

利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発
手法の提案と適用

2017年3月

秋本芳伸

目次

第 1 章	緒言	1
1.1.	背景と目的	1
1.2.	本論文の構成	3
第 2 章	本論文における基本情報	5
2.1.	本論文における用語	5
2.2.	これまでのシステム開発手法の課題	6
2.3.	本論文で採用した基本技術	7
2.3.1.	人間中心設計	8
2.3.2.	ペルソナ	9
2.3.3.	モデルベース・システムズエンジニアリング	11
2.3.4.	モデルベース開発およびモデルベース開発ツール	12
2.4.	本論文で提案するシステム開発手法の構成	13
2.4.1.	利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の構成	13
2.4.2.	利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の構成	14
2.5.	本論文の各章の位置付け	17
第 3 章	利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の検証	19
3.1.	ログデータに基づく利用者のモデリングとの比較による有効性の検証	19
3.1.1.	システム構成	19
3.1.2.	基本データ	20
3.1.3.	ログデータに基づく利用者のモデリング手法	20
3.1.3.1.	所在場所ログ・行動ログ収集システム	21
3.1.3.2.	ファジィ推論による行動分析	22
3.1.4.	利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法	23
3.1.4.1.	利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリングの処理	23
3.1.4.2.	家族の利用者プロフィール	24
3.1.5.	二種類の利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果の比較	26
3.1.5.1.	環境に関する前提	26

3.1.5.2.	本検証のシミュレーション・プロセスと関連する値	26
3.1.5.3.	ログデータに基づく利用者のモデリング	28
3.1.5.4.	利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング	28
3.1.5.5.	ログデータに基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果	29
3.1.5.6.	利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果	29
3.1.6.	考察と結論	30
3.2.	複数の家族セグメントへの適用と比較による有効性の検証	31
3.2.1.	システム構成	31
3.2.2.	家族セグメントのプロファイル	32
3.2.3.	シミュレーション・プロセス	32
3.2.3.1.	シミュレーションのためのモデルに関係する値と関数	34
3.2.3.2.	シミュレーションのための共通モデル	36
3.2.4.	家族セグメントの利用者のモデル	38
3.2.4.1.	各家族セグメントの利用者のモデル	38
3.2.4.2.	各家族セグメントの利用者のモデルの関数	39
3.2.5.	評価基準とシミュレーションの結果	40
3.2.5.1.	評価基準	40
3.2.5.2.	各家族セグメントにおける可能性と効果	41
3.2.5.3.	供給電力平準化の可能性と効果	43
3.2.6.	考察と結論	44
第4章	利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の検証	45
4.1.	利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性の検証	45
4.1.1.	利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング	45
4.1.2.	サービスロボットの実システム	46
4.1.3.	サービスロボットのモデルベース開発用システム	47
4.1.3.1.	アプローチと自動緊急停止のプロセス	47
4.1.3.2.	アプローチと自動緊急停止の評価基準	48
4.1.4.	アプローチ機能のシミュレーションと実験	49
4.1.4.1.	アプローチ機能のシミュレーションの結果	49
4.1.4.2.	アプローチ機能の実験の結果	49
4.1.5.	自動緊急停止機能のシミュレーションと実験	50
4.1.5.1.	自動緊急停止機能のシミュレーションの結果	50
4.1.5.2.	自動緊急停止機能の実験の結果	51
4.1.5.3.	考察	51
4.1.6.	結論	51

4.2.	具体的人間中心設計プロセスとしての有効性の検証	52
4.2.1.	対象ロボットと機能.....	52
4.2.2.	具体的人間中心設計プロセスに基づく開発	53
4.2.2.1.	具体的人間中心設計プロセスのプラン	53
4.2.2.2.	ペルソナによる利用状況の理解と明確化	53
4.2.2.3.	モデルベース・システムズエンジニアリングによるユーザ要求の明確化	55
4.2.2.4.	RTMにおけるMBSのためのユーザ要求に適合した設計ソリューションの生成	60
4.2.2.5.	RTMにおけるMBSによるユーザ要求に対する設計ソリューションの適合性評価 ...	64
4.2.2.6.	RTMでの製品サンプルの生成	64
4.2.2.7.	RTMでの製品サンプルの検証	65
4.2.3.	設計ソリューションの評価結果と製品サンプルの検証結果.....	66
4.2.3.1.	設計ソリューションの評価結果.....	66
4.2.3.2.	製品サンプルの検証結果.....	67
4.2.4.	考察	69
4.2.5.	結論	70
第5章	利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の適用例	73
5.1.	車椅子ロボットの開発への適用	73
5.1.1.	車椅子ロボットにおける利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング	73
5.1.2.	車椅子ロボットの実システム	74
5.1.3.	車椅子ロボットのモデルベース開発用システム	75
5.1.3.1.	シミュレーションのための変数と式.....	75
5.1.3.2.	シミュレーションによる評価結果	78
5.1.4.	車椅子ロボットの実システム	79
5.1.4.1.	車椅子ロボットの実システムの構成.....	79
5.1.4.2.	実システムによる検証結果	79
5.1.5.	考察と結論	80
5.2.	テレプレゼンス車椅子ロボットの開発への適用.....	80
5.2.1.	テレプレゼンス車椅子ロボットの利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング	80
5.2.2.	遠隔地の利用者のための安全運転支援機能	82
5.2.3.	テレプレゼンス車椅子ロボットのシステム構成.....	82
5.2.4.	自動停止共通基本機能のための処理手順.....	83
5.2.5.	シミュレーションと実験のための変数と式	84
5.2.6.	自動停止共通基本機能のシミュレーションと実験	85
5.2.6.1.	自動停止共通基本機能の開発環境	85
5.2.6.2.	シミュレーションのためのシステム構成	85

5.2.6.3.	シミュレーションの結果.....	86
5.2.6.4.	実験の結果.....	87
5.2.7.	考察と結論.....	88
5.3.	具体的人間中心設計プロセスとしての適用.....	89
5.3.1.	目標とアプローチ.....	89
5.3.2.	対象サービスロボットと対象機能.....	89
5.3.3.	具体的人間中心設計プロセスに基づく開発.....	90
5.3.3.1.	ペルソナによる利用状況の理解と明確化.....	90
5.3.3.2.	モデルベース・システムズエンジニアリングによるユーザ要求の明確化.....	93
5.3.3.3.	RTM における MBS のためのユーザ要求に適合した設計ソリューションの生成.....	95
5.3.3.4.	RTM における MBS によるユーザ要求に対する設計ソリューションの適合性評価 ...	99
5.3.3.5.	RTM での製品サンプルの生成.....	99
5.3.3.6.	RTM での製品サンプルの検証.....	101
5.3.4.	設計ソリューションの評価結果と製品サンプルの検証結果.....	101
5.3.4.1.	設計ソリューションの評価結果.....	101
5.3.4.2.	製品サンプルによる検証結果.....	102
5.3.5.	考察.....	103
5.3.6.	結論.....	105
第 6 章	結言.....	107
謝辞.....		109
引用論文および参考文献.....		111

第1章

緒言

本章では、本論文の背景と目的、そして、本論文の構成を示す。

1.1. 背景と目的

日常生活でサービスロボットが一般的になってきている。サービスロボットは、利用者と密接に関係しながら、利用者とは独立に動作する。サービスロボットに代表される多機能システムには、物理的安全などのユーザビリティと心理的安心などのユーザエクスペリエンスを有する利用者視点での高い利用時品質を実現したサービスを、多機能システムと関係を持つ多様な利用者に提供することが期待されている。

しかし、これまでは、製造企業視点に立ち、製造企業の独自技術に基づいて、システムを開発してきたため、完成したシステムがユーザ要求に適合していないことがあった。そこで、利用者視点に立ち、ユーザ要求に適合するシステムを開発することが必要になった。

サービスロボットでは、関係を持つ利用者として、直接的利用者だけではなく、サービスロボットの周囲の歩行者などの間接的利用者も含まれ、また、直接的利用者にも間接的利用者にも様々な特徴や特性を有する多様な利用者が存在する。そして、多様な利用者には、類似した特徴や特性を有する利用者が多数存在する利用者グループの中心的利用者だけではなく、類似した利用者が少数しか存在しない境界の利用者も含まれる。そこで、サービスロボットに代表される多機能システムでは、利用者グループの中心的利用者だけではなく、境界の利用者を含む多様な利用者に対しても、高い利用時品質を実現したサービスを提供する必要がある。そのため、境界の利用者を含む多様な利用者に適応するシステム開発が期待されている。

しかし、これまでのシステム開発では、対象利用者を理解する際に、身体的形状や物理的動作などの対象製品に関わる定量データを多くの被験者から収集する必要があったために、利用者グループの中心的利用者の理解は可能だったが、境界の利用者を含む多様な利用者の理解は困難であった。そこで、境界の利用者を含む多様な利用者の理解のために、比較的少量の定量データを定性データで補完して利用者プロフィールを作成し、利用者プロフィールを基に、ユーザ要求と利用者のモデルを作成するシステム開発手法が必要になった。

また、システム開発では、すべての機能の開発と評価を、短期間に低コストで完了することが期待されている。しかし、これまでのシステム開発では、システム設計時に、多くの被験者による様々な条件下や繰り返し同一条件下における評価を実施する必要があった。そのため、システムのすべての機能の評価することは困難であった。そして、製品サンプルが設計時品質を達成するまで、製品サンプルのハードウェア制作と被験者による設計時評価を繰り返す必要があったため、これがシステム開発の長期化と高コスト化の要因となっていた。そこで、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を可能にするシステム開発手法が必要になった。

更に、システム開発時における被験者の負傷のリスクの低減も期待されている。これまでのシステム開発で実施されてきた被験者による評価では被験者が負傷するリスクがあったため、このリスクの低減のためにも被験者を必要としない設計時評価が必要になった。

そこで、本論文では、前述の4つの課題を解決するシステム開発手法として、利用者の特徴と特性に基づく新たな利用者のモデリング手法を提案し、更に、この利用者のモデリング手法を活用したモデルベース開発手法を提案する。本論文において、この利用者のモデリング手法を、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法[1][2][3]と呼び、そして、この利用者のモデリング手法を活用したモデルベース開発手法を、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法 [4][5][6][7][8]と呼ぶ。

利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法は、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法によって定義した利用者のモデルを基に、モデルベース開発のシミュレーション環境で利用者の代理として振舞うユーザモデルを作成し、多機能システムの代理として動作するデバイスモデルと協働させることで、多機能システムの設計時評価を実施し、ユーザ要求に対する適合性を検証するシステム開発手法である。

利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法は、多くの被験者から対象製品に関わる大量の定量データを収集するのではなく、境界の利用者を含む多様な利用者のモデルを作成するために、比較的少量の定量データを定性データで補完して利用者プロファイルを作成する方法としてペルソナ[9][10]を採用し、ペルソナによる利用者プロファイルを基に利用者のモデルを作成する手法である。

本論文では、本利用者のモデリング手法の有効性を検証するために、電気自動車の蓄電池利用による電力需要の平準化の研究に適用し、比較的少量の定量データを定性データで補完することで、利用者プロファイルを作成することが可能であり、更に、多様な利用者プロファイルに対してそれぞれの利用者のモデルを定義することが可能であることを証明した。

利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法では、製造企業視点でのシステム開発から、利用者視点でのシステム開発に移行し、ユーザ要求に適合するシステムを開発するために、ISO 9241-210:2010[11]で定義されている人間中心設計を採用している。そこで、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を適用し、ペルソナにより、比較的少量の定量データを定性データで補完して利用者プロファイルとシステムの利用状況を明確にし、更に、利用者のモデリング手法としてモデルベース・システムズエンジニアリング[12][13]を採用し、利用者のモデルとユーザ要求を作成する。

そして、システム的设计時評価における製品サンプルのハードウェア制作を不要にすることでシステム開発の期間短縮と低コスト化を実現するために、製品サンプルの代理であるデバイスモデルを作成してシミュレーション環境でシステムを評価することを可能にするモデルベース開発[14] [15] [16]を採用している。また、モデルベース開発により、モデルベース・システムズエンジニアリングで定義するユーザ要求と利用者のモデルを基に、利用者の代理として振舞うユーザモデルを作成し、製品サンプルの代理であるデバイスモデルとシミュレーション環境で協働させることで、製品サンプルも被験者も必要とせずにシステムのすべての機能に対して様々な条件下や繰り返し同一条件下における設計時評価を可能にする。

更に、被験者を必要としないシミュレーション環境でのシステム的设计時評価により、設計時評価における被験者の負傷のリスクを排除することを可能にする。

本論文では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を検証するために、本開発手法をサービスロボットの物理的安全と心理的安心のための機能開発に適用し、本開発手法が利用者視点でのシステム開発を実現し、開発したシステムが多様な利用者のユーザ要求に適合し、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価が可能なシステム開発を実現し、被験者の負傷のリスクを低減したシステム開発が可能であることを証明した。更に、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の具体的人間中心設計プロセスとしての有効性も証明した。

そして、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を、車椅子ロボット、テレプレゼンス車椅子ロボット、テレプレゼンスロボットの開発に適用して、本手法の有効性を示した。更に、テレプレゼンスロボットの開発においては、具体的人間中心設計プロセスとしての有効性も示した。

1.2. 本論文の構成

本論文では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を適用した、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を提案する。そして、提案の利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を、以下の構成で検証した。

本論文は、6章で構成する。

第1章では、背景と目的、および、本論文の構成を示す。

第2章では、本論文における基本情報を示す。基本情報としては、本論文における用語、これまでのシステム開発手法の課題、本論文で採用した基本技術、本論文で提案するシステム開発手法の構成、そして、本論文の各章の位置付けを示す。

第3章では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の有効性を示す。最初に、ログデータに基づく利用者のモデリング手法による利用者のモデルのシミュレーション結果と、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法による利用者のモデルのシミュレーション結果を比較し、その有効性を検証する[1]。次に、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法により、複数の利用者グループに対して各利用者プロフィールを作成し、各利用者プロフィールを基にそれぞれの利用者のモデルを作成し、各利用者のモデルに基づくシミュレーションの結果を比較し、その有

効性を検証する[2] [3]。

第4章では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を示す。最初に、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法で定義した利用者のモデルを基にユーザモデルを作成してモデルベース開発に適用し、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を検証する[4]。次に、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を人間中心設計の具体的プロセスとして適用し、具体的人間中心設計プロセスとしての有効性を検証する[5]。

第5章では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の適用例を示す。利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を、車椅子ロボットの開発[6]、テレプレゼンス車椅子ロボットの開発[7]、テレプレゼンスロボットの開発[8]に適用し、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法が、利用者視点に立ち、多様な利用者に対して利用時品質の高いサービスを提供し、開発期間を短縮し、開発コストを低減し、そして、被験者の負傷のリスクを低減することを可能にする開発手法であることを確認する。更に、テレプレゼンスロボットの開発においては、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を具体的人間中心設計プロセスとして適用し、その有効性を確認する。

第6章で結言を述べる。

第2章

本論文における基本情報

本章では、本論文における基本情報として、本論文における用語、これまでのシステム開発手法の課題、本論文で採用した基本技術、本論文で提案するシステム開発手法の構成、そして、本論文の各章の位置付けを説明する。

2.1. 本論文における用語

本節では、本論文で使用する用語を説明する。

「第3章 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の検証」では、利用者、利用者プロフィール、利用者プロファイリング、利用者のモデル、利用者のモデリング、装置のモデル、環境のモデルの用語を使用している。

- 利用者：対象製品や対象サービスを、直接的に、または、間接的に利用する人間。サービスロボットにおいては、実際の利用者やサービスロボットの周囲に存在する人間。
- 利用者プロフィール (User profile)：利用者の特徴や特性、そして振舞いを含む人物描写。
- 利用者プロファイリング (User profiling)：利用者の特徴や特性、振舞いを含む人物描写の作成。
- 利用者のモデル (Model of user)：モデルベース・システムズエンジニアリングなどによるユーザ要求や利用者の状態、利用者の振舞いなどの定義。
- 利用者のモデリング (Modeling of user)：モデルベース・システムズエンジニアリングなどによるユーザ要求や利用者の状態、利用者の振舞いなどの定義の作成。
- 装置のモデル (Model of device)：モデルベース・システムズエンジニアリングなどによる装置の状態と動作の定義。
- 環境のモデル (Model of environment)：モデルベース・システムズエンジニアリングなどによる環境の状態と動きの定義。

また、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の検証における、電気自動車の蓄電池利用による電力需要の平準化の研究では、V2H、V2G、HEMS、CEMS の用語を使用している。

- V2H (Vehicle to Home) : 自動車の蓄電池の家庭における電源としての利用。
- V2G (Vehicle to Grid) : 自動車の蓄電池の電力系統における電源としての利用。
- HEMS (Home Energy Management System) : 情報通信処理技術を利用した家庭における効率的な電気エネルギー管理システム。
- CEMS (Community Energy Management System) : 情報通信処理技術を利用した地域における効率的な電気エネルギー管理システム。

そして、「第4章 利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の検証」では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法で使用する、利用者、利用者プロファイル、利用者プロファイリング、利用者のモデル、利用者のモデリング、装置のモデル、環境のモデル以外に、ユーザビリティ、ユーザエクスペリエンス、ユーザモデル、デバイスモデル、エンバイロメントモデル、ユーザモデリングの用語を使用している。

- ユーザビリティ (Usability) : 利用者にとっての製品やサービスに関わる物理的な使いやすさや使い勝手などの意味。本論文では物理的安全に関わる要素もユーザビリティとしている。
- ユーザエクスペリエンス (UX : User experience) : 利用者にとっての製品やサービスに関する心理的な経験や体験などの意味。本論文では心理的安心に関わる要素もユーザエクスペリエンスとしている。
- ユーザモデル (UM : User model) : モデルベース開発のシミュレーション環境で利用者の代理として振舞うプログラム (コンポーネント)。
- デバイスモデル (Device model) : モデルベース開発のシミュレーション環境で装置の代理として動作するプログラム (コンポーネント)。
- エンバイロメントモデル (Environment model) : モデルベース開発のシミュレーション環境で環境の代理として動作するプログラム (コンポーネント)。
- ユーザモデリング (User modeling) : モデルベース開発のシミュレーション環境で利用者の代理として振舞うプログラム (コンポーネント) の作成。

2.2. これまでのシステム開発手法の課題

これまでも、製品サンプルも被験者も必要としないシステム開発を可能にし、被験者の負傷のリスクを低減するシステム評価を可能にするための開発手法が研究されてきた。この開発手法に関する代表的な研究には、EUのVERITAS Project - FP7 IP (以下、VERITAS) [17] [18]によるVirtual User Modeling and Simulation (VUMS) [19] [20]と、独立行政法人 産業技術総合研究所[21]によるデジタルヒューマン (以下、DH) [22] [23]がある。これらの開発手法では、製品の代理となるデジタルモックアップと利用者の代理となるユーザモデルを、3D CADなどのツールによって作成し、シミュレーション環境で評価する方法を採用している。

VERITAS は、近年のヨーロッパで増加傾向にある高齢者や障害者に対して、適切な製品や環境を提供するために実施されたプロジェクトである。そして、VERITAS では、製品に関わる利用者のデータを実験により収集し、ユーザモデルを作成し、シミュレーション環境で評価する開発手法を研究した。VERITAS の開発手法では、ユーザモデルの作成において多くの被験者を対象として製品に関わる様々な操作や動作のログデータを収集する必要がある、データの収集に長期間と高コストを必要とする欠点があった。更に、VERITAS の開発手法には、データの収集の際に、被験者が負傷するリスクもあった。また、DH は、身体的形状や物理的動作などの統計データを基にユーザモデルを作成し、シミュレーション環境で評価する開発手法である。そのため、DH においても、ユーザモデルの作成のために、多くの被験者や回答者を対象に大量のデータを収集して、統計データベースを作成する必要がある、長期間と高コストを必要とする欠点があった。

そして、これらのデジタルモックアップとユーザモデルによる開発手法では、製品の限定された機能しか実現できず、また、人間の身体的形状や物理的動作などの一部の特徴や特性しか実現できないため、利用者が簡単な操作をする製品の開発には有効であったが、条件依存の動作や利用者の振舞いに対応するリアルタイムリアクションを必要とする製品の開発には適していなかった。

2.3. 本論文で採用した基本技術

本論文で提案する利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法と、それを構成する利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法では、次の要件を実現する。

- ① 利用者視点での高い利用時品質を実現したサービスを利用者に提供することが期待されている。
 - (1) 利用者視点に立ち、ユーザ要求に適合するシステムを開発する必要がある。
- ② 境界の利用者を含む多様な利用者に適応するシステムの開発が期待されている。
 - (2-1) 比較的少量の定量データを定性データで補完して利用者プロフィールを作成する必要がある。
 - (2-2) 多様な利用者プロフィールに対してユーザ要求と利用者のモデルを定義する必要がある。
- ③ すべての機能の開発と評価を短期間で、低コストで実現することが期待されている。
 - (3) 製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価が可能なシステム開発が必要である。
- ④ システム開発時における被験者の負傷のリスクの低減が期待されている。
 - (4) 被験者を必要としないシステムの設計時評価を可能にする必要がある。

そこで、本論文では、人間中心設計、ペルソナ、モデルベース・システムズエンジニアリング、モデルベース開発を採用し、以下のように利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の要件を実現する。なお、本論文では、サービスロボットを対象に研究を進めるため、モデルベース開発ツールとして、RT-Middleware（以下すべての章で、RTM）[24] [25] [26]を採用する。

- (1) 利用者視点に立ち、ユーザ要求に適合するシステムを開発する。

人間中心設計を導入することで、製造企業視点に基づく開発から利用者視点に基づく開発への移

行を可能にする。

(2-1) 比較的少量の定量データを定性データで補完して利用者プロフィールを作成する。

ペルソナを利用者プロファイリング手法として採用することで、被験者数と収集するデータ数を低減することを可能とし、比較的少量の定量データを定性データで補完して、設計に必要な、境界の利用者を含む多様な利用者に関する情報を獲得し、利用者プロフィールを作成する。

