解説

安全性を考慮した次世代ロボットの実証試験

Demonstration Tests for Next-Generation Robots Focusing on Safety Consideration

山田 陽 滋^{*1} 本間 敬 子^{*2} ^{*1}名古屋大学 ^{*2}産業技術総合研究所

Yoji Yamada^{*1} and Keiko Homma^{*2} ^{*1}Nagoya University ^{*2}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1. はじめに

ロボットの開発段階において、次世代ロボットの有用性を示し生産性を評価する実証試験は、ロボットの市場創出性を見積もる上で、極めて重要な役割を演じる。その際、特に、次世代ロボットは、人に直接サービスを提供する目的で開発するものであり、基本的に人との共存が前提となるため、実証試験においても、安全性への配慮が不可欠となる。これまで筆者らは、本稿第2~3章に記述する次世代ロボットあるいはそれらの要素技術開発プロジェクトに従事してきた。いずれのプロジェクトでも、実用化・事業化をミッションとして、実証試験によるロボットの有用性検証が必須の課題とされ、同時に、安全性への十分な配慮が要請された。本稿前半では、これらのプロジェクトへの従事実績に基づき、特に安全性確保の観点から実証試験の紹介を行う。とりわけ、被験者を用いた実証試験の観点では、困難性が高かった人間支援ロボット実用化基盤技術開発[1]を中心に紹介する。そして後半では、実証試験に共通する課題として、ロボットの有用性、生産性を示しつつ、安全性の評価と安全技術の構築を段階的に行っていく方法について述べる。

2. 被験者実験を伴う研究事例1：排泄介護総合支援ロボット「トイレアシスト」の開発

我々は、2005年~2007年の3年間、施設における高齢者の排泄介護を総合的に支援するロボット「トイレアシスト」(図1)の研究開発に携わった。倫理審査への対応を中心とした本研究の概要については、すでに論文[2]にまとめたとおりであるが、ここでは「被験者を用いた実験」という観点から、本研究の実証実験について改めて振り返ってみる。

図1 The excretion care robot "Toilet-Assist"

2.1 研究開発の概要

本研究は、ロボット技術を用いてトイレ自体に移動や適合の機能を付与することにより、施設に居住する要介護高齢者に対する排泄介護において、介護者の負担を軽減することを目的として実施された。

「トイレアシスト」の開発は、実機による評価、すなわち実証試験を経て段階的に行われた。

初めに施設で働く介護職員を対象にヒアリングを行って必要な機能を抽出し、基本動作の検証を行うための機能コンポーネントを製作した。

機能コンポーネントによる予備検証を行ったあと、第一次実証機を試作した。第一次実証機においては、要介護度4~5レベルの被介護者を、介護者1名が介助することでトイレでの排泄ができるようにすることを目標とした。第一次実証機は、本体に移動、便座および肘掛けの昇降、便座の前後スライドおよび開動(被介護者の体格に合わせた便座幅の変更)、臀部洗浄の機能を有するとともに、高機能便座(洗浄性、座位安定等)、昇降前方ボード(姿勢保持)と合わせて排泄介護の負担軽減を行うべく開発された。

試作した第一次実証機を用いて第一次実証試験を行った。第一次実証試験は、特別養護老人ホーム(以下「特養」と記す)で働く介護職員の方々を被験者とし、高齢者シミュレータを装着した若年健常者に対して模擬排泄介護動作を行う形で実施し、施設内の通常のトイレでの模擬排泄介護動作と比較を行った。

第二次実証機は、第一次実証試験の結果を踏まえて設計

原稿受付 2011年1月25日

キーワード: Next-generation Robot, Verification Test, Protection of Subject, Safety, Risk Assessment

^{*1}〒464-8603 名古屋市千種区不老町

^{*2}〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1

^{*1}Nagoya-shi, Aichi

^{*2}Tsukuba-shi, Ibaraki

変更と装置の使用に関する想定シナリオを変更した。すなわち、「補助があれば立ち座りが可能であるが、足の踏み替えができず、また安定した着座ができない人（要介護度2～4の一部に相当）」を対象とする被介護者とし、介護者が被介護者の体重を支えながら身体をひねる動作を行わずにすむことで、介護者の負担を軽減することを目指した。第二次検証機は本体、昇降前方ボード、車いすシャトル台車から構成され、車いすから立ち上がった被介護者が昇降前方ボードを用いて立位姿勢を維持している間に、車いすをシャトル台車によって移動させ、空いたスペースにトイレアシスト本体が移動することによって、転倒を招きやすい姿勢変換をしなくても車いすとトイレの間の移乗を可能とした。

