論文の内容の要旨

論文題目　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

氏名　小林　一也

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，歩行安定化制御のみでは避けられない実地不整地環境での転倒に着目し，従来の受動的な外装ではなく自ら形状や容積を変形・展開する能動緩衝外装を有するヒューマノイドを実現させた．そのためのアプローチとして，転倒を許容するヒューマノイド能動緩衝外装形状と構造を提案し，外装利用後の形状復元のための排出・再収縮構造，空圧供給源の再装填機構を設計開発することで，自己保護行動と復帰回復を実現するような等身大ヒューマノイドの構成法を提案した．本研究は以下のような構成となっている．

第１章「序論」では，本研究の目標である「転倒可能な」等身大ヒューマノイドについて述べ，研究背景と本研究の位置付けを述べた．

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」においては，まず，等身大二足歩行ヒューマノイドが転倒に際して行う自己身体の保護と，従来の柔軟緩衝外装の弊害について述べた．ヒューマノイドの様々な損傷として，電装系の損傷，締結の不備に伴う破壊，環境との接触に伴う物理的荷重破壊を挙げた．この中で特に環境との不意の物理的接触や衝撃外乱荷重による損傷を回避するために「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，本研究の提案する能動的に形状・容積可変な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．

また，提案する能動緩衝外装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持ちそれらを利用することで可能となる自己保護行動について詳細に議論した．重要な先行研究として「転倒しても回復できる HRP2」(JRSJ2005，藤原ら)のアーキテクチャを引用しつつ，能動的外装を用いて「緊急行動」ではなく「通常行動」と同列に転倒自己保護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」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構成法を示した．また，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等身大ヒューマノイドのために能動緩衝外装を開発した．さらにこの能動外装モジュールに弾性収縮要素を備え，外装構造を平時に小さく保持しておくための収縮機構について検討・議論した．収縮機構としては，様々な機構方式を検討し，次回充填膨張の阻害防止を最大に考慮し，機械的な構造を廃して弾性要素のみを用いて自然に収縮する構造とした．

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，従来の空圧・油圧ロボットとの能動緩衝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，本研究での空圧の特異な要求性について論じた．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用インフレータ（ガス発生器）について触れながら，それらの性能・要求性を検討し，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緩衝外装への充填に最も適したストアードガス式の爆破弁インフレータを選定した．

カートリッジ設計においては，まずヒューマノイドのインフレータ再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・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，外装用空圧構成とインフレータカートリッジ再装填機構の設計論と開発，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／未使用の判定方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」では，繰り返し利用可能なヒューマノイド能動緩衝外装のために必要となる形状復帰のための外装排出・再収縮・復帰動作について議論し，既に論じた能動緩衝外装の構造，再装填機構と併せて，等身大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述べながら，気密性よりも外装内気体の排出速度を最優先と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 秒で外装内の 30 リットルを完全排出できるような専用ドレインバルブを開発した．併せてドレインファンとして種々のファンを挙げ，選定すべき項目と採用方法について議論し，ファンを採用した．さらに，注入口／排出口それぞれの特性のために内側に装着する注入／排出キャップとその有効性について示し，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．

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，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概算した．また能動緩衝外装を用いた着地姿勢制御の，ヒューマノイドの安定化制御の中での位置付けを述べた．その上で，HRP2 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，能動緩衝外装を用いる検証実験を行った．

転落実験では，等身大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に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，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．

さらにヒューマノイド HRP2 を用いた実験では，転倒中に転倒角度と転倒方向を判定し，体幹をひねることで転倒方向へ背面能動緩衝外装を押し出し安全に着地する自己保護行動の実現と評価を示した．

次に，HRP2 の背面に装着した能動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・再収縮（4）カートリッジ排莢・交換　が繰り返し実行可能であることを実証した．

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による押し込みと引っ張りだけで空圧的また電気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．

第 7 章「結論」においては本研究の概要と結論，今後の展望について議論した．

本研究は，能動緩衝外装構造，再装填機構，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」と同列に安全な転倒動作・自己保護行動をとることが可能となった．またそれはいわゆる「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環境でも活躍できる新しい等身大ヒューマノイドの構成法を示し，その応用可能性を示したものである．