートリッジを交換し、能動緩衝外装の利用が可能となることが示された。

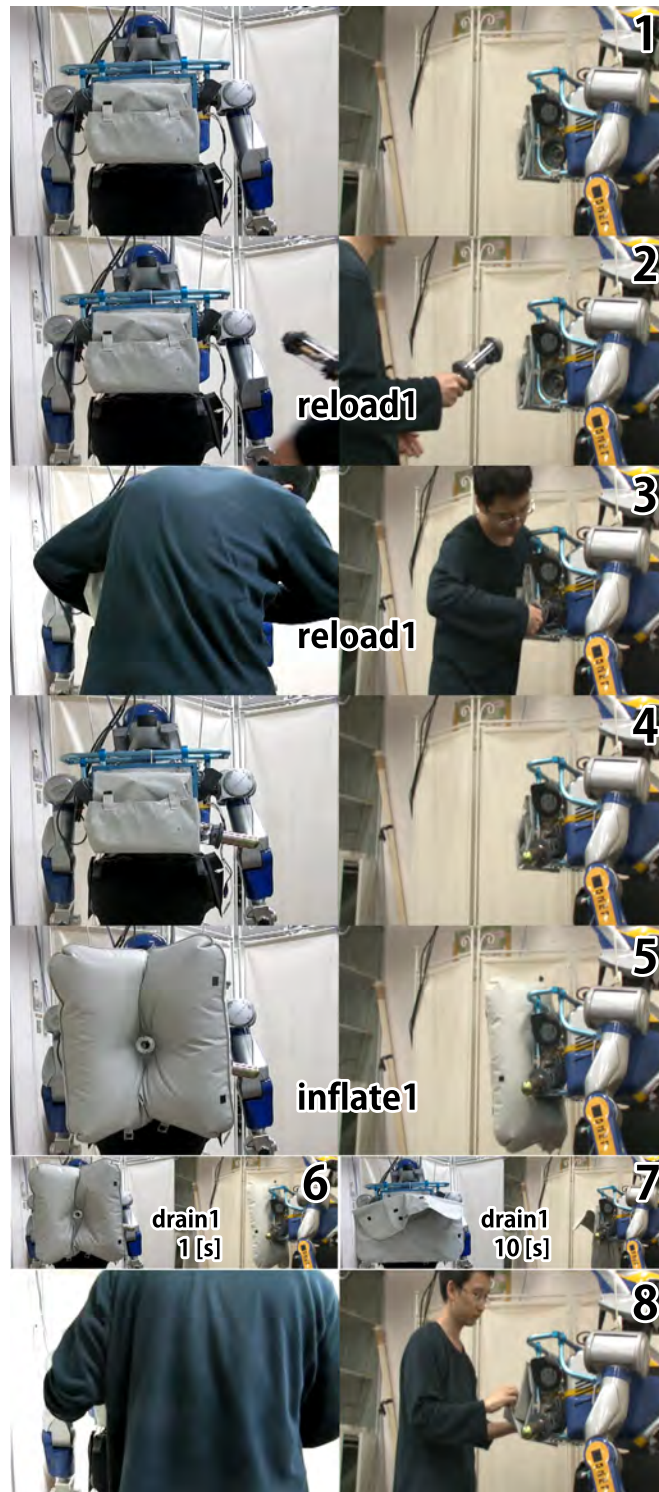


図 6.30: リロード・インフレート・ドレイン動作の繰り返し動作 (1/3)



図 6.31: リロード・インフレート・ドレイン動作の繰り返し動作 (2/3)



図 6.32: リロード・インフレート・ドレイン動作の繰り返し動作 (3/3)

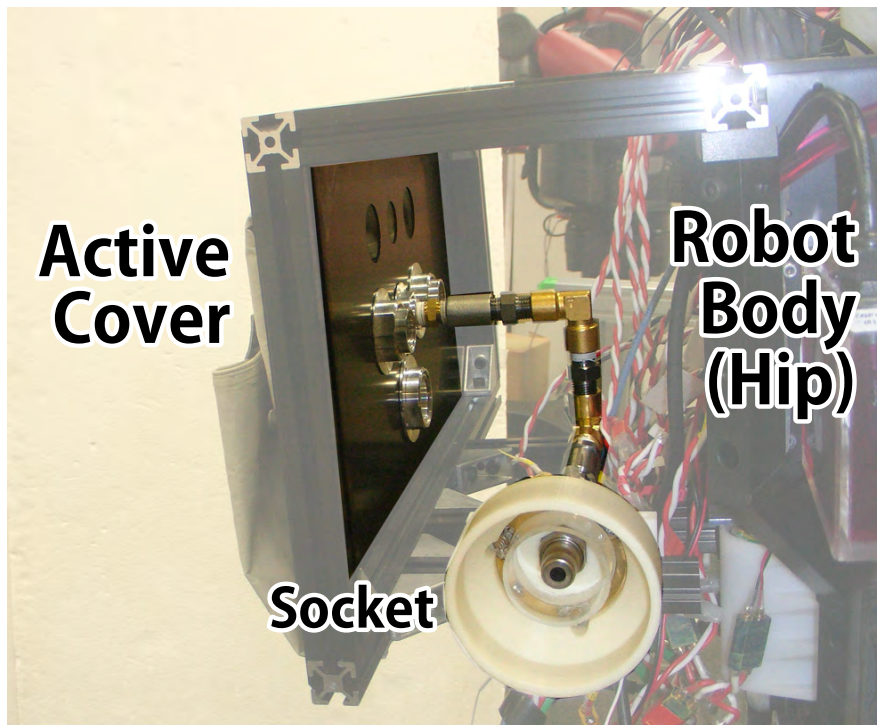


図 6.33: 等身大ヒューマノイドの腰部配管とソケットを右側から見た概観

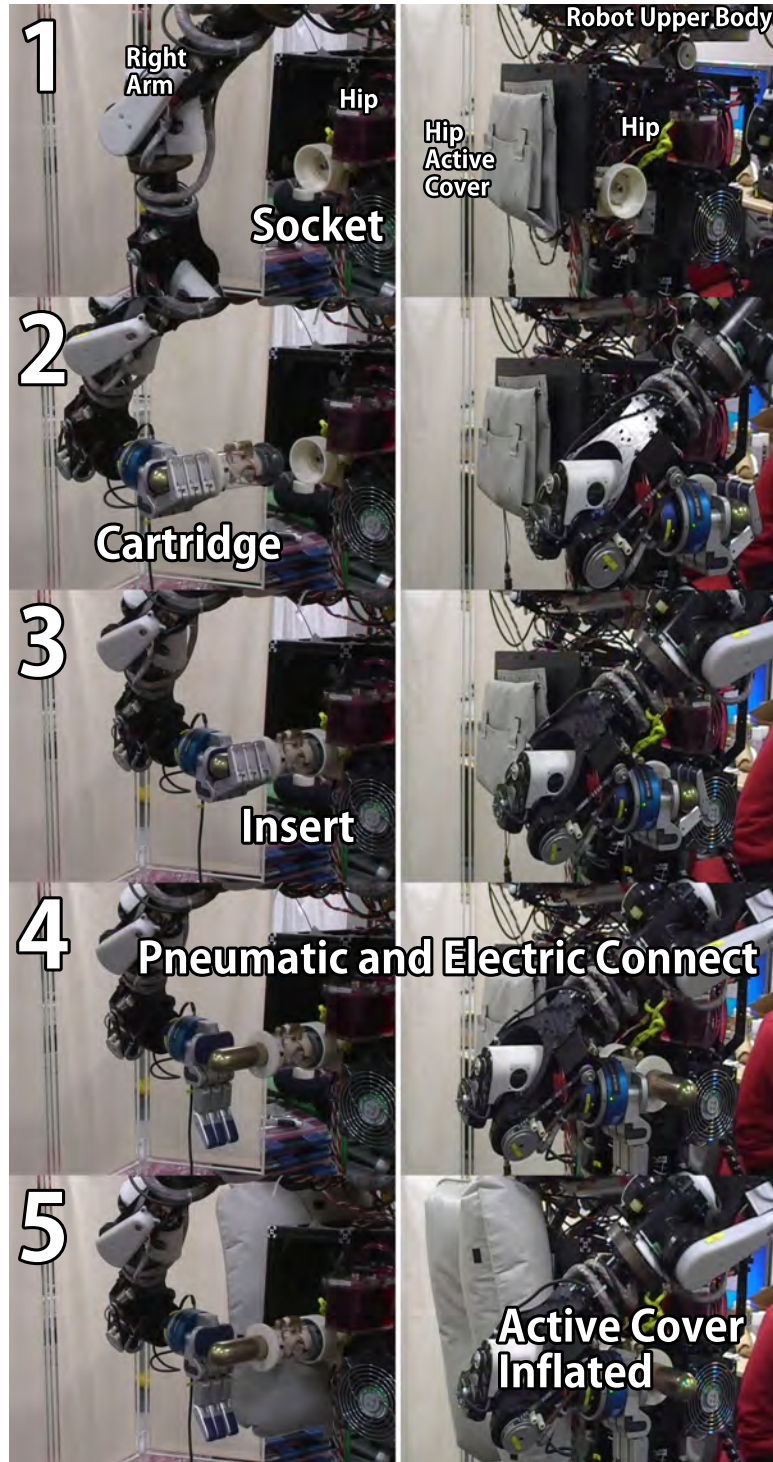


図 6.34: ヒューマノイド自身によるリロード (1/2)

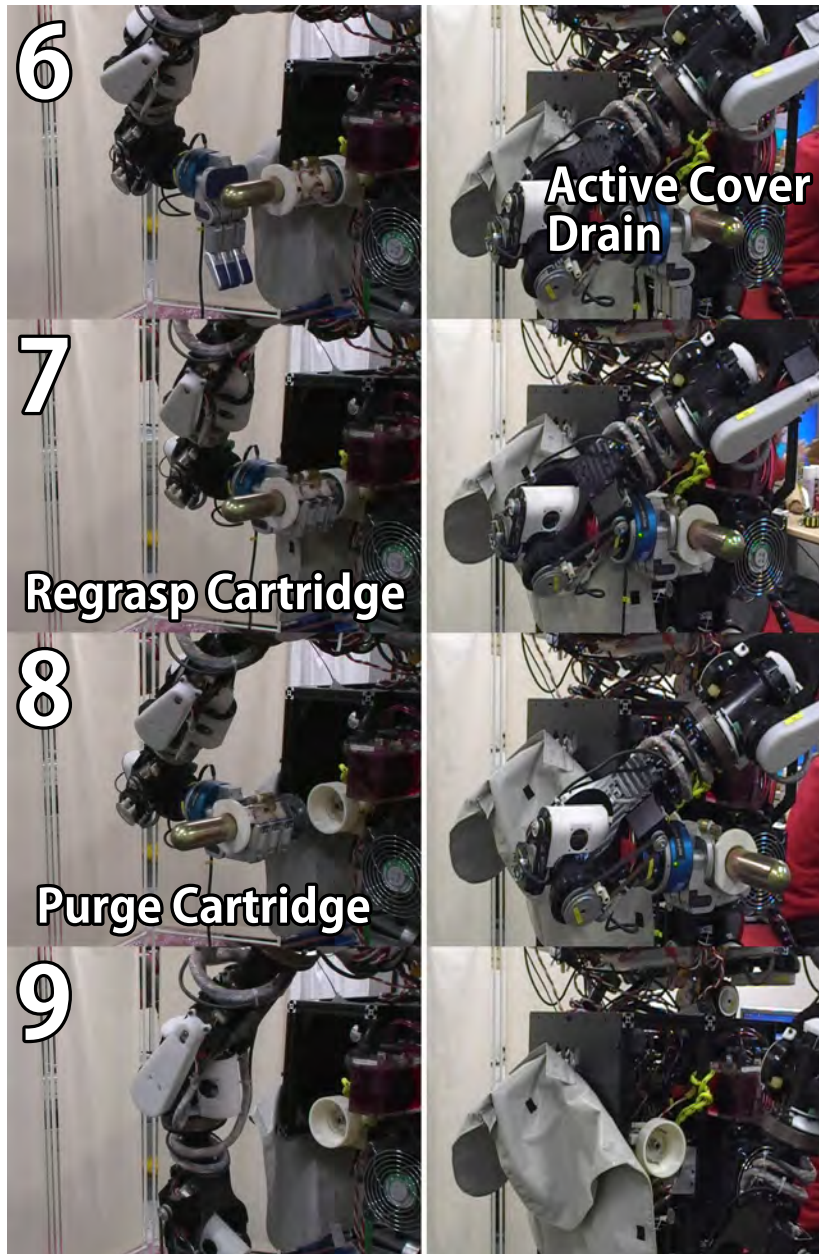


図 6.35: ヒューマノイド自身によるリロード (2/2)



## 6.9 おわりに

本章では、まず転倒衝撃に伴う衝撃加速度を力積の理論式から計算し、衝突時間に反比例してヒューマノイドに印加される転倒衝撃加速度を導出した。またヒューマノイド安定化制御の中で、能動緩衝外装を用いた着地姿勢制御の位置付けを述べた。

その上で、HRP-2及び本研究で開発された等身大二足歩行ヒューマノイドを用いて、

- 直立姿勢からの瞬間的かつ能動緩衝外装の変形
- 転倒方向判定によって能動緩衝外装を利用するための自己保護行動
- 外装充填展開と排出再収縮動作の繰り返し動作実証
- インフレーターカートリッジの交換・再装填動作

を実現した。

転倒実験では、直立姿勢からサーボトルクをオフとすることで膝裏打ち合わせから転落する動作において能動緩衝外装を用いて着地衝撃を緩和し、また外乱転倒実験では能動外装を利用しなかった場合の着地衝撃約60Gに対して能動外装を利用して半分以下に抑えるなど、その有用性、理論値との比較、評価方法について議論した。

ヒューマノイドHRP-2を用いた転倒実験では、転倒中に転倒方向と転倒角度を計測し実際に体幹をひねることで転倒方向に能動緩衝外装を押し出す動作を実現させた。

さらに、ヒューマノイド自身によってインフレーターカートリッジの再装填試験を行い、最低限ものを掴むことのできる簡易なハンドがあれば、繰り返し能動緩衝外装を利用できることを示した。

これらにより瞬間転倒時の能動外装利用による自己保護行動、またカートリッジの排莢・再装填と外装再収縮による回復・復帰行動が実際に示され、実際に瓦礫不整地環境で稼働するヒューマノイドの耐衝撃性の評価方法についても議論した。



