

厚生労働科学研究費補助金  
身体機能解析・補助・代替機器開発研究事業

人間・機械・情報系の融合複合新技術サイバニクス  
を駆使したロボットスーツHALの開発

平成17年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 山海嘉之

平成18年(2006)年3月

# 目次

## I. 総括研究報告書

人間・機械・情報系の融合複合新技術サイバニクスを駆使したロボットスーツHALの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2

山海嘉之（筑波大学大学院システム情報工学研究科教授）

## II. 分担研究報告書

1. 身体性を考慮したロボットスーツHALのデザインに関する研究・・・・・・・・・・ 10

五十嵐浩也（筑波大学大学院人間総合科学研究科助教授）

2. ロボットスーツHALを用いた診断インターフェースに関する研究・・・・・・・・・・ 14

葛岡英明（筑波大学大学院システム情報工学研究科講師）

3. ロボットスーツHALの自律的制御機構に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 17

長谷川泰久（筑波大学大学院システム情報工学研究科講師）

4. ロボットスーツHALを用いた運動機能訓練プログラムに関する研究・・・・・・・・ 29

居村茂幸（茨城県立医療大学保健医療学部・大学院保健医療科学研究科教授）

5. ロボットスーツHALを用いた筋ジストロフィー患者のQOLに関する研究・・ 33

中島孝（独立行政法人国立病院機構新潟病院副院長）

III. 研究成果の刊行に関する一覧表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36

IV. 研究成果の刊行の刊行物・別冊・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42

# I. 総括研究報告

## 人間・機械・情報系の融合複合新技術サイバニクスを駆使した ロボットスーツHALの開発

主任研究者 山海 嘉之 筑波大学大学院システム情報工学研究科教授

### 研究要旨

本事業では、サイバニクス技術を駆使して、全身系の運動機能を拡張・増幅することができるロボットスーツHAL (Hybrid Assistive Limb) を完成させ、これを実用化することを目的とする。当該年度は次年度以降の共通研究開発基盤となるロボットスーツとして、主に、小型パワーユニットの開発、電装系の分散化、装着機能の開発、シェルカバーの開発を実施し、世界最新鋭となるロボットスーツを開発した。

### 分担研究者

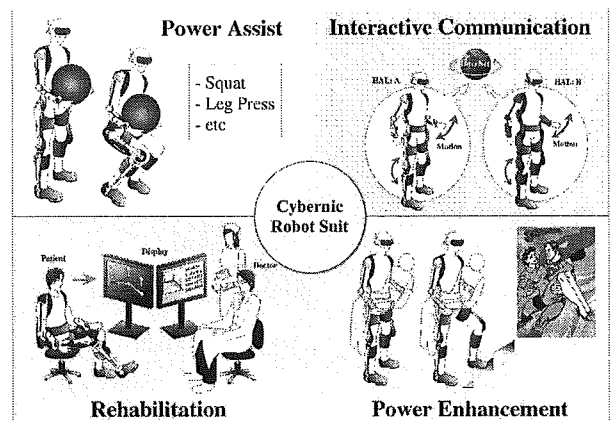
五十嵐浩也（筑波大学大学院人間総合研究科  
助教授）

居村茂幸（茨城県立医療大学保健医療学部・  
大学院保健医療科学研究科教授）

葛岡英明（筑波大学大学院システム情報工学  
研究科助教授）

中島 孝（独立行政人国立病院機構新潟病院  
副院長）

長谷川泰久（筑波大学大学院システム情報工学  
研究科助教授）



### A. 研究目的

高齢者、運動機能障害者の介護問題は、現在そして未来の大きな社会的問題である。我々は、世界に先駆けて人間の意思通りに身体運動機能を拡張し増幅する下肢用「ロボットスーツ」（試験装置）の開発に成功した。成功の背景には、人間・機械・情報系を融合複合した新しい学術「サイバニクス」開拓が必須であった。サイバニクスは、Cybernetics, Mechatronics, Informaticsを中心として、脳・神経科学、行動科学、システム制御工学、ロボット工学、IT技術、心理学、生理学、システム統合技術などが融合複合した新しい分野である。

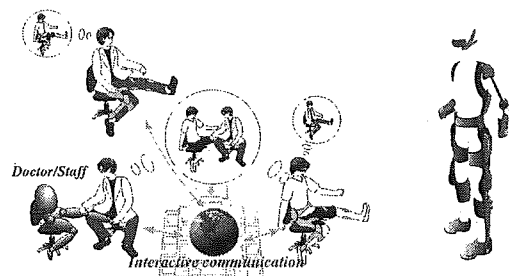
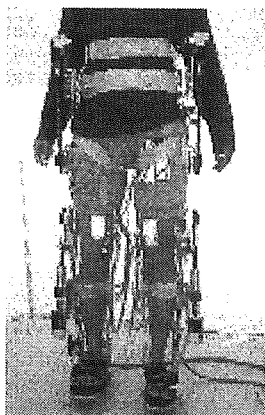
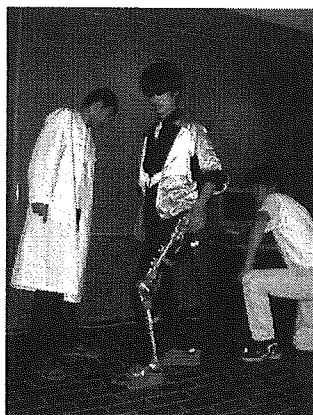


図1 身体機能を補助・拡張・増幅する  
ロボットスーツHALと適用例

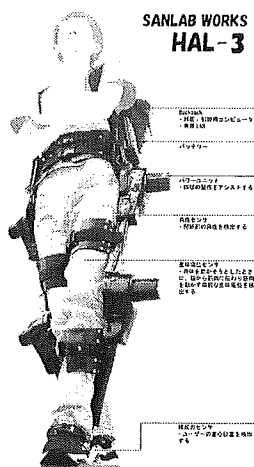
当該ロボットスーツを用いると、筋力が低下した高齢者や運動機能障害を有する患者のリハビリテーションや自立生活支援、また、重労働となる介護負荷を大幅に軽減することができる（図1参照）。実際に当該システムを、各種運動機能障害者に適応することによって、より具体的な障害・疾患・レベルについて適切な適用範囲を検証し、そのガイドラインを構築する。



HAL-1（試作機）



HAL-2（コンソール仕様）



HAL-3（バックパック仕様）

図2 これまでに開発してきた主なロボットスーツ  
HAL

その社会的意義は極めて大きく、当該ロボットスーツがもたらす「寝たきりからの脱却」「モビリティプロモーション（運動の増進）」は、

介護費用・介護作業の軽減、活力に満ちた自立社会の展開、労働力の確保などを実現し、超高齢社会に直面する我が国にとって極めて重要なテーマである。人間と機械と情報系が一体化し互いに補完し合う当該ロボットスーツは、次世代基盤技術として是非とも実現すべきものである。