(2-2) 多様な利用者プロフィールに対してユーザ要求と利用者のモデルを定義する。

モデルベース・システムズエンジニアリングを利用者のモデリングに適用することで、製品のモデルや環境のモデルと同じ手法で、多様な利用者プロフィールを基にユーザ要求と利用者のモデルをダイアグラムによって定義することを可能にする。

(3) 製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価が可能なシステム開発を実現する。

モデルベース開発を導入することにより、製品サンプルの代理としてデバイスモデルをシミュレーション環境で評価することで、システム開発の長期化と高コスト化の原因となる、設計時評価における製品サンプルのハードウェアの制作を不要にする。また、利用者の代理として振舞うユーザモデルをモデルベース開発に導入してシミュレーション環境でデバイスモデルと協働させることにより、身体的形状や物理的動作だけではなく、条件依存の動作や利用者の振舞いに対応するリアルタイムリアクションなどを、様々な条件下や繰り返し同一条件下において、システムのすべての機能に対して、評価を可能にする。

(4) 被験者を必要としないシステムの設計時評価を可能にする。

ユーザモデルをモデルベース開発に導入することにより、利用者の代理としてユーザモデルをシミュレーション環境で動作させてシステムを設計時評価できるので、設計時評価における被験者の負傷のリスクの排除や、検証における被験者の負傷のリスクの低減を可能にする。

本節では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法で採用した、人間中心設計、ペルソナ、モデルベース・システムズエンジニアリング、モデルベース開発を説明する。そして、RTM に関しては、モデルベース開発とともに、モデルベース開発ツールとしての役割を説明する。

2.3.1. 人間中心設計

サービスロボットに代表される多機能システムは、利用者視点で、高いユーザビリティと高いユーザエクスペリエンスを有する、利用時品質の高いサービスを利用者に提供することが期待されている。しかし、これまでのシステム開発では、製造企業視点に立ち、製造企業の独自技術に基づいてシステムを開発してきたため、システムがユーザ要求に適合していないことがあった。また、製造企業は利用者グループの中心的利用者だけに焦点を当てており、境界の利用者を含む多様な利用者に対応するシステム開発は実施されてこなかった。

そこで、利用者視点の開発プロセスモデルとして、人間中心設計 (HCD: Human-centred design) が ISO 9241-210:2010 で定義された。人間中心設計は、人間が使用可能であり、人間にとって有用な

システムを開発することを目的とした開発アプローチである。そして、人間中心設計では、利用者に着目し、高いユーザビリティと高いユーザエクスペリエンスを有する利用時品質の高いサービスを利用者に提供するため、ユーザ要求に適合する技術を適用することを前提としている。

Fig.1 に、ISO 9241-210:2010 で定義された人間中心設計プロセスモデルを示す。

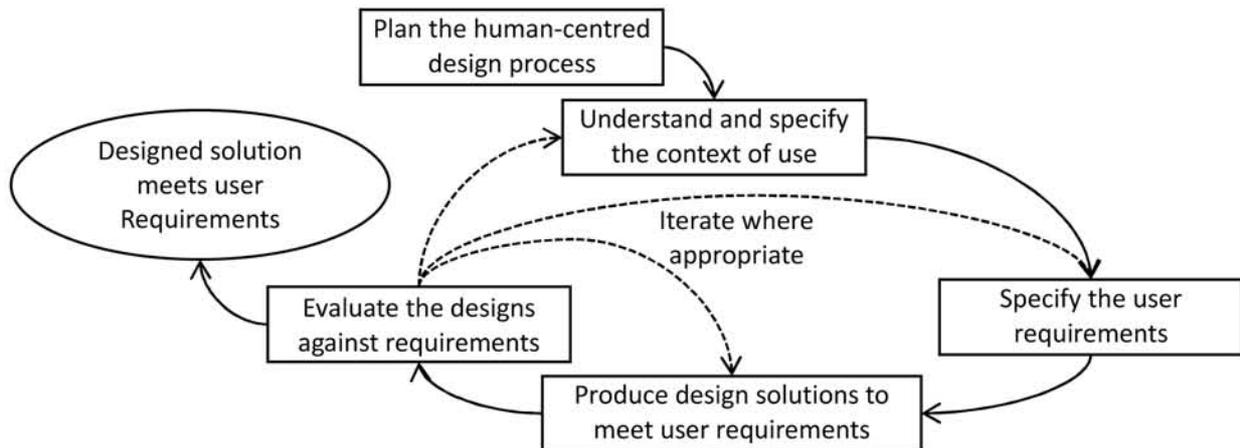


Fig. 1 人間中心設計プロセスモデル.

しかし、ISO 9241-210:2010 では、人間中心設計の具体的プロセスを提案していない。そこで、これまでの人間中心設計[27] [28] [29] [30]によるシステム開発では、ペーパープロトタイピングやモックアップの制作と被験者による評価を繰り返す方法が多く実施されてきた。しかし、これらの方法では製品の限定された形状や機能しか実現できないため、利用者の身体的形状や物理的動作に関わる製品の開発や評価には適していたが、条件依存の動作や利用者の振舞いに対応するリアルタイムリアクションを必要とする製品の開発や評価には適していなかった。また、これらの方法では、多くの被験者を必要としたため、被験者の多いユーザグループの中心的利用者による評価は可能だが、被験者の少ない境界の利用者を含む多様な利用者による評価が困難という欠点もあった。そこで、本論文では、人間中心設計の具体的プロセスとなる新たな開発手法を研究した。

2.3.2. ペルソナ

製品の利用時品質の向上のためには、利用者を正確に理解することが不可欠である。しかし、利用者を理解することは容易ではない。例えば、健常者である開発者が、介護用サービスロボットのような障害者用機器や装置、そして、それらの利用環境や利用方法、利用形態などの利用状況 (Context of use) を理解することは容易ではない。

本研究では、利用者と利用者による製品の利用状況を理解するために、利用者の特徴や特性を収集し、利用者プロフィールを作成し、製品の利用状況を明確にする手法を検討し、ペルソナ (Persona) に着目した。ペルソナは、製品やサービスなどの顧客を対象とし、顧客の特徴や特性、購買状況を擬人化して表現する代表的な顧客プロファイリング手法の一つである。

そこで、ペルソナを利用者に適用し、利用者の身体的形状や物理的動作だけではなく、心理的要因

を含む特徴や特性である振舞いや経時的変化などを含む利用状況を擬人化して表現する利用者プロファイリング手法としての有効性と、人間中心設計に対する適用性を調査した。そして、調査を基に、本論文では、ペルソナを利用者プロファイリング手法として採用した。

ペルソナのプロファイリングプロセスは、データの収集と利用者のセグメント化、ファクトイドの解析と整理、スケルトンの作成と優先順位付け、主要ペルソナの作成、ペルソナの検証で構成している。なお、ファクトイドは、利用者の特徴や特性、利用状況、利用方法、利用形態、利用場所、振舞い情報などを表現する最小単位であり、ペルソナの骨格であるスケルトンの構成要素である。

ペルソナの特徴の一つとして、比較的少量の定量データを、少人数に対するインタビューなどによる定性データで補完することで、利用者プロファイルを作成できる利点がある。また、ペルソナには、ユーザ要求の定義やシステムの要件定義に必要な機能条件や非機能条件をファクトイドとして抽出し、それらを基に、利用者の身体的形状や物理的動作などの身体的特徴や特性だけではなく、心理的要因を含む特徴や特性である振舞いや経時的変化、そして、製品の利用環境や利用方法、利用形態などの利用状況を、ストーリーとして定義できる利点もある。

そして、ストーリーとして表現した身体的形状や物理的動作などの身体的特徴や特性、心理的特徴や特性を含む利用者の振舞いや経時的変化、利用状況などは、利用者の状態遷移の定義だけではなく、システムに対するユーザ要求やシステムの状態遷移の定義においても有用である。

Fig.2 に、本論文で採用したペルソナのプロファイリングプロセス[10]を示す。

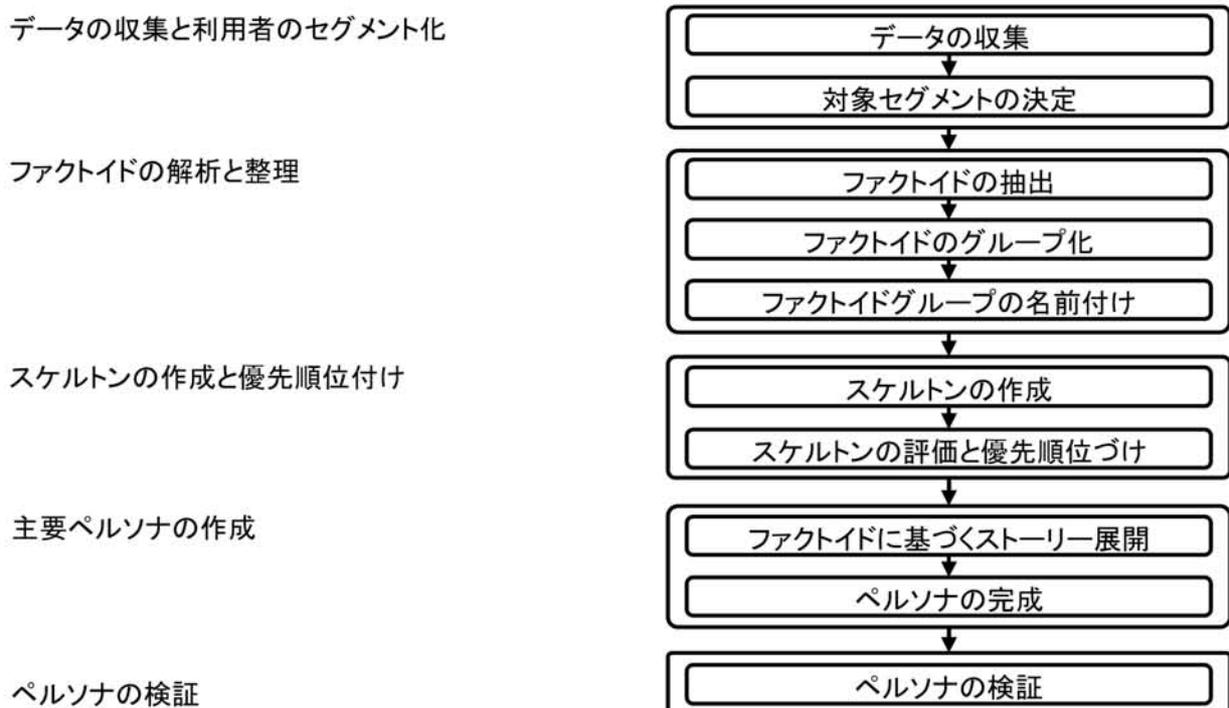


Fig. 2 本論文で採用したペルソナのプロファイリングプロセス。

ペルソナによる利用者プロファイリングでは、対象製品や対象サービス毎に収集すべき情報項目群

と条件が異なるため、対象製品や対象サービスを特定する必要があり、そして、収集すべき情報項目群と条件も経時的に変化するために、ペルソナの自動作成は困難である。また、対象製品や対象サービスのペルソナを適切に維持するためには、最新の利用者の利用状況を調査し、ペルソナを更新し続ける必要がある。

なお、ペルソナによる利用者プロファイリングでは、収集すべき情報項目群と条件の決定において、調査者の知識や常識を排除する必要がある。

2.3.3. モデルベース・システムズエンジニアリング

システム開発では、システムを明確に定義し、表現することが必須である。モデルベース・システムズエンジニアリング (MBSE : Model-based Systems Engineering) は、システムの分析、仕様決定、設計、検証の支援を目的とし、システム要求定義やシステムの構造、システムの動作をダイアグラムによって記述し、装置などのモデルを定義する手法である。

ダイアグラムには、要求ダイアグラム、パッケージダイアグラム、ブロック定義ダイアグラム、内部ブロックダイアグラム、パラメトリックダイアグラム、ユースケースダイアグラム、シーケンスダイアグラム、アクティビティダイアグラム、ステートマシンダイアグラムがある。モデルベース・システムズエンジニアリングでは、これらのダイアグラムを使って、ユーザ要求や装置のモデル、環境のモデルを定義することが可能である。利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発では、利用者のモデリング手法としてモデルベース・システムズエンジニアリングを採用した。

これまでのモデルベース・システムズエンジニアリングでは、装置のモデルや環境のモデルから独立した利用者のモデルを定義することはなかった。そこで、本論文では、利用者プロフィールを基に、装置のモデルや環境のモデルから独立した利用者のモデルを作成する手法を研究した。

Fig.3 に、モデルベース・システムズエンジニアリングのためのシステムズモデリング言語 (以下、SysML) のダイアグラムの構成を示す。

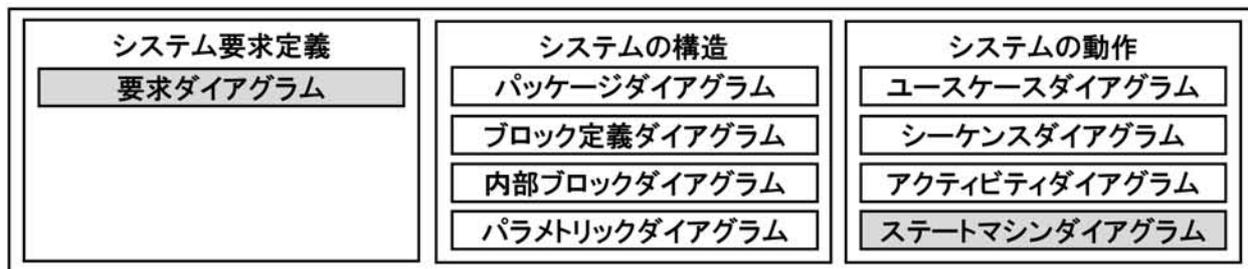


Fig. 3 モデルベース・システムズエンジニアリングのための SysML のダイアグラム.

本論文では、Fig.3 においてグレーの四角のボックスで示した要求ダイアグラムとステートマシンダイアグラムにより、ユーザ要求と利用者のモデルを定義した。

2.3.4. モデルベース開発およびモデルベース開発ツール

システム開発において、開発期間を長期化させ、高コスト化させる要因として、製品サンプルのハードウェアの制作と、被験者による評価や検証がある。そして、システムが複雑になればなるほど、製品サンプルのハードウェアの制作と被験者による評価や検証に、長期間と高コストを要する。また、製品サンプルのハードウェアに不具合が発見されれば、製品サンプルのハードウェアを修正したり、制作し直したりする必要があり、更に、開発期間を長期化させ、高コスト化させる要因となる。

モデルベース開発 (MBD : Model-Based Development) では、製品サンプルのハードウェアを制作する必要がなく、システムの代理として動作するデバイスモデルや、環境の代理として動作するエンバイロメントモデルを使い、モデルベース・シミュレーション (MBS : Model-Based Simulation) により、システムの設計時評価や検証が可能になる。そこで、システム開発において、開発期間の短縮とコストの削減などを目的に、自動車業界などでモデルベース開発が普及しはじめている。また、モデルベース開発には、作成したモデルを実システムの基盤として利用できる利点もある。

Fig.4 に、一般的なモデルベース開発の開発プロセスを示す。

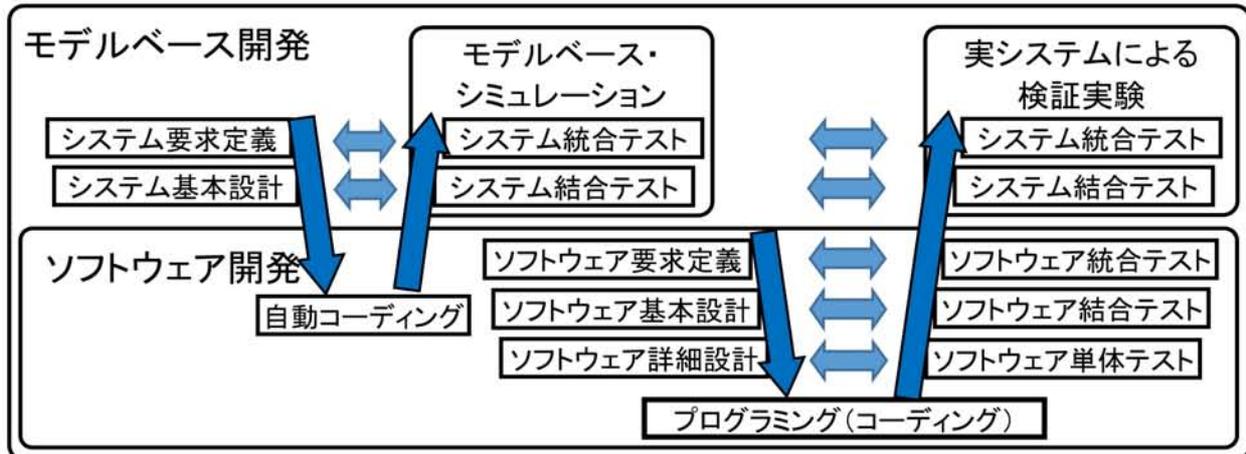


Fig. 4 一般的なモデルベース開発の開発プロセス。

しかし、これまでのモデルベース開発では、利用者の代理として振舞うユーザモデルを独立したモデルとして作成することはなく、利用者の振舞いをデバイスモデルやエンバイロメントモデルの一部として定義したため、多様な利用者の様々な振舞いに対応する評価は困難であった。

本論文では、ロボット開発用ミドルウェアである RTM をロボット開発のためのモデルベース開発ツールとして採用した。RTM には式や図形から自動的にプログラムを生成する自動コーディング機能はないが、RTM は単なるミドルウェアではなく、シミュレーションツールとしての能力を備えている。そこで、本論文では、利用者の代理としてのユーザモデル、装置の代理としてのデバイスモデル、環境の代理としてのエンバイロメントモデルを、RTM 上のコンポーネントとして作成し、RTM 上のシミュレーション環境で協働させて、利用者を含めたシステム全体を評価する手法を研究した。

Fig.5 に、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発に適用した RTM によるモデルベース開

発の開発プロセスを示す。

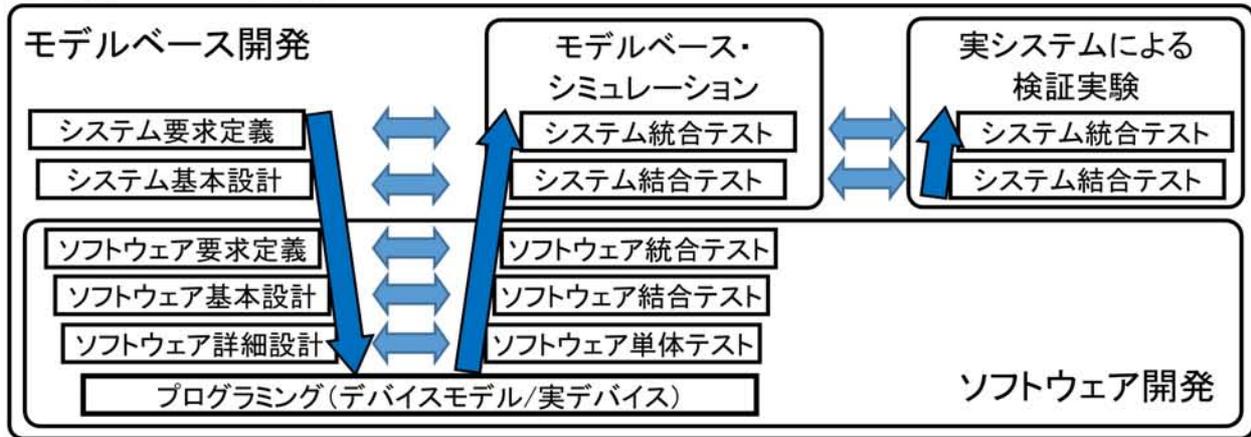


Fig. 5 RTM によるモデルベース開発の開発プロセス.

また、RTM によるシミュレーションでは、実サブシステムに利用者を負傷させるリスクがない場合は実システムのコンポーネントをそのまま組込み、また、実サブシステムに利用者を負傷させるリスクがある場合はそのサブシステムに対応するデバイスモデルのコンポーネントを開発し、シミュレーション環境で協働させることで、安全性を確保しながら、システムの設計時評価を可能にする利点がある。

2.4. 本論文で提案するシステム開発手法の構成

本論文で提案する利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法では、利用者視点でのシステム開発の実現を目的とし、最初に、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法により、比較的少量の定量データを定性データで補完して多様な利用者プロフィールを作成し、それぞれの利用者プロフィールに対してユーザ要求と利用者のモデルを定義する。そして、ユーザ要求と利用者のモデルを基に、利用者の代理として振舞うユーザモデルと、製品の代理として動作するデバイスモデルを作成し、これらのモデルをシミュレーション環境で協働させてシステムを評価することで、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価が可能なシステム開発手法を実現する。また、利用者の代理として振舞うユーザモデルにより、システムをシミュレーション環境で評価することで、被験者を必要としないシステムの設計時評価を可能にし、被験者の負傷のリスクを低減する。

本節では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法と、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の構成を説明する。

2.4.1. 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の構成

利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法では、比較的少量の定量データを定性データで補完することで利用者の特徴と特性を明確にして利用者プロフィールを作成するために、利用者プ

ロファイリング手法としてペルソナを採用した。ペルソナの採用により、利用者の特徴と特性に関する情報の獲得に必要な被験者数やデータ数を低減することで、境界の利用者を含む多様な利用者プロフィールを作成することを可能にした。

電気自動車の蓄電池利用による電力平準化の研究では、ペルソナによる利用者プロフィールを起点とし、Michon の道路利用者タスクの階層構造[31] を利用者のモデリングプロセスとして適用し、利用者のモデリング手法としてモデルベース・システムズエンジニアリングを採用して、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を構成した。

また、サービスロボットの開発では、ペルソナによる利用者プロフィールを起点とし、モデルベース・システムズエンジニアリングによって製品のモデルや環境のモデルを定義し、そして、同一手法によって多様な利用者プロフィールに対するユーザ要求と利用者のモデルをダイアグラムにより定義することを可能にし、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発に適用するための利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を構成した。

Fig.6 に、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法に適用する利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の構成を示す。

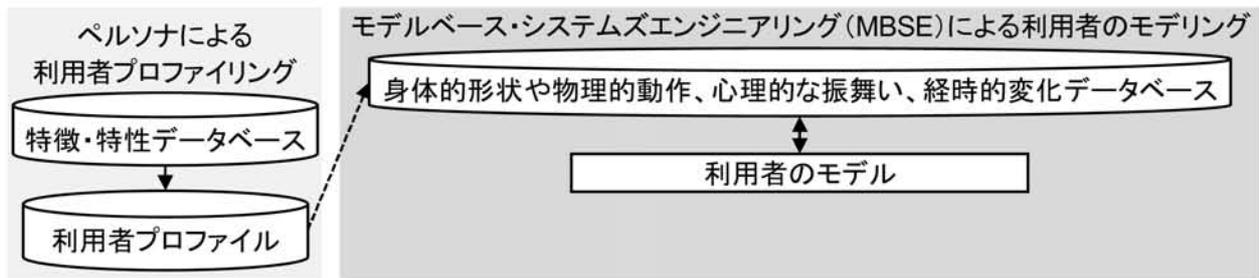


Fig. 6 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の構成.