## 第7章

### 結論



## 7.1 本論文の概要

本研究では、転倒・回復可能なヒューマノイドアーキテクチャ[16][17]に強く影響を受けつつ、等身大二足歩行ヒューマノイドが自ら身体形状を制御し、能動的な身体変形行動を取り、転倒・転落事故に際しても自己保護行動をなす全く新しいヒューマノイド能動緩衝外装を実現し、外装構造の選定と開発、再装填機構の必要性と設計・開発、排出機構の必要性と設計・開発、外装を利用した自己保護行動論の観点から、その構成法を提案した。

第1章では、ロボットと人間/環境/物体接触問題から、物理的接触、緩衝、柔軟外装の議論から始め、従来の受動的な外装を有するロボットでは実際の転倒による損傷を回避できないという問題を議論し、本研究の目的と構成を述べた。

第2章では、等身大二足歩行ヒューマノイドの様々な損傷回避のために、「転倒しないヒューマノイド」あるいは「転倒しても回復できるヒューマノイド」として不整地歩行軌道生成、環境支持、転倒姿勢制御などの種々の方法論が研究されている中で、従来の多関節ヒューマノイドの自由度空間にとらわれない能動的に形状・容積可変な緩衝外装の位置付けを説いた。また従来の柔軟外装の構成法において、ヒューマノイドの物理的接触特性と汎用行動性を共に満足するための設計選択余地が非常に小さかったことを説き、能動緩衝外装によって等身大ヒューマノイドの汎用性を損なうことなく自律した環境適応が可能となることを議論した。

さらに、提案する能動緩衝外装の背景について様々な先行研究の観点から論じ、全身に分布した能動緩衝外装を利用することで可能となる自己保護行動について議論した。重要な先行研究として「転倒しても回復できる HRP-2」などの既存のヒューマノイドへの実装論と転倒行動アーキテクチャを引用しつつ、能動的な外装を用いて「緊急行動」ではなく従来の「通常行動」と同列に自己保護行動を可能とする新しい等身大ヒューマノイドアーキテクチャについて議論し、本研究でのアプローチについて示した。

第3章では、小型ヒューマノイドから等身大ヒューマノイドに至るまで、様々な方式で開発した能動緩衝外装の設計、実装について検討・議論した。また実際に、任意のヒュー

マノイドが与えられた時，その体幹サイズと着地姿勢許容角から能動緩衝外装の必要サイズを見積もる手法を示した．

ここでは内圧過負荷に際しても破裂しない低通気性素材を用いて製作した能動緩衝外装を用いて等身大ヒューマノイドの転倒試験を行い，実際にその自己保護行動を評価しつつ，能動緩衝外装の開発と検討を繰り返した．また，この能動外装モジュールを平時に小さくまとめて保持しておくための収縮機構について議論した．収縮機構としては様々な機構方式を検討したが，次回充填展開の阻害防止を最優先に考慮し，機械的構造を廃して弾性要素のみで構成された収縮機構を備え，排出時に外装構造を収縮させる動作を示した．

第4章では，まず従来の空圧・油圧ロボットとの能動外装の空圧システムの相違，エアバッグと能動外装システムの相違について述べ，本研究での空圧システムの要求性について述べた．その上で，能動緩衝外装へガスを供給する方法論とそのカートリッジの設計・開発について議論した．市販されている自動車や二輪車運転者，または危険環境で働くためのエアバッグのためのインフレーター(ガス発生器)について触れながら，それらとの性能・要求性の相違について述べ，都度圧縮式から，化学反応式，ストアードガス式までその諸特性を述べ，等身大ヒューマノイド能動外装への充填に最も適した爆破弁インフレーターを選定した．

カートリッジ機構においては，まずヒューマノイドのインフレーター装填方法について論じ，簡易なハンドでも利用可能なカートリッジ化の重要性を説いた．そして実地的環境・開発者が介在しない環境下においてもヒューマノイドが自ら能動緩衝外装を有効に利用するために必須となる，外装用空圧構成とインフレーターカートリッジ再装填機構の設計論と実装について述べた．

またここでは，実地環境で必要とされるヒューマノイド自身によるカートリッジの使用済み/未使用の判定法についても論じた．

第5章では，等身大ヒューマノイド能動緩衝外装に必要となる形状復帰のための外装排出・再収縮動作について述べた．またこれまでにそれぞれ論じた能動緩衝外装，再装填機構と併せて，ヒューマノイドが自ら身体表面形状を瞬間的に膨張変形させ，また元の形状に復帰するため外装制御システムについて述べた．

ここでは、市販の電磁バルブと本研究で必要となる大流量電磁バルブの、気密性・応答性・動作頻度等の要求仕様の相違について触れながら、気密性よりも外装内 30ℓ の排出速度を優先する専用ドレインバルブの設計論について論じ、実際に 10 秒で 30ℓ を完全排出できるよう設計した。また、ドレインファンとして種々のファンを挙げ、それぞれの圧力損失に対する耐性を述べ、能動外装の排出用ドレインファンの設計と選定において、考慮すべき項目について議論し、ファンを採用した。さらに、注入口 / 排出口それぞれの特性的ために内側に装着する注入 / 排出キャップとその有効性、着地大衝撃に対しても外装構造が破裂しないよう自動的に内圧を調整できるような自然排出機構の構想についても議論した。また、カートリッジ装填・外装充填展開・復帰・再装填を複数回連続で行うことのできる能動外装モジュールを等身大ヒューマノイド HRP-2 の背面に構成した。

第6章では、まず転倒衝撃に伴う衝撃加速度を、力積の理論式から計算し、衝突時間に反比例してヒューマノイドに印加される転倒衝撃加速度を導出した。また能動緩衝外装を用いた着地姿勢制御の、ヒューマノイドロボットの安定化制御の中での位置付けを述べた。その上で、HRP-2 及び本研究で開発された等身大二脚ヒューマノイドを用いて、自己保護行動に関する実験を取り扱った。

転落実験では、二脚ヒューマノイドの直立姿勢から各関節のサーボトルクをオフとすることで膝裏打ち合わせから転落する動作において能動外装を用いて着地衝撃を緩和し、安全な着地動作を実現した。

また外乱転倒実験では、体前面への外乱荷重に対して後方へ転倒する動作を示し、能動緩衝外装を利用しなかった場合の着地衝撃加速度 60G に対して瞬間的な外装充填展開を利用して 30G 以下に抑えるなど、その有用性、理論値との比較、評価方法について議論した。

ヒューマノイド HRP-2 を用いた転倒実験では、転倒中に転倒方向と転倒角度を計測し、実際に体幹をひねることで転倒方向に背面能動緩衝外装を押し出す自己保護行動の実現性の評価を行った。

また HRP-2 の背面能動緩衝外装モジュールを用いて、(1) インフレータカートリッジ装填 (2) 能動緩衝外装充填展開 (3) 形状復帰収縮 (4) カートリッジ排莢・交換の試験を示し、能動緩衝外装モジュールが繰り返し利用可能であることを示した。

さらに、本外装と空圧配管を有する等身大ヒューマノイド自身によってインフレータ

カートリッジの再装填試験を行った。ここではものを掴むことのできる簡易なハンドを用いて、押し込みと引っ張りだけで空圧的また電氣的に接続可能なカートリッジ機構によって容易な交換が可能となり、ヒューマノイド自身が繰り返し能動緩衝外装を利用できることを示した。

これらの検証により瞬間転倒時の能動外装利用による自己保護行動、またカートリッジの排莢・再装填と外装再収縮による回復・復帰行動が実証された。また実際に瓦礫不整地環境で稼働するヒューマノイドの耐衝撃性の評価方法についても議論した。

また、付録 A では電磁バルブ・爆破弁インフレーター制御基板の仕様、付録 B では小型ヒューマノイド NAO を用いた転倒実験の詳細について述べる。ここでは NAO の後方転倒衝撃 14G を、背面部及び臀部の能動外装を用いて半分に抑え、まず小型ヒューマノイドで能動緩衝外装の有用性を示した。また前腕・上腕部、胸部の能動外装合計 6 モジュールを用いて、内部圧力を各々センシングしつつ、目標圧力に対して充填/排出を繰り返すことで能動外装の膨張のみで書籍を把持するという、能動的かつ積極的な物体把持を実現した。

## 7.2 結論

本研究では、等身大ヒューマノイドの抱える大きな問題点として、転倒による身体の損傷を挙げ、「非転倒性」のために様々な手法が研究されている中で、「転倒対応」に着目した。すなわち、実際の瓦礫不整地環境などでのヒューマノイド転倒を避けられないものとして捉え、従来の通常行動と同様に転倒・自己保護行動を選択可能とするヒューマノイドを実現した。そして再装填機構と排出機構を備えた能動的に形状・容積可変な緩衝外装を提案し、それら自己身体を利用する自己保護行動を実証し、その有用性を議論した。

本研究では、一般のヒューマノイドに対して、その体幹の形状と転倒時姿勢の許容角度から能動緩衝外装のサイズを設計する設計論を提案した。また再装填機構、排出・再収縮機構に関しても、常に転倒が起こりうる環境下において自己身体を保護しつつ活動できるヒューマノイドのために満たすべき条件を挙げ、それらの設計論を論じることで、クレーンに保証された「非転倒性」から脱却し実地不整地環境での転倒行動と自己保護行動を可能とする等身大ヒューマノイドの構成法を提案した。さらに複数のヒューマノ



イド実機に能動緩衝外装を装着させ、転倒・転落実験を行い、その衝撃緩衝の有効性と自己保護行動の具体的利用法を示した。

具体的成果は以下の通りである。

(A) 直立姿勢からのサーボオフ実験では、転落に際して膝裏打ち合わせから着地に至るまでに能動外装を充填膨張させ、その動作速度を示すとともに、着地衝撃を抑える有効性を確認した。外乱に伴う体幹大転倒実験では、能動外装を利用しなかった場合の着地衝撃約 60G に対して能動外装を利用して半減以下に抑え、その有用性、理論値との比較、評価方法について議論した。

(B) 緩衝緩衝外装を利用した転倒時自己保護行動実験では、外乱荷重に対して転倒方向を計測し、転倒中に体幹を「ひねる」ことによって背面の能動緩衝外装を用いて着地する動作 [14][15] を能動緩衝外装とそれを有する HRP-2 によって実現させた。現在まで、外乱に対して ZMP/重心軌道制御によってその非転倒性を高めてきたヒューマノイドに新たに与えられる自己保護行動の選択肢として、能動緩衝外装展開を利用した着地衝撃を吸収する自己保護行動の実例がこの実験により示された。

(C) 瓦礫不整地環境にて自律的に活動できる能動緩衝外装ヒューマノイドの必須動作として、ヒューマノイド自身による外装空圧源 (インフレーターカートリッジ) の再装填動作を実現させた。これによって、瓦礫不整地において、ハードウェアトラブル監視の観点から人間の援助を受けることなく、自律的に自己保護行動を絡めながら実地稼働可能なヒューマノイドの可能性を示した。

本研究は、第3章での外装構造、第4章の再装填機構、第5章の排出機構を利用することによって、従来必須であった安全吊り具 (クレーン) の庇護から等身大ヒューマノイドを解放する構成法の提案である。本研究で実現されたヒューマノイドは、転倒行動時にのみ高圧インフレーターにより一瞬で動作する巨大緩衝外装を持ち、「緊急行動」ではなく従来の「通常行動」と同列に安全転倒行動をとることが可能となった。これはいわゆる「エアバッグ」のような緊急用・一回性のものではなく、ヒューマノイド自身がカートリッジを交換・再装填し、外装構造の再収縮を可能とするものであるから、従って自身の能動的な外装構造を環境や必要性に応じて変形させつつ、身体を安全に保持し、人間の介助無しに実地で活躍できる新しいヒューマノイドの構成法とその応用可能性を示した。

### 7.3 今後の展望

本研究では大衝撃への瞬間的対応の為に大容量能動外装を用いたが、その他にも手先・膝などの部位に小規模な能動変形柔軟モジュールを取り付け、それらを使いこなすことでヒューマノイドの環境適応はさらに深化する。そのような手を軽くついて転倒回避する条件下、あるいは定常的・継続的に与えられる荷重への対応には、低圧・低容量のインフレーターによって手先小規模能動外装に適宜充填を行うことも有用となってくる。全身に能動外装分布を有することで、ヒューマノイドに与えられる転倒衝撃回避行動と自己保護行動の選択肢は飛躍的に向上するだろう。

- 全身能動外装の部分的利用とその選択行動。狭所環境での二次的転倒・転落を防ぐため、転倒時にも全身の能動外装を一度に利用するのではなく、転倒衝撃を最小限に防ぐ環境支持のような、効率的かつ局所的な能動外装モジュールの利用を模索する。
- 転倒衝撃緩衝動作のみならず、積極的物体把持/主体的環境接触への能動外装の利用。例えばハンドなどの、ヒューマノイド・物体/環境接触面の形状、粘弾性度、摩擦係数を操作し、物体/環境に応じた身体表面を能動的に実現する。
- 能動外装に充填展開した後、着地衝撃の瞬間の外装内圧力の制御と模索。着地衝撃の瞬間(第6章では、 $\sim 0.05$ 秒)に外装内自然排出を可能とすることで、着地に際してその衝撃時間を延ばし、最大衝撃加速度を抑える手法を模索する。
- ヒューマノイドの外装構造・骨格構造・関節構造の損傷状態を推定し、人間による常時メンテナンスから脱却できるヒューマノイドを構成する。

また小型ヒューマノイドで実現してきた関節脱臼機構 [26] などは、ロボットスケールに応じて考慮されるべきもので、等身大ヒューマノイドの場合、撃力に際して全身関節が転落することは好ましくない。等身大ヒューマノイドの関節保護構造においては、それは粘性・弾性要素が最適となるだろう。

外乱衝撃に対するヒューマノイドの転倒・大荷重環境接触は多岐に渡る。全方向に対して、一瞬の衝撃荷重の転倒もあれば、一定時間の間外乱に耐えるべき状況も想定され

る．状況に依存し，身の回りの物にしがみつくと自己身体の能動変形を利用して単独で衝撃を緩和する，膝裏の打ち合わせを緩和して膝関節の破損を防ぐなどの状況に応じた選択肢がヒューマノイドに与えられるべきである．現在，ヒューマノイドの非転倒性はフットステップや不整地歩行制御によって実現されているが，ここに自ら変形する能動的な外装の自由度を新しく与えることで，従来多関節ロボットの自由度空間で規定・議論されてきた環境適応論や制御論の分野も大きく拓かれると考えられる．



## 謝辭



本論文は筆者が東京大学大学院 情報理工学系研究科知能機械情報学専攻に 2011 年度～2013 年度在学中、情報システム工学研究室 (JSK) において稲葉雅幸 教授，岡田慧 准教授，吉海智晃 特任講師<sup>1</sup>，中西雄飛 助教<sup>2</sup>，矢口裕明 特任助教，浦田順一 特任助教<sup>3</sup>，垣内洋平 助教，野沢峻一 助教のご指導のもとで行なった研究をまとめたものです。