当該研究では、これまで、関連研究によって図2に示すように、下肢用ロボットスーツの基本原理の開拓からプロトタイプの開発を行ってきた。

本事業では、サイバニクス技術を駆使して、全身系の運動機能を拡張・増幅することができるロボットスーツHAL(Hybrid Assistive Limb)を完成させ、これを実用化することを目的とする。当該年度は次年度以降の共通研究開発基盤となるロボットスーツプラットフォームの開発を行った。

## B. 研究方法

これまで開発されたロボットスーツHALの基盤技術および改善点を基に以下の項目に関して重点的に研究開発を行った。

### 1. ロボットスーツ用パワーユニット

人間の筋特性・稼働性に適合した制御用パワーユニットの開発を行うため、人間の動作特性情報を運動データ、生理データから取得・解析し、動作支援に必要なパワーユニットの仕様を決定した。さらにロボットスーツの全重量を大部分を占めているパワーユニットの軽量化及び小型化を行った。

### 2. 電装系の分散化

従来までのロボットスーツに採用していた集中型の制御システムは電装系の配置場所を大きく占有し、コンパクト化を困難にするばかりではなく、ロボットスーツの重量配分の偏りによる動作支援の非効率化、あるいは配線の複雑化の原因にもなる。そこで、モータドライバ、

バッテリー、制御コンピュータ等の電装系を機構的にも機能的にも分散型の制御システムを構築した。

### 3. 装着機構の開発

装着者が自分一人で簡単にロボットスーツを着脱することができる機構の開発を行った。従来までのロボットスーツの装着は体にモールドを固定することによって行われる。ロボットスーツHAL-3では、腰、左右の大腿・下腿・足底の計7箇所にモールドがある。HAL-3での装着作業では、HAL-3を座位の姿勢にして、HALのモールドに装着者の体を入れて装着を行っていた。しかし、HALの骨格が全ての関節において一体となっているため、ほぼ同時に7箇所のモールドに体を入れなければならないが、健常者であっても一人で装着するには非常に手間をかけなければならなかった。そこで本研究ではHALの分離型構造を考えた。

#### d) シェルカバーの開発

ロボットスーツは一般ユーザが身につけるため、見た目の印象をよくすることは極めて重要である。そこで、パワーユニット、バッテ

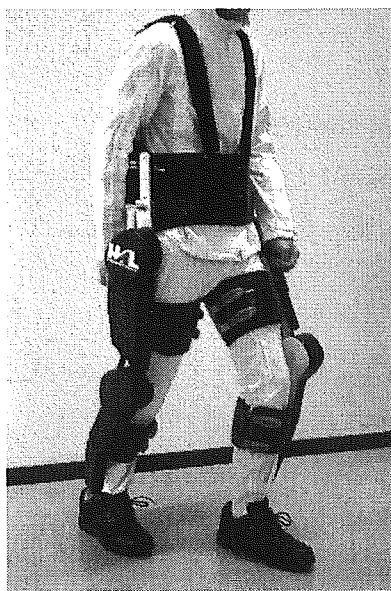


図2 開発した下半身用ロボットスーツHAL

リー、電子基板、無数のケーブル等を覆うカ

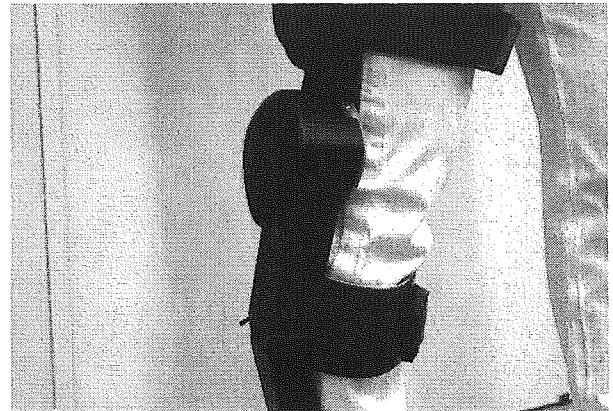


図3 小型パワーユニット

バーの開発を行った。カバーはラピッドプロトタイプによって製作した。

## C. 研究結果

以上の開発項目によって製作されたロボットスーツの外観を図2に示す。各開発項目の成果を以下に述べる。

### 1. ロボットスーツ用パワーユニット

従来の実用試作機（HAL-3）と比べ、厚さおよび重量を大幅に減少させることに成功し、さらに出力も向上させることができた。図3にパワーユニットの外観を示す。パワーユニット内部には周辺温度・電流量をモニタし正常動作を監視する機能、および異常状態になった場合、異常レベルを通知するアラート機能、パ