本利用者のモデリング手法では、ペルソナによる利用者プロファイリングにおいて、比較的少量の定量データを定性データで補完し、利用者プロフィールを作成する。そして、モデルベース・システムズエンジニアリングによる利用者のモデリングにおいて、利用者プロフィールとその利用状況を基に、利用者の身体的形状や物理的動作、心理的な振舞い、経時的変化などを利用者のモデルとして定義し、そして、利用者プロフィールや利用者のモデルを基に、製品に対するユーザ要求を定義する。

利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の詳細に関しては、第3章で説明する。

2.4.2. 利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の構成

利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法で採用したペルソナ、モデルベース・システムズエンジニアリングに加え、モデルベース開発を採用し、更に、モデルベース開発ツールとしてロボット開発のためのミドルウェアであるRTMを採用した。

まず、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法により、ユーザ要求と利用者のモデル

を作成し、次に、ユーザ要求と利用者のモデルを基に、利用者の代理として振舞うユーザモデルと、製品の代理として動作するデバイスモデルを作成してシミュレーション環境で協働させることで、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を可能にするシステム開発手法を実現した。本論文では、モデルによるシミュレーションをモデルベース・シミュレーション (MBS) と呼ぶ。

これにより、システムの設計時評価で使用してきた製品サンプルのハードウェアの制作に必要な開発期間と開発コストを低減し、更に、ユーザモデルをシミュレーション環境で動作させることで、被験者による評価期間と評価コストを低減することも可能にした。

そして、利用者の振舞いをユーザモデルにより再現することで、身体的形状や物理的動作だけでなく、条件依存の動作や利用者の振舞いに対応するリアルタイムリアクションなどを、様々な条件下や繰り返し同一条件下で評価することも可能にした。

また、利用者の代理としてユーザモデルをシミュレーション環境で振舞わせることで、被験者を必要としないシステムの設計時評価を可能にし、システム開発における被験者の負傷のリスクを低減した。

Fig.7 に、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の基本構成を示す。Fig.7 では、Fig.6 で示した利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の構成に対し、点線の長方形で囲った「RTMによるモデルベース開発 (MBD)におけるモデルベース・シミュレーション (MBS)」の部分を追加している。

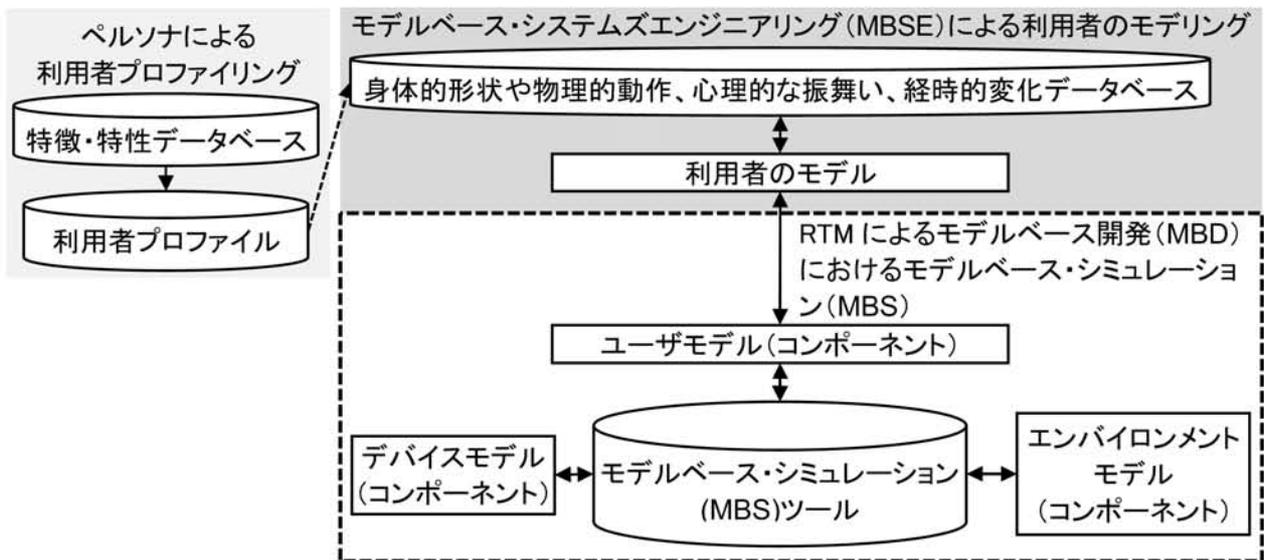


Fig. 7 利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発の基本構成.

そして、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を Fig.1 に示した人間中心設計プロセスモデルに適用し、具体的人間中心設計プロセスとしての有効性を検証した。

Fig.8 に、具体的人間中心設計プロセスとしての利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を示す。

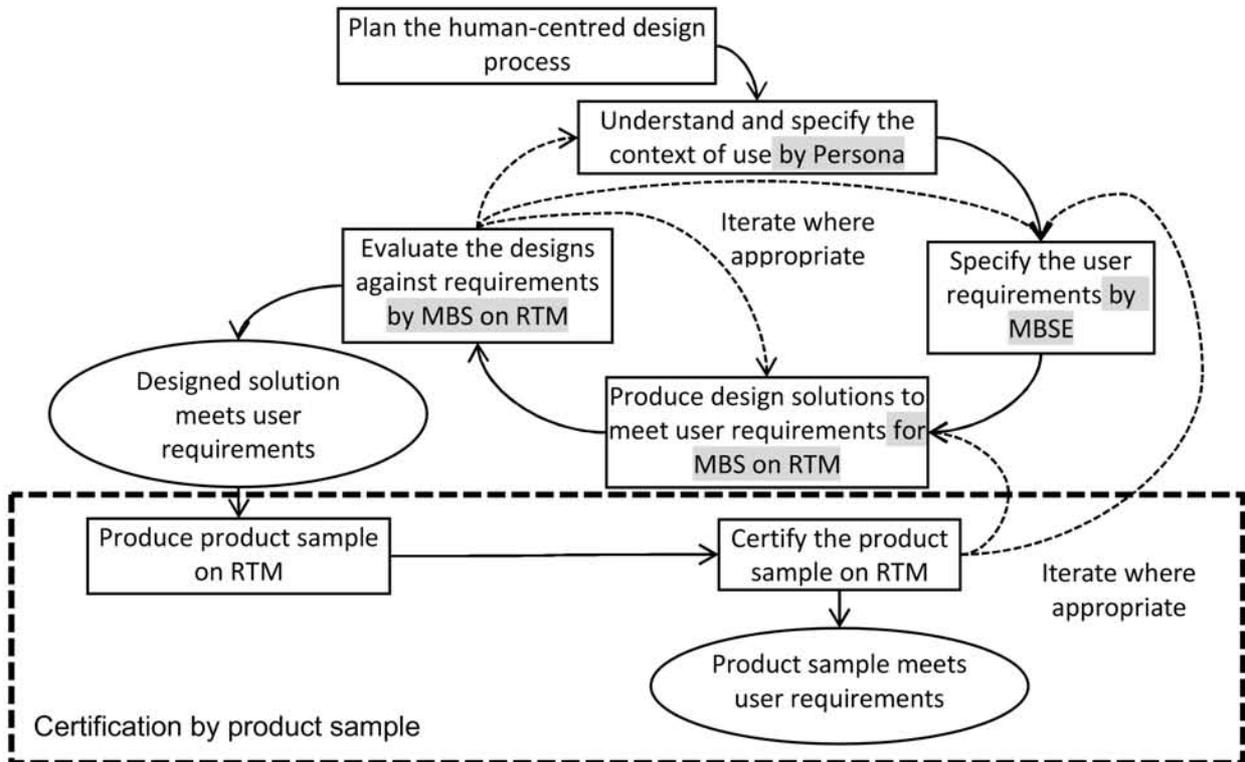


Fig. 8 具体的人間中心設計プロセスとしての利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法.

具体的人間中心設計プロセスとしての利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法では、ペルソナ、モデルベース・システムズエンジニアリング、モデルベース開発、そして、モデルベース開発ツールとしてのRTMを、以下のように人間中心設計プロセスモデルの各ステップに適用した。なお、点線の長方形で囲った「Certification by product sample」の部分は、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法において、人間中心設計プロセスモデルに対して追加したプロセスを示す。

- **Understand and specify the context of use by Persona**
ペルソナ (Persona) により、利用者プロフィールを記述し、ペルソナのストーリーとして利用状況 (context of use) を記述する。
- **Specify the user requirements by MBSE**
モデルベース・システムズエンジニアリング (MBSE) により、ユーザ要求と装置および利用者のモデルを定義する。
- **Produce design solutions to meet user requirements for MBS on RTM**
モデルベース開発により、RTM 上でデバイスモデルやユーザモデルなどで構成するモデルベース・シミュレーション (MBS) が可能な設計ソリューションを生成する。
- **Evaluate the designs against requirements by MBS on RTM**
RTM 上で MBS により、モデルベース開発のデバイスモデルやユーザモデルなどで構成する設計ソリューションを動作させ、様々な条件下や繰り返し同一条件下で評価する。

そして、本論文では、Fig.1 に示した人間中心設計プロセスモデルに対し、次の 2 ステップを追加し、製品サンプルによる設計ソリューションの検証を可能にした。

- **Produce product sample on RTM**
RTM 上のデバイスモデルとユーザモデルを、ハードウェアを実装した実サブシステムと置き換えることで、製品サンプルを制作する。
- **Certify the product sample on RTM**
RTM 上で、製品サンプルを、被験者により、安全に検証する。

2.5. 本論文の各章の位置付け

本節では、本論文の各章の位置付けを示す。

第 1 章では、本論文における、背景と目的、そして、本論文の構成を示す。

第 2 章である本章では、本論文における基本情報として、本論文における用語、これまでのシステム開発手法の課題、本論文で採用した基本技術、本論文で提案するシステム開発手法の構成、本論文の各章の位置付けを説明する。基本技術としては、人間中心設計、ペルソナ、モデルベース・システムズエンジニアリング、モデルベース開発およびモデルベース開発ツールについて説明する。また、本論文で提案するシステム開発手法の構成では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法と、このモデリング手法を適用した利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の構成を説明する。そして、本論文の各章の位置付けでは、本論文の構成と各章の位置付けを図で示す。

第 3 章では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の検証を実施する。最初に、電気自動車の蓄電池利用による家庭部門の需要電力平準化の研究において、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法と、ログデータに基づく利用者のモデリング手法との比較による有効性の検証 [1]を実施する。次に、電気自動車の蓄電池利用による広域供給電力平準化の可能性の研究において、複数の家族セグメントへの適用と比較による有効性の検証[2] [3]を実施し、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の有効性を検証する。

第 4 章では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の検証を実施する。最初に、自走式サービスロボットの開発による利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性の検証[4]において、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法により身体的形状と物理的動作、そして、心理的な振舞いを対象とする利用者のモデルを作成し、作成した利用者のモデルを利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法に適用し、その有効性を検証する。次に、コンシェルジュタイプ・ロボットの開発による具体的人間中心設計プロセスとしての有効性の検証[5]において、人間中心設計の具体的プロセスとしての利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を検証する。

第 5 章では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の適用例として、車椅子ロボットの開発への適用[6]、テレプレゼンス車椅子ロボットの開発への適用[7]、テレプレゼンスロボットの

開発への適用[8]を実施し、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を確認する。更に、テレプレゼンスロボットの開発への適用では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を具体的人間中心設計プロセスとして適用[8]し、その有効性を確認する。

最後に、第6章で結言を述べる。

Fig.9に、本論文の第2章から第5章までの構成を図で示す。

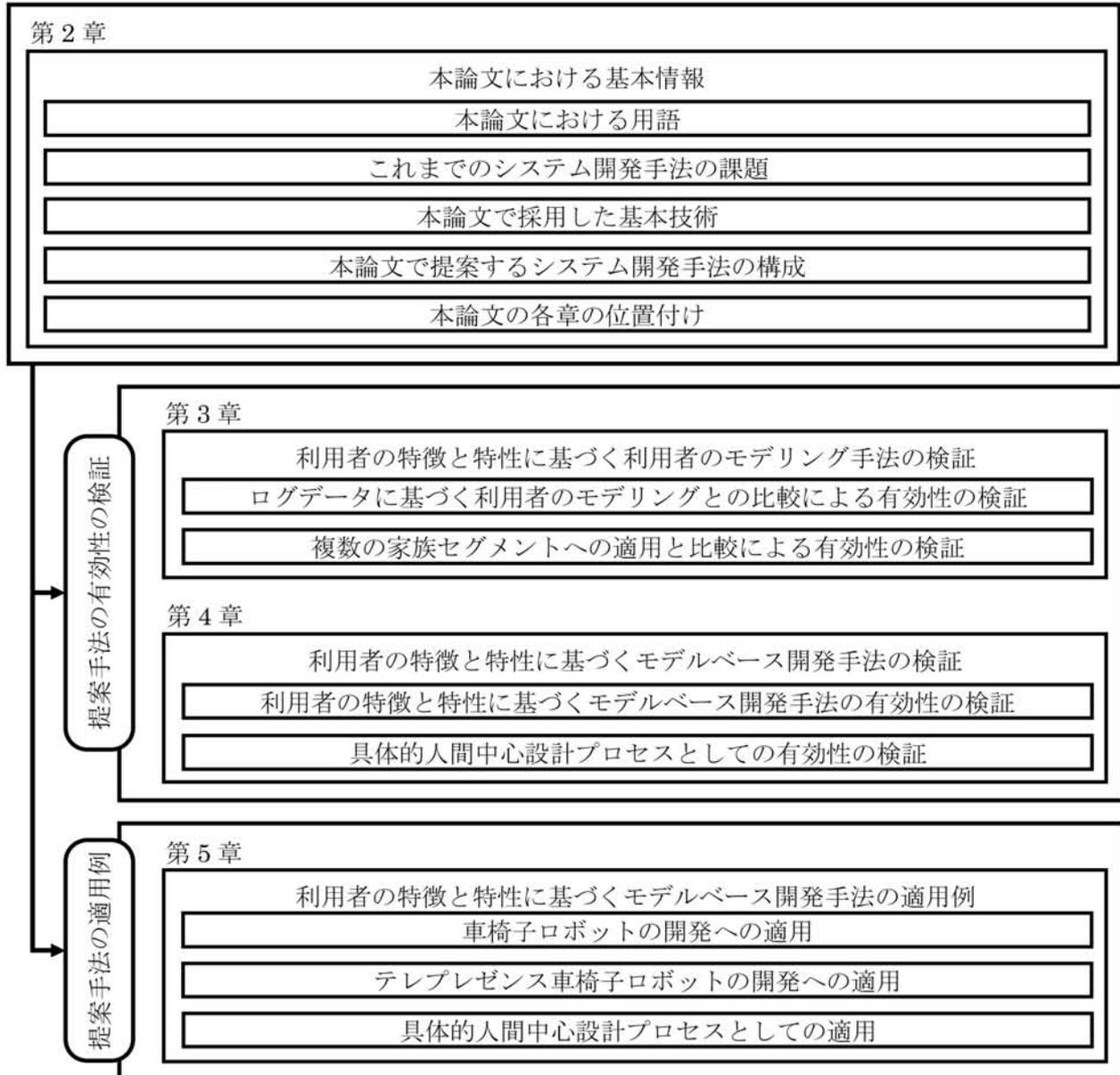


Fig. 9 本論文の構成.

第3章

利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の検証

本章では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法に関する有効性を検証する。電気自動車の蓄電池利用による家庭部門の需要電力平準化の研究では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果を、ログデータに基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果と比較し、本手法の有効性を検証する。そして、電気自動車の蓄電池利用による広域供給電力平準化の可能性の研究では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を複数の家族セグメントに適用し、利用者プロファイルから利用者のモデルを定義し、それらの利用者のモデルによるシミュレーション結果を比較することで、本手法の有効性を検証する。

3.1. ログデータに基づく利用者のモデリングとの比較による有効性の検証

本検証では、電気自動車（以下、EV）の蓄電池利用による家庭部門の需要電力平準化の研究において、比較的少量の定量データを定性データで補完する利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果を、ログデータに基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果と比較し、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の有効性を検証する。

3.1.1. システム構成

本検証では、V2H と HEMS による家庭内の需要電力平準化のためのシステムを EV、スイッチボードとコントローラによるパワーコントローラ、家庭電化製品の 3 コンポーネントで構成した。

Fig.10 に、家庭内の需要電力平準化のためのシステム構成を示す。



Fig. 10 家庭内の需要電力平準化のためのシステム構成.

3.1.2. 基本データ

本検証では、家庭内の需要電力平準化のシミュレーションのために、平成 22 年度エネルギーに関する年次報告[32]に示された 2010 年 7 月 23 日の東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データを採用した。

Fig.11 に、平成 22 年度エネルギーに関する年次報告の 2010 年 7 月 23 日の東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データを示す。

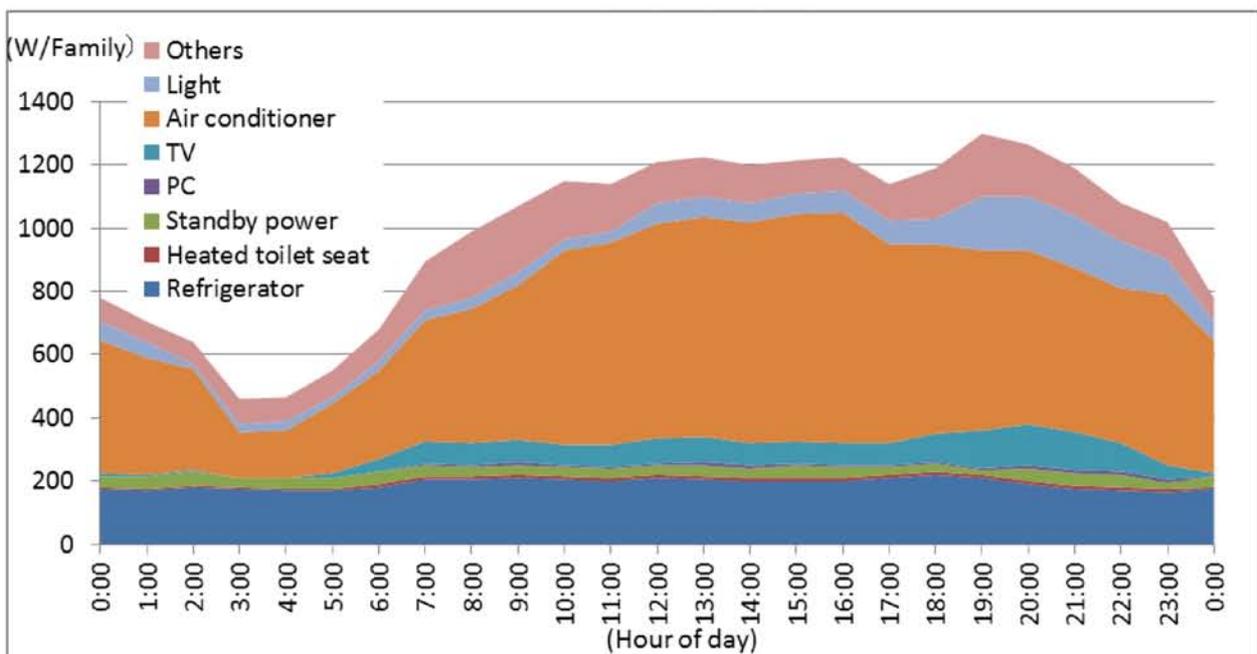


Fig. 11 2010 年 7 月 23 日の東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データ。

3.1.3. ログデータに基づく利用者のモデリング手法

ログデータは被験者から収集する実データであり、ログデータに基づく利用者のモデリング手法は、ログデータをもとに利用者をセグメント化し、利用者の各セグメントに対応する利用者のモデルを作成する手法である。

本検証では、利用者のモデルを作成するために、位置と加速度の時系列ログデータを基に利用者の所在場所ログと行動ログを推定して蓄積する所在場所ログ・行動ログ収集システムを開発した。なお、行動ログとしては特に移動手段に焦点を当て、ファジィ推論による行動分析を実施した。

本システムではこれらの時系列データを収集するために、GPS 機能と加速度計機能を有するスマートフォンをデータ収集装置として採用し、位置と加速度の時系列ログデータを収集して蓄積した。そして、位置と加速度の時系列ログデータに基づいて、ファジィ推論による行動分析を実施した。以下に、所在場所ログ・行動ログ収集システムの概要とファジィ推論による行動分析方法を示す。

3.1.3.1. 所在場所ログ・行動ログ収集システム

所在場所ログ・行動ログ収集システムの入力はスマートフォンによる位置と加速度の時系列ログデータであり、出力は所在場所ログと行動ログである。そして、本システムを、自宅・オフィス位置データベース、センサーデータ時系列データベース、所在場所・行動ログデータベースの3種類のデータベースで構成した。

Fig.12 に、所在場所ログ・行動ログ収集システムの構成を示す。

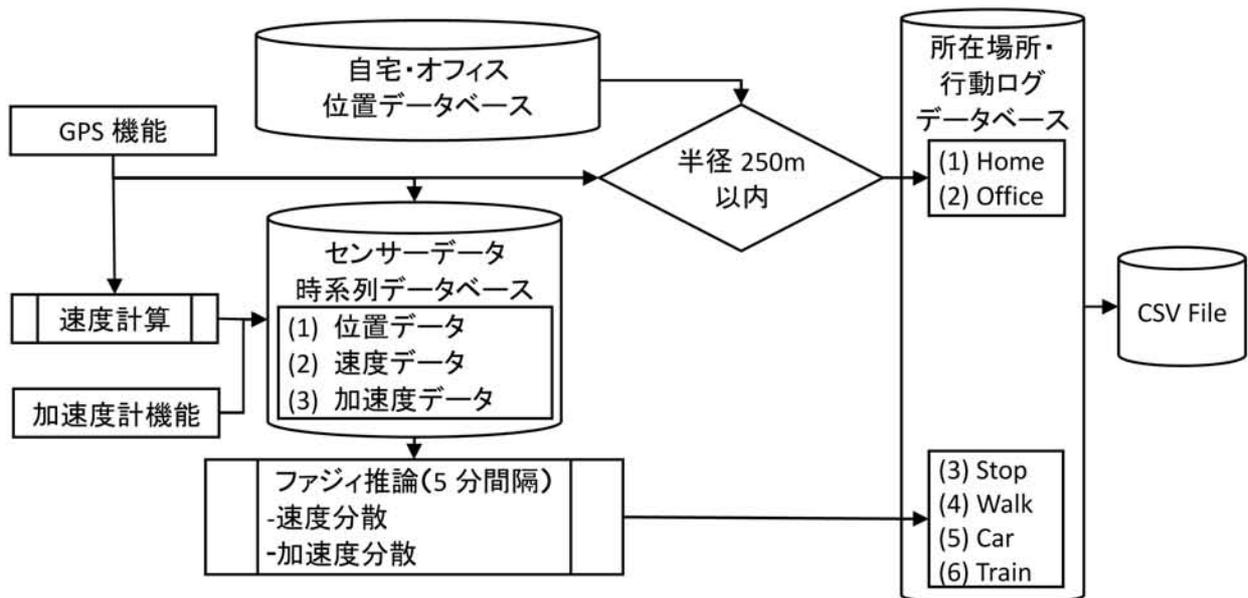


Fig. 12 所在場所ログ・行動ログ収集システムの構成.