稲葉先生には、研究方針から論文のまとめ方、発表の練習、また本博士論文は元より、修士論文、卒業論文、また学術振興会特別研究員制度 (DC1) への申請書の書き方に至るまで、研究に関するあらゆる事項について幅広く、密に、そして厳しく相談に乗って頂きました。ご多忙の中、毎週の研究会・輪講あるいは個別での面談により研究過程の確認をして頂き、時には休日にもご指導のための時間を取って頂いたこともありました。その都度的確なアドバイスを頂くことができこそ、この博士研究があります。感謝の念にたえません。

岡田先生には、ヒューマノイドの現場からのありがたいアドバイスを何度も頂きました。また、HRP-2 を用いた実験においても、夜遅くまで懇切丁寧にご指導頂きました。小さな研究にならないよう、常にマクロな視点からの議論の仕方について不勉強な筆者に懇切丁寧にご教示頂きました。

柔軟外装グループのリーダーである吉海先生には、「肉」研究に初めて足を踏み入れ、かつ JSK の環境についても不勉強な筆者に基礎から丁寧に何もかもをご教示頂きました。厚肉外装の設計の仕方や基板設計、RT ミドルウェアの使い方など、修士研究からそれを発展させた小型ヒューマノイド NAO を用いた能動緩衝外装の開発と検証 (博士 1 年) の実装面においては吉海先生にお世話にならなかった事柄は無いといって過言ではありません。

中西先生には、研究室に入ったばかりの 4 年生の時からずっと、研究の在り方、研究に望む姿勢、技術的な面では Nervous の使い方、Eus モデルや逆運動学の解き方など実に幅広く学ばせて頂きました。筆者にとって初めての「博士 3 年の先輩」として、この博士研究に至るまで数々の悩み相談にも真摯に乗って下さり、どれ程貴重なご意見を頂き、救われたか分かりません。また研究外の休憩時、大学の近くの定食屋で研究室仲間と夕食を頂く時にも、楽しくお話することができました。

---

<sup>1</sup>2011 年度をもってご退職

<sup>2</sup>2013 年 11 月をもってご退職

<sup>3</sup>2013 年 11 月をもってご退職

矢口先生のご指導は大変手厳しいものですが、いつも研究テーマに揺れる筆者に対し的確なアドバイスをいつも賜りました。また矢口先生も、筆者の初めての「博士3年生」として、ご自身の時のご経験からなされる実際的アドバイスも大変沢山頂きました。

浦田先生には、先生が博士課程学生でいらっしゃった頃から基板、電装系について全くの初心者であった筆者に対し多大な講義を頂き、また等身大二脚ヒューマノイドの開発において先生のリーダーシップの元、開発メンバーの一員としてCAD設計の初歩からご指導頂きました。本研究で使用している等身大ヒューマノイドの制御・運用に関しては、その全てが浦田先生の革新的技術で成り立っており、感謝の念に耐えません。

それぞれ2012・2013年度から教職にお就きになった垣内先生、野沢先生、HRP-2の動かし方に関して不勉強に過ぎる筆者に対し、その実験の為多大なご支援を頂きました。また実験以外でも、博士論文のまとめ方、テーマの広げ方・絞り方など、博士研究全般に渡って議論させて頂き、大変貴重なご教授を沢山頂きました。

山口技官には、ハードウェア設計の都合上業者への発注が多い本研究に際し、多くの事務処理をお願い致しました。不注意にも経理処理締め切りを過ぎたことも多々あり、その都度ご迷惑をおかけしてしまいました。深く感謝する共に、ここに改めて、お詫び申し上げます。

小型ヒューマノイドグループの皆様へ。同期の後藤君、後輩の秋元君、辻君、Youssef君にも感謝します。修士論文の追い込み時期には、一緒に実験を手伝ったり、あるいは手伝ってもらったりの毎日でした。グループの資産である、柔軟外装を有する小型ロボットに転倒・転落動作をさせてばかりで、不注意にも破損させてしまうこともあり、グループには少なくない損害を出してしまい、申し訳ありませんでした。後藤君、秋元君は修士課程を卒業した後就職なさっていますが、かつて彼らと一緒に取り組んだ数多くの実験、議論、チームワークが、本研究での能動外装の全ての基礎となったことは言うまでもありません。

柔軟外装グループの先輩である林さんにも特別の感謝を捧げます。林さんの素晴らしい研究を引き継ぐにはまだまだ未熟でしたが、新しい外装ロボットのあり方や、DC1の申請書・面接に関して親身になって相談に乗って頂き、頭の下がる思いで一杯です。同じく卒業生でいらっしゃる福島さんには、本研究中や修士課程での追い込み時期にも毎日夕食で楽しく話し合うことができました。



73B1 室の皆様へ。筆者が研究室に入った頃には学生でいらっしやっただ中西先生、浦田先生は元より、太田さん、同期の伊東君、小林巧実君、後輩の伊沢君、白井君、長田君、溝口君、伊藤君、上月君、浅野君、梯さん、黒飛さん、茂木君、中岡君にも大変お世話になりました。今ではご卒業なされたり、研究部屋を移動してしまった方も多くいらっしますが、実際に各々独創的なものづくりで成果を挙げ続けていらっしやる 73B1 室メンバーの皆様との議論は大変貴重で、そこから大きなヒントを頂いたことも数えきれません。大変個性的な方々ばかりなので、趣味面でも激しく意見をぶつけ合い、研究以外の話題でも楽しく話し合うことができました。

特に伊藤君、中岡君は、浦田先生率いる JSK の技術の粋を結集させた等身大ヒューマノイド開発グループのメンバーとして、暗中模索しながらも、一からヒューマノイドを設計・開発・組立を行う楽しさと苦しさを分かち合った仲間だと思っています。その上で、二脚ヒューマノイドの押し倒し転倒試験では基板類に損害を与え、学会発表の締め切り前にご迷惑をかけてしまったこと、改めてお詫び申し上げます。

また小島(邦)君には、HRP-2 ひねり転倒実験に際して 2 週間以上も手伝ってもらいました。能動緩衝外装ヒューマノイドの実現に当たって欠くべからざる実験でした。ありがとうございました。

同期として最後までお互いの博士研究を励ましあった長濱君。同期に長濱君がいてくれてよかった。一人だったらプレッシャーに耐え抜けたかどうか分かりません。

その他の研究グループの皆様。博士研究のテーマの在り方について、凝り固まった筆者の頭をしばしば客観的かつ画期的なアドバイスにより導いて頂いたことは数え切れません。

何度も直接ご足労頂き、ヒューマノイド用外装の試作・外注開発をお願いした株式会社プロップの内田様・市村様にも特別の謝意を。外装の試作に留まらず、インフレーター的大量発注交渉など、多大にご迷惑おかけしましたが、その都度ご丁寧に相談に乗って頂きました。本来、排出口や、短時間での繰り返し使用を考慮していない御社の製品について、本論文の「能動緩衝外装の再装填・復帰」のために度重なる設計要求、設計変更にも対応して頂きました。感謝の念にたえません。

最後に、遠く離れた実家から支えてくれ、また不規則な生活を送る筆者に多くの仕送りをもたらした家族に、心からの感謝を示します。家族の支えあつての研究生活でした。博士研究中は体調が優れず、いつも心配をかけていました。論文をまとめ終わったら、研

究にまつわる数多くの話をお土産として、帰省するつもりです。また、博士3年の夏に他界した祖母にも格別の感謝を。墓前にこの博士論文を持って報告に参ります。

数多くの方々の支えがあって、この論文を完成させることができました。本当にまだまだ未熟者な筆者ではございましたが、皆様から頂けた心優しいご指導・ご鞭撻に深く感謝いたします。ありがとうございました。

本研究は日本学術振興会特別研究員制度の助成を受け実現されました。

2014年2月4日 小林 一也

## 付 録 A

# 電磁バルブ及び爆破弁インフレータ制御基板 の設計



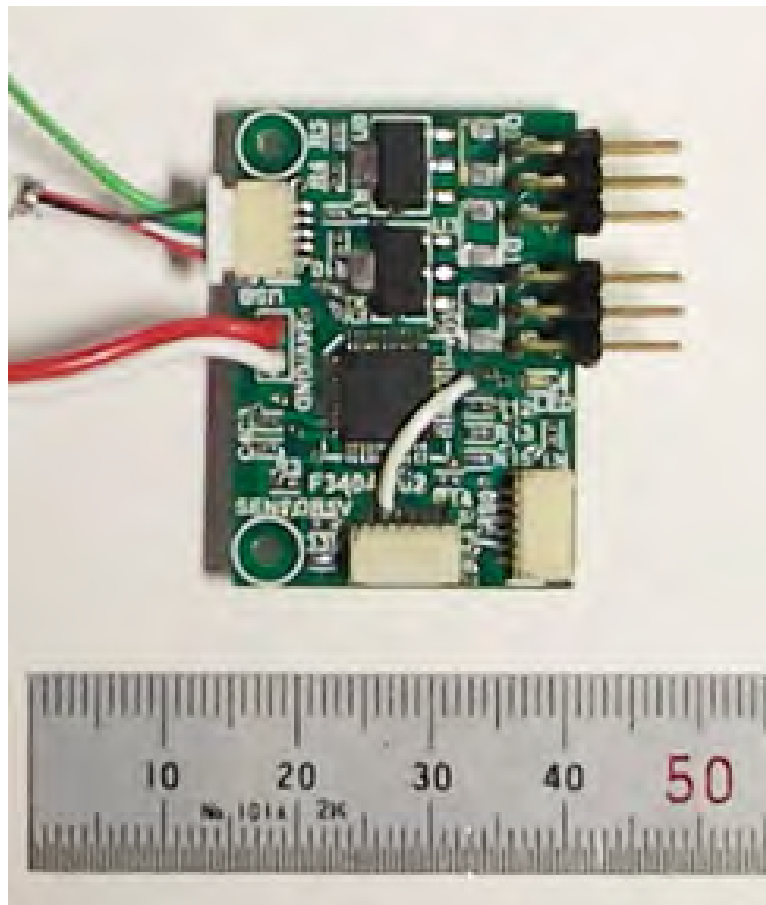


図 A.1: 小型ヒューマノイド NAO の能動緩衝外装のための制御基板 . (著者論文 [41] より引用)

## A.1 はじめに

本章では, 第 3 章, 付録 B において用いる, 電磁バルブ制御及び外装内圧センサ基板について述べる (著者論文 [41] にて一部発表済み) . またこの基板は第 6 章での等身大ヒューマノイドにおける爆破弁インフレータへの着火にも用いている .

## A.2 気圧計測, 電磁バルブ制御基板の概観

図 A.1 に本基板の概観, 図 A.2 にそのスキマティックを示す . この基板は裏表の 2 層からなり, 銅箔  $70 \mu\text{m}$  仕様, パワー MOSFET へのパワー線幅  $100\text{mil}(=2.54\text{mm})$  とし

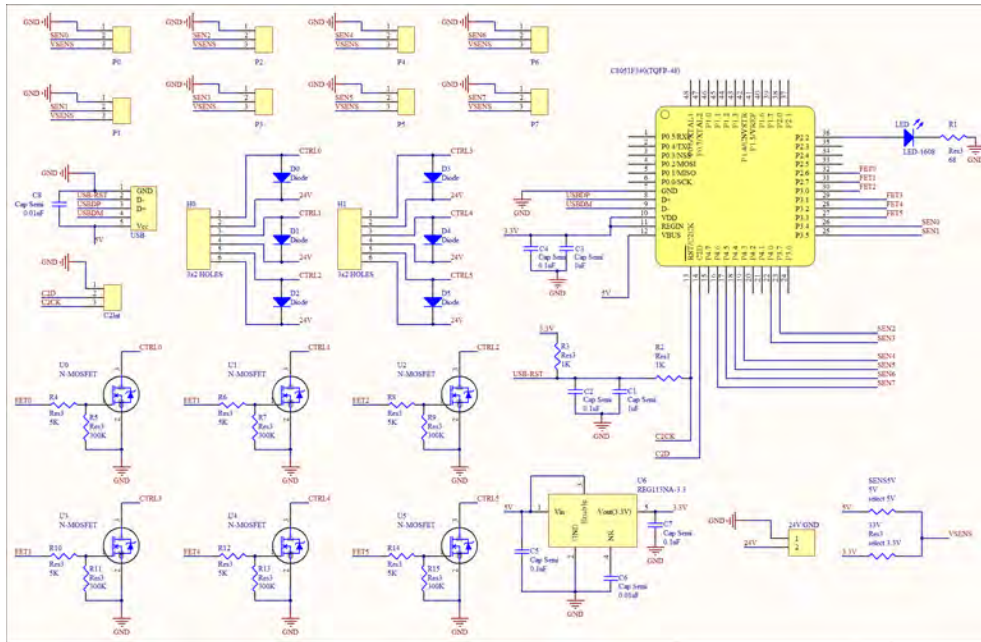


図 A.2: 気圧計測・電磁バルブ制御基板のスキマティック

である(図 A.3 , 図 A.4) . これは本研究で使用した電磁弁が, 最大で消費電流 0.5A 程度まで達するからである. 本基板は電磁バルブを 6 ポート制御できるため, パワー線幅は  $1.5\text{mm}^1$  以上必要と判断した.

高性能なモータドライバ基板としては FET のスペックが不足しているが, 第 3 章で述べた高圧ガスポンペ(インフレータ)の着火にも使用でき, 実際に NAO・等身大ヒューマノイドでの両実験においてこれを使用した.

### A.3 気圧計測, 電磁バルブ制御基板の通信

本基板は Linux カーネルが与える libusb ライブラリを用いてホスト PC と USB 通信を行う. パケットフォーマットはシンプルで, 送信は最大 6 ポートの電磁バルブあるいは爆破弁インフレータへのパワー ON/OFF 等のコマンド, 受信は最大 8 ポートの気圧センサの値である. 気圧センサの値は NAO による実験にて扱っている.

<sup>1</sup>銅箔厚  $35\ \mu\text{m}$  の場合, 線幅  $1\text{mm}$  で  $1\text{A}$  程度が設計のスタンダードとされる. 銅箔  $70\ \mu\text{m}$  ならばそのほぼ倍と考えてよい.