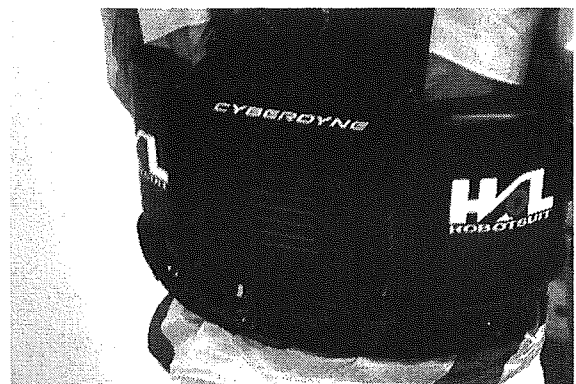


図4 メインコンピュータ

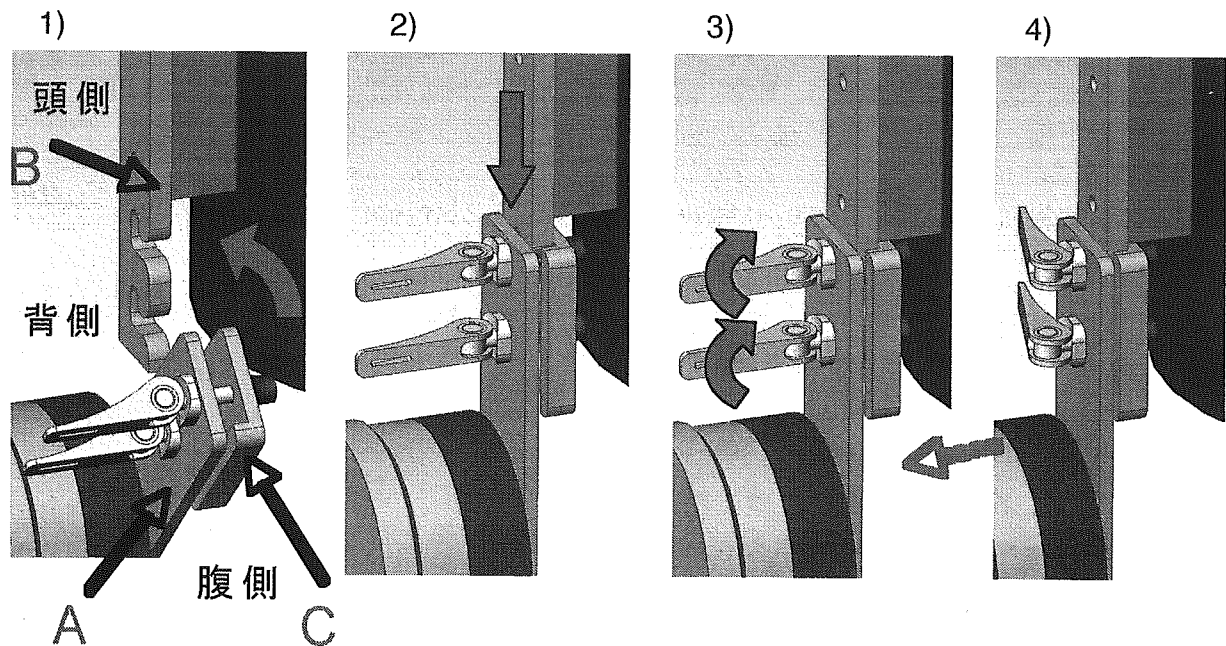


図5 カム機構を用いた脱着機構

ワーユニットの一時停止機能を搭載し、安全性を向上させた。

## 2. 電装系の分散化

ロボットスーツの計測制御システムを分散化するにあたり、まず、関節部位ごとに計測制御システムのユニット化を行った。汎用性を高めるためユニットのI/Oポートの規格化および各ユニット間および各ユニットとメインコンピュータを安全に効率よく通信するための通信プロトコルの規格化を行った。さらに、各ユニットを関節フレームに配置することを可能にするため、電子回路部品の小型・集積化、およびボード基盤の多層化を行った。これにより、計測制御系メインコントローラ等を小型化することができた。HAL-3で使用していたバックパックを用いない構造となった。図4にメインコンピュータの外観を示す。

## 3. 装着機構の開発

要求仕様として容易に着脱が行なえることを挙げる。これまでに磁石を用いた着脱が試みられたが、固定する力が十分でなく、簡便性にも問題があった。そこで本研究では、カム機構を用いた着脱方法に着目する。正面から見た着

脱機構の右部分の設計モデルを図3に示す。カム機構を開閉することで発生する締め付け力を利用し、固定する。着脱の手順は以下になる。

- 1) HALの股関節を伸展させ、腰部分のパーツBと脚部分のパーツA, Cを結合する。
- 2) 腰部分を下にスライドする。
- 3) 2つのカム機構を閉じる。
- 4) パーツA, CでパーツBを挟み込み固定する。

パーツBは腹側から頭側にかけてL字の切り欠きについては、万が一着脱機構の固定が外れた場合でも、HALの腰と両足が即座に分離しないようにする安全性を考慮に入れた設計となっている。頭側の切り欠きは歩行時の着地衝撃を考慮している。

着脱機構は片側3つのパーツで構成されているが、カム機構による締め付けが十分である場合、パーツA, B, Cは一体成形された部品として考えることができるため、本稿ではそのように応力解析を行なった。また、着脱機構は左右1組であるが、左右にかかる重量は均等であるものとし、右側部分のみ応力解析を行なった。着脱

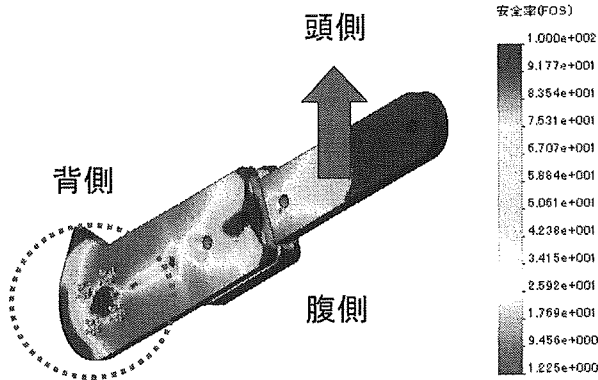


図6 解析結果（安全率）

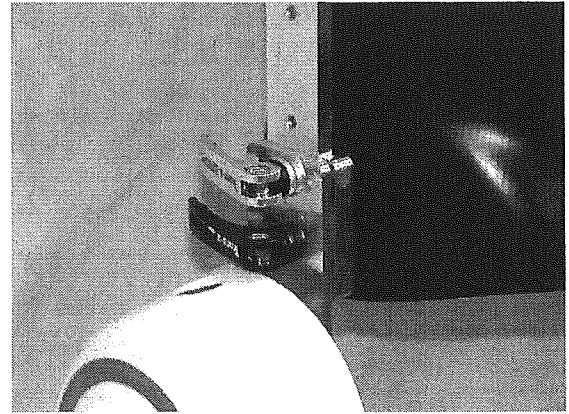


図7 製作した脱着機構

機構に荷重がかかる場面として、装着者が人を抱きかかえる介護動作を想定した。被介護者の体重を約43kgとする。HALの上半身の重量が約7kgであることから、装着者の体重は自身が支えているものとする。着脱機構には片側25kgの荷重がかかる。地面に対して荷重は垂直方向と水平方向に分けられ、姿勢によってその大きさは変化する。

垂直方向の荷重が最大となるのは、人とHALが直立状態の時である。この時、装着者の体重はHALにかからないため、着脱機構には鉛直下向きに片側25kgの荷重がかかる。有限要素法解析の結果、応力は着脱機構において部材が最も薄い股関節付近のパーツに集中していたが、最大応力は $1.825e+007$  [N/m<sup>2</sup>]で、最小安全率は28であった。安全率が低すぎると部材が破損される危険性が増し、安全率が高すぎると部材の重量や製作コストが増すため好ましくないと言える。一般的にエレベータのワイヤーなど、物を吊るす部材の安全率は6以上であることから、垂直方向に関しては十分な強度を有していることが確認された。

水平方向の荷重は、上体を前傾させるにつれて大きくなる。本稿では、直立状態を0度とした時に60度前傾した姿勢で解析を行なう。60度という値は、人を抱きかかえる際の最大角度として妥当と考え、設定した。装着者として、身長180 [cm]、体重80[kg]の人を想定する。上体の

重量を50[kg]、身長半分が上体の長さで更に重心をその中点とし、股関節から重心までの距離は0.45 [m]と仮定する。股関節から荷重のかかる着脱機構までの距離は0.175[m]である。装着者が前傾姿勢を維持している場合、荷重によって生じる股関節まわりのトルクとHALのアシストトルクが等しから、着脱機構にかかるアシスト力は、1090[N]となる。解析結果を図6に示す。図中の矢印はアシスト力の向きを表しており、破線の丸部分は拘束部分にあたるHALの股関節側である。