(1) 自宅・オフィス位置データベース

自宅・オフィス位置データベースは、被験者の自宅とオフィスの位置を記録するデータベースである。これらのデータは、被験者の現在位置と自宅やオフィスの位置の関係を判定するために利用する。

(2) センサーデータ時系列データベース

センサーデータ時系列データベースは、位置データ、速度データ、加速度データを時系列データとして格納するデータベースである。スマートフォンのGPS機能と加速度計機能により、位置データと加速度データを5秒ごとに収集し、速度に関しては位置の時系列データから生成した。

- 位置データは、GPS機能により収集する位置の時系列データである。
- 速度データは、位置データから生成する速度の時系列データである。
- 加速度データは、加速度計機能によって収集する加速度の時系列データである。

(3) 所在場所・行動ログデータベース

所在場所・行動ログデータベースは所在場所ログと行動ログを時系列データとして格納するデータベースである。

所在場所ログは、スマートフォンの GPS 機能と自宅・オフィス位置データベースを基に以下のよう
に推定した。

- Home は、被験者の自宅から半径 250m 以内の領域に位置していることを意味する。
- Office は、被験者のオフィスから半径 250m 以内の領域に位置していることを意味する。

そして、行動ログは、センサーデータ時系列データベースの速度データと加速度データを基にファ
ジィ推論により行動分析を実施し、行動を以下のように推定した。

- Stop は、Home または Office 以外のどこかで停止していることを意味する。
- Walk は、Home または Office 以外のどこかで徒歩で移動していることを意味する。
- Car は、Home または Office 以外のどこかで自動車移動していることを意味する。
- Train は、Home または Office 以外のどこかで電車で移動していることを意味する。

3.1.3.2. ファジィ推論による行動分析

本検証では、行動分析にファジィ推論を適用し、行動分析のために加速度分散メンバーシップ関数
と速度分散メンバーシップ関数を定義し、更に、行動の評価のためにこれらのメンバーシップ関数に
基づく以下の4つのファジィルールを定義した。

- If (加速度分散 is Low) AND (速度分散 is Low) then Stop.
- If (加速度分散 is High) AND (速度分散 is Low) then Walk.
- If (加速度分散 is Medium) AND (速度分散 is High) then Car.
- If (加速度分散 is Low) AND (速度分散 is High) then Train.

Fig.13 に、加速度分散メンバーシップ関数を、Fig.14 に、速度分散メンバーシップ関数を示す。

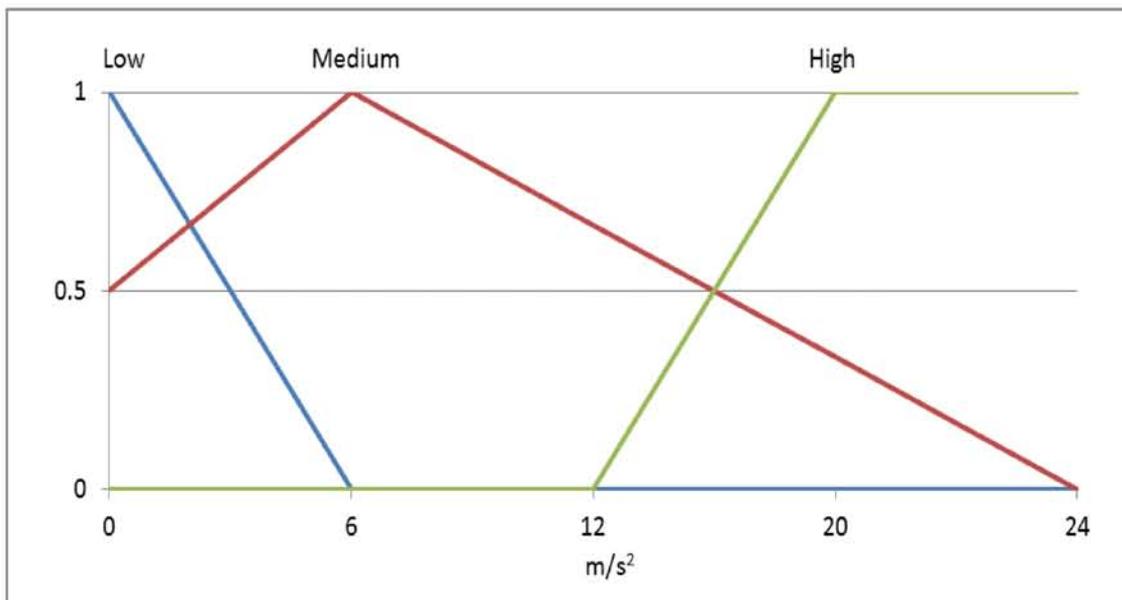


Fig. 13 加速度分散メンバーシップ関数.

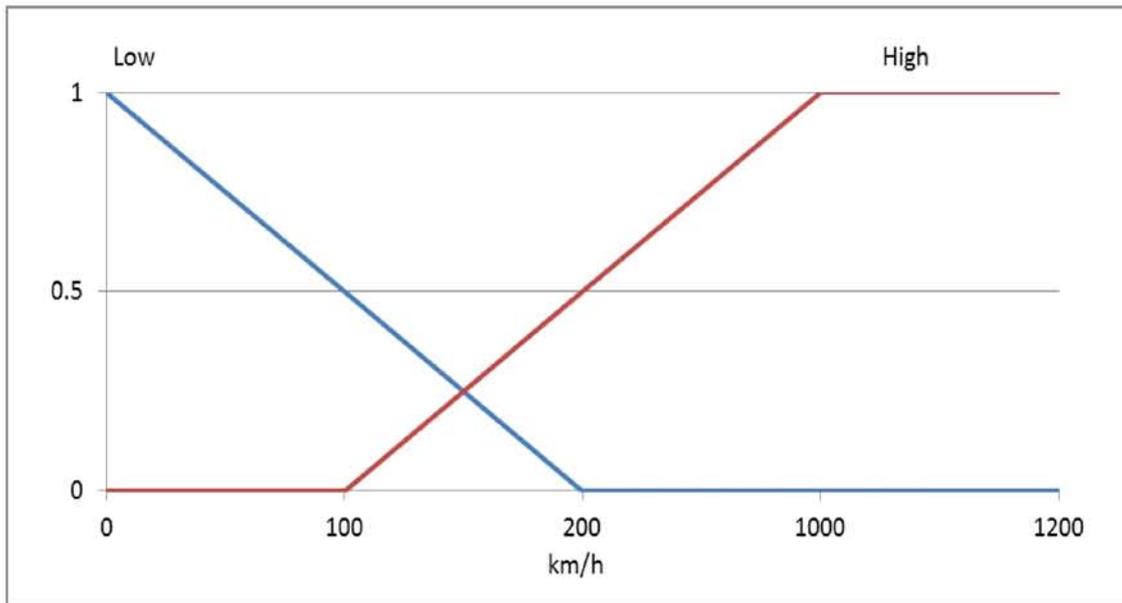


Fig. 14 速度分散メンバーシップ関数.

3.1.4. 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法

利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法は、最初に、統計データやログデータなどの定量データだけではなく、インタビューなどの定性データを基に、利用者の特徴や特性を表現した利用者プロフィールを作成し、次に、この利用者プロフィールに基づいて利用者のモデルを作成する手法である。

3.1.4.1. 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリングの処理

本検証では、EV の利用者をモデル化するので、ペルソナによる利用者プロフィールを起点とし、戦略レベル、戦術レベル、そして、操作レベルの3階層で構成する Michon の道路利用者タスクの階層構造を利用者のモデリングプロセスとして適用した。

Fig.15 に、道路利用者タスクの階層構造に基づく利用者のモデリングプロセスを示す。

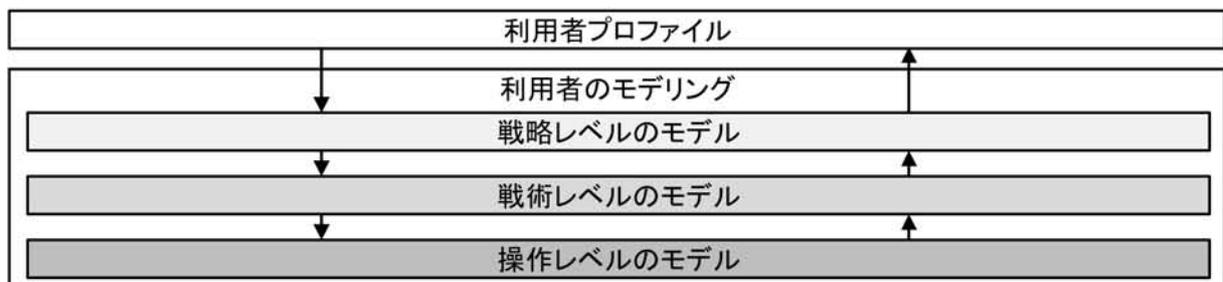


Fig. 15 道路利用者タスクの階層構造に基づく利用者のモデリングプロセス.

この利用者のモデリングプロセスにおいて、戦略レベルのモデルは、計画段階での利用者の行動のセットであり、利用者プロフィールで表現した利用者の特徴を基に定義する。戦術レベルのモデルは、環境との交渉における利用者の行動のセットである。そして、操作レベルのモデルは、利用者の行動の最小単位のセットである。最後に、この操作レベルのモデルを基に利用者のモデルを定義した。

3.1.4.2. 家族の利用者プロフィール

利用者プロフィールは、年齢、性別、嗜好、生活パターンなどの利用者の特徴や特性の表現である。本検証では、事前に、適切な電力使用に関する研究のためのアンケートを 80 名の回答者に対して実施し、家族構成や家庭電化製品の所有の有無と利用形態、自動車の所有の有無と利用形態などの生活パターンを調査した。

Fig.16 に、適切な電力使用に関する研究のためのアンケートの質問項目を示す。

■世帯情報をご記入ください / 選択質問の場合、選択項目に○を付けるか、色をつけてください

居住タイプ	同居家族人数		4		名内 75 歳以上		0		
	本人	年齢	59	歳	性別	男性	世帯主	はい	
世帯構成	本人以外の家族構成(人数)	会社員	公務員	専業主婦	学生	アルバイト	年金	無職	その他
	1			1		1	1		
詳細(記入欄)									
自動車	所有数	2	台						
	利用形態	通勤	買い物		遊び		その他		
	1日運転時間	1	時間	0	時間	0	時間	0	時間
	1週間運転回数	5	回	2	回	0	回	0	回

■世帯における電化製品についてご記入ください

1日に使用するTV・PCの時間	5	時間/日	電力会社契約アンペア数(A)	60	A
・ご使用になる電化製品に○を付けるか、色をつけてください					
エアコン	扇風機				
ホットカーペット	冷蔵庫	洗濯機	ドライヤー	テレビ	PC
オーブントースター	オーディオ				
掃除機	電気ポット		電子レンジ	電気炊飯器	

■世帯における照明の点灯パターンについてご記入ください

世帯の平均的な就寝時間(全員が寝る時間)		平日	時頃	休日	時頃
使用パターン	居間	18:00	~	23:00	18:00 ~ 23:00
	台所		~		~
	寝室	23:00	~	7:00	23:00 ~ 7:00
	その他		~		~

■世帯における冷暖房器具の使い方についてご記入ください

クーラー (エアコン)	居間	13:00	~	23:00	13:00 ~ 23:00
	台所		~		~
	寝室	19:00	~	23:00	19:00 ~ 23:00
	その他		~		~
暖房 (エアコン)	居間	7:00	~	23:00	7:00 ~ 23:00
	台所		~		~
	寝室	19:00	~	23:00	19:00 ~ 23:00
	その他		~		~

Fig. 16 適切な電力使用に関する研究のためのアンケートの質問項目。

そして、家族のプロファイルを定義するため、統計データに加え、補完データとしてアンケートによる調査結果である生活パターンを参考にして、ペルソナにより利用者プロフィールを作成した。

Fig.17 に、2010 年国民生活時間調査報告書[33]で報告された家族メンバーの在宅率を示す。

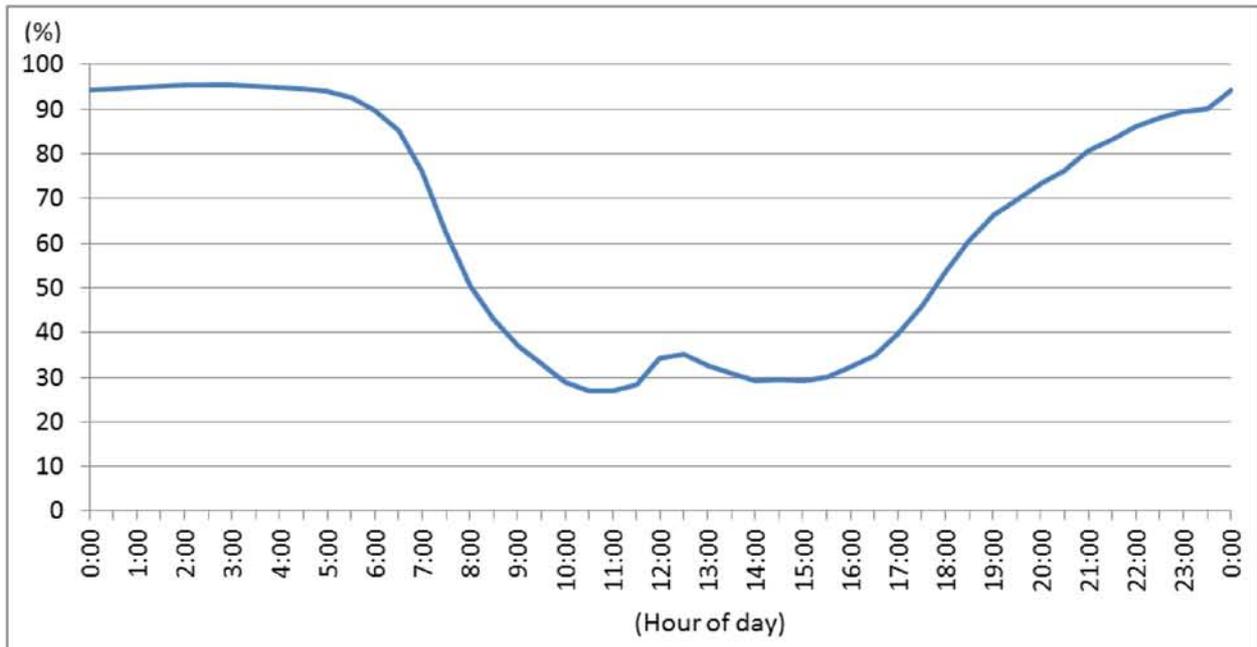


Fig. 17 家族メンバーの在宅率.

本検証において、東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データ、家族メンバーの在宅率、世帯類型別の住宅の状況[34]、平成 22 年国勢調査[35]、平成 23 年（2011）人口動態統計（確定数）の概況[36]を以下のように採用した。

- 家族の需要電力パターンとして、東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データを想定した。
- 家族の各メンバーの在宅パターンを、家族メンバーの在宅率とアンケートによる生活パターンに基づいて推定した。
- 家族の低需要電力時間帯を、東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データに基づいて推定した。
- 世帯類型別の住宅の状況および平成 22 年国勢調査に基づいて、本検証における家族構成を父親、母親、一人または二人の子供と推定した。

そして、本検証における家族のプロファイルを以下のように仮定した。

- 平成 23 年（2011）人口動態統計（確定数）の概況により、家族構成は父親、母親、子供の 3 人とした。
- 家族は EV を所有するとした。
- 父親は EV で通勤するとした。
- 東京電力管内を前提としているため、家族は東京電力管内で生活するとした。
- 父親は、EV で通勤することから、東京近郊の工場に勤務するとした。

- 東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データにより、エアコンディショナーが一日中作動しており、昼間に少なくとも1人は在宅していると推定できるので、母親は専業主婦であり、一日中在宅していると仮定した。
- 子供は高校生であり、父親の出勤後に子供は登校し、父親と同時間帯に帰宅すると仮定した。

Fig.18 に、上述の仮定に基づいて作成した家族の在宅パターンを示す。

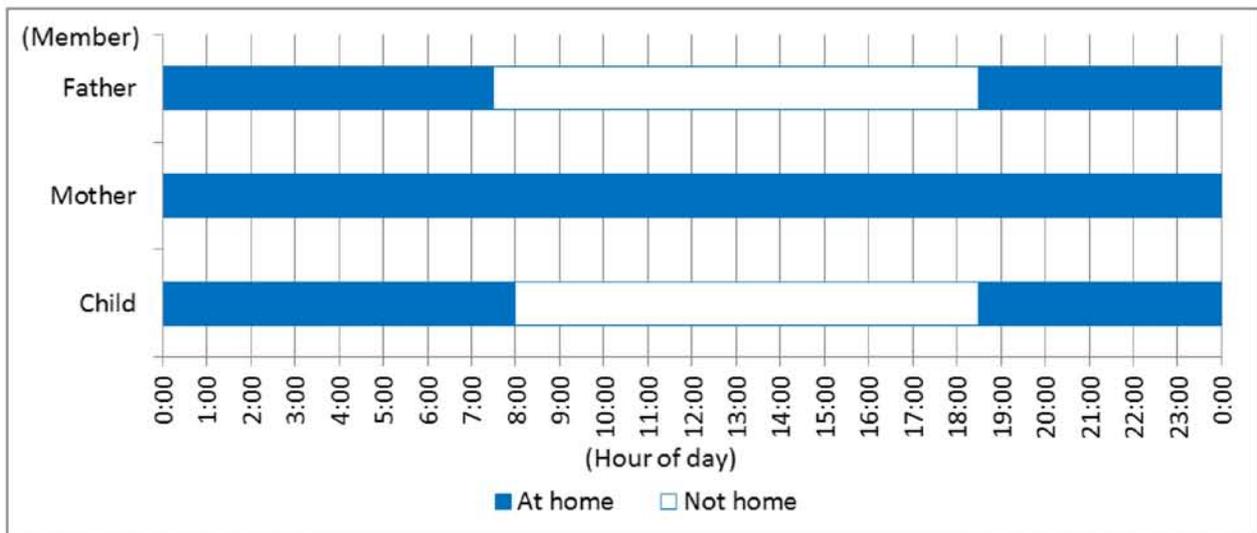


Fig. 18 家族の在宅パターン.

