

## 月探査ヒューマノイドロボット基盤研究

東京大学 情報理工学系研究科  
中村仁彦

### a) 研究開発の意義及び概要

#### ① 研究開発の意義

ヒューマノイドロボットのロボットとしての特徴は人間との形態の類似性にある。これによって人間の生活空間を変えずにロボットを導入することが可能になる。また人間の動作をまねて基本動作をつくることによって、人間にとって予測しやすい安心・安全なロボットとすることができる。ヒューマノイドロボットが、月面探査の初期段階における無人探査技術として適している理由も、まさにこの身体の形態類似性から生まれるものであり、以下のように説明できる。

(1) わが国が独自技術として保有していない生命維持装置などの宇宙特有の人間に対する基幹的な安心・安全技術を長期的に開発できる。これによって宇宙開発のための技術開発の立ち上げを早く行うことができ、初期コストを下げる効果もある。

(2) 将来の有人探査時に人間の生活空間ともなる月面基地の建設にヒューマノイドロボットの身体の形態は適している。建設やメンテナンスに人間とロボットで同一の手順を採用できるからである。このとき人間はヒューマノイドロボットが作った生活空間に入っていき、地上でヒューマノイドロボットが人間の生活空間に入ってくるのとは逆になっている。



図1 無人活動から有人活動へ連続的な宇宙開発が行える。宇宙開発の初期コストを下げることができる。

- (3) 地球上から科学者がロボットを操作して無人探査や実験をおこなう際に、身体の形態の類似性は直感に訴えやすく、科学的な感性や知覚を妨げない優れた臨場感を人間に作り出すことができる。また高校生向けの公開授業など、一般国民に月面探査を「実」体験する機会をつくることで、宇宙開発に対して広く国民の理解を得ることができる。

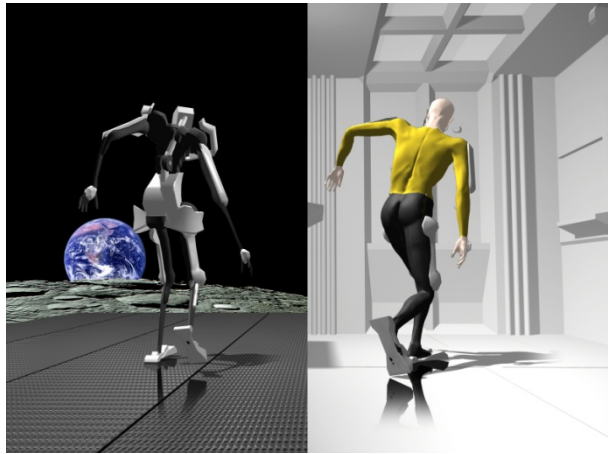


図2 科学者の感性や知覚をさまたげない臨場感を大切にした無人月探査を可能にする。

- (4) 将来の有人探査時において、人間の探査活動を支援するための技術としてヒューマノイドロボットによる支援が考えられる。ここでは人間と共存する多くのヒューマノイドロボットに指示を出しながら探査活動や実験を行うことになる。同じ空間に存在するうえで、ロボットの運動を予測しやすく作ることによる安心・安全技術が役立つ。またロボットに人間の運動を予測する機能を持たせることで、人間の意図をロボットに伝えるコミュニケーションが容易になる。これらの運動予測技術はおなじ技術を双方向に構築することによって可能になる。