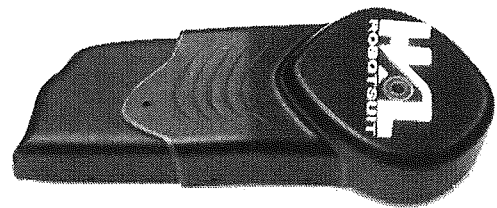


図8 大腿部のカバー

安全率が低い箇所は応力が集中していることを表す。HALの股関節付近の最小安全率は1.2であった。通常、安全率が1未満で部材に破損が生じてくる。この解析結果より、装着者が上体の重量を全てHALにかけるという通常より厳しい条件においても着脱機構が破損しないことが確



認められた。前節の解析結果とあわせて、想定する状況においては十分な強度を有していることがわかり、この着脱機構を実際に製作した。図7に正面から見た着脱機構の右部分を示す。

#### 4. シェルカバーの開発

本研究開発では、ラピッドプロトタイプによる光造形技術によって製作を行う方法を採用した。この方法では、CADで簡単に設計が行え、ロボットスーツのカバー部品の場合、24時間以内で製作することができる。現在所有しているラピッドプロトタイプでは材質がABSかポリカーボネードであり、厚さ2～3mmでロボットスーツの仕様に十分耐えられる剛性でカバーが製作できる。製作した大腿部のカバーを図8に示す。

#### D. 考察

本研究では開発項目、1) 小型パワーユニットの開発、2) 電装系の分散化、3) 装着機能の開発、4) シェルカバーの開発を実施し、運動支援用の下半身ロボットスーツを開発した。従来までに開発されたロボットスーツに比べ、軽量で装着者に扱いやすく、見た目の印象も良いロボットスーツに仕上げることが出来た。本研究で開発されたロボットスーツは次年度以降の研究開発基盤となるものである。今後はこのロボットスーツを用いて、実際に運動機能障害者の運動支援を実施する。

#### E. 結論

本研究では 当該年度は次年度以降の共通研究開発基盤となるロボットスーツの開発を行った。主に、小型パワーユニットの開発、電装系の分散化、装着機能の開発、シェルカバーの開発を実施し、世界最新鋭のロボットスーツを完成させた。

#### F. 健康危険情報

特記事項なし。

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

- Toda, Hideki; Sankai, Yoshiyuki, Three-dimensional link dynamics simulator based on N-single-particle movement, Advanced Robotics, Vol. 19, No 9, pp. 977-993, 2005
- H.Kawamoto, Y Sankai, Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL, Advanced Robotics, vol. 19, no.7,pp.717-734, 2005
- S. Lee, Y. Sankai, Virtual Impedance Adjustment inUnconstrained Motion for Exoskeletal Robot Assisting Lower Limb, Advanced Robotics, vol. 19, no.7, pp.773-795, 2005
- Ryo Kosaka, Yoshiyuki Sankai, Ryoichi Takiya, Takashi Yamane, TatsuoTsutsui, Estimation of Physiologic Strategy based on MathematicalModel for assisting and substituting Cardiac Functions for RoboticArtificial Heart, Advanced Robotics, vol.19, no.7, pp.735-750, 2005
- 李秀雄, 山海嘉之, 装着型下肢用パワーアシストシステムによる振り運動での仮想インピーダンス調整に関する研究, 日本機械学会誌C編, 71巻, 705号, pp1686-1695, 2005
- Hayashi T., Kawamoto H. and Sankai Y., Control Method of Robot Suit HAL working as Operator's Muscle using Biological and Dynamical Information, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), CD-ROM,pp. 3455-3460, 2005
- Kim Seong Hoon and Sankai Yoshiyuki, Task Generation for Humanoid Robot Walking using Human Motion by Phase Sequence, Proc. of 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2005), CD-ROM, pp.524-530, 2005
- Kim Seong Hoon and Sankai Yoshiyuki, Stair Climbing Task of Humanoid Robot by Phase Composition and Phase Sequence, Proc. of 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2005), CD-ROM, pp.531-536, 2005
- Suzuki K., Kawamura Y., Hayashi T., Sakurai T., Hasegawa Y., Sankai Y., Intention-Based Walking Support for Paraplegia Patient, Proc. of Int'l Conf. onSystems, Man and Cybernetics (SMC2005), CD-ROM, pp.2707-2713, 2005

##### 2. 学会発表

- 山海嘉之, 河本浩明, “サイバニクス技術が生み出す人間と機械の一体化・共依存システム:サイバーノイド”, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演予稿集(SI2005), pp.599-600, 2005
- 河本浩明, 山海嘉之, “人間とロボットの相互作用力に着目した身体動作補助のためのパワーアシスト法”, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演予稿集(SI2005), pp.601-602, 2005
- 林 知広, 山海嘉之, “人の生体力学特性を反映したロボットスーツHALによる適応的アシスト法”, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演予稿集(SI2005), pp.603-604, 2005
- 鈴木健太, 桜井尊, 長谷川泰久, 山海嘉之, “ロボットスーツHALを用いた下半身不随患者の歩行支援に関する研究”, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演予稿集(SI2005), pp.605-606, 2005
- 川畑共良, 桜井尊, 山海嘉之: “ロボットスーツHALのための設計シミュレーション環境とテストユニットへの適用”, 日本機械学会第18回計算力学講演会講演論文集, pp.713-714, 2005

## H. 知的財産権の出願・登録状況

### 1. 特許取得

なし。

### 2. 実用新案登録

なし。

### 3. その他

なし。

## II. 分担研究報告

## 身体性を考慮したロボットスーツHALのデザインに関する研究

分担研究者 五十嵐 浩也 筑波大学大学院人間総合研究科助教授

### 研究要旨

本研究では人間とロボットが一体となるために必要なロボットスーツのデザインを人間工学やプロダクトデザインの立場から検討することを目的とした。ロボットスーツのデザインで考慮しなければならないファクター、(a) コンパクト化、(b) 分散化、(c) 装着感、(d) 脱着性を挙げ、その利点・解決の方法について述べた。

### A. 研究目的

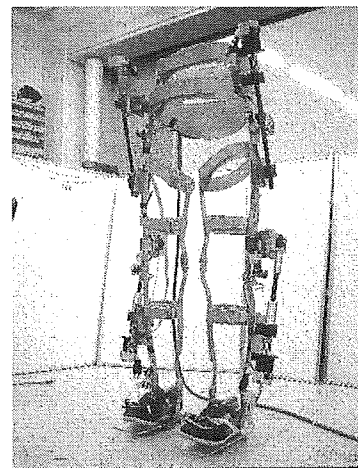
ロボットスーツは人間の身体能力を補助、強化を行う装着型のロボットである。人間が機器を身につけると言うことから、その大きさには制約が伴う。また、健常者が生活するある程度の生活環境でのロボットスーツによる運動支援を考えると、より人間の形態に近づける必要がある。したがって、他のロボットと比べロボットスーツの場合、さまざまな要求仕様を考慮して設計しなければならない。これまでに開発した実験用試作機では、歩行支援や立ち座り支援など運動制御方法に主眼がおかれ開発が行われてきた。そこで、本研究では人間とロボットが一体となるために必要なロボットスーツのデザインを人間工学やプロダクトデザインの立場から検討することを目的とする。