第二次検証機を用いて、第二次検証試験を行った。第二次検証試験は、第一次検証試験と同じ特養で実施した。第二次検証試験においては、特養に勤務する介護職員に加えて、同じ特養に入居している高齢者に被験者として参加していただいた。

2.2 検証試験における安全確保の問題

被験者を用いた実験においては、被験者を不必要なリスクにさらさないよう、可能な限り安全確保を行う必要がある。安全確保が行われているかどうかは、倫理審査における主要な審査項目の一つでもある。以下では、機械安全の観点から我々が行った方策と、「被験者の安全確保」という観点からの課題について述べる。

2.2.1 機械安全

被験者実験において、被験者に機器を使用していただくにあたっては、第一に、機械安全の観点から当該機器のリスクが十分に低減されている必要がある。このため、ISO 12100-1:2003に定められているように、リスクアセスメントを行い、その結果に基づいて本質安全設計、安全防護および追加の安全方策、使用上の情報といった3ステップ法に従ってリスクの低減を行う。

トイレアシストの研究開発においては、リスクアセスメントにおいて、あらかじめ想定した作業シナリオに沿って危険源の洗い出しを行うとともに、機器に関与する人（介護者、被介護者、保守要員）の属性を考慮したアセスメントを行った。これらはいずれも、トイレアシストが人と密接にかかわりながら動作するという特性をリスクアセスメントに反映するための試みである。

リスクアセスメントの結果に基づいて設計変更等の必要な対処を行った結果、重大な残留リスクとして残ったのは、ヒューマンエラーによる被介護者の転倒であった。これについては、安全管理マニュアルを作成するとともに、マニュアルに基づいて介護者側被験者に対する教育を行うことで対処した。

2.2.2 「被験者の安全」の多層性

上記のように、検証試験に用いた検証機の製作にあたっ

ては、リスクアセスメントとその結果に基づく安全方策の適用によって、「機械安全」の観点からは一定範囲の安全確保を行うことができたと考えられる。しかし、「被験者の安全確保」を考えた場合、使用する機器に関する機械安全が実現されるだけでは十分ではない。機器自体の持つリスクが十分低減され、かつ正常に作動したとしても、試験手順や試験環境に起因する問題がある場合や、被験者の体調がすぐれない場合などには、やはり被験者に対するリスクが生じる可能性があるからである。このようなリスクについては、倫理審査や、有識者からの意見聴取などを通じて指摘を受け、それに対する対処を行った。有識者の意見は極力取り入れるよう努めたが、工学技術の外の領域で議論すべきことが多く、機械安全に対する対応のように周知な枠組みを構えて取り組むことが困難であった。

2.3 検証試験におけるその他の問題

安全に関する問題については前節で述べたとおりであるが、このほか、本研究における検証試験には、以下のような困難さがあった。

(1) 介護者と被介護者という二つの異なる属性を持つ被験者をそれぞれ選定する必要がある。

(2) 被介護者側被験者の選定に関する困難。

(3) 排泄という、特に個人の尊厳やプライバシーに配慮が必要な場面を扱っている。

(1) については、以下に述べる点が問題となった。通常の機器の場合、機器とそのユーザは一対一に対応し、ユーザが機器の使用による直接的な利益を得るとともに、機器による危害を受けると考えられる。本研究の場合は、「介護負担の軽減」という目的に照らせば、介護者がユーザであり、直接の利益を受ける人である。しかし、介護支援ロボットの特異性として、機器の使用に際して、介護の対象である被介護者が存在し、なおかつ第一当事者である介護者より高い危害を受ける恐れが発生する。そこで、我々は「介護者と被介護者それぞれに対して、別個にリスク・ベネフィット評価を行う」という方針で臨んだ。リスクについては、2.2.1項に述べたように、機器に関与する人の属性を考慮したリスクアセスメントを行った。また、ベネフィットについては、次のように整理された。開発されたトイレアシストの第一義のベネフィットは「介護者の負担の軽減」であり、この利益を直接受ける者は介護者であるが、被介護者にとってのベネフィットとして、「使いやすいトイレの実現」という将来展望を示した。