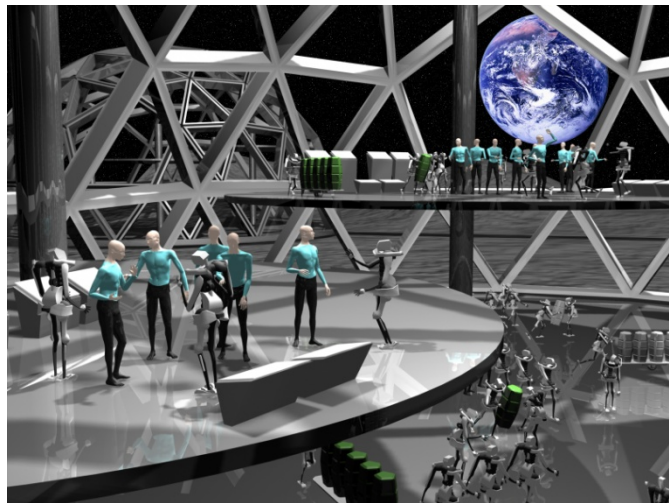


図3 有人活動時における人間支援技術としてわが国の宇宙開発の長期的な国際競争力となる。

宇宙開発計画の一つに、わが国の科学技術の特徴の一つであるヒューマノイドロボット技術を置き、これを先導的に研究開発することによって宇宙開発におけるわが国の長期的な国際競争力をつけることができる。

アポロ計画が生み出した科学技術が、その後にスピナウトした科学者や技術者によってさまざまな民生機器のなかに生かされて人間の生活にイノベーションを起こしたことはよく知られている。月面探査のために開発されるヒューマノイドロボット技術は、人間や人間の生活と親和性に高いものであり、これから世界が直面する少子高齢化社会における生活支援のためのロボット技術として大きな波及効果がある。

## ② 研究開発の概要

宇宙開発戦略本部が宇宙計画基本法(平成20年5月制定)に基づいて、平成21年6月2日に決定した「宇宙基本計画～日本の英知が宇宙を動かす～」によると、「世界をリードする先端的な研究開発の推進」の3つの柱の1つとして、「有人宇宙活動の推進」が挙げられている。この中で2020年頃を目途として「二足歩行ロボット等、高度なロボットによる無人探査の実現を目指す」と述べ、さらに次の段階として「人とロボットの連携による本格的な探査への発展を目指す」とある。この計画はわが国固有の技術の優位性を宇宙開発へ展開することによって、科学技術の知的資産の蓄積に貢献するとともに、産業力や人材育成において国際競争力を高め、わが国の安全や国益を確保し、国民に夢や自信を与えようとするものである。

この計画の実現のためには、ロボットのアクチュエータやセンサなどの宇宙耐用の要素技術やシステム技術の開発と同時に、基礎となる情報基盤技術の整備を早急に進める必要がある。本提案は、中心研究者をはじめとする研究チームをつくり情報基盤技術の研究開発を進め、JAXAを中心とした要素技術やシステム技術の宇宙技術開発が本格化するタイミングに間に合わせることで<sup>1</sup>、2020年頃の月探査ヒューマノイドロボットの実現を目指すものである。

本研究で開発する情報基盤技術は3年後には、JAXAとの連携による技術移転がスタートできるレベルにまで到達させる。3～5年目には、相互連携によって速やかな技術移転と実装に向けた展開研究を実施する。また本研究が終了する5年後には、民生用の生活支援技術としてヒューマノイドロボットの産業化を目指す企業に対して、情報基盤技術として技術移転可能なレベルに到達させる。

### (A) 月探査活動高度情報化・シミュレーション技術

月面基地の建造物や実験設備や資材についての全情報を設計情報と経時的現況計測から常にアップデートし、これに基づいて異常事態や予期しない状況が生じた際に、修理計画の作成においてヒューマノイドロボットが対応可能な選択肢をシミュレーションによって計

---

<sup>1</sup> 現在の提案書の時点で、JAXAと何らかの連携について合意や、話し合いを持ったものではない。

算し提示する高度情報化・シミュレーション技術の基盤を開発し、地上実験により検証する。具体的には以下のような項目を研究開発する。

- (A-1) 月面基地や月表面を模擬した実験空間および計算機上の仮想空間を構築し、実空間で観測する実情報と仮想情報の精度と整合性を確保する技術を開発する。
- (A-2) 仮想空間で自然現象やヒューマノイドロボットの動作によって同時並列的に起きる変化を高速にシミュレーションして状況の変化を予測できるようにする。
- (A-3) リアルタイムでの浅い予測、時間をかけての深い予測などを自在に行うことを目指す。
- (A-4) 予測に基づいて短期的(リアルタイム制御)および長期的(行動計画)な行動最適化を行うことができるシステムとする。
- (A-5) 実空間と整合性を保証された仮想空間のモデルに存在するモノに関するCAD、仕様、マニュアルなどの管理情報のデータベースや、それ以外のWEB上の非管理情報などを、範囲を自在に設定しながら検索することでシミュレーションや予測に用いることができるようにする。
- (A-6) ロボットが観測した事物や事象を時刻とあわせて世界情報としてデータベースに蓄積するとともに、個体のロボットの体験としても検索できるようにする。