### B. 研究方法

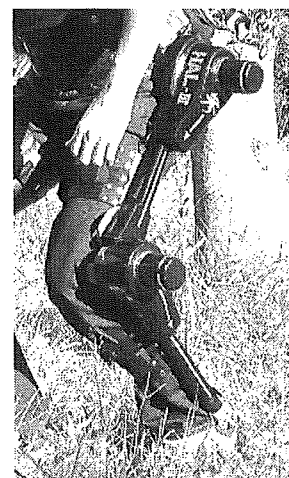
本研究では、ロボットスーツのデザインで考慮しなければならないファクターを掲げ、これに基づいて、その解決の方法を提案しながら議論を展開することとした。最も注意を払うべき点は、装着者の立場になって、どのように設計すれば装着者は利用しやすいかといった実用化に向けた課題として中心に据えることであると考えた。そして、これまでに開発されてきたロボットスーツの問題点を考慮しつつ検討を進めた。

### C. 研究結果

#### (a)コンパクト化



(a) HAL-1



(b) HAL-3

図1 ロボットスーツHAL-1とHAL-3の外観

ロボットスーツの基本構造は外骨格であり、装着者のボディラインに沿った構造である必要がある。特に注意を払うべき点は、突出度である。これまでに開発が行われてきたロボットスーツHAL-1、HAL-3ではそれぞれパワーユニットの構造は異なるが著しく身体外部に突出する構造となっていた（図1参照）。HAL-1ではボールねじ機構を採用したことにより、股関節、膝関節が屈曲すると、ボールねじが矢上面に突出してしまい、座り動作に著しい制限が生じる問題があった。また、HAL-3ではパワーユニットの機構特性上横側へ突出してしまう構造となってしまう、扉の枠や椅子の手すりにパワーユニット部が接触してしまう問題が頻繁に起こった。可能な限り突出部を減らすことが理想であるが、基本的には装着者の肩幅よりも突出しないことが一つの目安になる。その他、コンパクト化にはロボットスーツの重量も考慮しなければならない。パワーユニット、バッテリーの重量は支援するパワーによるため、アプリケーションの仕様に応じた設計が必要となる。

### (b)分散化

集中型の制御システムは電装系の配置場所を大きく占有し、コンパクト化を困難にするばかりではなく、ロボットスーツの重量配分の偏りによる動作支援の非効率化、あるいは配線の複雑化の原因にもなる。そこで、モータドライバ、バッテリー、制御コンピュータ等の電装系

を機構的にも機能的にも分散型にすることによって上記の問題点を解決する。この分散化はロボットスーツの開発や支援の上でも重要である。制御コンピュータの機能を分散させることによりメインコンピュータの負荷を軽減することができたり、また、分散化したパーツに対して、重量があるパーツなどを外骨格の大幹寄りに配置することによって動作支援の効率化を図ることも可能である。

### (c)装着感

ロボットスーツが提供するパワーを装着者に的確に伝えるため、ロボットスーツのパワーを直接伝達する部分であるモールドを人間にある程度強く絞める必要がある。そのため、装着者はある程度の圧迫感（束縛感）を感じ、長時間の装着によって疲労も生じる可能性がある。可能な限り装着者に圧迫感を与えないため、モールドのインナーに工夫をする必要がある。実験試作機（HAL-3）はABS製のシェルの内側にスポンジを取り付けて装着していた。ある程度の効果はあるが、時間が立つにつれて、圧迫感、疲労感を生じる装着者が多かった。この対策として、スキーブーツ等で使用されている流体パッドやフォーミング剤による成型が考えられる。

### (d)着脱性

ロボットスーツによる運動支援の性能がどんなに優れていても、着脱に手間がかかってしまうような機構では実用化は極めて厳しい。実用

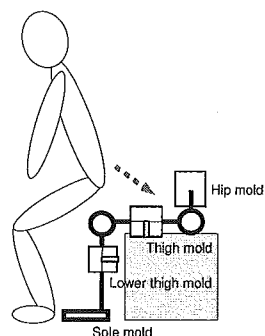


図2 HAL-3の装着方法

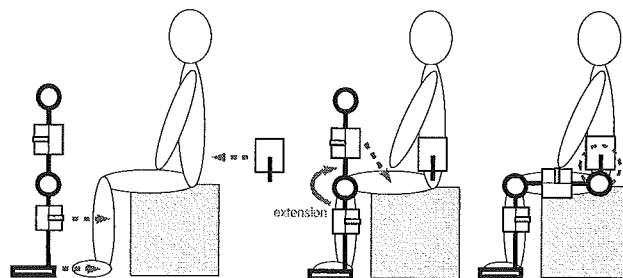


図3 新たに提案するHALの装着方法

化を考慮するのであれば、装着者が自分一人で簡単にロボットスーツを着脱する必要がある。ロボットスーツの装着は体にモールドを固定することによって行われる。ロボットスーツHAL-3では、腰、左右の大腿・下腿・足底の計7箇所にもールドがある。HAL-3での装着作業では、図2に示すようなHAL-3を座位の姿勢にして、HALのモールドに装着者の体を入れて装着を行っていた。しかし、HALの骨格が全ての関節において一体となっているため、ほぼ同時に7箇所のモールドに体を入れなければならない、健常者であっても一人で装着するには非常に手間をかけなければならなかった。そこで、HALの分離型構造を考える。分離型構造により部分的な装着が実現され、上述の問題点を解決することが可能であると考えられる。更に、分離型構造では部分的にHALを外すことが可能となる。例えば、着替えを行なう場合、一体型構造ではHALを全て外さなければならないが、分離型構造であれば必要な箇所だけ外せばよい。

分離箇所については、膝や肩などいくつか考えられるが、現在の所、腰部と左右の脚部分の3ピースでの構成を考えている。この分離型構造によって図3に示される装着手順が考えられる。

- 1) 分離された腰部と両脚部を装着者が自分の体に引き寄せ、腰モールド及び左右の下腿モールド・足底モールドを装着する。
- 2) 装着者HALの膝関節を屈曲させ、大腿モールドを装着者の大腿に引き寄せ、左右の大腿モールドを装着する。
- 3) 腰モールドとHALの股関節部分を接続する。

以上のような装着方法が実現することで一カ所ずつモールドを固定することが可能となり、特に装着するのが困難であった腰モールドについ

てはHALから分離することにより単体で装着が行えるため、簡単な装着が見込まれる。

#### (d) シェルカバー

パワーユニット、バッテリー、電子基板、無数のケーブル等が露出している状態は、接触や衝突した場合、機械的な故障を容易に引き起こす可能性がある。また、日常生活での使用中、電子回路等に水分がかかりショートする危険も考えられる。さらに、外観を著しくそこね、一般装着者の印象を悪化させる恐れもある。従って、シェルカバーで外骨格構造を覆うことは実用化の上で重要な意味をもつ。シェルカバーの設計する上で重要なことは材質の選択であり、軽くて剛性が高い材質のものを選ぶ必要がある。ただし、開発者が設計し専門業者に製作を依頼する過程は時間の浪費が著しい。そこで本研究開発では、ラピッドプロトタイプによる光造形技術によって製作を行う方法を考えた。この方法では、CADで簡単に設計が行え、ロボットスーツのカバー部品の場合、製作時間は24時間以内ですませることが出来る。現在所有しているラピッドプロトタイプでは材質がABSかポリカーボネードであり、厚さ2〜3mmでロボットスーツの仕様に十分耐えられる剛性でカバーが製作できる。現在開発を進めている。