3.1.5. 二種類の利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果の比較

本検証では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法による利用者のモデルを使ったシミュレーションの結果を、ログデータに基づく利用者のモデリング手法による利用者のモデルを使ったシミュレーションの結果と比較し、これらのシミュレーションの結果の類似性を確認した。

3.1.5.1. 環境に関する前提

家族の環境として季節が重要であり、Fig.11 に示す東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データに基づいてシミュレーションを実施するので、本検証の対象季節を夏とした。

3.1.5.2. 本検証のシミュレーション・プロセスと関連する値

EV の蓄電池利用による家庭内の需要電力平準化に関するシミュレーション・プロセスと、このシミュレーションに関連する値を以下のように定義した。

(1) シミュレーションに関係する値

- 定数
 - 1) Average power of use in a day : 一日当たりの通勤用電力量。平均走行距離から算出する、通勤で使用する1日当たりの電力量。
 - 2) Specified threshold demand to feed from EV : EVからの給電のための需要電力の閾値。EVから家庭電化製品への給電とEVへの充電を切り替えるための需要電力の閾値。
- 変数
 - 1) Location of EV : EVの所在場所の時系列データ。所在場所・行動ログデータベースの所在場所ログから生成する、EVが自宅に駐車している比率。
 - 2) Current demand : 需要電力の時系列データ。Fig.11に示す平成22年度エネルギーに関する年次報告の2010年7月23日の東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力。
 - 3) Power left in EV : EVに残存する電力量の時系列データ。運転による消費、充電電力、給電電力に基づく計算値。

(2) シミュレーション・プロセス

Fig.19に、本検証におけるシミュレーション・プロセスを示す。

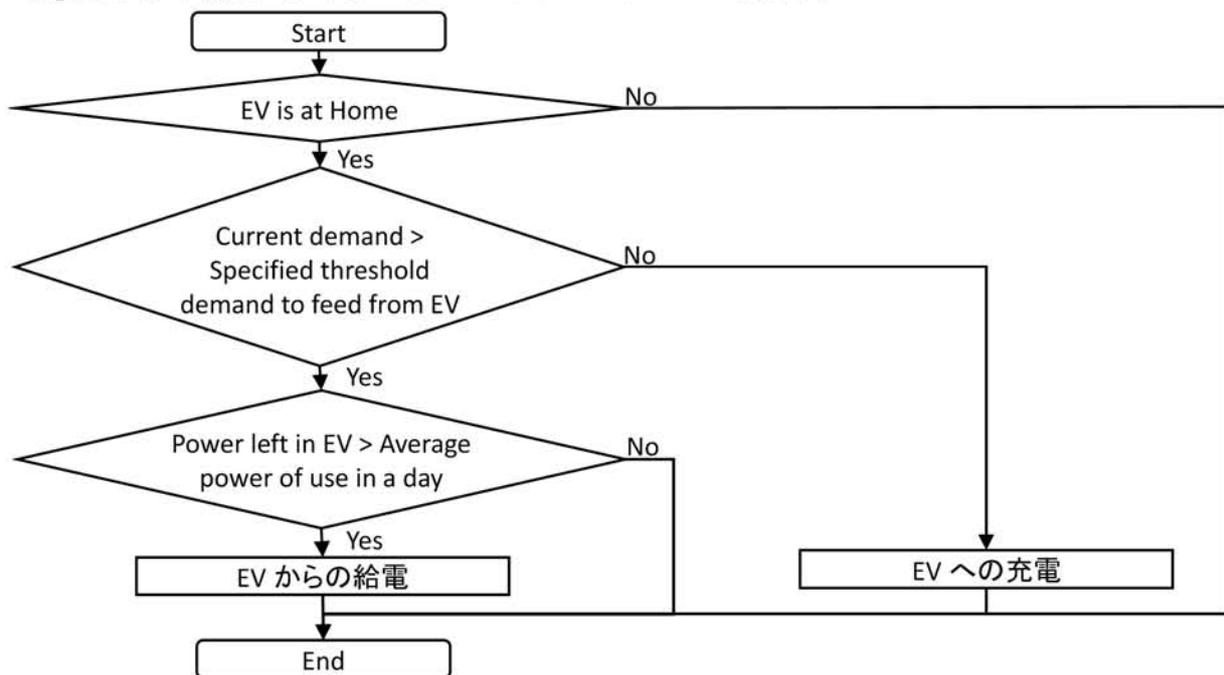


Fig. 19 シミュレーション・プロセス.

本シミュレーション・プロセスでは、その時点の需要電力がEVからの給電のための需要電力の閾値を越えると、EVから給電し、その時点の需要電力が閾値を下回るとEVに充電する。

- EVからの給電のための需要電力の閾値を指定する。閾値率を0.8の場合、閾値は推定ピーク値*0.8である。
- EVが自宅に駐車している場合のみ、充電および給電が可能である。

- その時点の需要電力が EV からの給電のための需要電力の閾値を超え、かつ、EV の残存電力量が一日当たりの通勤用電力量を超える場合にのみ、給電を実施する。
- その時点の需要電力が EV からの給電のための需要電力の閾値未満である場合、充電を実施する。

(3) 家庭内の需要電力平準化の可能性に関する評価基準

本検証における家庭内の需要電力平準化の可能性を判定する基準として、1週間分のデータによるシミュレーションの結果である、最終日のピーク率を判定基準とした。つまり、最終日のピーク率が閾値率と等しい場合には、指定した閾値での平準化が達成されたことを意味し、それ以外の場合は継続的な平準化ができないことを意味する。

3.1.5.3. ログデータに基づく利用者のモデリング

本検証では、昼間に EV で外出する被験者のユーザグループを対象に、ログデータに基づく利用者のモデリングを実施し、利用者のモデルを作成し、所在場所・行動ログデータベースの所在場所ログと行動ログから、各被験者の時系列在宅率と一日あたりの平均走行距離を調査した。

- 時系列在宅率：実験期間中に被験者が在宅している時間の 30 分ごとの比率。当該時間帯に被験者が在宅である場合、在宅率は 1.0。当該時間帯に被験者が留守である場合は、在宅率は 0.0。
- 1日の平均運転距離：実験期間中の一日あたりの被験者の平均走行距離。

(1) 被験者 1

- 時系列在宅率は、被験者 1 の所在場所ログに基づいて作成した。
- 1日の平均運転距離は、被験者 1 の行動ログから、27.5 km であることがわかった。

(2) 被験者 2

- 時系列在宅率は、被験者 2 の所在場所ログに基づいて作成した。
- 1日の平均運転距離は、被験者 2 の行動ログから、20 km であることがわかった。

3.1.5.4. 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング

「3.1.4.2.家族の利用者プロフィール」の結果に基づいて、「3.1.4.1.利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリングの処理」の手順に従って、父親の利用者のモデルを以下のように仮定した。

(1) 戦略的レベルのモデル

- 家族は EV を所有する。
- 父親が EV を利用する。
- 父親の不在は EV の不在を意味する。

(2) 戦術レベルのモデル

- 父親は朝と夕刻の通勤に EV を運転するため、Fig.19 のシミュレーション・プロセスで EV は夜間に給電と充電ができる。

(3) 操作レベルのモデル

- Fig.18 に示した家族の在宅パターンにより、父親は 7 時 30 分から 18 時 30 分まで外出するため、EV も同じ時間帯は自宅に駐車していない。
- 本検証では、給電のための需要電力の閾値率（以下、閾値率）を 0.5、0.6、0.7、0.8 として、シミュレーションを実施する。
- 本検証では、一日当たりの平均走行距離を以下の値として、シミュレーションを実施する。
 - 1) 10 km
 - 2) 20 km
 - 3) 30 km
 - 4) 40 km
 - 5) 50 km
- 交流電力量消費率 [Wh/km] : 105 (燃費)
- 蓄電容量 [Wh] : 24000 (可変電力で充電可能)

3.1.5.5. ログデータに基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果

Table 1 に、ログデータに基づく利用者のモデリング手法により作成した利用者のモデルを使って、Fig.19 のシミュレーション・プロセスに従って実施した、シミュレーション結果を示す。

Table 1 ログデータに基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果.

閾値率	被験者	
	被験者 1	被験者 2
0.5	1	1
0.6	1	1
0.7	0.7	0.7
0.8	0.8	0.8

3.1.5.6. 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果

Table 2 に、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法により作成した利用者のモデルを使って、Fig.19 のシミュレーション・プロセスに従って実施した、シミュレーション結果を示す。

Table 2 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法によるシミュレーション結果.

閾値率	1日当たりの平均走行距離				
	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km
0.5	1	1	1	1	1
0.6	0.6	1	1	1	1
0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1
0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

3.1.6. 考察と結論

ログデータに基づく利用者のモデリング手法による利用者のモデルを使ったシミュレーション結果と、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法による利用者のモデルを使ったシミュレーション結果から、以下を確認した。

- EVが自宅に駐車している時間帯において、需要電力の平準化が可能である。
- 同一ユーザグループにおいても、走行距離は、需要電力の平準化のために重要な要因である。
- 需要電力の平準化の実現には、ユーザグループ内の一日あたりの走行距離に応じて、閾値率を適正に設定する必要がある。

そして、EVの蓄電池利用による家庭内の需要電力平準化は、EVからの給電を決定する需要電力の閾値を適切に選択すれば実現可能であることが確認できた。そして、ログデータに基づく利用者のモデリングによる利用者のモデルを使ったシミュレーション結果と、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリングによる利用者のモデルを使ったシミュレーション結果の比較から、以下のことが確認できた。

- 被験者1（平均運転距離 27.5 km）の結果は、一日あたり 30 km 運転する利用者プロフィールに基づく利用者のモデルの結果と類似であった。
- 被験者2（平均運転距離 20.0 km）の結果は、一日あたり 20 km 運転する利用者プロフィールに基づく利用者のモデルの結果と類似であった。

この結果から、利用者プロフィールを適切に策定することで、比較的少量の定量データを定性データで補完する利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリングによる結果と、ログデータに基づく利用者モデリングによる結果が類似することを確認でき、この類似性から、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の有効性を証明した。

3.2. 複数の家族セグメントへの適用と比較による有効性の検証

本検証では、電気自動車（以下、EV）の蓄電池利用による広域供給電力平準化の可能性の研究において、複数の家族セグメントに利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を適用し、各家族セグメントの利用者プロフィールを基に利用者のモデルを定義し、各家族セグメントの利用者のモデルによるシミュレーション結果を比較することで、本手法の有効性を検証する。なお、本検証では、V2H と HEMS だけを前提とした家庭内の需要電力のピークシフトによる、EV の蓄電池利用による広域供給電力平準化を実現する手法を採用しており、V2G や CEMS を含めた電力市場を前提としない。

3.2.1. システム構成

本検証では、EV の蓄電池利用による広域供給電力平準化のための家庭内電力管理システムを、EV、家庭電化製品、家族、配電盤とパワーコンディショナで構成するパワーコントローラ、環境の 5 要素で構成した。

Fig.20 に、環境を除くシステムの構成と電力の流れを示す。

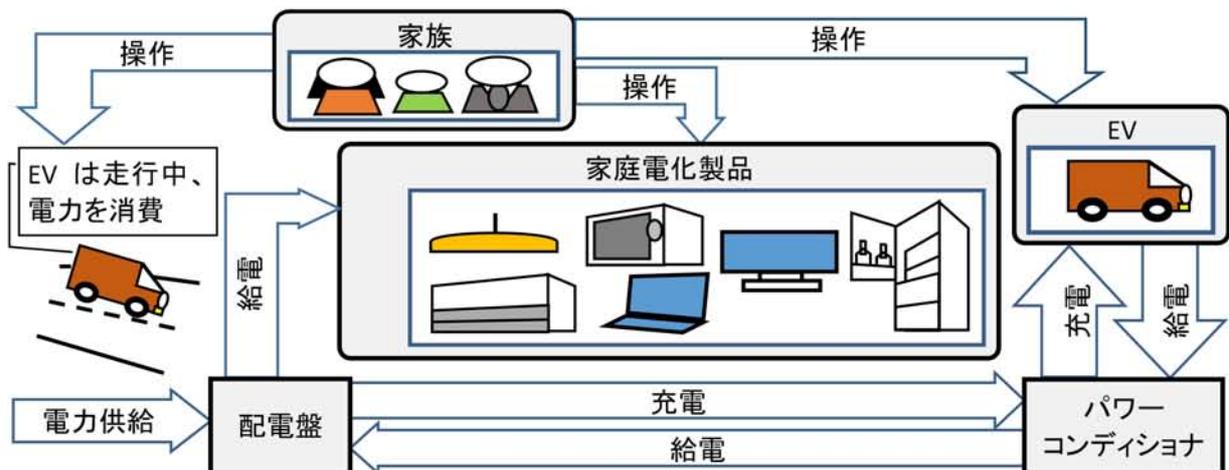


Fig. 20 環境を除くシステムの構成と電力の流れ.

- EV
EV の蓄電池としての役割は、電力充電、運転時における電力消費、および、家庭用二次電源としての家庭電化製品に対する電力供給である。
- 家庭電化製品
家庭電化製品の役割は、各家族の生活様式に基づいた家庭電化製品の利用による電力消費である。
- 家族
家族の役割は、EV と家庭電化製品を利用する主体である。EV と家庭電化製品の使用時間帯と使用量は、各家族の生活様式により異なる。

- パワーコントローラ

パワーコントローラの役割は、電力会社と EV、家庭電化製品間の電力の流れの制御である。パワーコントローラは、配電盤とパワーコンディショナで構成する。

- 環境

環境の役割は、季節や家族の居住地域を含み、シミュレーションで使用する基本的な値を決定することである。

3.2.2. 家族セグメントのプロファイル

家族は EV を運転したり、家庭電化製品を利用したりする電力消費の主体であるので、供給電力平準化を検証する上で重要な要素である。本検証では、通勤形態と家庭電化製品の利用形態を利用者の特徴とし、通勤時間と家庭電化製品の利用時間を利用者の特性としている。

今後、石油系燃料の自動車から EV への移行が期待できる。そこで、Fig.16 で示した適切な電力使用に関する研究のためのアンケートの調査結果を基に、石油系燃料の自動車を所有する家族を抽出して EV を将来所有する可能性のある家族とし、2 軸により 4 セグメントに分類し、各家族セグメントのプロファイルをペルソナで作成した。

分類軸は、EV の通勤利用の有無と昼間の家族の在宅人数の 2 軸である。

- 家族セグメント 1: 家族の一人が EV を通勤に利用し、家族の一人以上が一日中在宅している。
- 家族セグメント 2: 誰も EV を通勤に利用せず、家族の一人以上が一日中在宅している。
- 家族セグメント 3: 家族の一人が EV を通勤に利用し、家族は昼間に不在である。
- 家族セグメント 4: 誰も EV を通勤に利用せず、家族は昼間に不在である。

3.2.3. シミュレーション・プロセス

家庭内の需要電力ピークシフトのシミュレーション・プロセスの概要は以下のとおりである。

- シミュレーション開始時に、広域需要電力ピーク時間帯 (Tf_{from} と Tf_{to}) と広域需要電力オフピーク時間帯 (Tc_{from} と Tc_{to}) を指定する。
- EV に電力量が残存する間 ($PHf_{left\ in\ EV}(d, t) > 0$)、EV は走行により $Pf_{drive}(d, t)$ の値で電力を消費する。
- 現時刻が広域需要電力オフピーク時間帯内 ($Tc_{from} \leq \text{current time} < Tc_{to}$) であり、かつ、EV が自宅に駐車している間、満充電になるまで、EV は $Pf_{charge}(d, t)$ の値で充電する。
- 現時刻が広域需要電力ピーク時間帯内 ($Tf_{from} \leq \text{current time} < Tf_{to}$) であり、かつ、EV が自宅に駐車している間、EV の残存電力量が翌日の通勤に必要な電力量を超えている場合 ($PHf_{left\ in\ EV}(d, t) > PHf_{drive\ average}$)、EV は $Pf_{feed}(d, t)$ の値で給電する。

Fig.21 に、家庭内の需要電力ピークシフトのためのシミュレーション・プロセスを示す。

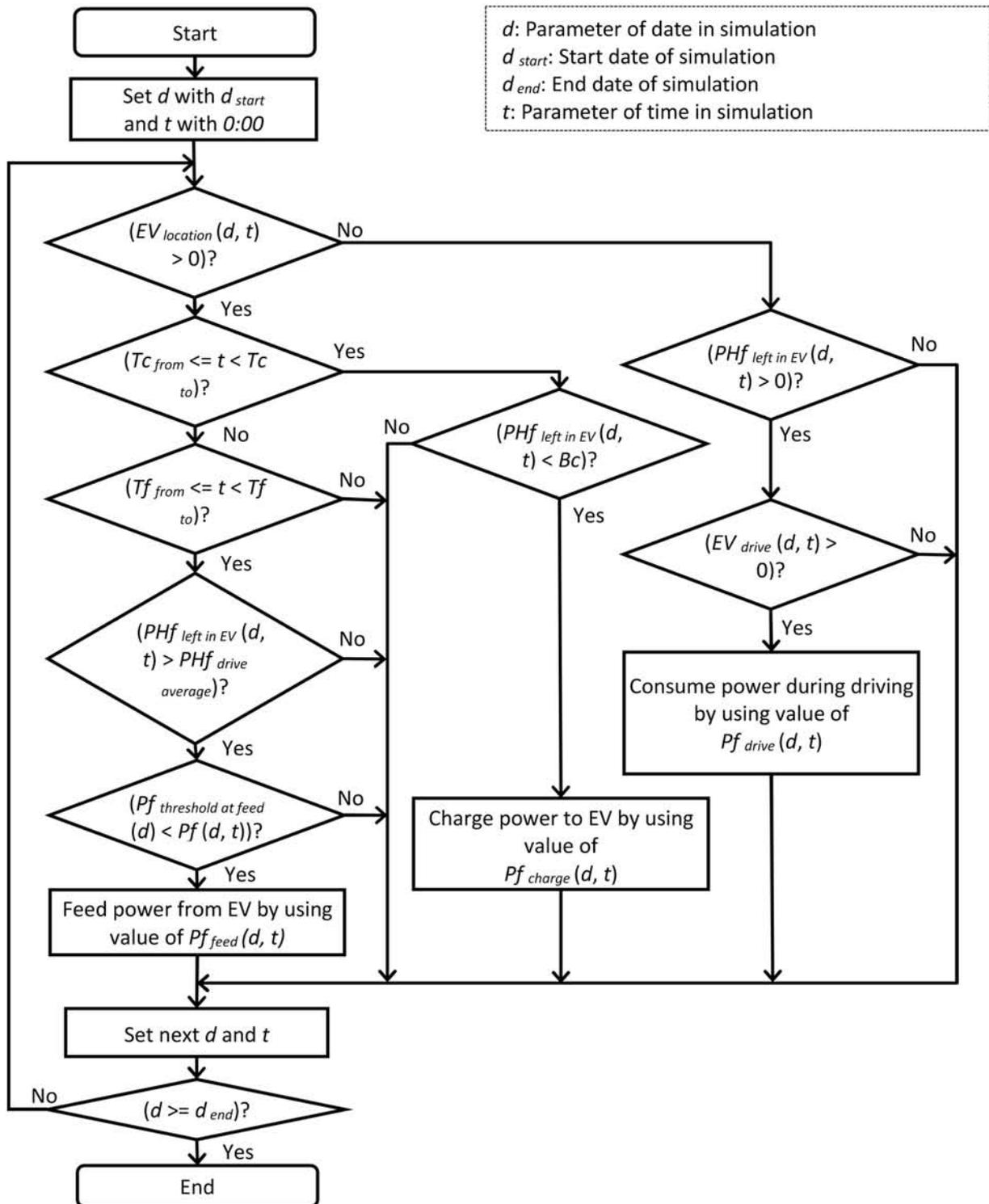


Fig. 21 家庭内の需要電力ピークシフトのためのシミュレーション・プロセス.

本検証では、Fig.21 のシミュレーション・プロセスに基づき、モデルベース・シミュレータを開発した。このシミュレータは、利用者のモデルだけでなく、他のモデルも変更可能にした。Fig.22 に、家庭内の需要電力ピークシフトのためのモデルベース・シミュレータのスクリーンショットを示す。

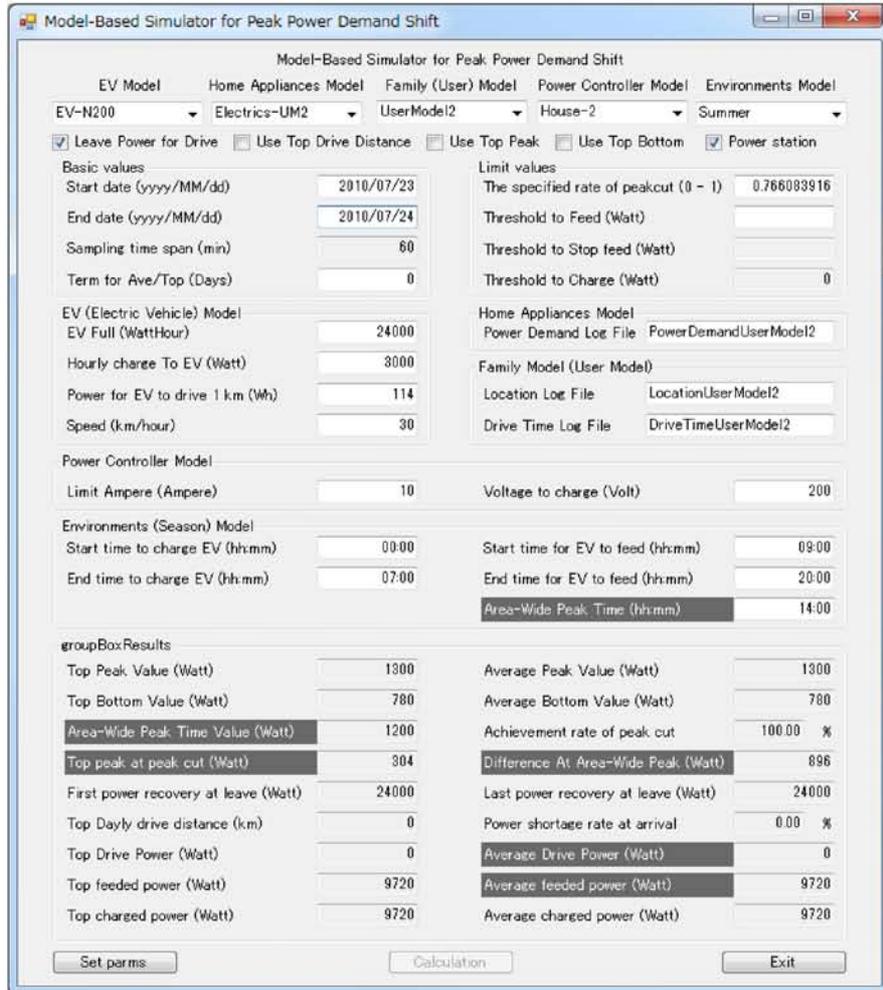


Fig. 22 家庭内の需要電力ピークシフトのためのモデルベース・シミュレータのスクリーンショット。

3.2.3.1. シミュレーションのためのモデルに関する値と関数

本検証におけるシミュレーションのモデルに関する値と関数を示す。本検証のデータの解像度が1時間であるので、各関数の時間パラメータ t の時間間隔を1時間とした。

1) EVモデルに関する値

- Fcr [Wh/km]: 燃費 (交流電力量消費率)。
- Bc [Wh]: 蓄電容量。
- Obc [VA]: 充電電力。
- $Speed_{average}$ [km/h]: 平均速度。