図4 月面活動高度情報化・シミュレーション技術。CADモデルと実情報を組み合わせて仮想空間において高速高精度シミュレーションを行い、行動のリアルタイム制御や行動計画に利用する。

#### (B) 臨場感通信型月探査活動参加技術

月面基地外での探査や基地内での定型化できる活動は、ヒューマノイドロボットが行動計画と状況判断に基づいて自動的に実施し、必要時や非定型的な活動では人間が臨場感通信技術によって介在することで直感的に自在に作業できるための基盤技術を開発し、地上実験により検証する。具体的には以下のような項目の研究開発を行う。

- (B-1) 高度情報化・シミュレーション技術によって、月面基地の内外において定型化でき

る活動についてはロボットがゴールやサブゴールを自律的に設定することで実行できるようにする。

- (B-2) 非定型活動については、ロボットの自律性を一部に使いながら地上の人間（科学者、技術者、一般国民）が活動に参加できるようにする。
- (B-3) ロボットの自律度と人間の介在度を随時自在に、あるいは自動的に最適化する技術を開発する。
- (B-4) 月面活動と地上情報の臨場感を損なわないように通信時間遅れを考慮した通信を実現する。視覚や聴覚に訴えるだけでなく、搭乗型あるいはウェアラブルなヒューマノイドロボットインターフェイスを構成して地上で活動に参加する人間の体性感覚に訴えることができるシステムを実現する。

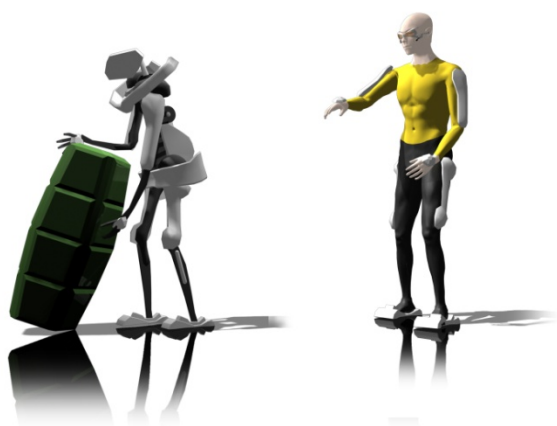


図5 搭乗型・ウェアラブルインターフェイスによる臨場感通信型月探査活動参加技術

### (C) 有人活動に向けた直感型コミュニケーション技術

月面基地での有人活動において、人間の行動理解や人間的な行動生成によって複数のヒューマノイドロボットと人間が簡単な相互行動意図推論をおこない、さらに運動情報と言語情報を用いた相互情報伝達を成立させ探査活動を実施することができる直感型コミュニケーション技術の基盤を開発し、地上実験により検証する。具体的には以下のような項目を研究開発する。

- (C-1) 地上から非技術者が月面のヒューマノイドロボットを臨場感通信型インターフェイスで操作する場合において、できる限り直感的な行動や言語によって指示を出せるシステムを開発する。
- (C-2) 少数の人間と複数のヒューマノイドロボットが共存する将来の有人宇宙開発において、行動や言語をもちいて通常に人間同士がおこなうような協働活動を可能にするための基盤技術を開発する。
- (C-3) 人間の全身の運動を観察して行動の理解と推論を行い、人間が理解と推論しやすいようにロボットが自分の運動パターンを生成することができるような身体行動知能



を実現する。

- (C-4) 身体運動の推論と、自然言語の推論機構を一体とした情報システムとすることで、「動作」と「ことば」のあいだの連想によって意図の伝達をおこない、協働作業を容易に実現できる技術を開発する。