## D. 研究結果

ロボットスーツのデザインで考慮しなければならないファクター、(a) コンパクト化、(b) 分散化、(c) 装着感、(d) 脱着性を掲げ、その利点・解決の方法を述べた。本稿では機能的な部分しか述べなかったが、これらのファクターをデザインする上で共通して考慮しなければならない点は安全性である。特に、支援を実施する範囲の中で破壊や破損などの強度的な問題に十分な注意を払わなければならない。この問題に対して現在、応力解析による設計・解析シミュレーション環境による開発の提案を行っている。これは、これは、設計、解

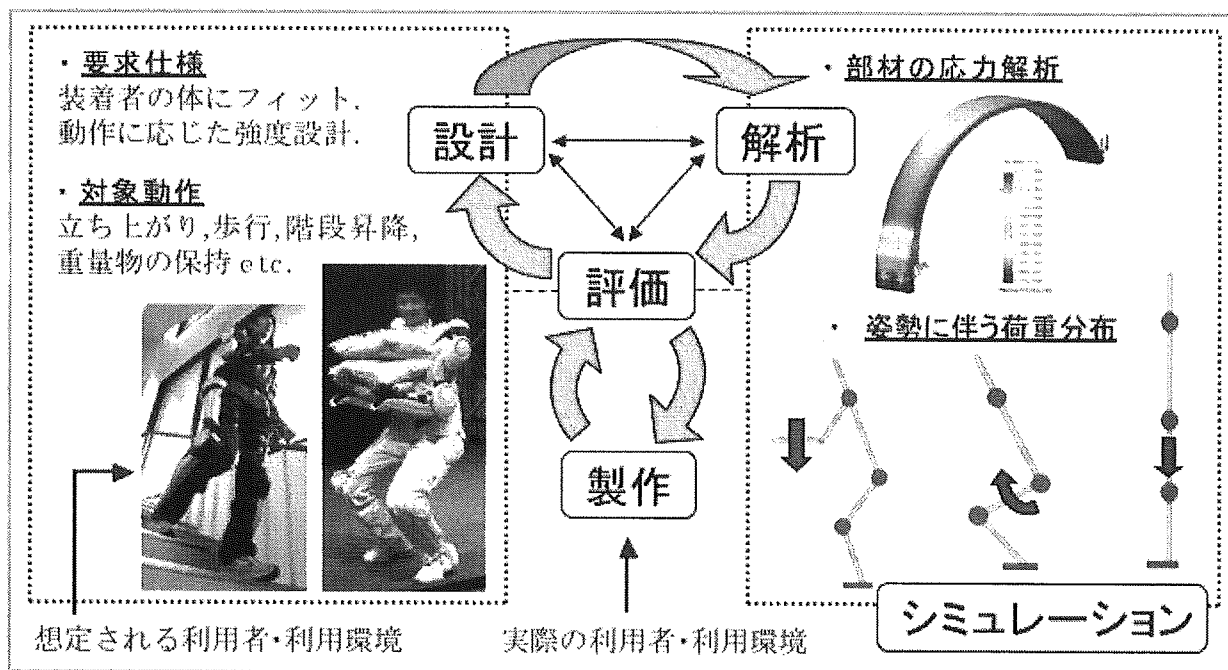


図5 設計・解析シミュレーション環境

析・シミュレーション，評価，製作によって構成される。設計においては，まず装着者や利用環境を想定し，必要と考えられるおおよその強度を見積もり，3DCADを用いて行なう。次に有限要素法を用いて応力解析を行なう。デザインされたロボットスーツあるいはそのパーツは，利用用途や利用環境によってそのデザイン構造が大きく変化することであり，それぞれの構造に応じたシミュレーションは重要である。その後，設計・解析が目的にとって妥当であるかを評価し，必要であれば再設計を行なう。これを繰り返すことで，設計・解析に基づいてデザインが行われる。製作後は，実際の利用者・利用環境に適用し評価を行なう。提案する設計・解析シミュレーション環境の概要図を図5に示す。

利点・解決の方法を述べた。今後はこれらのデザインファクターを基にロボットスーツの開発を実施する。

## E. 結論

本研究では人間とロボットが一体となるために必要なロボットスーツのデザインを人間工学やプロダクトデザインの立場から検討することを目的とした。ロボットスーツのデザインで考慮しなければならないファクターを掲げ、その

## ロボットスーツHALを用いた診断インターフェースに関する研究

分担研究者 葛岡 英明 筑波大学大学院システム情報工学研究科助教授

### 研究要旨

本研究では、ロボットスーツを用いて装着者の運動情報および生体情報をモニタリングし、医師または理学療法士にリアルタイムで情報提示することによって、運動機能の客観的評価を可能とする診断インターフェースの開発を目的とする。ソケット通信、マルチスレッド、DUPを導入することで、各センサ情報をリアルタイムで送信することを可能にし、GUIで表示・操作環境により、ユーザにとって見やすく操作しやすいインタフェースを構築することができた。

### A. 研究目的

ロボットスーツは装着者の運動機能の補助・増幅・拡張を行うため、さまざまなセンサが取り付けられている。ロボットスーツと装着者は一体となっていることからセンサから得られ情報は装着者の運動情報や生体情報を提示するものである。これらの情報を統合的に検出・解析することによって装着者の身体状態や生理状態を把握し、効果的で効率的な運動補助への活用や、あるいは、医師や理学療法士が装着者の運動機能を診断する新しい診断システムとして活用することが期待できる。本研究では、以上のようなロボットスーツのセンサフェュージョンシステムの構築の第一歩として、ロボットスーツを用いて装着者の運動情報および生体情報をモニタリングし、医師または理学療法士にリアルタイムで情報提示することによって、運動機能の客観的評価を可能とする診断インターフェースの開発を目的とする。

### B. 研究方法

診断インターフェースの構築にあたり、以下の設計内容に基づいて開発を行った。

#### 1. センサデータの取得

取得するセンサデータを以下に示す。これらの情報からロボットスーツ装着者の運動状態を把握することが出来る。

- ・ 関節角度（股関節、膝関節、足関節）
- ・ 関節角加速度（股関節、膝関節、足関節）
- ・ 上体角速度
- ・ 床反力（踵、拇指級）
- ・ 各フレームに作用する力（大腿フレーム、下腿フレーム）
- ・ 生体電位信号（股関節、膝関節、足関節の心筋、屈筋）
- ・ パワーユニットの電流値（股関節、膝関節）