2) 家庭電化製品モデルに関する関数

- $Pf(d, t)$ [W]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする、各時間帯における家庭電化製品による1家庭あたりの需要電力。

3) 家族の利用者のモデルに関する関数

- $EV_{drive}(d, t)$ [0.0 to 1.0]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯における運転率。EV がその時間帯に常時運転状態である場合は 1.0 を返し、EV が停止状態である場合には 0.0 を返す。そうでなければ、0.0~1.0 の間の値を返す。
 - $EV_{location}(d, t)$ [0.0 to 1.0]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯における EV の自宅駐車率。EV がその時間帯に常に自宅に駐車している場合には 1.0 を返し、EV がまったく駐車されていない場合には 0.0 を返す。そうでなければ、0.0~1.0 の値を返す。
- 4) パワーコントローラモデルに関する値
- Amp [A]: 電流。
 - $Volt$ [V]: 電圧。
- 5) 環境モデルに関する値と関数
- Tf_{from} : 広域需要電力ピーク時間帯の開始時刻。
 - Tf_{to} : 広域需要電力ピーク時間帯の終了時刻。
 - Tc_{from} : 広域需要電力オフピーク時間帯の開始時刻。
 - Tc_{to} : 広域需要電力オフピーク時間帯の終了時刻。
 - $Pa(d, t)$ [W]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯における広域供給電力パターン。
 - da_{peak} : $Pa(da_{peak}, ta_{peak})$ が $Pa(d, t)$ の最大値である場合の日付。
 - ta_{peak} : $Pa(da_{peak}, ta_{peak})$ が $Pa(d, t)$ の最大値である場合の時刻。
- 6) シミュレーションに関する値と関数
- $Pf_{drive}(d, t)$ [W]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯における通勤時消費電力。

$$Pf_{drive}(d, t) = EV_{drive}(d, t) * Speed_{average} * Fcr \quad (1)$$
 - $Pf_{charge}(d, t)$ [W]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯における蓄電電力。
 If ($Tc_{from} \leq t$ AND $t < Tc_{to}$) then

$$Pf_{charge}(d, t) = \min(EV_{location}(d, t) * (Amp * Volt - Pf(d, t)), Bc - PHf_{left\ in\ EV}(d, t)) \quad (2)$$

 Else

$$Pf_{charge}(d, t) = 0 \quad (3)$$
 - $PHf_{charge}(d)$ [Wh]: 日付 d をパラメータとする 1 家庭 1 日の蓄電電力量。

$$PHf_{charge}(d) = \int_{t=Tc_{from}}^{Tc_{to}} Pf_{charge}(d, t) dt \quad (4)$$
 - $Pf_{feed}(d, t)$ [W]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯における 1 家庭の給電電力。
 If ($Tf_{from} \leq t$ AND $t < Tf_{to}$) then

$$Pf_{feed}(d, t) = \max((Pf(d, t) - Pf_{threshold\ at\ feed}(d)) * EV_{location}(d, t), 0) \quad (5)$$

 Else

$$Pf_{feed}(d, t) = 0 \quad (6)$$
 - $PHf_{feed}(d)$ [Wh]: 日付 d をパラメータとする 1 家庭 1 日の給電電力量。

$$PHf_{feed}(d) = \int_{t=T_{f_{from}}}^{T_{f_{to}}} Pf_{feed}(d, t) dt \quad (7)$$

- $T_{in\ feeding}(d)$ [h] : 日付 d をパラメータとする広域需要電力ピーク時間帯において、家庭電化製品に対して電力を供給する各1日の時間。

$$T_{in\ feeding}(d) = \int_{t=T_{f_{from}}}^{T_{f_{to}}} EV_{location}(d, t) dt \quad (8)$$

- $Pf_{threshold\ at\ feed}(d)$ [W] : 日付 d をパラメータとする広域需要電力ピーク時間帯において、 $PHf_{feed}(d)$ を最大化するための固定値。

If ($T_{in\ feeding}(d) > 0$) then

$$Pf_{threshold\ at\ feed}(d) = \frac{PHf_{charge}(d)}{T_{in\ feeding}(d)} \quad (9)$$

Else

$$Pf_{threshold\ at\ feed}(d) = Amp * Volt \quad (10)$$

- $PHf_{drive\ average}$ [Wh] : シミュレーションにおける、通勤で消費する1日の平均電力量。

$$PHf_{drive\ average} = \text{ave}_d \left(\int_{t=T_{leave}}^{T_{arrive}} PHf_{drive}(d, t) dt \right) \quad (11)$$

- $PHf_{feed\ average}$ [Wh] : シミュレーションにおける、EVからの1日の平均供給電力量。

$$PHf_{feed\ average} = \text{ave}_d(PHf_{feed}(d)) \quad (12)$$

- $Pf_{shift\ result}(d, t)$ [W] : 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯における1家庭内の需要電力のピークシフトの結果。

$$Pf_{shift\ result}(d, t) = Pf(d, t) + Pf_{charge}(d, t) - Pf_{feed}(d, t) \quad (13)$$

- $PHf_{left\ in\ EV}(d, t)$ [Wh] : 日付 d と時刻 t をパラメータとするEVに残存する電力量。 d_{start} がシミュレーションの開始日。

$$PHf_{left\ in\ EV}(d, t) = PHf_{left\ in\ EV}(d_{start}, 0:00) + \int_{x=d_{start}}^{d-1} \int_{y=0:00}^{24:00} (Pf_{charge}(x, y) - Pf_{drive}(x, y) - Pf_{feed}(x, y)) dy dx + \int_{y=0:00}^t (Pf_{charge}(d, y) - Pf_{drive}(d, y) - Pf_{feed}(d, y)) dy \quad (14)$$

3.2.3.2. シミュレーションのための共通モデル

本検証では、EV、家庭電化製品、パワーコントローラ、および、環境の共通モデルを以下のように設定した。

1) 共通EVモデル

Specifications 日産リーフ 主要諸元[37]に基づいて共通EVモデルを定義した。

- Fcr [Wh/km] : 114
- Bc [Wh] : 24000

- Obc [VA] : 3000
 - $Speed_{average}$ [km/h] : 30
- 2) 共通家庭電化製品モデル
- $Pf(d, t)$ [W] : Fig.11 に示す平成 22 年度エネルギーに関する年次報告の 2010 年 7 月 23 日の東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データの繰り返し。
- 3) 共通パワーコントローラモデル
- Amp [A] : 10
 - $Volt$ [V] : 200
- 4) 共通環境モデル
- 平成 22 年度エネルギーに関する年次報告と東京電力の Web サイト[38]のデータを基に、共通環境モデルを定義した。
- Tf_{from} : 09:00 (Peak hours の開始時刻)
 - Tf_{to} : 20:00 (Peak hours の終了時刻)
 - Tc_{from} : 00:00 (Bottom hours の開始時刻)
 - Tc_{to} : 07:00 (Bottom hours の終了時刻)
 - $Pa(d, t)$ [W] : 平成 22 年度エネルギーに関する年次報告の 2010 年 7 月 23 日の東京電力管内の時間帯別広域需要電力の時系列データの繰り返し。
 - da_{peak} : 2010 年 7 月 23 日
 - ta_{peak} : 14:00

Fig.23 に平成 22 年度エネルギーに関する年次報告の 2010 年 7 月 23 日の東京電力管内の時間帯別広域需要電力の時系列データと共通環境モデルを示す。

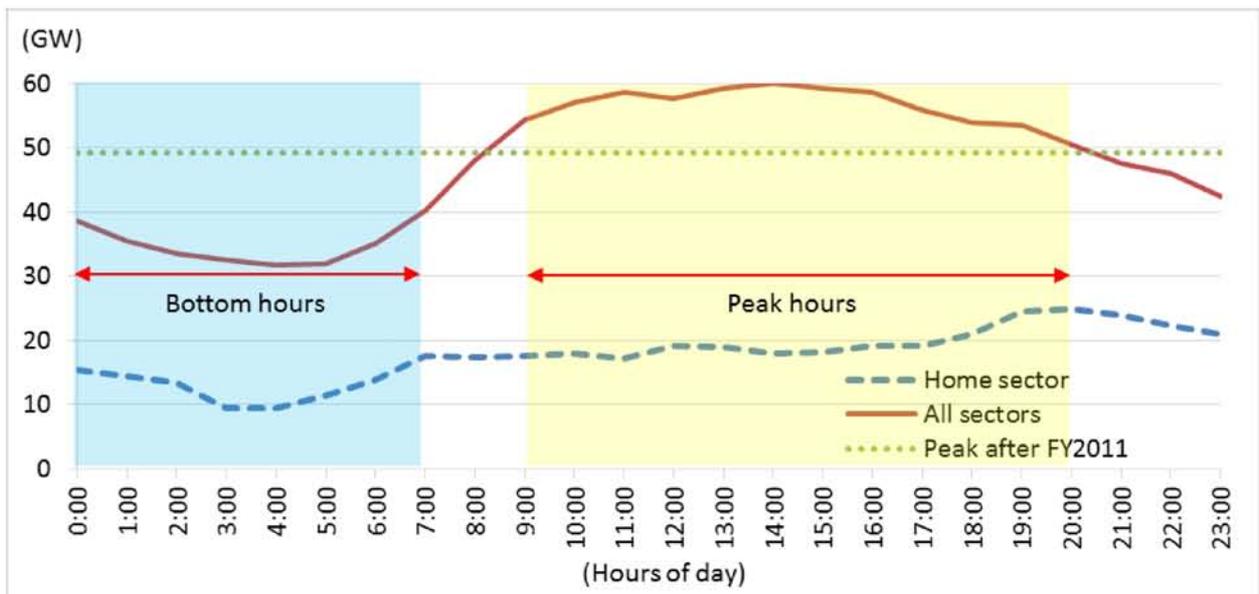


Fig. 23 2010 年 7 月 23 日の東京電力管内の時間帯別広域需要電力と共通環境モデル。

3.2.4. 家族セグメントの利用者のモデル

家族は EV を運転したり、家庭電化製品を利用したりする電力消費の主体であるので、供給電力平準化を検証する上で重要な要素である。本検証では家族を 4 セグメントに分類し、シミュレーションのために各家族セグメントの利用者のモデルを定義した。

3.2.4.1. 各家族セグメントの利用者のモデル

ペルソナにより既に作成した 4 種類の家族セグメントのプロファイルに基づいて、2010 年国民生活時間調査報告書、世帯類型別の住宅の状況、平成 23 年（2011）人口動態統計（確定数）の概況、自動車利用と環境に関する世論調査[39]、都道府県別・車種別自動車保有台数（軽自動車含む）[40]を組合せ、各家族セグメントの家族構成と家族の外出時刻や帰宅時刻などの生活時間のパターンを想定し、モデルベース・システムズエンジニアリングにより、利用者のモデルを定義した。以下に、本検証に関わる、4 種類の家族セグメントの利用者のモデルの基本要素を示す。

1) 家族セグメント 1 の利用者のモデル

父親は EV 通勤、母親は専業主婦の家族セグメント。

- 父親は一日あたり 1 時間 EV で通勤する。父親と EV は 7:30 に外出し、18:00 に帰宅する。
- 母親は専業主婦であり、一日中自宅で家事を行う。
- 子供は高校生で 8:00 に外出し、18:30 に帰宅する。

2) 家族セグメント 2 の利用者のモデル

父親は電車通勤、母親は専業主婦の家族セグメント。

- 父親は EV で通勤していないので、EV は一日中自宅に駐車している。父親は 7:30 に外出し、20:30 に帰宅する。
- 母親は専業主婦であり、一日中自宅で家事を行う。
- 子供は高校生で 8:00 に外出し、18:30 に帰宅する。

3) 家族セグメント 3 の利用者のモデル

父親は EV 通勤、母親も日中は仕事で外出する家族セグメント。

- 父親は一日あたり 1 時間 EV で通勤する。父親と EV は 7:30 に外出し、18:00 に帰宅する。
- 母親は、パートタイムの仕事を持ち、9:30 に外出し、16:30 に帰宅する。
- 子供は高校生で 8:00 に外出し、18:30 に帰宅する。

4) 家族セグメント 4 の利用者のモデル

父親は電車通勤、母親も日中は仕事で外出する家族セグメント。

- 父親は EV で通勤していないので、EV は一日中自宅に駐車している。父親は 7:30 に外出し、20:30 に帰宅する。
- 母親は、パートタイムの仕事を持ち、9:30 に外出し、16:30 に帰宅する。
- 子供は高校生で 8:00 に外出し、18:30 に帰宅する。

3.2.4.2. 各家族セグメントの利用者のモデルの関数

EV モデルと家庭電化製品モデルに関連する利用者のモデルの関数を示す。

1) EV モデルに関連する関数

- $EV_{drive}(d, t)$: Fig.24 は家族セグメント 1 および家族セグメント 3 の EV の運転状態、そして、Fig.25 は家族セグメント 2 および家族セグメント 4 の EV の運転状態を示す。

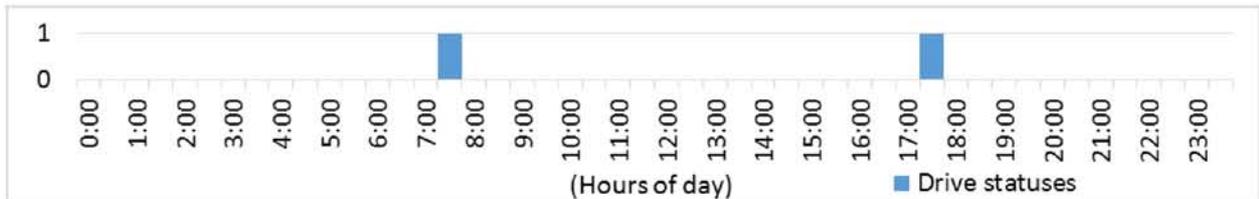


Fig. 24 家族セグメント 1 および家族セグメント 3 の EV の運転状態。

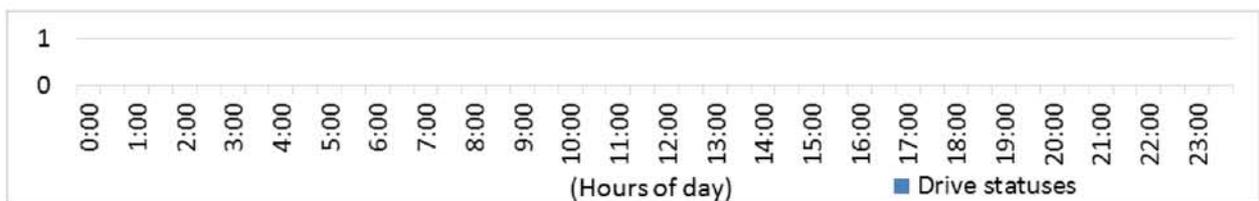


Fig. 25 家族セグメント 2 および家族セグメント 4 の EV の運転状態。

- $EV_{location}(t)$: Fig.26 は家族セグメント 1 および家族セグメント 3 の EV の自宅駐車状態、そして、Fig.27 は家族セグメント 2 および家族セグメント 4 の EV の自宅駐車状態を示す。



Fig. 26 家族セグメント 1 および家族セグメント 3 の EV の自宅駐車状態。

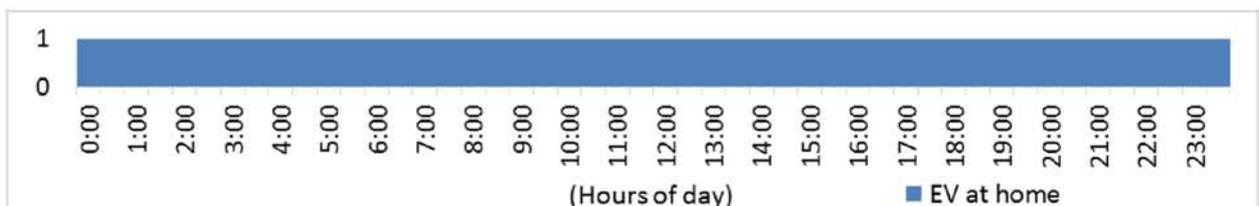


Fig. 27 家族セグメント 2 および家族セグメント 4 の EV の自宅駐車状態。

2) 家庭電化製品モデルに関連する関数

- $Pf(d, t)$: 世帯平均の時間帯別需要電力関数。Fig.28は、家族セグメント1と家族セグメント2の $Pf(d, t)$ であり、平成22年度エネルギーに関する年次報告の2010年7月23日の東京電力管内の世帯平均の時間帯別需要電力の時系列データを採用した。Fig.29は、家族セグメント3と家族セグメント4の $Pf(d, t)$ であり、日中の家族の不在時間帯の消費電力を冷蔵庫、温熱便座、待機電力だけに限定することで推定した。

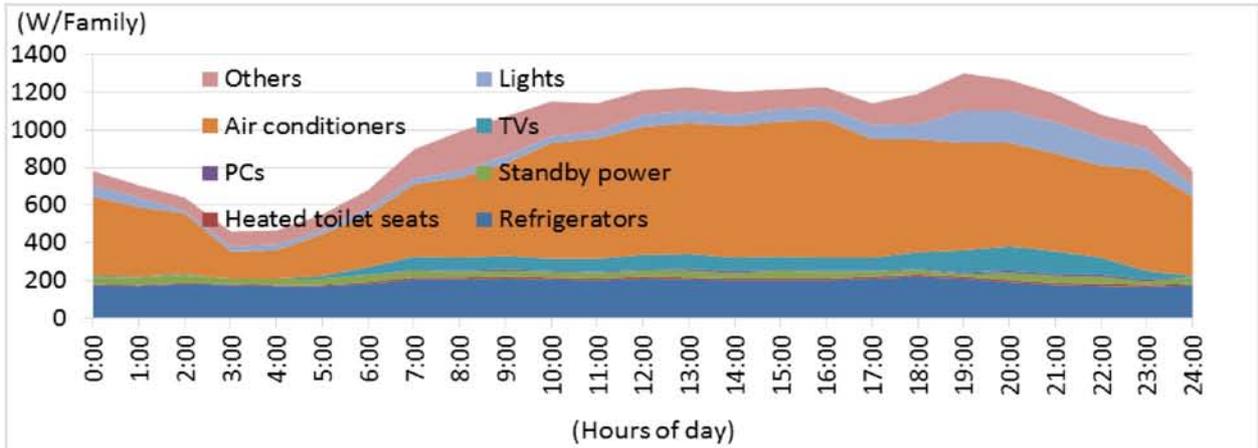


Fig. 28 家族セグメント1と家族セグメント2の需要電力パターン。

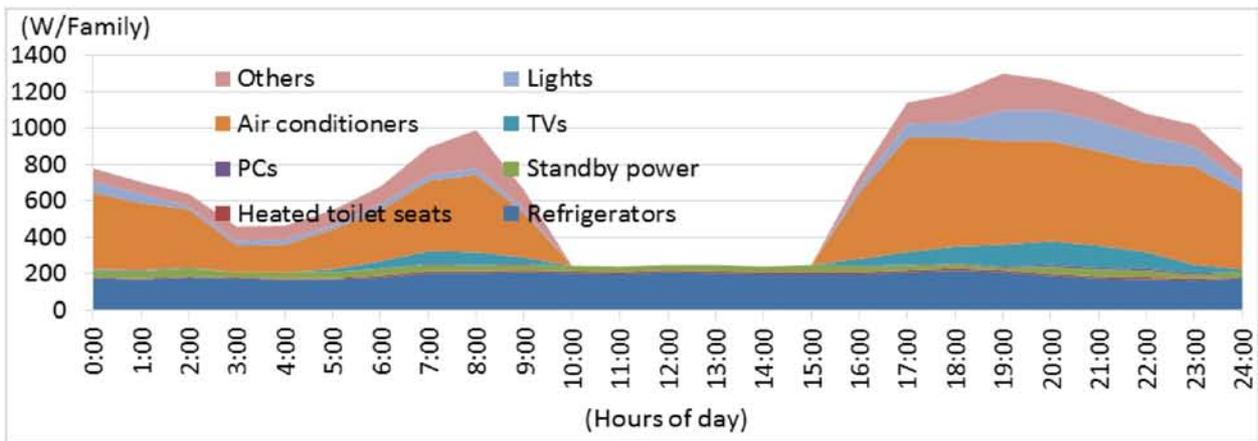


Fig. 29 家族セグメント3と家族セグメント4の需要電力パターン。

3.2.5. 評価基準とシミュレーションの結果

供給電力平準化の可能性と効果の評価基準を定義し、Fig.22に示した家庭内の需要電力ピークシフトのためのモデルベース・シミュレータにより、供給電力平準化の可能性と効果を評価した。以下に、評価基準とシミュレーションの結果を示す。

3.2.5.1. 評価基準

本検証では、二種類の評価基準を採用した。一つは、供給電力平準化の可能性の評価基準であり、

もう一つは、供給電力平準化の効果に関する評価基準である。

1) 電力供給平準化の可能性のための評価基準 ($Pf_{difference\ at\ peak}$)

- $Pf_{difference}(d, t)$ [W]: 日付 d と時刻 t をパラメータとする各時間帯の、ピークシフトの有無による世帯の時間帯別需要電力の差分。

$$Pf_{difference}(d, t) = Pf(d, t) - Pf_{shift\ result}(d, t) \quad (15)$$

- $Pf_{difference\ at\ peak}$ [W]: 供給電力平準化の可能性。 $Pf_{difference\ at\ peak}$ が 0 の場合には不可能であり、その他の場合には可能である。

$$Pf_{difference\ at\ peak} = Pf_{difference}(da_{peak}, ta_{peak}) \quad (16)$$

2) 電力供給の効果のための評価基準 ($Ra_{efficacy}$)

- $Ra_{efficacy}$ [0.0 to 1.0]: 供給電力平準化の効果率。 $Ra_{efficacy}$ は広域供給電力平準化の効果の比率である。なお、 n_{EV} は都道府県別・車種別自動車保有台数 (軽自動車含む)、次世代自動車普及戦略 [41]、東京電力サービス区域 [42] をもとに推定した東京電力管内の EV の予測数である。

$$Ra_{efficacy} = \frac{\max_{d,t}(Pa(d,t) - Pf_{difference}(d,t) * n_{EV})}{\max_{d,t}(Pa(d,t))} \quad (17)$$

3.2.5.2. 各家族セグメントにおける可能性と効果

各家族セグメントによるシミュレーションの結果を示す。供給電力平準化の可能性と有効性は、各家族セグメントにおける $Pf_{difference\ at\ peak}$ により評価できる。また、1 世帯の電力供給ピークシフトの全体効果は、 $PHf_{feed\ average}$ と $PHf_{drive\ average}$ により評価できる。

1) 家族セグメント 1 のシミュレーションの結果

Fig.30 に、家族セグメント 1 の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果を示す。

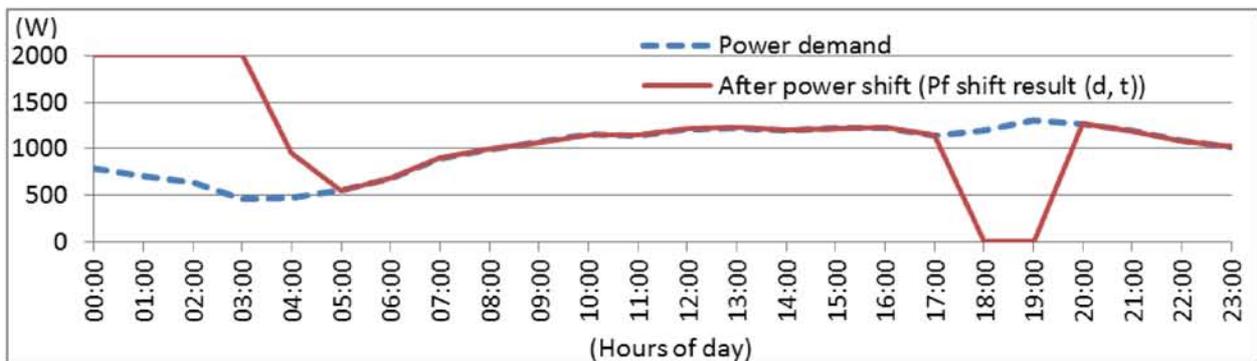


Fig. 30 家族セグメント 1 の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果.