図6 運動情報と言語情報に基づいて複数のヒューマノイドロボットと人間が意図推論をおこなう直感型コミュニケーション技術

#### (D) 月探査ヒューマノイドロボット運動制御技術

月面の重力加速度下における最適な歩行や運動のパターンを明らかにし、月面上で最適な運動パターンを生成するために必要な運動制御系の開発を行う。このためにシミュレーションと実証実験を並行して行う。具体的には以下のような項目を研究開発する。

- (D-1) 月面において活動するヒューマノイドロボットに必要なハードウェアの仕様を想定しこれらによって構成される全身機構の運動制御技術を開発する。
- (D-2) 宇宙や月面基地の環境について JAXA と連携しながら、温度差、冷却、真空、放射線などの特殊環境条件を視野に入れたハードウェア要素技術の仕様を、はじめに明らかにする。
- (D-3) 地上の1/6という月面の重力条件により、地上とは形や時定数が異なる運動パターンがより高い運動性能を示す場合がある。これらを動作生成に積極的に利用する全身運動制御技術を開発する。
- (D-4) 直感型コミュニケーションによって人間と協働するための運動制御技術を開発する。
- (D-5) 車輪型移動機構に搭乗し活動範囲を拡大するための運動制御技術を開発する。



図7 月面上での最適な運動パターンを生成し、制御する運動制御技術

### (E) 標準リソース化技術

本研究では主に情報基盤技術の開発を行うが、(B)の臨場感通信技術や(D)の運動制御技術などでは必要な一部要素技術やその中に組み込まれるファームウェアの開発が含まれる。情報基盤技術や関連する一部要素技術などは3年後を目途に、JAXAとの連携による技術移転ができるような標準リソース化のための開発を並行して行う。また本研究が終了する5年後には、民生用の生活支援技術としてヒューマノイドロボットの産業化を目指す企業に対して、情報基盤技術として技術移転可能なように世界標準を目指した標準リソース化を行う。

## b) 研究開発の成果

### ① 達成される成果の具体的内容

図8(a)のような居住部分と実験室部分をもつ月面基地に準拠した実物モデルを作成する。実験室部分は国際宇宙ステーション(ISS)の「きぼう」日本実験棟の船内実験室(図8(b))相当のものを作る。この実物モデルとその計算機上の数学モデルを扱い(A)月探査活動高度情報化・シミュレーション技術を研究する。この構造物の内部や中のさまざまな事物がヒューマノイドロボットの操作をきっかけにした事象として変化してゆく様子を、計測情報に基づいて常に実物モデルと数学モデルが精密に対応するようにアップデートする。この数学モデルを使うことによって、異常事態における修理計画や、リアルタイムでの予測や、長期的な動作計画を行う。計算システムにはスケールアップが容易で標準的なHPC環境とし、ソフトウェアの標準化を念頭に置いた開発を当初から行う。このような生活空間とその変化を精密なモデル化とシミュレーションの対象とするような研究はこれまでに世界で例がない。