(2) についての困難さは、以下のような点であった。

第一次検証試験の場合、開発時に想定した被介護者の状態像が、実際の施設入居者と一致しておらず、結果として選定プロセスの途中で、検証試験に参加していただける候補者がゼロとなってしまった。この点は第二次検証機の構築に反映され、第二次検証試験には入居者の方にも検証試

験に参加していただくことができた。

第二次実証試験においては、インフォームドコンセントの方法が問題となった。具体的には、「介護支援ロボットの直接的な受益者でない被介護者にとって、享受できるベネフィットは何か」という問題や、「インフォームドコンセントにおいて、被介護者の負担を避けつつ十分な説明を行うにはどうすべきか」という問題、同じくインフォームドコンセントにおいて、誘導や威圧と受け止められないような説明の方法、などが挙げられる。

(3) については、本研究の中では具体的な解決策を見出すことはできず、結果として衣類を着用した状態での模擬排泄動作による試験にとどまった。

2.4 倫理審査について

本章の最後に、本研究に関する倫理審査の経緯について述べる。本研究で行われた実証試験に際しては、主要研究機関3機関および実証試験の現場である特養において、別個に倫理審査が実施された。さらに、プロジェクト推進委員会の下にワーキンググループが設置され、倫理および安全の面から、実証試験の審査が行われた。多段の倫理審査が行われることにより、様々な観点から安全面および倫理面で計画の妥当性を評価することができたが、反面、倫理審査の完了までに長時間が費やされるという問題もあった。

以上のように、トイリアシストの実証試験を行うにあたっては、開発の本質にかかわる問題から、手続き的な問題に至るまで、多くの問題が生じた。特に、開発の本質にかかわる問題が生じるのを避けるためには、開発のごく初期の段階から、使用シナリオを明確にし、さらにその妥当性について臨床の専門家を交えて十分検討を行うことが必要であることを、本研究を通じて経験した。

3. 被験者実験を伴う研究事例2:「コンパクトハンドリングシステムを備えた安全な上体ヒューマノイド」の研究開発[3]

3.1 研究開発の概要

情報家電分野の組立工程で主流であるセル生産方式が、変種変量生産を強いられる中で抱えつつある問題、すなわち、人間による作業効率向上の限界と作業品質の低下、頻繁な機種切り替えに伴う人間の訓練のコストアップと人員確保、等をひとつひとつ現場から聞き出し、これらを一挙に解消するためのブレイクスルー技術を目指した。それが、組立工程における省人化を図るべく、現場で肩を並べる作業者の一部をそっくり双腕ロボットで置き換えるという「安全な小型上体ヒューマノイド」の構築であった(図2)。そして、具体的に1) 小型上体ヒューマノイドのハードウェアおよび制御技術、2) 簡易交換コンパクトハンドリングシステム、3) 安全管理システム、のそれぞれを開発した。

事業開始後3年目に設けられた中間ゲートにおける具体

図2 Collaborative work scene by a human worker and the upper-body humanoid

的な目標は、「ターゲットとする現場における実証試験と、導入効果の検証」と定め、第一に、デバイス部品生産現場を模擬したラインに実証試験用ロボットシステムを導入して部品の検査整列を行い、省人化率を評価した。また、第二に、機械部品生産現場を模擬したセルラインに第二次実証試験用システムを投入してベアリング(クロスローラベアリング)の組み立てを行い、生産性・信頼性に関する要求仕様の達成度を評価し、安全性について検証を実施した。

第二の実証試験を報告例にとると、3種類の型式のクロスローラリング仮組み工程に導入し評価した。その結果一例として、1日300個の生産について、組立作業員が3.3人必要であるのに対し、およそ1.7人の省人化が可能となる見通しを得た。また、安全上の問題についても、双腕ロボットと作業者が隣接した環境でワークの受け渡しを行う中で、試験期間中事故等の発生はなく、本格導入に関する安全面の障害も見当たらなかった。