このシミュレーションから以下の結果が得られた。

- $Pf_{difference\ at\ peak}$ [W]: 0
- $PHf_{feed\ average}$ [Wh]: 2490
- $PHf_{drive\ average}$ [Wh]: 3420

2) 家族セグメント 2 のシミュレーションの結果

Fig.31 に、家族セグメント 2 の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果を示す。

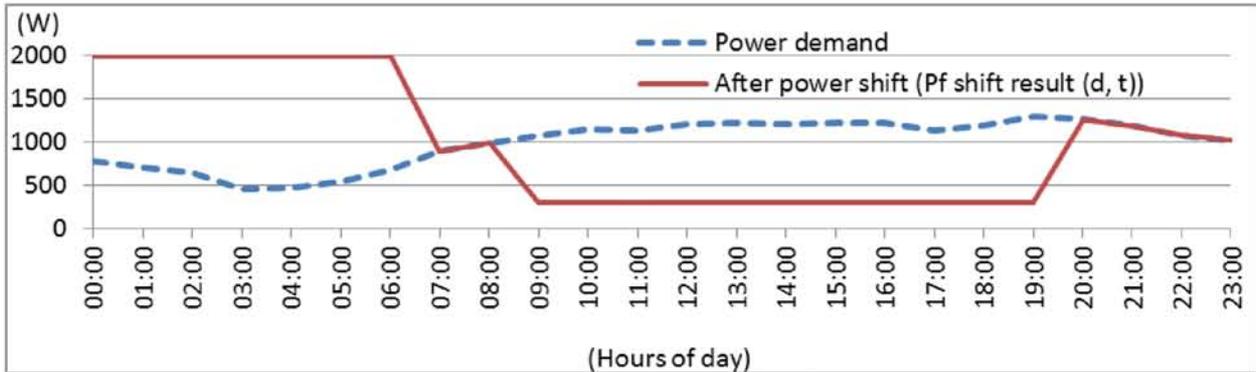


Fig. 31 家族セグメント 2 の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果.

このシミュレーションから以下の結果が得られた。

- Pf difference at peak [W] : 896
- PHf feed average [Wh] : 9720
- PHf drive average [Wh] : 0

3) 家族セグメント 3 のシミュレーションの結果

Fig.32 に、家族セグメント 3 の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果を示す。

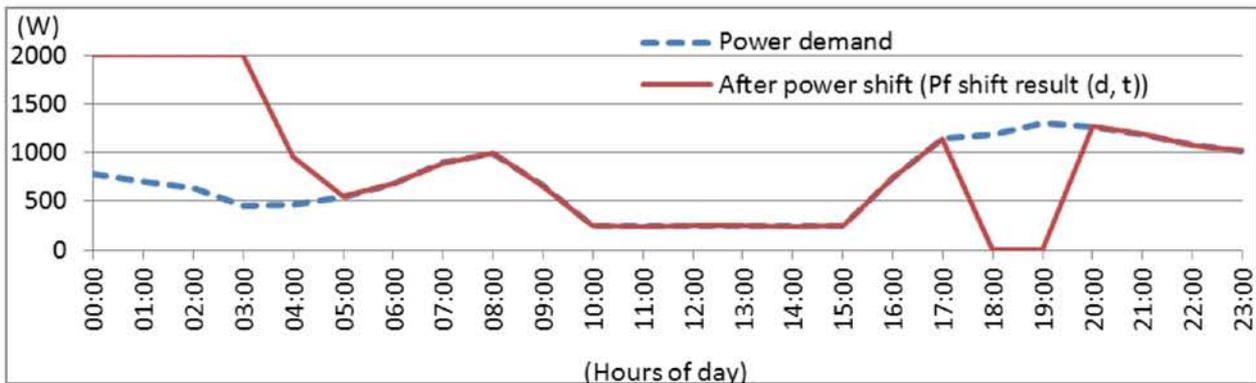


Fig. 32 家族セグメント 3 の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果.

このシミュレーションから以下の結果が得られた。

- Pf difference at peak [W] : 0
- PHf feed average [Wh] : 2490
- PHf drive average [Wh] : 3420

4) 家族セグメント 4 のシミュレーションの結果

Fig.33 に、家族セグメント 4 の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果を示す。

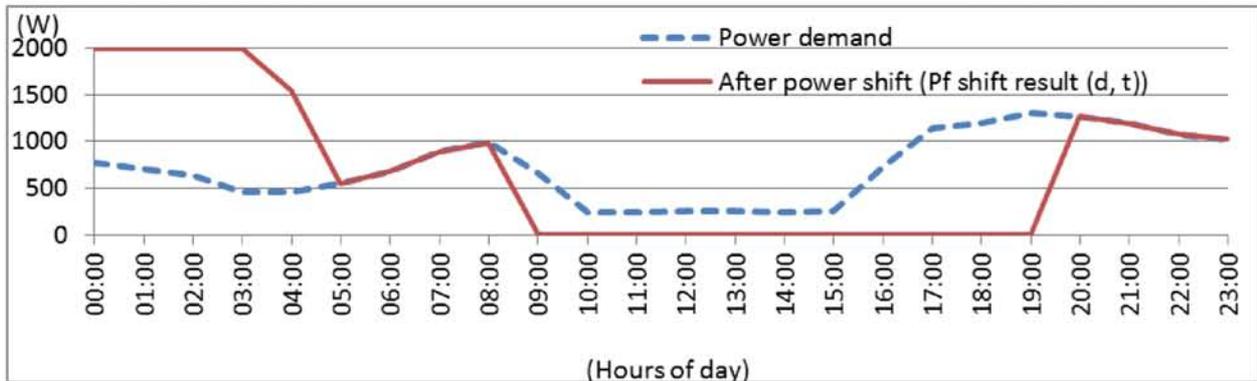


Fig. 33 家族セグメント4の需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果.

このシミュレーションから以下の結果が得られた。

- $Pf_{\text{difference at peak}}$ [W] : 240
- $PHf_{\text{feed average}}$ [Wh] : 6500
- $PHf_{\text{drive average}}$ [Wh] : 0

3.2.5.3. 供給電力平準化の可能性と効果

シミュレータで得られた結果から、供給電力平準化の可能性と最大効果を以下にまとめた。

1) 供給電力平準化の可能性

家族セグメント2および家族セグメント4では $Pf_{\text{difference at peak}}$ の値が正であり、供給電力平準化が可能であることが検証された。また、需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果を Table 3 にまとめ、家族セグメント毎の違いを比較した。

Table 3 需要電力のピークシフトのシミュレーションの結果.

家族セグメント	$Pf_{\text{difference at peak}}$ [W]	$PHf_{\text{feed average}}$ [Wh]	$PHf_{\text{drive average}}$ [Wh]
1	0	2490	3420
2	896	9720	0
3	0	2490	3420
4	240	6500	0

2) 供給電力平準化の最大効果

家族セグメント2の $Pf_{\text{difference at peak}}$ が最も高いので、家族セグメント2の結果をもとに、2020年、2030年、2050年の供給電力平準化の最大効果を評価した。この最大効果の評価に際して重要なそれぞれの年の東京電力管内のEV数である n_{EV} を、都道府県別・車種別自動車保有台数（軽自動車含む）、次世代自動車普及戦略、東京電力サービス区域に基づいて推計した。なお、本検証ではこれらの

データをもとに日本全国に対する東京電力管内の自動車保有の比率を 30.3%とした。

Table 4 に、2020 年、2030 年、そして、2050 年における家族セグメント 2 による電力供給平準化の効果を示す。

Table 4 家族セグメント 2 による電力供給平準化の効果.

家族セグメント 2	2020 年	2030 年	2050 年
日本国内 n_{EV} [台]	2,070,000	5,900,000	8,800,000
東京電力管内 n_{EV} [台]	627,000	1,790,000	2,670,000
$Pf_{difference\ at\ peak}$ [W]	896	896	896
$Pa (da_{peak}, ta_{peak})$ [GW]	60.0	60.0	60.0
$Ra_{efficacy}$ [%]	99.1	97.3	96.0

3.2.6. 考察と結論

本検証では、家庭部門における EV の蓄電池利用による広域供給電力平準化の可能性と効果を検証するために、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を適用し、利用者のモデルを含むすべてのモデルを適用できる Fig.22 に示した家庭内の需要電力ピークシフトのためのモデルベース・シミュレータにより、各家族セグメントの可能性と有効性、そして、それぞれの違いを確認した。

そして、最大効果の家族セグメントとして家族セグメント 2 を特定し、2050 年までの EV による供給電力平準化の最大効果を予測した。また、家族セグメント 4 の効果の向上のためには V2G の実現と CEMS を含めた電力市場の確立が不可欠であることや、家族セグメント 1 と家族セグメント 3 の効果のためには固定式蓄電池の導入などの他の施策が必要であることも明確になった。

本検証では、電気自動車の蓄電池利用による広域供給電力平準化の可能性の研究において、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を複数の家族セグメントに適用し、多様な利用者プロファイルに対して利用者のモデルを定義し、それらの結果を比較することで、本手法の有効性を証明した。

第4章

利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法 の検証

本章では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を検証する。自走式サービスロボットのアプローチ機能と自動緊急停止機能の開発と、コンシェルジュタイプ・ロボットのアプローチ機能の開発において、利用者視点での高い利用時品質を実現し、境界の利用者を含む多様な利用者に適応し、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を実現し、被験者の負傷のリスクを排除した設計時評価を可能にするために、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を適用し、その有効性を検証する。更に、コンシェルジュタイプ・ロボットのアプローチ機能の開発においては、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を具体的人間中心設計プロセスとして適用し、その有効性を検証する。

4.1. 利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性の検証

本検証では、自走式サービスロボット（以下、Robot）のアプローチ機能と衝突回避のための自動緊急停止機能の開発において、利用者視点での高い利用時品質を実現し、境界の利用者を含む多様な利用者に適応し、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を実現し、設計時評価における被験者の負傷のリスクを排除するために、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法（以下、MBD/UM）を適用し、その有効性を検証する。これまで、人間に対するロボットの物理的安全に着目し、アプローチに関する先行研究[43]が実施され、衝突回避機能に関する先行研究[44] [45] [46]も実施されてきた。本検証では、利用者（以下、Target）の物理的安全と心理的安心を考慮したアプローチ機能と、歩行者（以下、Walker）の物理的安全と心理的安心を考慮した自動緊急停止機能の開発を実施するために、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法による利用者のモデルから、ユーザモデルを作成してモデルベース開発に適用し、MBD/UMを実施する。

4.1.1. 利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング

本検証では、Robotにおける人間との衝突回避を研究目的とし、Targetに対するアプローチ機能と

Walker に対する衝突回避のための自動緊急停止機能の開発を実施した。Robot の周囲に存在する多くの利用者は注意力を有しており、衝突の危険を感じた場合、衝突回避行動が可能であり、この利用者が Robot の中心的利用者である。しかし、一部ではあるが、衝突の危険性を有する利用者も存在する。そこで、Robot と衝突する危険性を有する利用者の特徴と特性を明確にするために、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法により、Target と Walker の利用者のモデルを作成した。

本検証では最初に、Robot がアプローチする際に、人間が不安や不快を感じる条件を調査した。その結果、Target や Walker のパーソナルスペースに焦点を当てた。また、本検証では、Robot との衝突の危険性のある、Robot の周囲に存在する Walker の状態を調査し、衝突の危険性が高いと考えられる Walker の行動として、歩きながらスマートフォンを操作する歩きスマホに焦点を当てた。

これらの条件を基に、Robot がアプローチする Target と、Robot と衝突する危険性が高い Walker の利用者プロファイルをペルソナによって定義した。次に、ペルソナで定義した Target や Walker の特徴や特性、ストーリーに基づいて、モデルベース・システムズエンジニアリングにより、ユーザ要求と利用者のモデルを定義した。そして、モデルベース開発ツールとして採用した RTM を使い、シミュレーション上で動作する Target と Walker のユーザモデルをコンポーネントとして開発した。

4.1.2. サービスロボットの実システム

本検証では実システムを、人間である Target や Walker と、Robot で構成した。そして、Robot を、駆動サブシステム、警告サブシステム、検知サブシステム、ロボットコントローラで構成した。駆動サブシステムは、駆動装置として実現した。警告サブシステムは警告装置として実現した。検知サブシステムを、障害物を検知するための装置である Laser Range Finder (以下、LRF) unit、Walker の注意力の分析のための装置である Kinect unit、および、センサーマネージャで構成した。なお、ロボットコントローラは他のサブシステムを制御して、アプローチ機能と自動緊急停止機能を実現する。

Fig.34 に、アプローチ機能と自動緊急停止機能のための実システムの構成を示す。

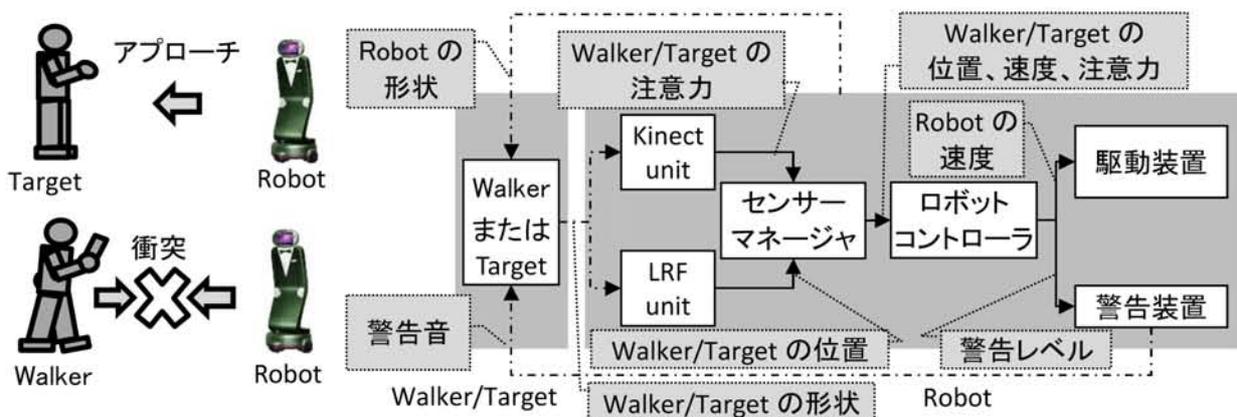


Fig. 34 アプローチ機能と自動緊急停止機能のための実システムの構成.

4.1.3. サービスロボットのモデルベース開発用システム

評価のためのシステムをシミュレーション環境で動作するユーザモデルおよび Robot のデバイスモデルで構成した。なお、ユーザモデルは、人間と Kinect unit および LRF unit の組み合わせとして実現した。そして、Robot の駆動装置を、駆動装置のデバイスモデルとして実現した。

Fig.35 に、アプローチ機能と自動緊急停止機能のための、ユーザモデルを導入したモデルベース開発におけるモデルベース・シミュレーション（以下、MBS）用システムの構成を示す。

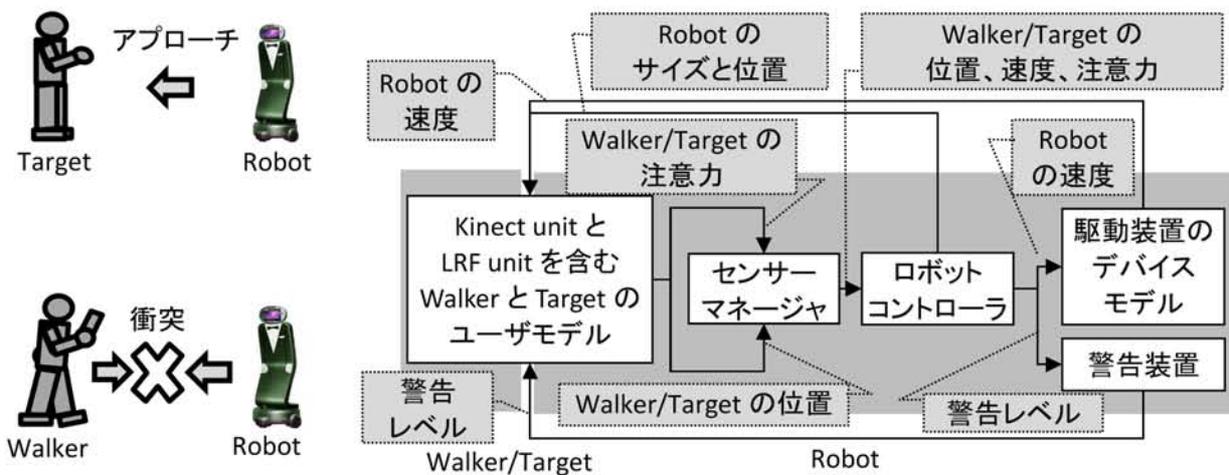


Fig. 35 アプローチ機能と自動緊急停止機能のためのユーザモデルを導入した MBS 用システムの構成。

4.1.3.1. アプローチと自動緊急停止のプロセス

人間は、そのパーソナルスペースに侵入されると不快や不安を感じる。そこで、パーソナルスペースをアプローチの際の重要な要因の一つであると仮定した。また、不注意な Walker との衝突の危険性は、慎重な Walker との衝突の危険性よりも高いので、Walker の注意力を自動緊急停止の判断のための重要な要因の一つであると仮定した。

Walker の注意力は、歩行時の同時行動によって低下する。そこで、Walker の注意力レベルに応じて、Robot が Walker に警告を発したり、自動停止したりするための境界値を算出するアルゴリズムを作成した。そして、本検証では、Walker の注意力を低下させる原因となる同時行動として、歩きながらスマートフォンを操作する「歩きスマホ」に焦点を当てて検証を実施した。

上述の仮定に基づき、アプローチ機能と自動緊急停止機能の処理手順を、次のように定義した。

- Step 1. センサーユニット（Kinect unit と LRF unit）が周囲を監視し、障害物を検出する。
- Step 2. Robot の進行方向前方に Walker が検出されない場合、Robot は Target に近づき続ける。
- Step 3. Robot の進行方向前方に Walker が検出された場合、Robot は境界値を算出する。
- Step 4. Walker が境界内に検出された場合、Robot は自動緊急停止し、Walker に警告を発する。
- Step 5. Robot が Target のパーソナルスペースの端に到達するまで、Robot はステップ 1 からステップ 4 までの処理を繰り返す。

Step 6. Robot が Target のパーソナルスペースの端に到達すると、Robot は停止する。

本検証における Walker としては、Robot と衝突するリスクを持つ歩行者と、立ち止まっている人間を対象とした。境界値を計算するために、以下の値を必要とする。

- 人間の注意力率: Kinect unit により取得する人間の行動に基づいて算出する人間の注意力の推定率。歩行時に人間がスマートフォンを見ている場合、人間の注意力が低いと想定される。
- 障害物の相対位置: LRF unit により取得する障害物の相対位置。
- 障害物の絶対速度: Robot の絶対速度と、障害物の相対位置の時系列データにより算出する相対速度をもとに、計算する障害物の絶対速度。
- パーソナルスペース: Robot や人間が存在する場合に、ユーザが不快や不安を感じる領域。パーソナルスペースは、ユーザごとに異なる。本検証では、Walker のパーソナルスペースとして固定値を使用した。

4.1.3.2. アプローチと自動緊急停止の評価基準

本検証では、評価基準を以下のように定義した。それぞれの変数や式のサブスクリプト x は、Robot の正面前方方向を示す。本検証では x 方向 1 次元のみで評価基準を記載しているが、自動停止処理は 2 次元で設計している。

- $t_{human\ best}$ [s]: 警告の認識から停止までの Walker の最短反射時間。
- $t_{human\ worst}$ [s]: 警告の認識から停止までの Walker の最長反射時間。
- HA_{max} [0.0 - 1.0]: Walker の最大の注意力率。
- HA_{sensor} [0.0 - 1.0]: 実際の Robot に設置されたセンサーにより取得される Walker の注意力率。
- v_x^{human} [mm/s]: Walker の絶対速度。Robot の絶対速度と Robot-Walker 間の相対位置の時系列データから推定される相対速度を基に算出する。
- $HD_x^{personal\ space}$ [mm]: パーソナルスペースの x 方向の距離。
- HA [0.0 - 1.0]: Walker が Robot からの警告を認識してから、停止するまでの時間を推定するために必要な人間の注意力率。人間の振舞いに基づいて以下の式で推定する。

$$HA = \max\left(\frac{t_{human\ best}}{t_{human\ worst}}, \min(HA_{max}, HA_{sensor})\right) \quad (1)$$