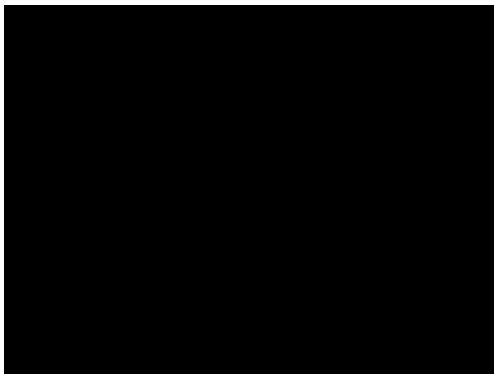


図8(a) 月面基地構想モデル

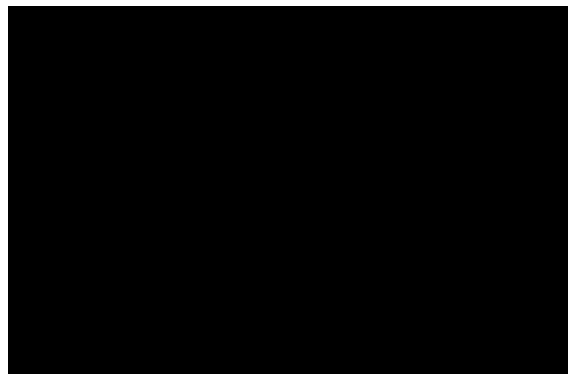


図8(b) 「きぼう」日本実験棟の船内実験室内で科学実験を行う若田光一さん

また（B）臨場感通信型月探査活動参加技術 では、高度情報化・シミュレーション技術を前提にして、ヒューマノイドロボットが完全自律的に比較的単純な作業を行ったり、やや複雑な作業では一部で人間の介在支援を受けながら半自律的に作業を行ったり、さらに複雑な作業では完全に人間の操作に従って作業をおこなうといった、自律度を自由に変更することができる人間介在技術を完成させる。また人間の介在では、搭乗型あるいはウェアラブル型のヒューマンインターフェイスを用い全身の身体を使って臨場感を与える技術を開発するとともに、映像や情報を3Dで表示するゴーグルを採用する。これらによってヒューマノイドの操作のための臨場感通信技術を開発する。また片道約1.3秒という月面と地球間の通信時間遅れがあっても吸収し、臨場感を保つ方法を開発する。

さらに（C）有人活動に向けた直感型コミュニケーション技術 の全身の臨場感を使って人間の介在度を自由に変化させながらヒューマノイドロボットを操る技術開発はこれまでに例がない独特の研究開発である。ウェアラブルロボットについては筑波大学やカリフォルニア大学バークレイ校などで重量物の搬送や介護支援用に開発されてきているが、作業の実行のための動作支援ではなく、全身への情報提示装置としての採用は世界でも初めてのことである。人間の運動パターンを分節化し、これにクラスター解析を行うことで人間運動を記号化し、ロボットが人間を見る場合に分類に従って人間を理解し、人間がロボットを見る場合には分かりやすい運動を生成する技術は、中心研究者らが1998年度に始まったCRESTから科学研究費基盤（S）を通じて独自に開発を発展させてきたものである。これについては現在、スイス、ドイツ、カナダ、米国などの研究グループも取り組み、国際競争が激しくなっている。運動記号と自然言語と結ぶことで自然な連想を作りだし、直感的なコミュニケーションを実現する問題も中心研究者らの研究において、簡単なシステムでの検証が行われているにすぎない。これを現実のヒューマノイドロボットとのコミュニケーションに使う実用的なレベルまで達成した例はない。

月面の重力や温度差などの物理現象の特殊性をシミュレーション技術によって正確に把握し、これをヒューマノイドロボットの運動制御に積極的に利用しようとするのが（D）月探査ヒューマノイドロボット運動制御技術 である。地球上の1/6といわれる月面の重力や冷却特性のためにどのような加速度パターンが適切かを計算によって求める。地上では考えられなかった意外な運動パターンが見つかる可能性もあり、これまでのヒューマノイドロボットのモビリティの考え方を変える新しい成果も期待できる。

## ② 諸外国の研究や他の研究者をどのようにリードするか

本研究が、情報基盤技術としての「月探査ヒューマノイドロボットの基盤研究」になっている点が、いち早くヒューマノイドロボットの宇宙開発への利用において特許化、著作権化、標準化をとおして世界の先頭に立とうとする戦略そのものであるといえる。



早期に研究を立ち上げるために、優秀な若手研究者をわが国の国内および世界から集めて、密度の高い開発体制をとることで焦点を絞った研究開発を行う。すでに中心研究者は関連するいくつかの研究機関の研究者と共同研究を始めようとしている。またこれらの研究機関から中心研究者のところへポストドクとして研究に従事したいとの希望も寄せられている。

早期立ち上げと、知財化・標準化を進めるとともに、いくつかの世界の代表的な研究機関と連携を深めながら開発した情報基盤技術をリサーチツールとして提供したり、交換したりしながら世界標準として確立させることが重要である。