3.2 機械安全

さて、安全上の方策を達成するための要素技術開発の観点では、「(当時の時点で)既存の産業用ロボットの安全規格が改訂されないことを考慮し、現行規格をほぼ準拠する形で開発技術を達成する」こと、というプロジェクトの方針に沿って、要素技術の開発が目標立てられた。これによりまず、労働安全衛生規則第36条第31号に定めるモータの出力(電力)規制、すなわち最大出力のモータが80[W]以下であることを確認することにより、開発ターゲットのロボットが、我が国で定義される産業用ロボットの範疇ではないと定めた。また、国際規格への準拠の観点から、当時すでに人間とロボットの共存を条件付きで認めるISO 10218-1:2006に定める産業用ロボットの安全要求事項に則り、ロボットのTCP(ツールセンターポイント)における発生力の低減化を検討することにした。これにより、図2に示すように被験者は、本質安全設計の指向されたロボットと安全柵で隔てられることなく、パーツをロボットに供給する等の協働化が実現できることになった。

4. 安全技術の段階的構築

前章までに述べたように、実証試験においては被験者のみならず、試験でロボットにかかわる人間の安全確保が不可欠である。しかしながら、有用性や生産性を検証する実証試験の初期段階から、安全技術に過大に投資することは、通常行われない。本章では、いかなる方法で安全技術を構築していくかについて述べる。

4.1 実証試験

実証試験には、制約が設けられることがしばしばある。例えば、2章で述べた事例では、実際の介護施設を実証現場として選び、被介護者の要介護度を4~5と設定して試験に臨んだため、試験例が少なく、統計的に適正な判断が下せるように、機能別に検証項目を再精査して、健常者を被験者に用いた別メニューの試験で補った。あるいは、実証試験の統計的な評価結果がよくても、現実社会から切り出す条件の設定の仕方に問題があると、本番ではロボットが役に立たず売れない、という状況に陥りかねない。以下、実証試験を安全技術構築の観点から3段階に分け、ロードマップとして、それぞれの段階での目的とともに、構築すべき技術の内容について述べる。

開発当初の段階から、安全技術をすべてロボットに搭載しようとする方針は、一般に、合理的ではない。なぜなら、事故・ヒヤリハットを経験していないロボットの使用想定段階では、リスクを過大に見積もらざるを得ず、安全技術に過大に投資をすることになるからである。

図3は、実証試験を3段階（第1次~第3次）に分ける手順を表している[4]。同図は、いずれの段階であっても、実証試験のもつ特徴に応じ、これに先駆けて倫理委員会等第三者による承認を得るべきことを示している。また、実証試験を始めることになったら、ヒヤリハットや、あるいは万が一事故が試験中に発生した場合に、再発の防止と情報の再利用を心掛けて情報化を行い、次の回のリスクアセ

図3 Stepwise construction of safety technology in demonstration test

スメントに反映することが重要である。

4.2 第1次実証試験

まず、第1次実証試験に先駆けて、ロボット使用上の制約条件やシナリオの設定を行い、リスクアセスメントを行う。この場合のリスクアセスメントは、この時点で仕上がっているロボットを対象として、これが実証試験で使用される局面を具体的に想定して実施する。しかし、リスクアセスメントの結果に基づくリスク低減のための安全方策については、緊急停止装置等最低限の保護方策を施す以外は、周到な安全管理、つまり人間による危険な状況の監視、によってリスクの顕現化を抑える方策にとどめ、有用性・生産性の実地検証を心掛ける。次に、第1次実証試験に際しては、現場に即したハザードの再同定やリスクの洗い出し、さらに、リスクの頻度等をより現実的な観点で見積もるためのデータを取得する。

倫理的な配慮を行う上でも、段階を踏むことが重要であると認識すべきである。例えば、介護ロボットを開発し、その有用性を検証する目的を達成するために、いきなり高齢者を対象として実証試験を行うのは、リスク・ベネフィットのバランス観点で説明がつかない。この場合は、健常な被験者による第1次実証試験を行う。そして、リスクの実態が把握でき、さらにこれを上回るベネフィットが見いだせなければ、第2次実証試験に進むことはできない。本節の第1次実証試験は、大学等研究機関が主体となる開発フェーズと言えよう。

4.3 第2次実証試験

第2次実証試験に向けては、第1次実証試験の結果に基づき、リスクアセスメントのレビューを行い、妥当な安全要求仕様の策定を行う。SIL等の指標によって、目標とする安全度水準を定めたり、安全技術では、アプリケーションに特有な安全技術を中心課題に据えて開発を進めるのもこの段階であり、これらのために、認証機関とのコンタクトも始める。企業主体の試作実証フェーズである。