### A.3.1 OutPacket : 送信フォーマット

0	1	2	3	4	5	6	7	...	24	25	26	27	28	...	63
*	ID	*	BNm	P0	W0	X0	Y0	...	P5	W5	X5	Y5	*	...	*

**ID** USB ID

**BNm** Board Name

**Pn** Power n; ON(1) or OFF(0) of Power Port (n=0 ... 5)

**Wn** Pulse Wide (0-127)

**Xn** Reserved parameter

**Yn** Reserved parameter

\* don't care

### A.3.2 InPacket : 受信フォーマット

0	1	2	3	4	5	...	18	19			
*	ID	*	BNm	AD0-H	AD0-L	...	AD7-H	AD7-L			
20	21	22	23	...	40	41	42	43	44	...	63
RP0	RW0	RX0	RY0	...	RP5	RW5	RX5	RY5	*	...	*

**ADn-H** Sensor value n (high 8bit) (n=0 ... 7)

**ADn-L** Sensor value n (low 8bit)

**RPn** Check power

**RWn** Check pulse-Wide (0-127)

**RXn** Check reserved parameter

**RYn** Check reserved parameter

\* don't care

本基板のマイコン C8051F34X の A/D コンバータ 10bit であることから，

$$\text{Output(V)} = \frac{AD\_value \times V_{\text{ref}}}{1024} \quad (\text{A.1})$$

第 3 章及び付録 B で用いた気圧センサ Honeywell 社製 HSCMANN100PG は，増幅アナログ出力であり，出力値は

$$\text{Output(V)} = \frac{0.8 \times V_{\text{ref}} \times P}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} + 0.10 \times V_{\text{ref}} \quad (\text{A.2})$$

ここで，P は求める気圧である．最大・最小測定気圧  $P_{\text{max}} = 100[\text{psi}]$ ， $P_{\text{min}} = 0[\text{psi}]$  であることから，式 A.1 式 A.2 より

$$P = \left( \frac{AD\_value}{1024} - 0.1 \right) \times \frac{100}{0.8} \quad (\text{A.3})$$

実際にはゲージ圧かつ psi 単位系で出力されるので，この値を工学気圧に変換し，大気圧を加算した値が測定気圧となる．

#### A.4 おわりに

本章では，第 3 章，第 6 章，付録 B において用いる，電磁バルブ制御及び外装内圧センサ基板について述べた．



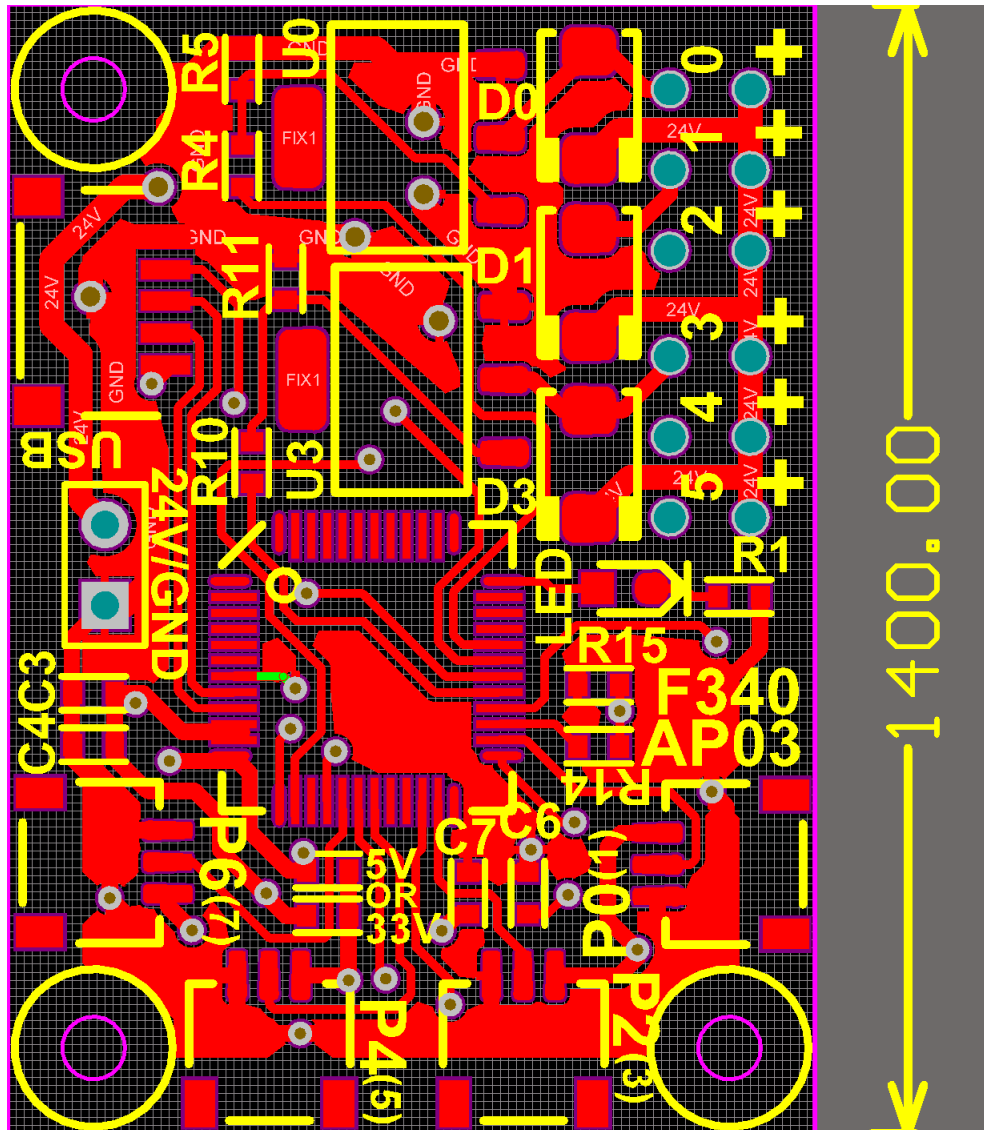


図 A.3: 気圧計測・電磁バルブ制御基板の表面パターン

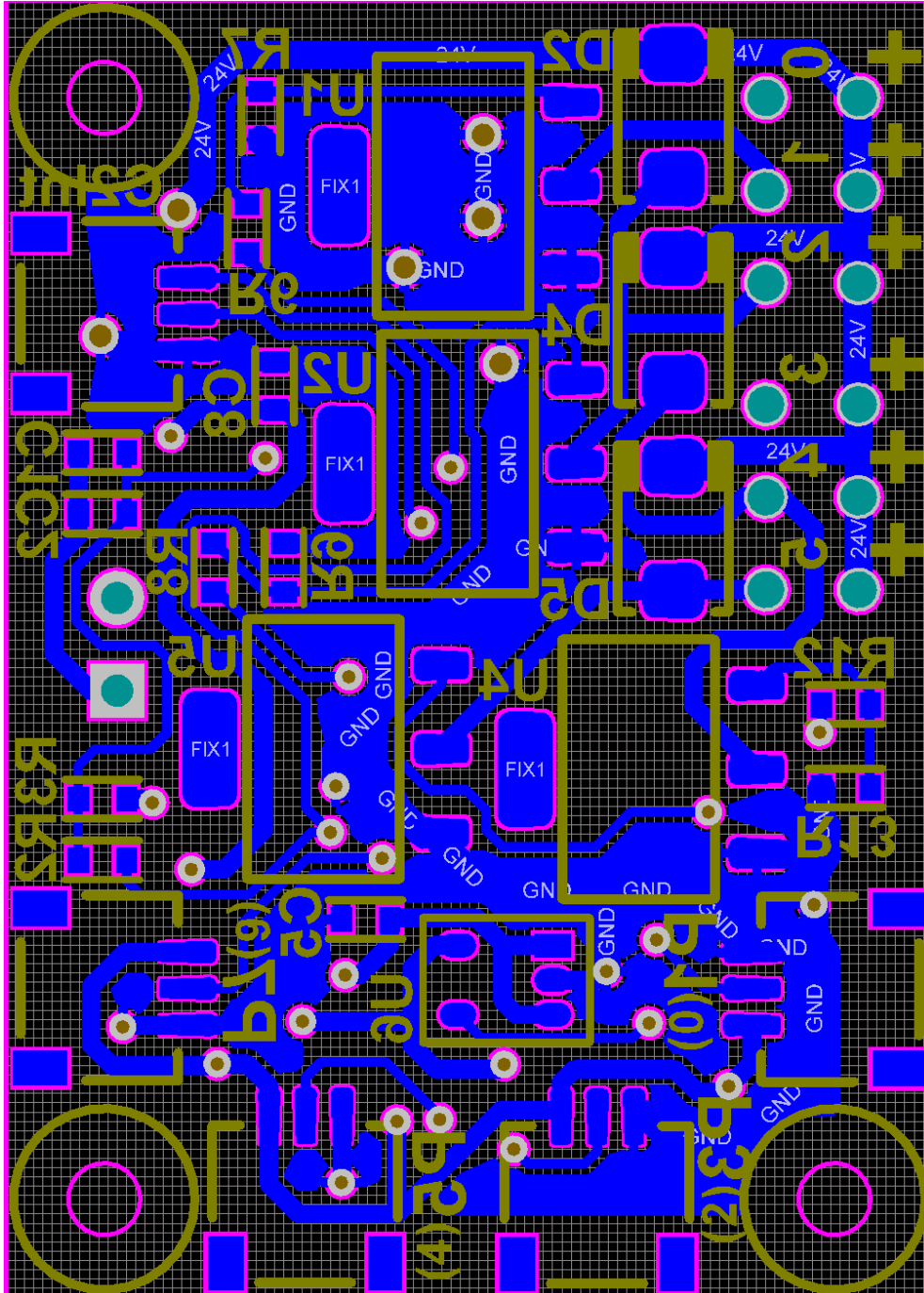


図 A.4: 気圧計測・電磁バルブ制御基板の裏面パターン

## 付 録 B

### 能動緩衝外装を持つヒューマノイドNAOの 転倒時自己保護行動



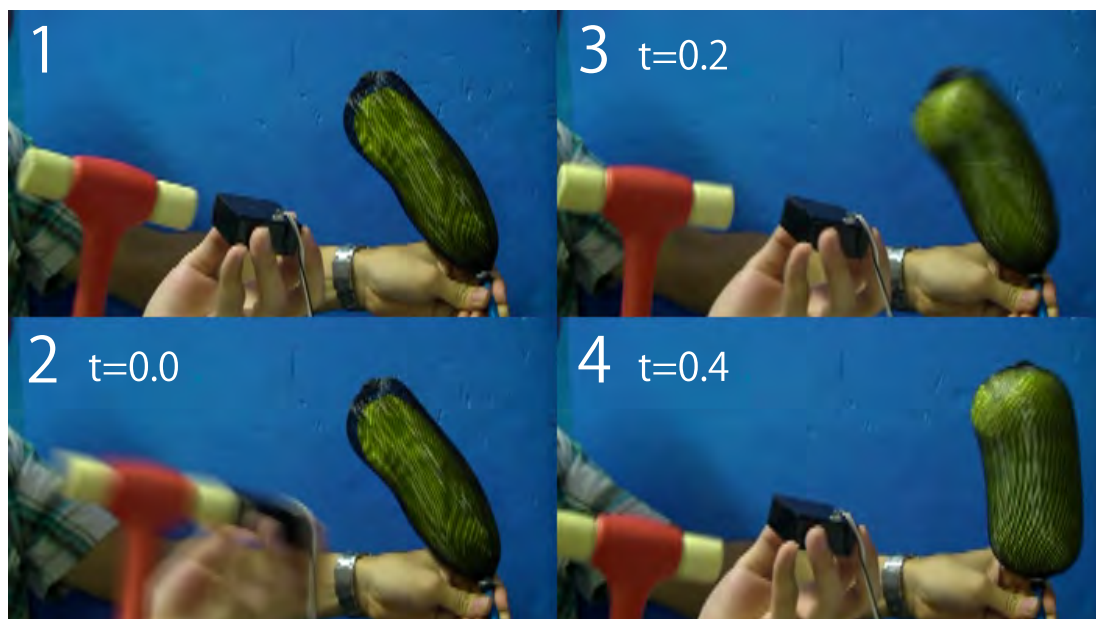


図 B.1: 外装の模式構造；ゴム素材を繊維性スリーブで包含した試験機。

## B.1 はじめに

本章では、第 3 章にて開発した、小型ヒューマノイド NAO のための能動緩衝外装、及びそれを用いた転倒時自己保護動作の詳細、また腕部と胸部の能動緩衝外装を用いた適応的物体把持について詳細に述べる（本章の内容及び図表の一部は、著者論文 [41] にて発表済み）。

## B.2 NAO の転倒時自己保護：柔軟素材 + 形状制限外装

まず、「柔軟素材 + 形状制限構造」による外装（第 3 章と共通）、能動緩衝外装本体をゴムのように柔軟な素材で構成し、膨張時の形状を制限する構造を考案した。これは McKibben 型アクチュエータと同様、繊維状のスリーブにより最大形を決定するものである（図 B.1）。この試験機は手前の加速度センサへの衝撃により加圧を行っている。

この最小構成試験外装を小型ヒューマノイド NAO の臀部に装着させ（図 B.2）、後方転倒試験を行った。

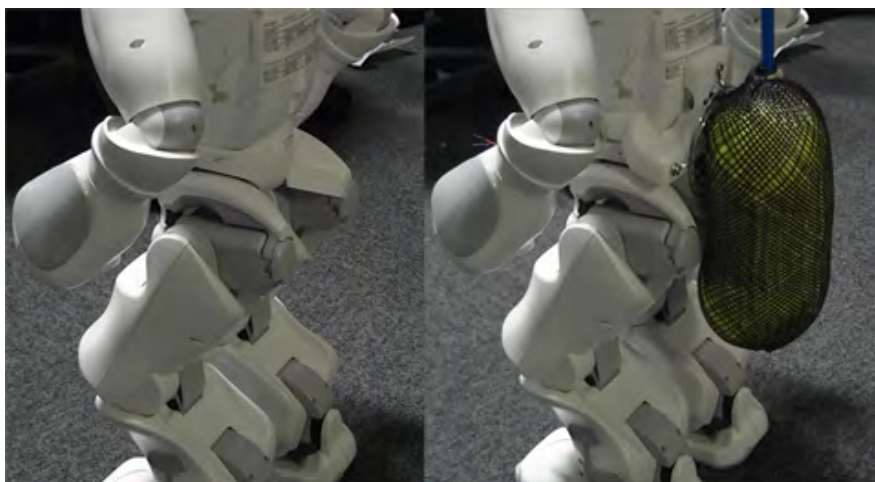


図 B.2: ゴム素材を繊維性スリーブで包含した NAO 臀部能動外装 (著者論文 [41] より引用)