#### 2. 通信方法

以下の機能を用いてデータの通信を実施した。

i)ソケット通信：ロボットスーツの制御周期に負担をかけることなく、リアルタイムでセンサ情報のモニタリングを可能にするため、ソケットを用いてセンサ情報を外部コンピュータに渡し、表示・解析を外部コンピュータに行わせるシステムを構築した。

ii)マルチスレッド：データ通信を実施する際、受信側はデータが送られてくるまで待機する命令が含まれている。この為、ロボットスーツの制御中に、この命令が含まれている場合、制御周期がずれる可能性が発生する。この問題を解決するため、ロボットスーツの制御と通信制御を分離して、それぞれのプロセスが独立して実行するマルチスレッド方式を採用した。マルチ



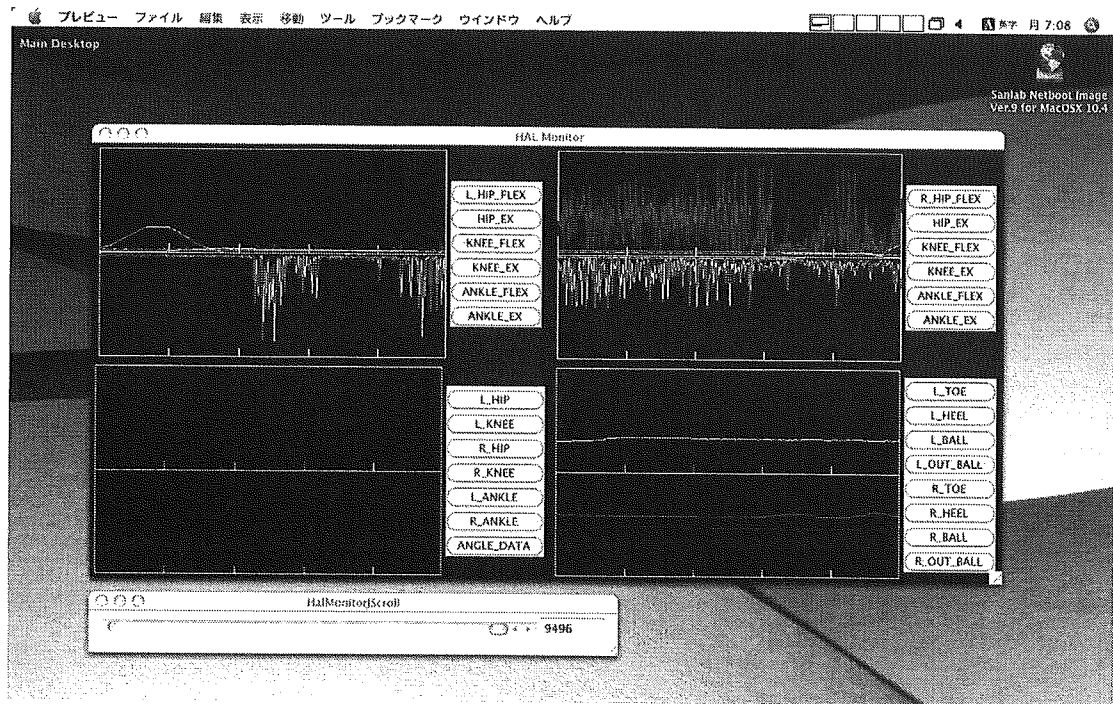


図1 開発したロボットスーツ用インターフェース

スレッドは、メモリ空間を共有することが可能であり、スレッド間のデータ通信が容易に実施することができるという利点がある。

iii) UDP：ロボットスーツよりセンサ情報を含むパケットを送信する方法として、UDP方式を採用した。パケットごとに送信，応答確認が行われるTCPとは異なり，UDPは，データが相手に届いたかは確認しない。送信側はただデータを送り出し，受信側は届いたデータだけを拾う。パケットの損失やデータ順序に関しては何の補償もしないかわりに応答確認を行わないためネットワーク上での転送時間に制限されないという特徴がある。TCPを用いた通信と比較した場合，転送停止時間も大きくなく，また通常時のデータ受信時間も短い。

#### (c) 開発環境

ロボットスーツ用インターフェースはJ A V Aによって記述されている。これによりOSに依存せずに扱うことを可能としている。

### C. 実験結果

図1に開発したインターフェースを示す。表示されるセンサ情報は4つのブロックに分類されている。まず、左右は左脚、右脚を示している。上部は関節角度と生体電位信号、下部は床反力、フレームにかかる力、モータ電流値、加速度を示している。

各情報はリアルタイムに時系列でプロットされる。特定の情報のみをモニターしたい場合は、各ブロックの右側のボタンを操作することによって、各情報の表示・非表示を行うことができる。また、左下にあるスライダーを操作することによって実施した試行の過去の時系列情報をその場で把握することができる。

モニタリングシステムの応答遅延時間を計測した結果を述べる。応答遅延時間とは、あるデータを送信した時、それに応じたデータが返信されてくるまでの時間のことで、通信によって生じる時間遅れを指す。インターネットプロトコル上で動作するICMPのpingコマンドでRTT (Round Trip Time)という項目で簡単に確認出来る。応答遅延時間は通信の往復にかかる時間であり、制御で言うむだ時間というのは片道通信

時間である。往復にかかる時間は、片道にかかる時間の2倍であると単純に仮定をすると、むだ時間はRTTの約半分の時間である。

今回は、UDPを用いたHALの制御プログラム上に、この応答遅延時間を計測するアルゴリズムを実装し、これを計測した。通信方法は有線LANと無線LANの両方で行った(Fig4)。実験の結果は、無線では標本数5000、平均値11.50msec、標準偏差は8.60msecであった。標準偏差がやや大きな結果となった理由は全標本の99.25%は17msec以下であったが、残りの0.75%のデータの平均値は106.96msecとなっていたからである。この実験を有線で行なった結果は、標本数5000、平均値1.07msec、標準偏差3.74msecであった。遅延時間に10倍程の差があることから通信の遅れは無線LAN特有のようで、有線ではほとんど起こらないことがわかった。

#### D. 考察

各センサ情報をリアルタイムで送信することを可能にし、GUIで表示・操作することができると、ユーザにとって見やすく操作しやすいインタフェースを構築することができた。今後は動画、シミュレータを実装し、センサ情報では直接知ることが出来ない装着者の情報を提供するインタフェースを構築する予定である。

#### E. 結論

本研究では、ロボットスーツを用いて装着者の運動情報および生体情報をモニタリングし、医師または理学療法士にリアルタイムで情報提示するインターフェースの開発を行った。ロボットスーツの制御に負担をかけずに各センサ情報をリアルタイムで送信することを可能にし、見やすく操作しやすいインタフェースを構築することができた。