倫理観点でリスク・ベネフィットのバランスが見いだされることになったら、企業視点も含め、あらためて必要に応じ倫理委員会等による再承認を得ることが重要である。もし、被験者も実際の使用局面に即して対象者を選出してよいと判断されたら、第2次実証試験にフェーズを進める。システムの不具合抽出もこの段階で行い、信頼性の評価も合わせて評価項目とすべきである。

さらに、実用化・事業化を視点に入れて、ALARP (As Low As Reasonably Practicable) を指針とした実用に供するための安全技術の設計を行う。ALARPとは、リスクが高すぎても産業上の実施が全面的に否定されるわけではない場合に適用可能な原理である。そしてそれは、リスク低減がもはや不可能な場合、またはリスク低減コストが獲得される改善に対して著しく不均衡に見積もられてしまう

場合等にリスクが許容できる (tolerable) という考え方である。並行して、コストパフォーマンスも精査する段階にあり、この時点で、開発期間、開発技術に対する投資総額と、初期の生産台数あるいは安全管理のためのリスク回避／リスクテイク指針等について、開発部署他複数部署を加えた横断的な議論とコミットメントが交わされる必要がある。

4.4 第3次実証試験

第3次実証試験に向けては、前段階までで搭載された技術に加えて、ALARP 規範に基づき安全度水準を達成するための安全技術の構築を行う。そして、機能安全技術を中心とした、第三者による安全認証を見据えた安全技術の整備を行う。第3次実証段階では、あらかじめ予定していた協力者に提供し、市場投入を始める。

5. おわりに

本稿では、その前半において、我々が過去に従事した排泄介護総合支援ロボットあるいは人間・ロボット協調型セル生産組立システムのための要素技術開発プロジェクトについて、特に安全性の観点から被験者実験に関連して報告に値するポイントを述べた。また、後半では、ロボットの市場創出性を見積もる上で実証試験を極めて重要な業務フェーズであると位置づけ、これを安全技術構築の観点から3段階に分けて、それぞれの段階における実証試験の目的に沿って、安全技術を構築していく手順を紹介した。スピーディな技術開発が要請されるなか、十分な妥当性を伴った安全技術を搭載した次世代ロボットを社会に送り出すためには、第2次、第3次の実証試験をいかに効率化するかが重要なポイントである。加えて、特に安全に関しては、研究機関と企業、企業と現場の間における正確な情報の授受が求められることから、リスクアセスメントをベースとした相互の情報交換が製品のライフサイクルにわたって行われるべきである。

参考文献

- [1] 新エネルギー・産業技術総合開発機構：人間支援型ロボット実用化基盤技術開発「介護動作支援ロボット及び実用化技術の開発」（排泄介護総合支援ロボット「トイレアシスト」の開発）に関する研究平成17年度～平成19年度成果報告書，2008。
- [2] 本間敬子，山田陽滋，松本治，李秀雄，小野栄一：“介護支援ロボットの実証試験における倫理審査と被験者保護について—排泄介護総合支援ロボット「トイレアシスト」の事例報告—”，日本ロボット学会誌，vol.28，no.2，pp.181-190，2010。
- [3] 新エネルギー・産業技術総合開発機構：戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト，人間・ロボット協調型セル生産組立システム（次世代産業用ロボット分野），コンパクトハンドリングシステムを備えた安全な上体ヒューマノイド，2009。
- [4] 山田陽滋：“実証試験における次世代ロボット安全技術の段階的構築”，第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，2010。

山田陽滋 (Yoji Yamada)

1983年3月名古屋大学大学院博士前期課程修了。同年4月豊田工業大学助手勤務。1992年工学博士（東京工業大学）。1993年4月豊田工業大学助教授。同年Stanford University 客員研究員を経験。2004年4月から産業技術総合研究所知能システム研究部門安全知能研究グループ長。さらに、2008年4月から名古屋大学大学院工学研究科教授（機械理工学専攻）。これまで、ロボットのセンサ・通信・知的制御に関する研究、および、人間—ロボット共存系の研究に従事。近年は、安全知能が主題。（日本ロボット学会正会員）

本間敬子 (Keiko Homma)

1989年東京大学工学部精密機械工学科卒業。同年工業技術院機械技術研究所に入所。1995～1996年ヘルシンキ工科大学客員研究員。2001年組織改編により独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。現在に至る。ワイヤ平行機構を用いた下肢リハビリ装置、排泄介護支援ロボット等の研究に従事。博士（工学）。（日本ロボット学会正会員）