検証実験の準備として、空圧システム、電磁バルブの制御、所要時間については図 3.2、表 3.1、表 3.2 にそれぞれ示した。

電磁弁として株式会社コガネイ社製直動バルブ (A: G010HE1, B: 230E1, C: K2-100HF-04, 図 3.2 内のバルブ記号に対応) を選定した。バルブ A, B は 3 ポート弁、バルブ C のみ 2 ポート弁である。中継タンク容量は 3.5ℓ であり最大耐圧力 10 気圧、試作した外装の容量は最大 0.5ℓ 程度と設定した。コンプレッサとしてはスキューズ株式会社製「MP-2-C」を用いた。最大圧縮圧力は 4 気圧であり、このコンプレッサを用いて中継タンクに加圧しておくものとする。表 3.1 に本稿の実験で用いる電磁バルブの各操作を示した。また、表 3.2 に本試験において重要な所要時間を示した。注入動作中、容積が十分でない中継タンク内の圧力も大きく変動するため注入時間の計算は困難であるが、実証的に確認された注入時間はおよそ 250ms であった。より太いチューブや大きな中継タンクの採用により外装準備時間の短縮が期待できるが、過大なチューブの転倒運動への影響の他、NAO 後方転倒に間に合うように外装充填展開可能であったことから、本試験では十分と判断する。

電磁バルブ制御と外装内圧計測のため、付録 A に示した制御基板を設計・開発した。気圧センサとしては、Honeywell 社製 HSCMANN100PG を用いた。センサ出力はアナログであり、上述のマイコン基板を用いて計測する。

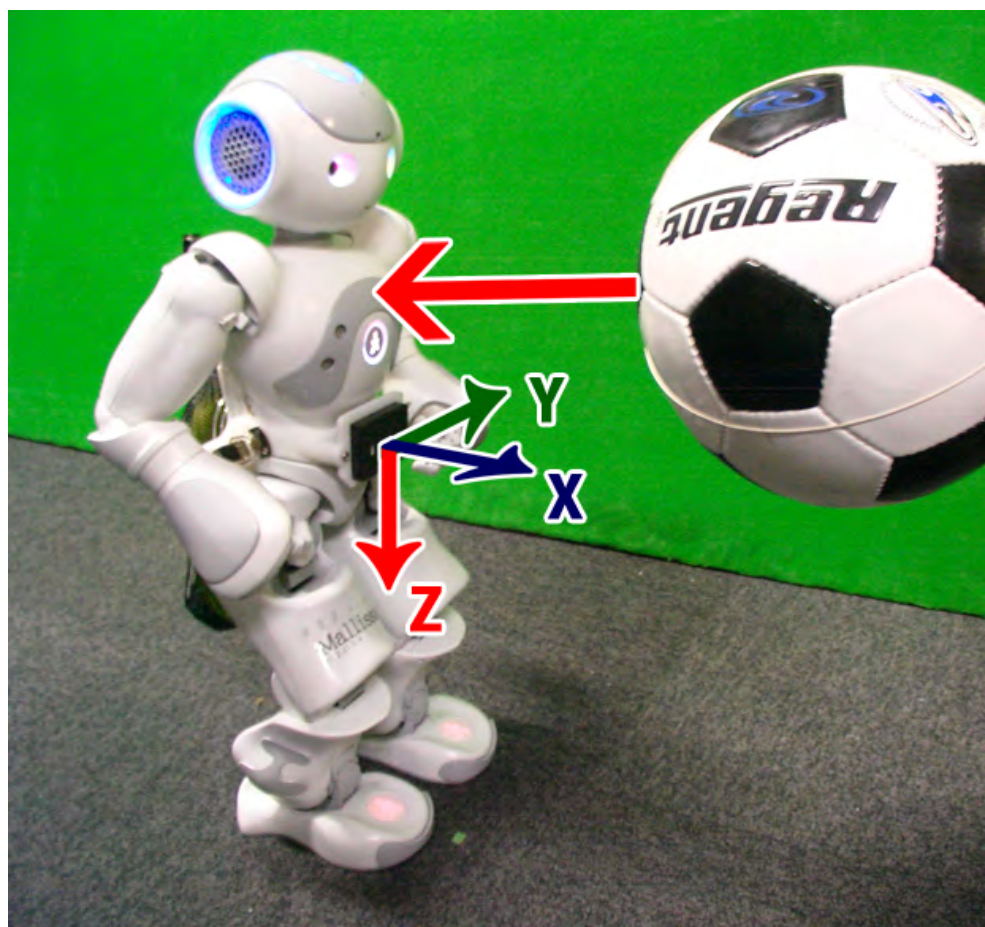


図 B.3: NAO 転倒のための撃力付加位置 (著者論文 [41] より引用)

加速度の計測については Logical Product 社製「9 軸ワイヤレスモーションセンサー」(本章, 以下同様) を用いた。計測周期は 500Hz で得られる。本加速度センサは NAO 前面腰部に取り付け, NAO 前面方向に X 軸, 直立姿勢時に鉛直下向きに Z 軸とした (図 B.3)。

図 B.4 に, 本実験の概観を示す。また図 B.5 に, 得られた着地時の衝撃加速度を示す (上: 能動外装による衝撃緩和, 下: 能動外装制御無し)。

衝撃加速度 (“ $\alpha$ ”) は, 外乱撃力である。NAO の重心位置, 加速度センサの位置, ボール衝突外乱の位置は同一ではなく, 衝突時の NAO の姿勢のわずかな違いや実験中の下半身などの関節出力低下によって荷重方向に差異が出たものと考えられるが, その後の転倒区間 (“ $\beta$ ”) における姿勢遷移の様子が同一であることから, 転倒動作はほぼ等しい

とみなした。転倒区間はおよそ 500 ~ 550ms である。“ $\gamma$ ” は、着地における衝撃荷重である。外装モジュールを膨張させた場合、臀部 ~ 背面で滑らかに着地することで後頭部や腕部が副次的に着地する様子が確認された (“ $\delta$ ”)。外装を制御しない場合は、NAO 臀部で着地するのみで後方に大きく転がることはなかった。本実験により、転倒動作中に瞬間的に能動緩衝外装を膨張させることで転倒衝撃を大幅に低減させることが確認できた。しかし、NAO 臀部に円柱形状を展開させるような形状であるため、着地の姿勢が定まらず後に肩・肘などを二次的に衝突させてしまう様子も観察された。

本試験では空気圧制御機器を NAO 本体に搭載せず外部においているため、空気圧注入のためのチューブが NAO 背面から伸びている。転倒動作に影響を与えないようチューブは十分に長く柔軟なものを用い、差異を無くすために外装変形を用いない場合でもチューブを同様に取り付けられている。

図 B.6 では、中継タンクに 4 気圧まで圧縮した (“ $\epsilon$ ”) 後、加速度センサによる外力判定 (NAO 胸部へのボールの衝突) によって能動外装への加圧バルブを開け、外装内圧 1.7 気圧を充填完了トリガとしてバルブを閉めている (“ $\zeta$ ”)。外装圧保持後に圧力が低下しているが、これは転倒姿勢に影響を及ぼさないよう配管チューブを長くとったことによる圧力損失、あるいはバルブ切り替えによる配管内体積の変化に起因するものと予想される。“ $\zeta$ ” 点でのバルブ開放時間はおよそ 270ms であった。“ $\eta$ ” は外装モジュール内の大気開放を行ったものである。

本試験により、まず空圧システムを用いたヒューマノイド能動可変外装の最小構成を述べた。転倒時に瞬間的に外装変形を行うことにより、大幅に転倒衝撃を緩和できることが示されたが、臀部の円柱形状に近い能動緩衝外装では接地面積や支持多角形を大きくとることができず、転倒後に姿勢が定まらないことも確認された。さらに、繊維型スリーブ構造だけでは、動作終了後に再び外装を収縮・収納することができず、転倒動作前の状態への復帰が実現できない。



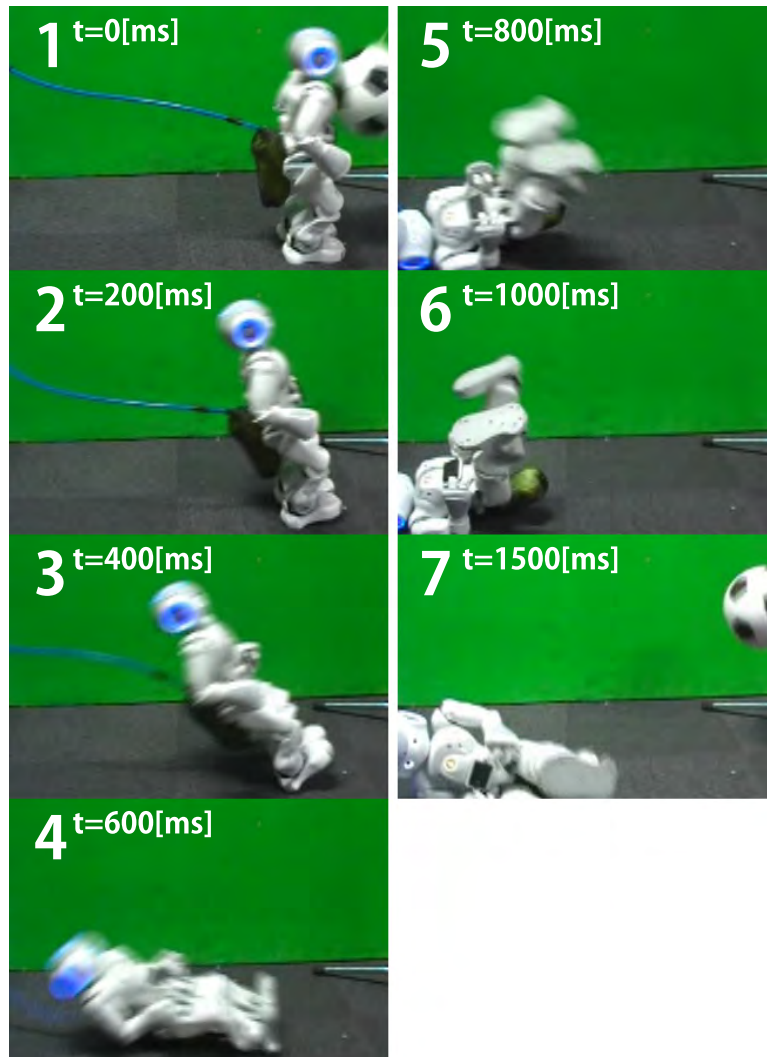


図 B.4: 「柔軟素材 + 形状制限」構造による能動緩衝外装を持つ NAO の転倒動作

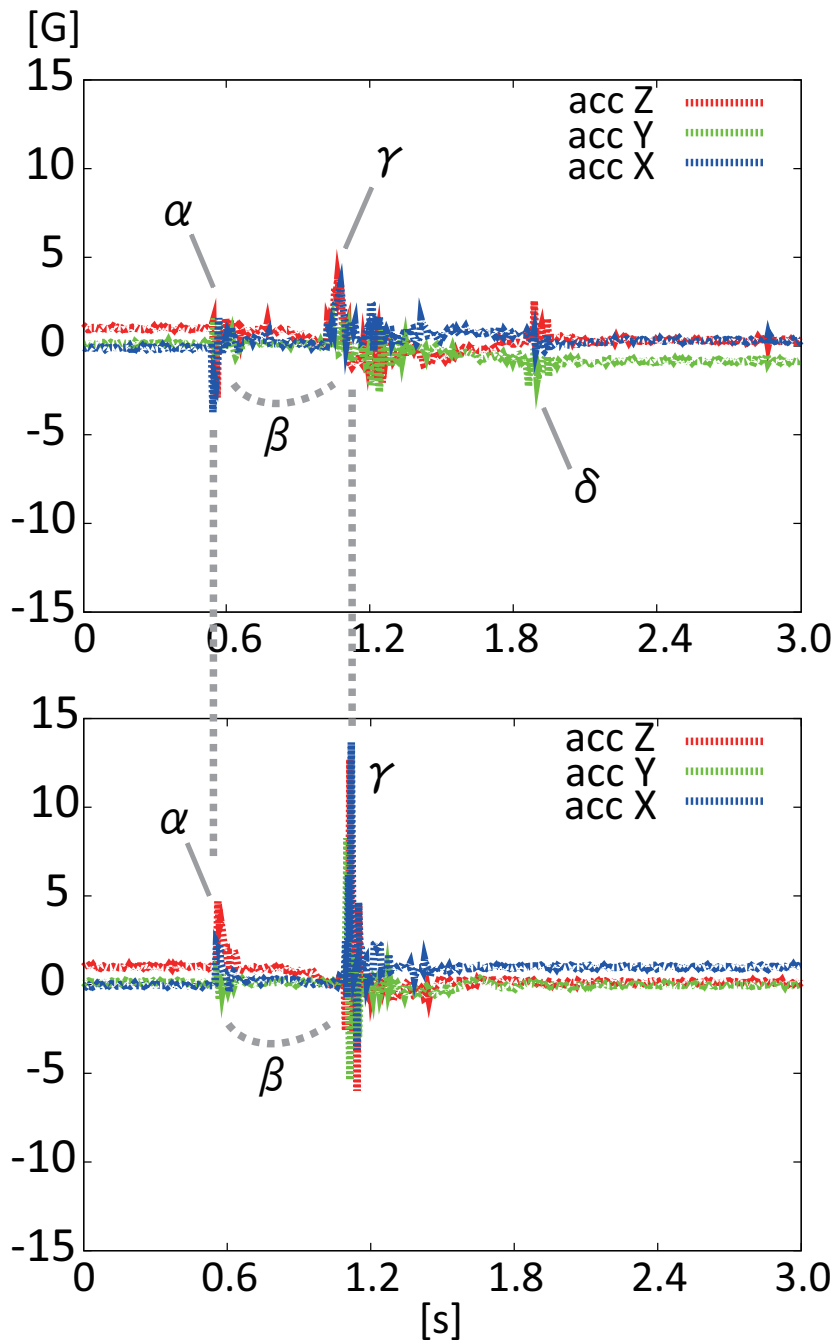


図 B.5: NAO 転倒における衝撃加速度！「柔軟外装 + 形状制限」構造による能動緩衝外装展開有り(上)，外装変形無し(下)。(著者論文 [41] より引用)