### ③ 国民生活、経済・社会、他の分野における研究開発に対するインパクト

本研究の成果は2重の波及効果をもたらすことになる。はじめに、5年後に生まれる情報基盤技術はヒューマノイドロボットが地球上の一般家庭やオフィスや病院・介護施設などに入ってゆくきっかけとなる基盤技術を提供する。つぎに、この技術が宇宙開発計画に連携し、月探査ヒューマノイドロボットの要素技術、システム技術の研究開発を加速させることで、これらの技術が民生展開され国民生活にイノベーションを起こす大きな波を作ることができる。月面基地や「きぼう」日本実験棟のモデルのシミュレーション技術は直ちに家庭、オフィス、病院、介護施設のシミュレーションに使われてゆくことになるだろう。

ヒューマノイドロボットがわれわれの生活に入り生活支援技術として浸透してゆくことは、少子高齢化社会にあって、単に高齢者の介護の問題に手を差し伸べるだけでなく、介護が不要な人たちには個人の社会参加を支援する技術となり、生活の質を高め21世紀後半に活力のある社会を形成するために必要とされるであろう。

上述のような社会への影響は、経済的にはヒューマノイドロボットを中心とする生活支援ロボットが自動車と競うような基盤産業を形作る可能性を持つことを物語っている。わが国が情報基盤技術をいち早く抑えた戦略的な研究開発を行うことのインパクトは極めて大きいと言える。

このようなインパクトを実現するための道筋として、情報基盤技術に対して知財化と標準化を推し進めることで、世界標準のリサーチツールとすることが最も重要である。次に、リサーチツールが使用され世界標準として認知されるために、世界の代表的な研究機関との協力体制を構築しておくことが必要である。

5年後に研究成果を産業で活用する方策はすでに上述したとおりであるが、3年目以降の時点において企業とのコンソーシアムを形成し、研究成果の民生展開を目指した体制の整備に早くから手をつけることが必要である。

## c) 波及効果等

### ① 研究者の人材育成

若手研究者の人材養成には、同じ年代の国際的な競争の中に入りながら、その中でネットワークを自ら作ってゆくことが必要になる。本研究はヒューマノイドロボットのための情報基盤技術が中心であり、現時点のロボティクスにおいて優秀な学生が世界の各機関で活躍している。これに自然に参加してゆくような国際交流と研究上の連携の場を作ることが人材養成で最も重要なことである。

若手研究者の成果や業績を的確に評価して、給料やキャリアアップに結び付ける細やかな評価システムを作る。たとえば研究員（ポスドク）についてはステップ1からステップ5、さらに支援機関として東京大学が当たる場合には、特任助教、特任講師、特任准教授、特任教授などについても、それぞれステップ1からステップ5のような制度を作る。

博士課程の研究者の交流の機会として、毎年日本においてヒューマノイドロボットソフトウェアに関するサマースクールを開催し、世界の関連する研究を行っている博士課程学生や若手研究者を公募し、優秀者20程度を奨学金（旅費、参加費）付きで招待する。

### ② 成果の実用化など

成果の実用化については、月探査ヒューマノイドロボットの情報基盤として3年後にわが国の宇宙開発に連携できるようにする。また5年度の研究終了後には、産業技術として民生用のヒューマノイドロボットに転用できるような計画とする。このためには早期の立ち上げによる知財化と標準化に基づいて、リサーチツールとしての世界的な認知をうけることが極めて重要であり、このために最大限の努力を行う。

## d) アピールポイント

- (1) ヒューマノイドロボットは身体の形態類似性により人間と親和性の高い技術であること。
- (2) このことが無人活動と有人活動をシームレスにつなぐ宇宙開発に寄与すること。
- (3) 本研究が目指す情報基盤技術はヒューマノイドロボット技術の核をなすものであり、わが国の科学技術の特徴をより強くするものであること。
- (4) さらに、ヒューマノイドロボットの情報基盤技術は民生展開によって、われわれの生活を支援する技術となり、社会的、経済的なインパクトが大きいこと。