## ロボットスーツHALの自律的制御機構に関する研究

分担研究者 長谷川 泰久 筑波大学大学院システム情報工学研究科講師

### 研究要旨

本研究ではロボットスーツの自律動作による歩行，立ち上がり，階段上りにおける下肢のパワーアシスト動作の実現について述べる．ロボットスーツに下肢動作を実現させるため，人間の動作解析により下肢動作をいくつかの基本動作となるPhaseに分解し，それらを遷移させながら実行することで下肢動作を行うPhase Sequence手法を用いた．各動作に対して健常者によるパワーアシスト実験を行い，各Phaseが適当に遷移したこと，健常者の筋活動量が減少していることから，本手法によりロボットスーツが自律的に生成した下肢動作によるパワーアシストの有効性を確認した．

### A. 研究目的

外骨格型ロボットの大きな特徴として外骨格型ロボットは装着者と一体となって動作する点が挙げられる．装着者の動作をアシストするため，外骨格型ロボットの構造は人間の関節構造に近い構造でできている．ここで外骨格型ロボットが自律的に動くときどうなるかを考える．外骨格型ロボット自らの動作によって，装着者は何も動作しない限り，外骨格型ロボット的作用を受けて外骨格型ロボットと同じ動作をすることになる．このとき，もし外骨格型ロボットが自律的に人間のような動作を行うことが可能であれば，それは人間の運動機能を補う働きをしてくれることになる．このような外骨格型ロボットは，筋自身は衰弱も損傷もしていないが，運動中枢や運動指令伝達経路の損傷によって下肢を動作させることができない麻痺を持った患者の下肢動作支援に有効であると考えられる．これは前述の筋力を増幅するパワーアシスト法に対して，運動機能を外骨格型ロボットが補完するパワーアシスト法といえる．そこで，本章ではロボットスーツの自律的動作による下肢動作のパワーアシスト法について述べる．

ロボットスーツの動作そのものは自律動作であるが，その動作はあくまで人間の動作のパワーアシストを目的としている．そのため人間の運動特性を考慮した動作を生成する必要があ

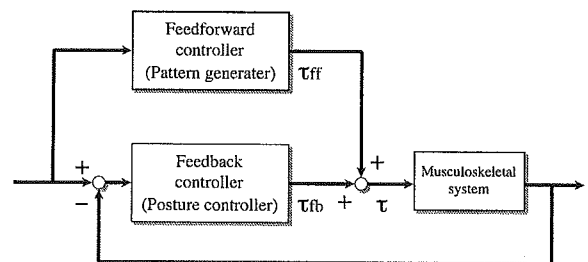


図1 Motion control system based on human motion property

る．ここで，歩行や立ち上がりなどにおける人間の下肢動作の運動特性を制御の視点で見ると図1のような構成として考えられる．下肢動作はフィードフォワード制御とフィードバック制御の2自由度系から構成され，フィードフォワード制御は予め決められた動作パターンを生成するブロックであり，フィードバック制御は姿勢安定のための姿勢制御ブロックである．下肢動作をパワーアシストする上で姿勢制御としてのパワーアシストも重要な要素であるが，本研究ではフィードフォワード制御ブロックである動作パターンに対してパワーアシストを行う．以降，下肢動作に対する自律的パワーアシストとはフィードフォワード制御ブロックであ

図1 Motion control system based on human motion property

る動作パターンに対するパワーアシストとする。

さて、自律的動作による下肢動作のパワーアシストを行うにあたって、ロボットスーツが健常者の下肢動作をできるだけ忠実に再現するよう各関節のトルクを生成する必要がある。本研究ではロボットスーツの自律的な動作生成において、これまでヒューマノイドロボットの人間の動作生成方法として開発されてきたPhase Sequence法を利用する。Phase Sequence法とは、歩行、立ち上がりといった一連の運動(Task)を人間の動作解析により各基本動作(Phase)に分離し、それらを遷移させながら実行することによって人間的な動作生成を行う方法である。

Phaseの分離基準は動作目的によって様々である。健常者の一連の動作(Task)では、環境や動作目的に応じて筋の収縮特性を使い分けながら複数の関節トルクの生成方法によって一連の動作が行なわれている。パワーアシスト動作は、健常者の関節トルク生成方法に合致するべきであると考えた。

そこで、本研究では、動作解析により、関節トルクの生成特性に基づいたPhase Sequenceによる自律的パワーアシスト動作生成法を提案し、歩行動作において本手法を適応しその有効性を検討する。

## B. 研究方法

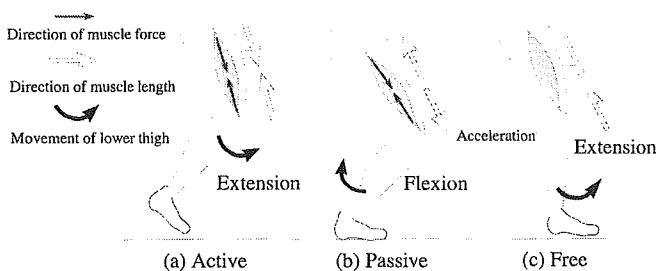


図2 Joint torque pattern

## 1. 人間の関節トルクの生成方法

歩行や立ち上がりといった一連の動作(Task)における人間の関節トルクの生成方法は、筋活動の様式(モード)によっていくつかの種類に分類される。HALによるパワーアシストを行う場合、装着者の力の生成方法に応じたパワーアシストを行うことは装着者へ適切なアシストを行うために極めて重要な条件である。日常動作で主に用いられる筋活動の様式を膝関節の伸展筋(大腿直筋)を例に図2に示す。図2(a)は、筋張力の方向と筋長の変化の方向が同じ場合、その力の生成方法は能動的に働いており、アクティブモードと呼ぶ。図2(b)は、筋張力の方向と筋長の変化の方向が反対の場合、バネ・ダンパ系のように受動的な力作用が働き、パッシブモードとなる。図2(c)は、筋に張力は発生していないが、慣性力により筋長が変化する場合、力が働かないフリージョイントのような働きをしており、フリーモードと呼ぶ。これらをふまえ、人間と一体となって自律的なパワーアシストを行う場合、装着者の関節トルクの生成方法に応じたパワーアシストが必要であると考えられる。

## 2. パワーアシスト動作生成のためのPhase分解

歩行、椅子からの立ち上がり、階段上り動作に関して、健常者の動作解析から、Phase分解を行い、各Phaseに対して三つのモードのいずれかを割り当てる。三つのモードの分類は、各関節の屈筋、伸筋の筋電位および関節角度の挙動に着目して分類する。

### 2.1 歩行動作

図3に歩行時の右脚の股関節、膝関節の角度および屈筋、伸筋の筋電位、左右足の前後の床反力を示す。各関節角度は直立姿勢時の角度を0 [rad]とする。歩行動作を3つのPhaseに分解した。

まず、Phase1は脚を前方へ振り出す遊脚期であり、股関節は屈曲され、屈筋に大きな筋電位が発生しているのがわかる。また、膝関節は屈曲から伸展へ移行するが、屈筋、伸筋での筋電位