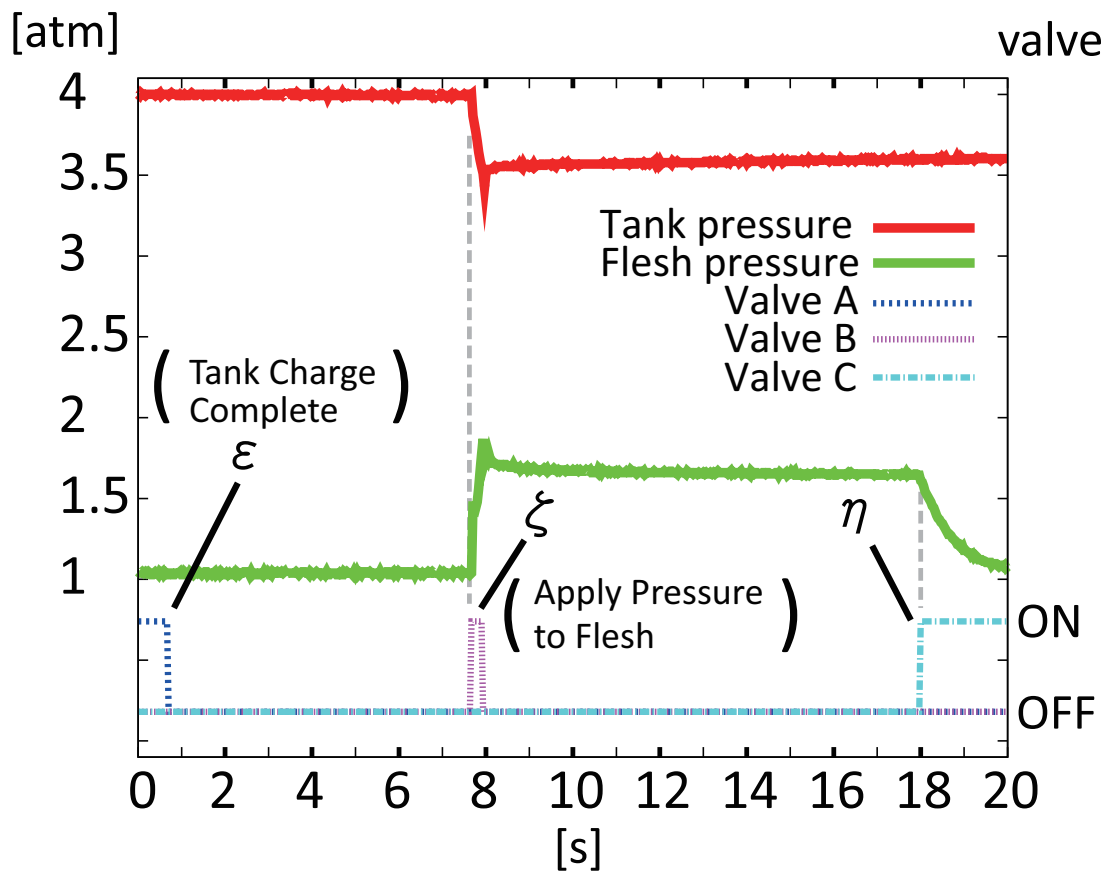


図 B.6: 転倒動作時の外装内各部位内圧 ; バルブ記号は図 3.2 に対応している . (著者論文 [41] より引用)

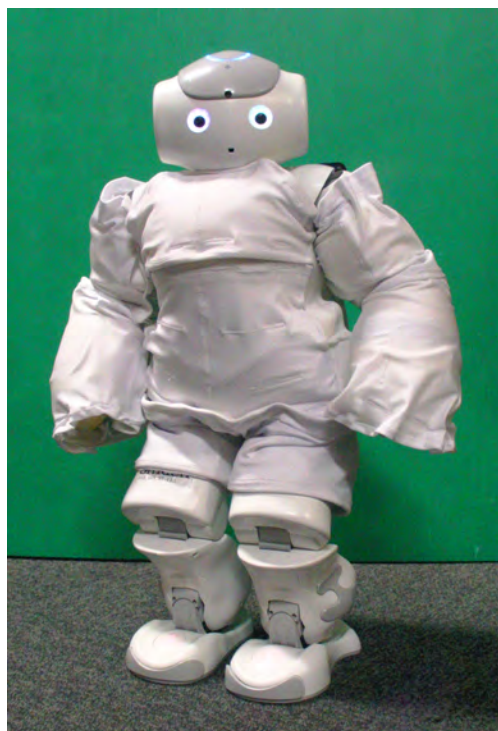


図 B.7: 「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」  
構造による NAO 緩衝外装

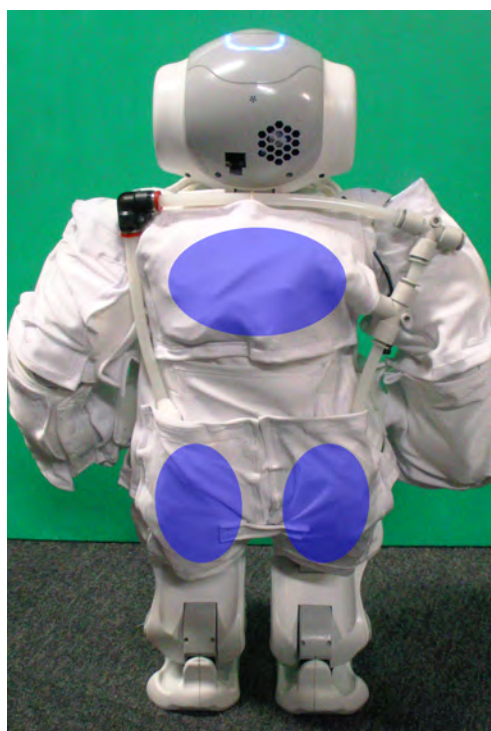


図 B.8: 「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」  
構造による NAO 緩衝外装の背面

### B.3 NAO の転倒時自己保護：柔軟素材 + 形状制限 + 収縮外装

次に、外装内空気を大気開放した際に自ら収縮する構造を併せ持つ「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」構造による能動緩衝外装を考案した（図 B.7 ~ 図 B.10）。

背面外装と臀部外装は直接接続されており、合計でおよそ 300ml と設定し開発した。前節の外装構造に比すれば小容量であるが、NAO の身体形状に沿って配置されており、着地面積を大きくとることで着地後も安定に姿勢を保つことが可能である。その他の小型モジュールは ~ 30ml 程の容量を持つ。

図 B.11 に、この転倒動作試験の概観を示す。図 B.12 はその着地衝撃加速度、図 B.13 は各所の内圧データである。「柔軟素材 + 形状制限」のみによる外装の内圧（図 B.6）と比較すれば、外装容量と耐内圧が異なるものの、同じ挙動を示している。外装充填展開無し（~ 15G）と比較し、その着地衝撃加速度を半減していることが示された。



図 B.9: 「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」  
構造による NAO 緩衝外装の体前面



図 B.10: 「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」  
構造による NAO 緩衝外装の両腕

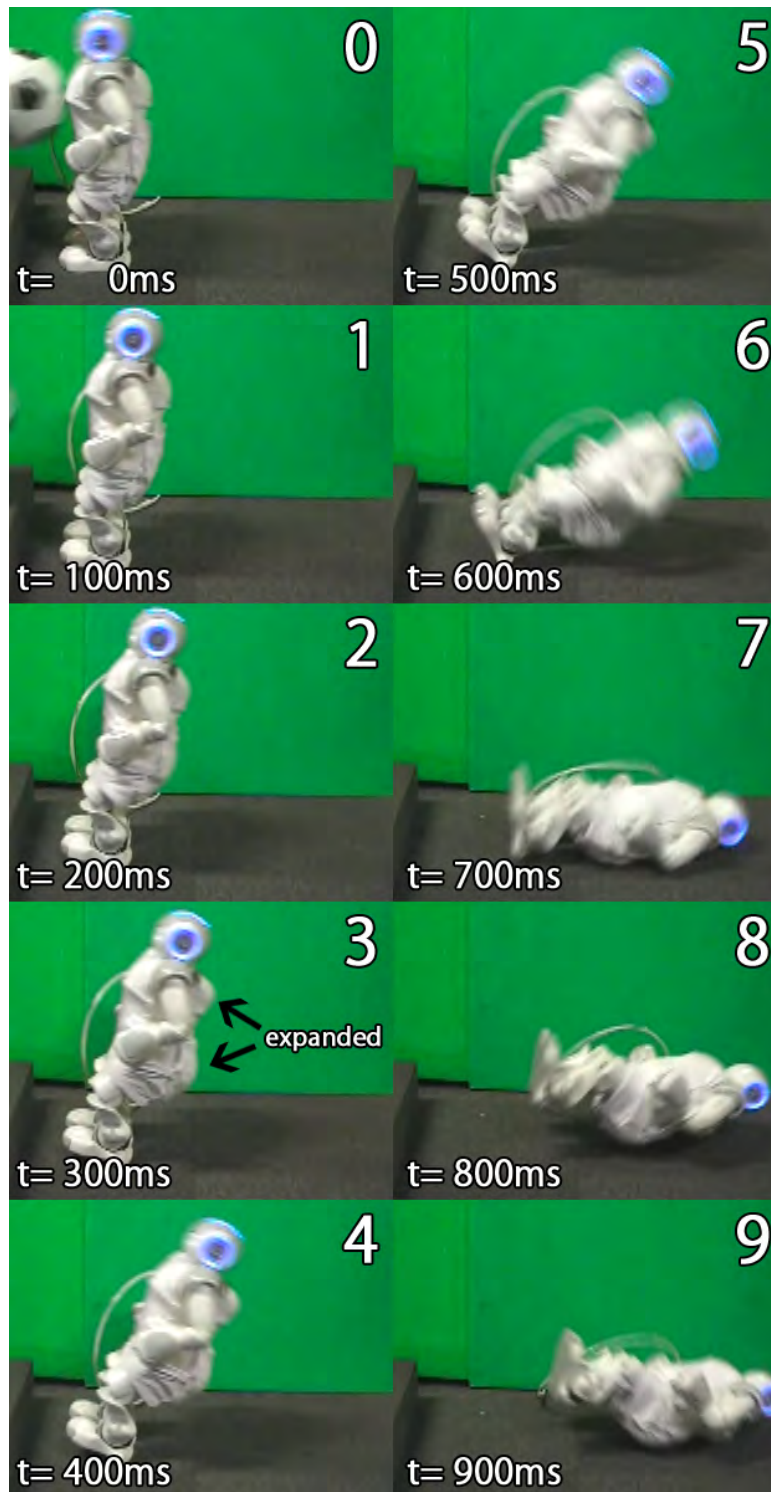


図 B.11: 「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」構造による能動緩衝外装を持つ NAO の転倒動作

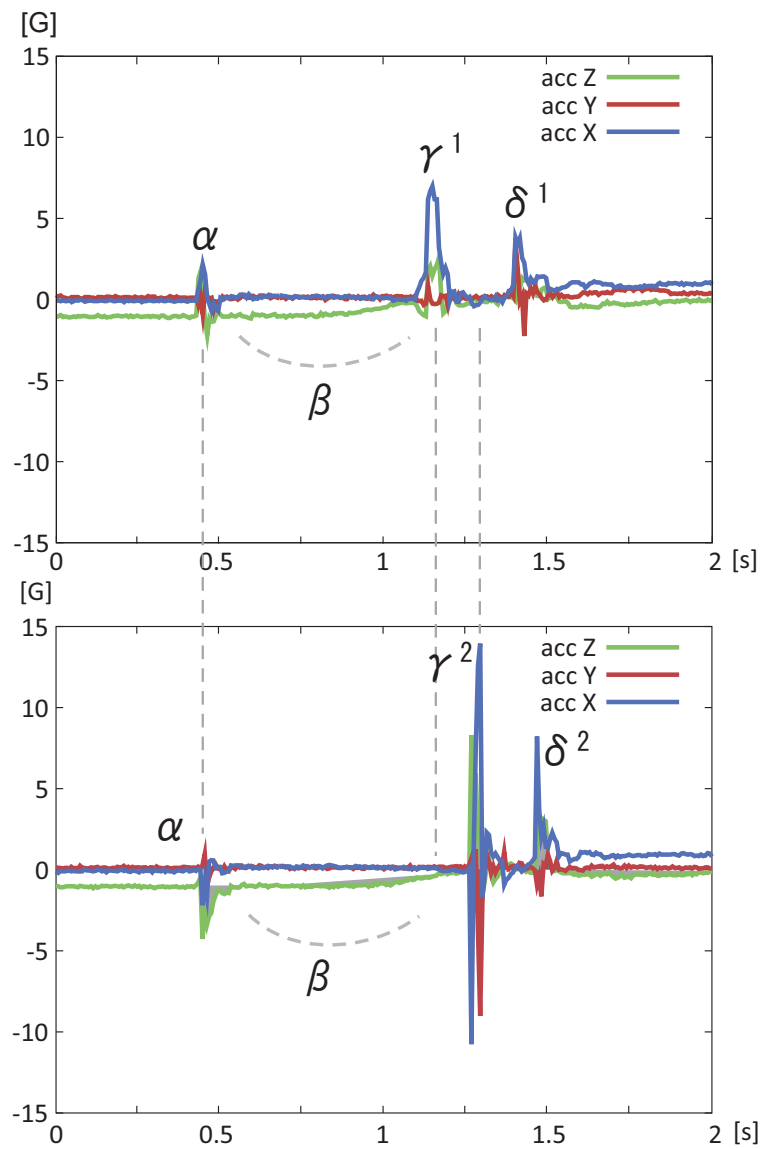


図 B.12: NAO 転倒動作における衝撃加速度。「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」構造による能動緩衝外装展開有り (上) ; 外装変形無し (下) .

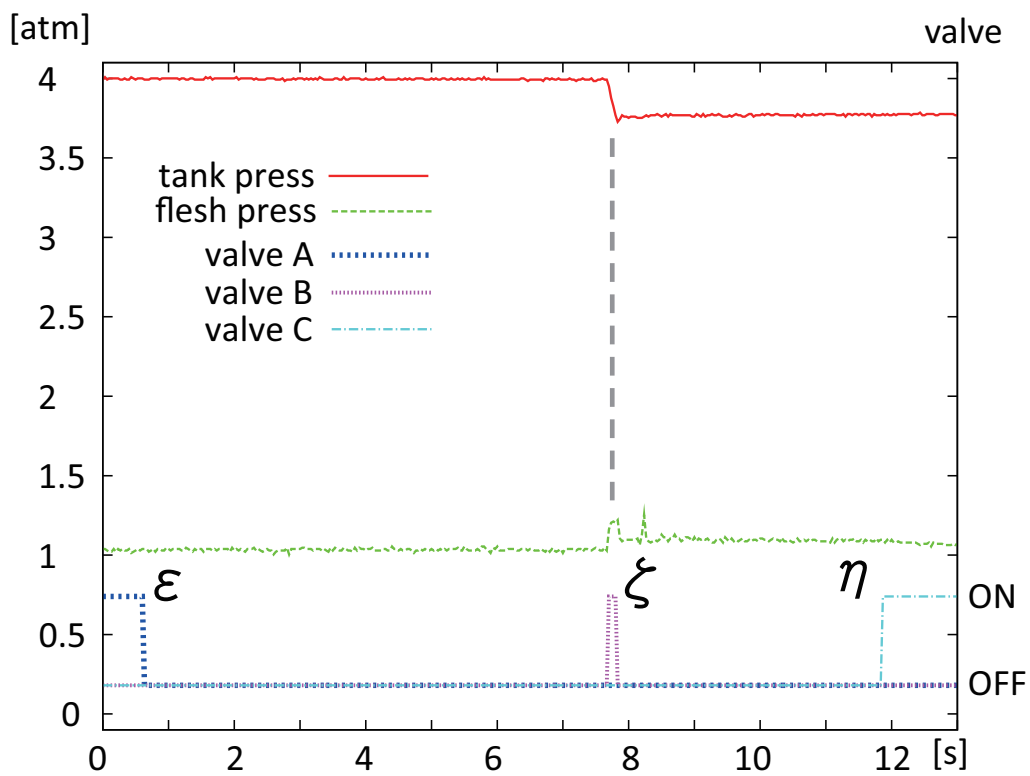


図 B.13: 「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」構造による外装を用いた転倒動作時の各部位内圧



#### B.4 NAO の外装物体適応：柔軟素材 + 形状制限 + 収縮外装

「柔軟素材 + 形状制限 + 収縮」構造外装を用い，図 B.14 に示すように胸部及び腕部に押し付けられた書籍に対して能動的に外装形状を変形させる把持動作を行う．書籍は完全な剛体ではなく，把持されることで形状が変化しうるが，胸部・腕部の能動変形外装の押し付け力のみで，なじみ把持を実現している．多関節ロボットアームによる把持では，関節数の自由度で各リンクが形成する多角形によって把持を行うが，さらに外装内の気圧を計測し，柔軟な外装そのものが変形・適応することによって緩衝外装の自由度によるなじみ把持が実現される．本節では，図 3.2 の「Air Tank」以降は 6 並列されており，各モジュールが「胸部」「上腕」「前腕」(それぞれ左右図 B.9，図 B.10) の能動外装に接続され，独立に動作する．本外装は，大気圧と伸縮布の張力のみで形状を保持する構造のため，充填展開した後も内圧はほぼ大気圧と同じである．伸縮布が破裂することなく保持できる張力に相当する気圧は，当然縫合方法に依存するが，本実験では 0.05 ~ 0.1 気圧程度であった．すなわち，本実験の能動緩衝外装の内圧は 1.1 気圧以下である．6 並列の外装モジュールそれぞれの内部気圧の目標を，試行的に 1.07 気圧と定め，目標値に対して  $\pm 0.01$  気圧以内に保つように P 制御でフィードバックし，「充填」(50ms) と「排出」(30ms) 制御を行い，人間が NAO の腕に外乱や抱え込み姿勢の変化を加えても，各モジュールの気圧フィードバックによって適応的に身体変形を可能としている．

図 B.15 にバルブ制御と各能動外装モジュール内の気圧を示す．“ $\theta$ ” 区間にて中継タンクへの加圧が完了し，以後タンク内気圧が不足にならないよう，適時コンプレッサ (圧縮) 制御を行う (図 B.15 最上段「tank」)．6 独立している各外装モジュール群は，各々の気圧をセンシングし，把持物体の押し付けられ方に応じて「膨張」「保持」あるいは「大気開放」を可能とすることが確認できた (図 B.15 「flesh0」～「flesh5」)．

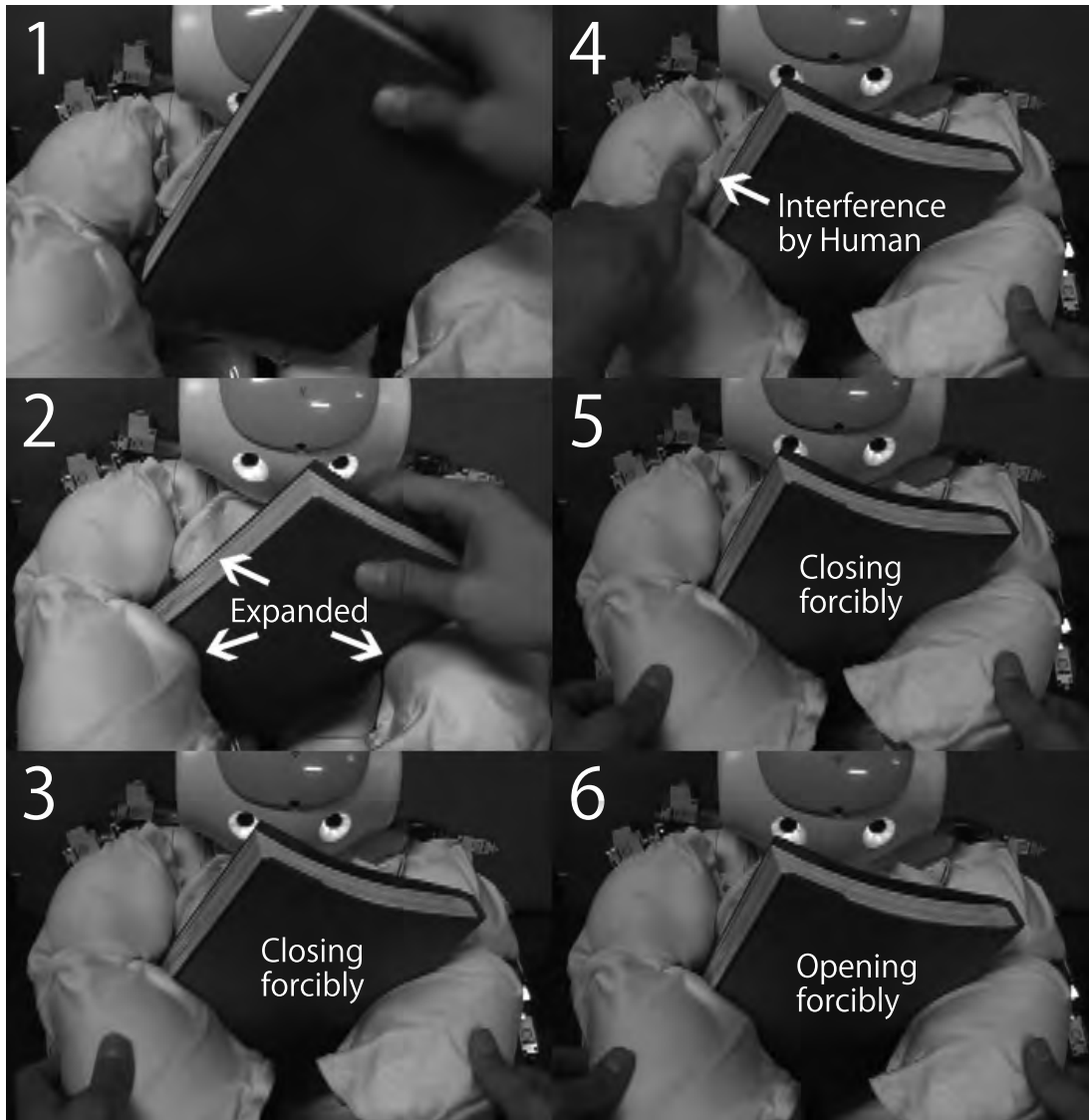


図 B.14: NAO の上腕・前腕・胸部能動緩衝外装を用いた適応的把持

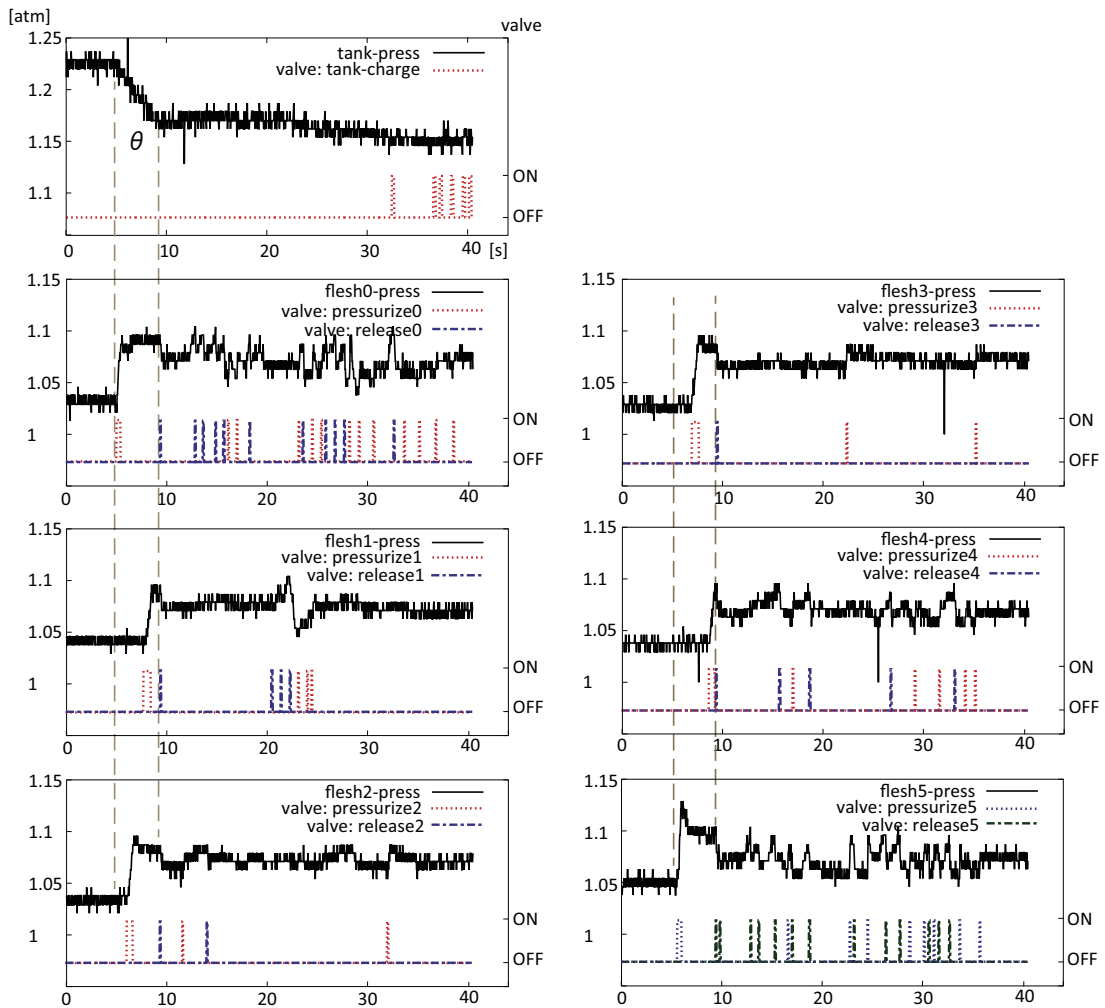


図 B.15: 物体適応把持における並列的空圧制御；中継タンクと6 並列能動外装モジュール各々の内圧と充填 / 排出信号

## B.5 NAOの外装衝撃緩衝・物体適応の評価

本章では、小型ヒューマノイドNAOにおいて後方転倒と物体適応把持を行った。能動外装モジュールは小型ではあるものの、転倒実験においては大幅に衝撃加速度を低減できることを示し、また充填/排出を能動的に繰り返すことで能動外装の膨張力のみで物体把持を可能とした。これにより、等身大ヒューマノイドでの実験に先立ち転倒実験における能動外装の重要性、また充填と排出を行うことのできる能動外装のシステムを実現し、その有効性を示した。

## B.6 おわりに

本章では、第3章にて開発した、小型ヒューマノイドNAOのための能動緩衝外装、及びそれを用いた転倒時自己保護動作の詳細、また腕部と胸部の能動緩衝外装を用いた適応的物体把持、それらの評価と位置付けについて述べた。

## 参考文献



- [1] 内山勝, 中村仁彦, “ロボットモーション”, 岩波書店, 2004.
- [2] 篠田裕之, “柔らかい機械の人工皮膚”, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 7, pp. 814–817, 2001.
- [3] 野田智之, 宮下敬宏, 石黒浩, 萩田紀博, “全身分布触覚における触覚特徴の局所性に注目した人間–ロボット間インタラクションの識別”, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 6, pp. 669–678, 2009.
- [4] 國吉康夫, 大村吉幸, 寺田耕志, 長久保晶彦, “等身大ヒューマノイドによるダイナミック起き上がり行動の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 6, pp. 706–717, 2005.
- [5] 林摩梨花, 石坂唯, 植田亮平, 吉海智晃, 稲葉雅幸, “発泡体型柔軟肉質の全身被覆分布変形感覚を備えたヒューマノイドの実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 8, pp. 925–931, 2008.
- [6] Taizo Yoshikawa and Oussama Khatib, “Compliant Humanoid Robot Control by the Torque Transformer”, In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3011–3018, 2009.
- [7] 池本周平, ベン・アモルヘニ, 港隆史, ユングバーンハード, 石黒浩, “物理的な人間ロボット間インタラクションを利用した柔軟関節ヒューマノイドロボットの運動学習”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 8, pp. 1025–1035, 2010.
- [8] 西脇光一, 加賀美聡, “ヒューマノイド歩行における将来の運動学的制約を考慮した腰高さ軌道のオンライン設計”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’10 講演論文集, 1A1-5, 2010.
- [9] 西脇光一, 加賀美聡, “姿勢角情報を直接用いて軌道生成を行うオンライン歩行制御システム”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’09 講演論文集, 1S2-06, 2009.
- [10] 西脇光一, 加賀美聡, “推定絶対運動状態を始点とする短周期軌道生成を用いたヒューマノイドの不整地適応歩行制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 1, pp. 111–121, 2011.

- [11] 橋本健二, 林昭宏, 沢戸瑛昌, 吉村勇希, 服部賢太郎, 浅野哲平, 菅原雄介, 林憲玉, 高西淳夫, “脚部にパラレルリンク機構を用いた2足口コモータの開発(第17報: 着地衝撃緩和を目指した不整路面適応制御)”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'09 講演論文集, 2P1-B17, 2009.
- [12] 有隅仁, 横井一仁, “ヒューマノイドのドア通過に対する軌道生成法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'09 講演論文集, 1S2-05, 2009.
- [13] 中井博之, 星野由紀子, 稲葉雅幸, 井上博允, “軟化変形ロボットの研究 低融点金属の相変化を用いた形状適応変形ロボットの実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 6, pp. 625–630, 2002.
- [14] Sung-Hee Lee and Ambarish Goswami, “FALL ON BACKPACK: DAMAGE MINIMIZING HUMANOID FALL ON TARGETED BODY SEGMENT USING MOMENTUM CONTROL”, In *International Design Engineering Technical Conference*, pp. 703–712, 2011.
- [15] S.-H Lee and A. Goswami, “Fall on Backpack: Damage Minimizing Humanoid Fall on Targeted Body Segment Using Momentum Control”, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 8, No. 2, p. 021005, 2012.
- [16] 藤原清司, 金広文男, 梶田秀司, 横井一仁, 齋藤元, 原田研介, 比留川博久, 五十棲隆勝, “等身大ヒューマノイドロボットの後方転倒制御の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp. 427–434, 2005.
- [17] 金広文男, 金子健二, 藤原清司, 原田研介, 梶田秀司, 横井一仁, 比留川博久, 赤地一彦, 五十棲隆勝, “ヒューマノイドの転倒回復機能の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 37–45, 2004.
- [18] 星野佑太, 小水内俊介, 富田将茂, 安孫子聡子, 辻田哲平, 近野敦, 内山勝, “オンライン踏み出し動作によるヒューマノイドロボットの転倒回避”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 講演論文集, 1A2-N02, 2012.
- [19] 杉原知道, “二脚ロボットの立位安定化に重畳する反射的踏み出し制御”, 第28回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2D2-7, 2010.



- [20] 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脚口ボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 91–97, 2010.
- [21] Marika Hayashi, Ryohei Ueda, Tomoaki Yoshikai, and Masayuki Inaba, “A FALL DOWN RESISTANT HUMANOID ROBOT WITH SOFT COVER AND AUTOMATICALLY RECOVERABLE MECHANICAL OVERLOAD PROTECTION”, In *12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, pp. 1225–1232, 2008.
- [22] Asuka Kadowaki, Tomoaki Yoshikai, Marika Hayashi, and Masayuki Inaba, “Development of Soft Sensor Exterior Embedded with Multi-axis Deformable Tactile Sensor System”, In *Proceedings of the 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 1093–1098, 2009.
- [23] Tomoaki Yoshikai, Hiroko Fukushima, Marika Hayashi, and Masayuki Inaba, “Development of Soft Stretchable Knit Sensor for Humanoids’ Whole-body Tactile Sensibility”, In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Humanoid Robots*, pp. 624–631, 2009.
- [24] Tomoaki Yoshikai, Marika Hayashi, Asuka Kadowaki, Takefumi Goto, and Masayuki Inaba, “Design and Development of a Humanoid with Soft 3D-Deformable Sensor Flesh and Automatic Recoverable Mechanical Overload Protection Mechanism”, In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4977–4983, 2009.
- [25] 小林一也, 吉海智晃, 後藤健文, 稲葉雅幸, “関節脱臼復帰機能を備えた柔軟性分布外装ヒューマノイドによる転倒・転落衝撃吸収動作の実現”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’11 講演論文集, 2P2-I06, 2011.
- [26] 小林一也, 吉海智晃, 後藤健文, 稲葉雅幸, “柔軟性多層分布外装と関節脱臼復帰機構を備えたロボットの転倒・転落時衝撃吸収自己保護行動の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 416–423, 2013.

- [27] Tatsuhito Aono and Yoshihiko Nakamura, “Design of Humanoid with Insert-Molded Cover Towards the Variety of Exterior Design of Robots”, In *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1476–1481, 2005.
- [28] 向井利春, 平野慎也, 中島弘道, 吉田守夫, 郭士傑, 早川義一, “対象と全身接触を行う介護支援ロボットのための触覚情報を用いた繰り動作”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 782, pp. 3794–3807, 2011.
- [29] 熊谷伊織, 小林一也, 野沢峻一, 垣内洋平, 吉海智晃, 岡田慧, 稲葉雅幸, “柔軟変形多軸触覚を分散配置した等身大ヒューマノイド用外装による物体受渡作用の検知反応行動の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 10, pp. 985–991, 2013.
- [30] Kazuya KOBAYASHI, Tomoaki YOSHIKAI, and Masayuki INABA, “Development of Humanoid with Distributed Soft Flesh and Shock-Resistive Joint Mechanism for Self-Protective Behaviors in Impact from Falling Down”, In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2390–2396, 2011.
- [31] Woosub Lee, Junho Choi, and Sungchul Kang, “Spring-Clutch: A Safe Torque Limiter Based on a Spring and CAM Mechanism with the Ability to Reinitialize its Position”, In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5140–5145, 2009.
- [32] 山元洋, 小泉雄吾, 山口洋, “Sr-Zn 系 W 型フェライト粉末の磁気特性とそれらのボンド磁石のトルクリミッタへの応用 (ハード磁性材料)”, 日本応用磁気学会誌, Vol. 30, No. 2, pp. 146–150, 2006.
- [33] 「NAO Datasheet - Corporate - Aldebaran Robotics — Discover NAO」, <http://www.aldebaran-robotics.com/Discover-NAO/darasheet.html>, 2013.10.30 アクセス.
- [34] 中野正, 松浦弘幸, 玉川雅章, 山中真, 行正徹, “頭部損傷基準値 (HIC) の理論的分析”, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 57–63, 2010.

- [35] 鈴木啓介, 高信英明, 鈴木健司, 三浦宏文, 土田崇弘, “成長するロボット”, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 4K2-7, 2012.
- [36] Shin'ichiro Nakaoka, Fumio Kanehiro, Kanako Miura, Mitsuharu Morisawa, Kiyoshi Fujiwara, Kenji Kaneko, Shuuji Kajita, and Hirohisa Hirukawa, “Creating Facial Motions of Cybernetic Human HRP-4C”, In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Humanoid Robots*, pp. 561–567, 2009.
- [37] Tomoaki Yoshikai, Takefumi Goto, Kazuya Kobayashi, Takahiro Akimoto, Hiroaki Yaguchi, and Masayuki Inaba, “Achievement of Trapeze Motion for Humanoid Robots Based on Realtime Ego-Motion / Moving Objects' Motions Recognition Algorithm”, In *the 15th International Conference of Advanced Robotics*, pp. 637–644, 2011.
- [38] 梶田秀司, “ヒューマノイドロボット”, 株式会社オーム社, 2005.
- [39] 尾形邦裕, 寺田耕志, 國吉康夫, “ヒューマノイドロボットにおける転倒判定と回避動作に関する研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10 講演論文集, 1A1-A01, 2010.
- [40] 梶田秀司, 金広文男, 金子健二, 藤原清司, 原田研介, 横井一仁, 比留川博久, “分解運動量制御: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 6, pp. 772–779, 2004.
- [41] 小林一也, 吉海智晃, 稲葉雅幸, “臀部に能動的変な柔軟肉質外装を有する小型ヒューマノイドによる転倒衝撃吸収動作の実現”, 第 11 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, 3J2-5, 2011.
- [42] 細田耕, “発見的バイオロボティクスアプローチと適応的 2 足歩行”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 479–484, 2010.
- [43] Kenichi Norioka, S.Tsugawa, and K.Hosoda, “3D limit cycle walking of musculoskeletal humanoid robot with flat feet”, In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4676–4681, 2009.

- [44] Ryuma Niiyama, Satoshi Nishikawa, and Yasuo Kuniyoshi, “A Biomechanical Approach to Open-loop Bipedal Running with a Musculoskeletal Athlete Robot”, *Advanced Robotics*, Vol. 26, No. 3-4, pp. 383–398, 2012.
- [45] 自動車技術会, “自動車技術ハンドブック 改訂版 第2分冊: 環境・安全編”, 2005.
- [46] 「jet Packs - Location to Location in No Time」, <http://www.flying-contraptions.com/>, 2013.10.06 アクセス.
- [47] 「Rocketman Best exhibition Jetpack」, <http://www.rocketman.tv/>, 2013.10.06 アクセス.
- [48] 日本規格協会, “JIS ハンドブック 油圧・空気圧 2013”, 2013.
- [49] Kei Okada, Takashi Ogura, Atsushi Haneda, Junya Fujimoto, Fabien Gravot, and Masayuki Inaba, “Humanoid Motion Generation System on HRP2-JSK for Daily Life Environment”, In *International Conference on mechatronics & Automation*, pp. 1772–1777, 2005.

## 発表文献



- [1] 小林一也, 吉海智晃, 後藤健文, 稲葉雅幸, “柔軟性多層分布外装と関節脱臼復帰機構を備えたロボットの転倒・転落時衝撃吸収自己保護行動の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 416–223, 2013.
- [2] Kazuya KOBAYASHI, Tomoaki YOSHIKAI, Masayuki INABA, “Development of Humanoid with Distributed Soft Flesh and Shock-Resistive Joint Mechanism for Self-Protective Behaviors in Impact from Falling Down”, *In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.2390–2396, 2011.
- [3] Kazuya KOBAYASHI, Nobuyuki ITO, Ikuo MIZUUCHI, Kei OKADA, Masayuki INABA, “Design and Realization of Fingertiped and Multifingered Hand for Pinching and Rolling Minute Objects”, *In Proceedings of the 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp.263–268, 2009.
- [4] 熊谷伊織, 小林一也, 野沢峻一, 垣内洋平, 吉海智晃, 岡田慧, 稲葉雅幸, “柔軟変形多軸触覚を分散配置した等身大ヒューマノイド用外装による物体受渡作用の検知反応行動の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 10, pp. 985–991, 2013.
- [5] 中岡卓也, 浦田順一, 柚木崎創, 伊藤佳人, 小林一也, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸, “全身大出力ヒューマノイドのための液冷ダブルモータユニットを備えた二脚ロボットの設計と実装”, in 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1C1-05, 2013.
- [6] Iori KUMAGAI, Kazuya KOBAYASHI, Shunichi NOZAWA, Yohei KAKIUCHI, Tomoaki YOSHIKAI, Kei OKADA, 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 Proceedings of the 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp.526–531, 2012.
- [7] Tomoaki YOSHIKAI, Takahiro AKIMOTO, Kazuya KOBAYASHI, Junpei TSUJI, Hiroaki YAGUCHI, Masayuki INABA, “Achievement of 'Mikoshi' with Multiple Humanoid Robots as Coordinated Navigation Problem Based on Real-Time 3D Space Recognition in a Dynamic Environment”, *In Proceedings of the 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, SaP4T1.1, 2012.

- [8] 吉海智晃, 福島寛子, 小林一也, 稲葉雅幸, “対人インタラクションのための伸縮可能な被覆型柔軟ニットセンサ外装の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.5, pp.505–514, 2012.
- [9] 中岡 卓也, 浦田 順一, 伊藤 佳人, 小林一也, 中西 雄飛, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, “小型大出力モータドライバ系による駆動力・即応性を備えた等身大ヒューマノイド用アームの設計と実装”, in 第30回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 4K1-1, 2012.
- [10] Tomoaki YOSHIKAI, Kazuya KOBAYASHI, Masayuki INABA, “Development of 4-axis Soft Deformable Sensor for Humanoid Sensor Flesh”, *In Proceedings of the 2011 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp.205–211, 2011.
- [11] Tomoaki YOSHIKAI, Takefumi GOTO, Kazuya KOBAYASHI, Takahiro AKIMOTO, Hiroaki YAGUCHI, Masayuki INABA, “Achievement of Trapeze Motion for Humanoid Robots Based on Realtime Ego-Motion / Moving Objects’ Motions Recognition Algorithm”, *In Proceedings of the 15th International Conference of Advanced Robotics*, pp.637–644, 2011.
- [12] 小林一也, 吉海智晃, 後藤健文, 稲葉 雅幸, “関節脱臼復帰機能を備えた柔軟性分布外装ヒューマノイドによる転倒・転落衝撃吸収動作の実現”, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’11 講演論文集, 2P2-I06, 2011.
- [13] 小林一也, 吉海 智晃, 稲葉 雅幸, “臀部に能動的に変な柔軟肉質外装を有する小型ヒューマノイドによる転倒衝撃吸収動作の実現”, in 第12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, 3J2-5, 2011.
- [14] Yohei KAKIUCHI, Ryohei UEDA, Kazuya KOBAYASHI, Kei OKADA, Masayuki INABA, “Working with Movable Obstacles Using On-line Environment Perception Reconstruction Using Active Sensing and Color Range Sensor”, *In Proceedings of The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1696–1701, 2010.
- [15] 中西 雄飛, 白井 琢磨, 伊沢 多聞, 小林 巧実, 小林一也, 伊東 信之, 本郷 一生, 廣瀬 俊典, 太田 茂樹, 浦田 順一, 水内 郁夫, 稲葉 雅幸, “全身超多自由度筋骨格ヒュー



- マノイドの筋関節身体設計の展開と静的運動性能の比較評価”, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’10 講演論文集, 2P1-D05, 2010.
- [16] 小林 一也, 吉海 智晃, 後藤 健文, 秋元 貴博, 伊沢 多聞, 稲葉 雅幸, “多層発泡成形による局所柔軟性分布を持つ超厚肉柔軟ロボット外装の実現”, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’10 講演論文集, 2A2-E04, 2010.
- [17] 秋元 貴博, 小林 一也, 植木 竜佑, 小島 光晴, 吉海 智晃, 稲葉 雅幸, “常駐型対人対応のための超短時間充電キャパシタ搭載自律移動ロボットの開発”, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’10 講演論文集, 2A1-E06, 2010.
- [18] 伊沢 多聞, 小林 一也, 伊東 信之, 長田 将彦, 本郷 一生, 太田 茂樹, 浦田 順一, 中西 雄飛, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, “剛性可変機能を有する腱駆動ヒューマノイドのための冗長多自由度頸部構造の開発”, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’10 講演論文集, 2A2-A05, 2010.
- [19] 伊沢多聞, 小林一也, 中西雄飛, 吉海智晃, 稲葉雅幸, “筋骨格ヒューマノイドのための柔軟外装構造の開発”, in 第 28 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2A2-7, 2010.
- [20] 吉海智晃, 小林一也, 稲葉雅幸, “伸縮異方性を備えたグリッド型肉質センサ外装の開発”, in 第 28 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2O1-4, 2010.
- [21] 秋元貴博, アイザック・アンソニー・アルバ, 後藤健文, 小林一也, 小島光晴, 吉海智晃, 稲葉雅幸, “次世代知能化画像認識モジュールを備えた小型ヒューマノイドロボットによる落下物体認識拾い上げ行動の実現”, in 第 11 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, 3B3-3, 2010.
- [22] 小林 一也, 伊東 信之, 水内 郁夫, 稲葉 雅幸, “微小物体のつまみ上げと指先転がしが可能な指尖形状を持つ多指ハンドの設計と実現”, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’09 講演論文集, 2A2-B10, 2009.
- [23] 小林 一也, 野沢 峻一, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, “等身大ヒューマノイドにおける爪と指尖形状を持つ多指ハンドの開発とつまみ上げ・指先転がし動作の実現”, in 第 27 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2S1-02, 2009.

以上

1p ~ 202p 完

博士論文

平成 26 年 2 月 4 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  
48-117505 小林 一也