- $t_{human\ stop}$ [s]: Walker が警告を認識してから停止までに必要な時間。

$$t_{human\ stop} = \frac{t_{human\ best}}{HA} \quad (2)$$

- RD_x^{border} [mm]: Robot が停止し、Walker に警告を発するための境界値の x 方向の距離。

$$RD_x^{border} = HD_x^{personal\ space} + v_x^{human} * t_{human\ stop} \quad (3)$$

- HD_x [mm]: Walker が停止した時点の Robot との間の x 方向の距離。

なお、Walker が移動しない場合 ($v_x^{human} = 0$) は、以下のように仮定した。

$$HA = 1.0, t_{human\ stop} = t_{human\ best}, RD_x^{border} = HD_x^{personal\ space}$$

また、本検証では、以下のように仮定した。

$$t_{human\ best} = 1.0\ s, t_{human\ worst} = 5.0\ s, HA_{max} = 1.0.$$

4.1.4. アプローチ機能のシミュレーションと実験

MBS 用システムによるシミュレーションの結果と、実システムによる実験の結果を以下に示す。

4.1.4.1. アプローチ機能のシミュレーションの結果

Fig.35 に示した MBS 用システムを、RTM 上で開発した。本シミュレーションでは、 $HD_x^{personal\ space}$ の値として 700mm、900mm、1100mm を使用した。

Fig.36 に、アプローチ機能のための MBS 用システムの構成を示す。

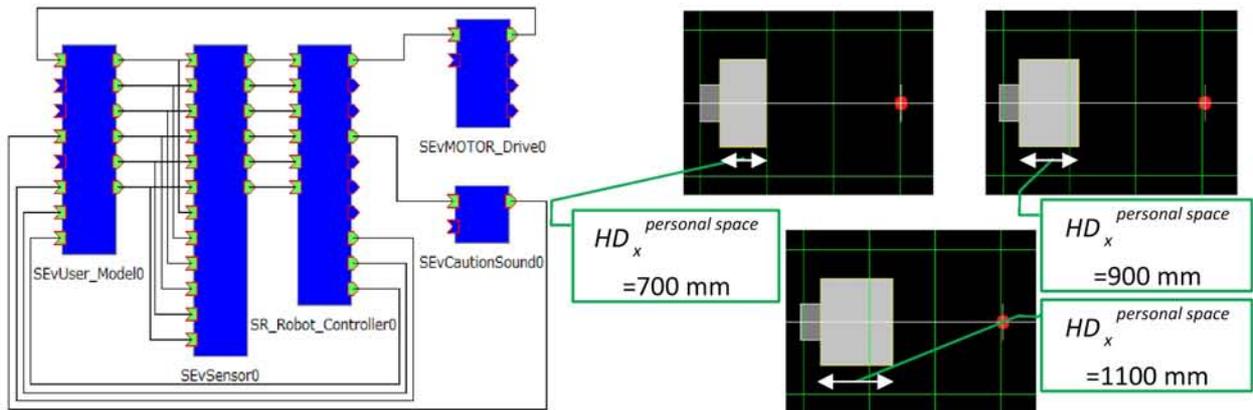


Fig. 36 アプローチ機能のための MBS 用システムの構成

Table 5 に、MBS によるアプローチ機能のシミュレーションの結果を示す。

Table 5 MBS によるアプローチ機能のシミュレーションの結果.

$HD_x^{personal\ space}$ [mm]	HA	v_x^{human} [mm/s]	$t_{human\ stop}$ [s]	RD_x^{border} [mm]	HD_x [mm]
700	1.0	0.0	0.0	700	695
900	1.0	0.0	0.0	900	887
1100	1.0	0.0	0.0	1100	1094

4.1.4.2. アプローチ機能の実験の結果

Fig.34 に示した実システムを、RTM 上で開発した。本実験では、 $HD_x^{personal\ space}$ の値として、700mm、900mm、1100mm を使用した。

Fig.37 に、アプローチ機能のための RTM 上の実システムの構成を示す。

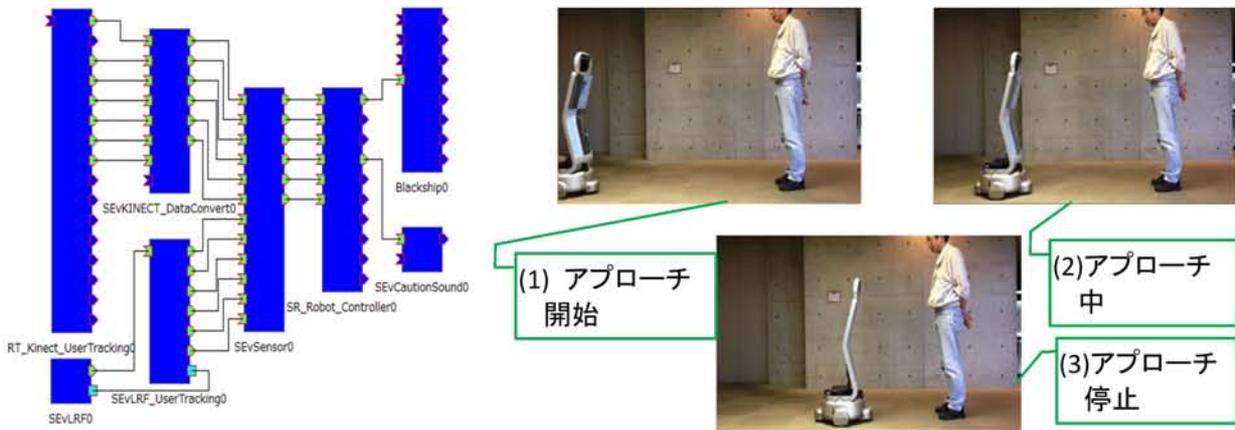


Fig. 37 アプローチ機能のための実システムの構成.

Table 6 に、実システムによるアプローチ機能の実験の結果を示す。

Table 6 実システムによるアプローチ機能の実験の結果.

$HD_x^{personal\ space}$ [mm]	HA	v_x^{human} [mm/s]	$t_{human\ stop}$ [s]	RD_x^{border} [mm]	HD_x [mm]
700	1.0	0.0	0.0	700	686
900	1.0	0.0	0.0	900	899
1100	1.0	0.0	0.0	1100	1080

4.1.5. 自動緊急停止機能のシミュレーションと実験

MBS 用システムによるシミュレーションの結果と、実システムによる実験の結果を以下に示す。

4.1.5.1. 自動緊急停止機能のシミュレーションの結果

自動緊急停止機能のための MBS 用システムの構成を、Fig.36 に示すアプローチ機能のための MBS 用システムと同一構成とした。本シミュレーションでは、 v_x^{human} として 500mm/s または 1000mm/s、 HA として 1.0 または 0.5、 $HD_x^{personal\ space}$ として 700mm を設定した。

Table 7 に、MBS による自動緊急停止機能のシミュレーションの結果を示す。

Table 7 MBS による自動緊急停止機能のシミュレーションの結果.

v_x^{human} [mm/s]	HA	$t_{human\ stop}$ [s]	$HD_x^{personal\ space}$ [mm]	RD_x^{border} [mm]
500	1.0	1.0	700	1200
500	0.5	2.0	700	1700
1000	1.0	1.0	700	1700
1000	0.5	2.0	700	2700

4.1.5.2. 自動緊急停止機能の実験の結果

自動緊急停止機能のための実システム構成を、Fig.37 に示すアプローチ機能のための実システムと同一構成とした。本実験では、 v_x^{human} と HA はセンサーで取得し、 $HD_x^{personal\ space}$ として 700mm を設定した。

Table 8 に実システムによる自動緊急停止機能の実験の結果を示す。

Table 8 実システムによる自動緊急停止機能の実験の結果.

v_x^{human} [mm/s]	HA	$t_{human\ stop}$ [s]	$HD_x^{personal\ space}$ [mm]	RD_x^{border} [mm]
801	1.0	1.0	700	1501
386	0.5	2.0	700	1472
1150	1.0	1.0	700	1850
718	0.5	2.0	700	2135

4.1.5.3. 考察

本検証では、アプローチ機能と自動緊急停止機能の開発に、MBD/UM を適用した。そこで、最初に、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を実施し、Robot の中心的利用者と、Robot と衝突する危険のある利用者を調査し、Robot がサービスを提供するためにアプローチする Target のユーザモデルと、Robot がアプローチする際に障害物となる Walker のユーザモデルを作成した。

アプローチ機能のシミュレーションでは、パーソナルスペースのサイズの異なる 3 つのユーザモデルを使った RTM 上のシミュレーションによって、Robot の実システムも Target の被験者も必要としない評価を実施した。そして、評価の実施後に、アプローチ機能の実験において、被験者に対する衝突のリスクなしに、アプローチ機能の検証を完了した。

また、自動緊急停止機能のシミュレーションでは、異なる速度と異なる注意力を持つ 4 つのユーザモデルを使った RTM 上のシミュレーションによって、Robot の実システムも Walker の被験者も必要としない評価を実施した。そして、評価の実施後に、自動緊急停止機能の実験において、被験者に対する衝突のリスクなしに、自動緊急停止機能の検証を完了した。

最後に、シミュレーションの結果と実験の結果を比較することにより、シミュレーション環境でユーザモデルが人間の代理として振舞うことができることを確認した。これにより、シミュレーションにより期待される結果を達成できれば、リスクを低減して実験を完了できることも確認した。

4.1.6. 結論

本検証では、Robot のアプローチ機能と自動緊急停止機能の開発に MBD/UM を適用し、利用者視点で、多様な利用者に対応する設計を実施し、ユーザモデルを導入したモデルベース開発による製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を実現し、設計時評価における被験者の負傷のリスクも

排除した。そして、被験者と実システムによる検証において、被験者の負傷のリスクを低減することを確認した。最後に、シミュレーション結果と実験結果を比較し、その類似性を確認した。

これらの検証結果から、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法 (MBD/UM) が、利用者視点での高い利用時品質を実現し、境界の利用者を含む多様な利用者に適応し、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価が可能なシステム開発を実現し、設計時評価における被験者の負傷のリスクを低減する開発手法として、有効であることを証明した。

4.2. 具体的人間中心設計プロセスとしての有効性の検証

本検証では、コンシェルジュタイプ・ロボットのアプローチ機能の開発において、利用者視点での高い利用時品質を実現し、境界の利用者を含む多様な利用者に適応し、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を実現し、被験者の負傷のリスクを排除した設計時評価を可能にすることを目的として提案する利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法 (以下、MBD/UM) を、Fig.8 に示した具体的人間中心設計プロセス (以下、具体的 HCD プロセス) として適用し、具体的 HCD プロセスとしての有効性を検証する。本検証では、コンシェルジュタイプ・ロボットに要求される機能を調査し、アプローチ機能に関する研究を実施し、MBD/UM の具体的 HCD プロセスとしての有効性と、HCD プロセスとしての以下の優位性を検証する。

- システム設計時評価のための製品サンプルのハードウェア制作に必要な期間とコストの低減
- システム設計時における様々な条件下や繰り返し同一条件下におけるシミュレーションによる評価
- システム設計時評価における被験者が負傷するリスクの排除と検証時のリスクの低減

4.2.1. 対象ロボットと機能

建造物の広い通路やホールでサービスを提供するコンシェルジュタイプ・ロボット (以下、Robot) に要求される機能を調査し、基本機能である Robot の周囲の利用者 (以下、Target) との会話機能に加え、少なくともアプローチ機能、自動緊急停止機能、追跡機能が必要であることが判明した。

本検証では、Target と会話する前に、Robot は Target に接近する必要があるため、そして、接近時に、Robot は衝突により Target を傷つけたり、Target に衝突の危険の不安を与えたりするリスクがあるため、これらの機能の中で Robot のアプローチ機能に焦点を当てた。

利用者視点で Robot のアプローチ機能を研究するため、ユーザ要求に適合する高いユーザビリティと高いユーザエクスペリエンス (以下、UX) を実現するために、具体的 HCD プロセスとして MBD/UM を適用した。

Fig.38 に、アプローチ機能の環境を示す。

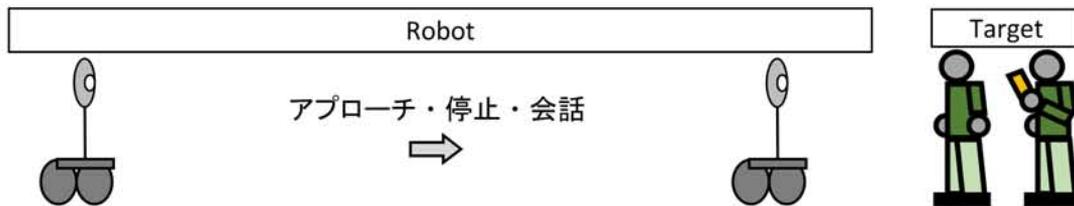


Fig. 38 アプローチ機能の環境.

4.2.2. 具体的人間中心設計プロセスに基づく開発

ユーザビリティとしての物理的安全と UX としての心理的安心を実現するために、具体的 HCD プロセスとして MBD/UM を適用し、Robot のアプローチ機能を開発した。MBD/UM のユーザモデルは、HCD プロセスにおいて利用者の代理として製品設計に寄与し、将来的には、利用者ごとに最適化するパーソナライゼーションを含む機能設計においても、多様な利用者の代理として有用になる。

4.2.2.1. 具体的人間中心設計プロセスのプラン

具体的 HCD プロセスとして MBD/UM を開始するために、アプローチ機能の実施場所を検討し、病院やショッピングモール、老人ホームなどの建造物の広い通路やホールとした。

そして、Robot がアプローチ機能によって接近する Target の中心的利用者は、Robot に用事があるため注意力を有することが想定された。しかし、Robot が接近する相手として多様な利用者が存在することも想定された。そこで、安全で安心なアプローチ機能を実現するための MBD/UM のプロセスを計画するため、アプローチ機能が必要となる状況を調査し、以下の二種類のケースを採用した。

- Target が質問するために Robot を呼び寄せるケース
このケースでは、Target が自分で Robot を呼び寄せるため、Target は注意深く Robot の到着を待つと、仮定した。
- Robot が情報を伝える目的を持って Target に近づくケース
このケースでは、Target は Robot の接近を知らないため、Target は時に注意深く、時に不注意に立っている。そこで、このケースの Target は不注意である危険性があるため、Robot と衝突するリスクが多く存在すると仮定した。

これらの状況に基づいて、物理的安全と心理的安心を備えた、Robot のアプローチ機能を設計するために、MBD/UM による具体的 HCD プロセスを計画した。そして、機能の利用状況の理解と明確化のための調査を皮切りに、MBD/UM による HCD サイクルを開始した。

4.2.2.2. ペルソナによる利用状況の理解と明確化

HCD サイクルとしての MBD/UM の第 1 ステップとして、利用者の特徴と特性を明確にし、利用

者による Robot の利用状況の理解と明確化が必要である。そのため、通路やホールにおいて起きる可能性のある、Target と Robot の間の怪我のない軽い衝突を含む衝突や衝突の危険の原因を検討した。

相手の歩行者の注意力不足が原因である通路やホールにおける歩行中の衝突や衝突の危険の経験と、モバイルフォンの操作による注意散漫が道を渡る際の歩行者の危険な振舞いであると結論付けた報告書[47]により、モバイルフォン（携帯電話およびスマートフォン）の操作が通路やホールにおける Target の注意力不足の要因の一つとなり、Robot との衝突や衝突の危険の原因になると仮定した。

そこで、上述の衝突や衝突の危険の原因に関する仮定の正当性を確認し、更に、心理的安心の条件の明確化に必要な定性データの収集のために、10名の回答者に対してアンケートを実施し、歩行者間の衝突や衝突の危険に関する経験と状況に関する調査を実施した。

このアンケートでは、回答者が歩行中に衝突や衝突の危険を経験した際の状況に関して次の質問を実施した。

- 歩行中に、他の歩行者と衝突したり、衝突の危険を感じたりした経験はありますか？
- 衝突や衝突の危険を経験した相手は注意を払っている人でしたか、または、注意力不足の人でしたか、または、その両方でしたか？
- 衝突や衝突の危険を経験したとき、注意力不足の人はモバイルフォンを操作していましたか？それ以外のことをしていましたか？それ以外の場合、何をしていましたか？

アンケート結果により、すべての回答者が何らかの衝突や衝突の危険を経験し、注意力のある人よりも注意力不足の人との衝突のリスクが高く、そして、モバイルフォン操作が注意力不足の主要な原因の一つであることを確認した。

Table 9 に、衝突や衝突の危険の経験に関するアンケートの結果を示す。

Table 9 衝突や衝突の危険の経験に関するアンケートの結果.

衝突や衝突の危険の経験	Ratio [%]
注意力不足の人との衝突や衝突の危険の経験	100
モバイルフォン操作による注意力不足	70
よそ見による注意力不足	50
注意力のある人との衝突や衝突の危険の経験	30

そして、アンケートにおいて、更に衝突や衝突の危険を感じた際の、アプローチパターンに関する質問を実施した。

- 衝突や衝突の危険を感じた際、相手は定速で接近してきましたか、それとも、減速して接近してきましたか？

アンケートの結果は、減速接近よりも定速接近に対して強い不安を感じたことを示した。
Table 10 に、アプローチパターンと衝突の不安に関するアンケートの結果を示す。

Table 10 アプローチパターンと衝突の不安に関するアンケートの結果。

アプローチパターン	Ratio [%]
定速接近	90
減速接近	20

これらの結果を基に、Target の利用者プロファイルをペルソナで定義し、Robot の利用状況をペルソナのストーリーとして記述した。

以下に、Target の利用者プロファイルにおいて採用した、利用者の特徴と特性を示す。

- Target は、Robot が接近する際に、時に注意深く、時に注意力はない。
- Target は、スマートフォン熟练操作の際に注意力が低下する。
- Target は、Robot が定速で接近して急停止するように接近すると衝突の不安を感じる。

そして、過去の経験を基に、次の仮定を追加した。

- Target は、ロボットが近づきすぎると衝突の不安を感じる。
- Target は、警告によって注意力を回復する。
- Target は、Robot が Target よりも速く移動すると、衝突の不安を感じる。
- 注意力不足の Target は、突然歩き始めるリスクがある。

4.2.2.3. モデルベース・システムズエンジニアリングによるユーザ要求の明確化

HCD サイクルとしての MBD/UM の第 2 ステップとして、利用状況を基に、ユーザ要求を明確にする必要がある。ユーザ要求の明確化のためには、最初に、利用状況に基づいて、利用者の活動を理解し、利用者のモデルをモデルベース・システムズエンジニアリング（以下、MBSE）のダイアグラムを使って定義し、次に、利用者のモデルに基づいて、ユーザ要求を MBSE の要求ダイアグラムを使って定義する必要がある。そして、最後にユーザ要求に基づいて、製品のモデルを検討し、MBSE のステートマシンダイアグラムなどによって定義する。

そこで、本検証では、Target のアプローチ機能に対するユーザ要求を明確にするために、最初に、MBSE により Target のモデルを定義した。

Fig.39 に、MBSE のステートマシンダイアグラムによる Target のモデルを示す。

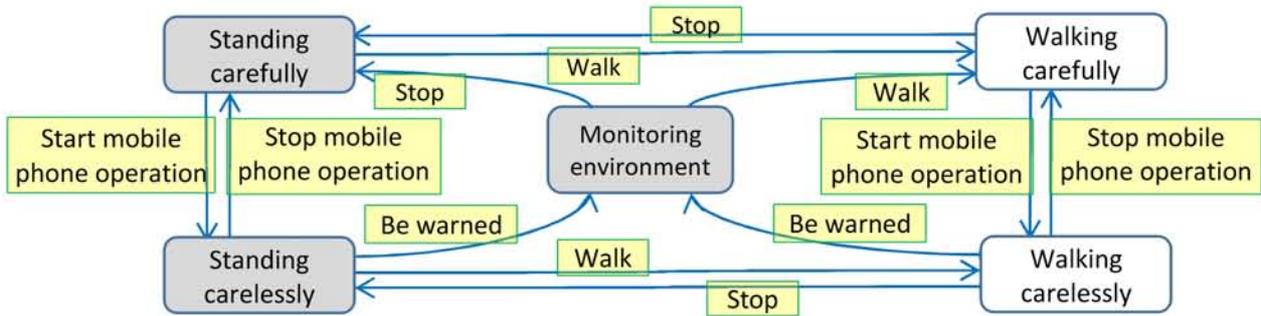


Fig. 39 ステートマシンダイアグラムによる Target のモデル.

本検証では、Robot は Target よりも低速であると仮定しており、歩行している Target に追いつけないので、Target のモデルにおいて「Standing carefully」、「Standing carelessly」、「Monitoring environment」の状態に焦点を当てた。

次に、Target のモデルを基に、モバイルフォンを操作することで注意力が低下した Target に対応するために必要な Robot のアプローチ機能に対するユーザ要求を、要求ダイアグラムにより定義した。以下に、主要なユーザ要求を示す。

- アプローチ機能は、Target の注意力を回復させたり、Target に心理的安心を与えたりするために、適切な距離で Robot の接近を警告しなければならない。
- アプローチ機能は、Target の物理的安全のために、衝突の回避にとって適切な距離で Robot を停止させなければならない。
- アプローチ機能は、Target の心理的安心のために、衝突の不安の低減にとって適切な距離で減速を開始しなければならない。
- Robot は、Target の心理的安心のために Target よりも低速で移動する。

次に、ユーザ要求を基に、アプローチ機能に関する Robot のモデルを定義した。

Fig.40 に、MBSE のステートマシンダイアグラムによるアプローチ機能に関する Robot のモデルを示す。

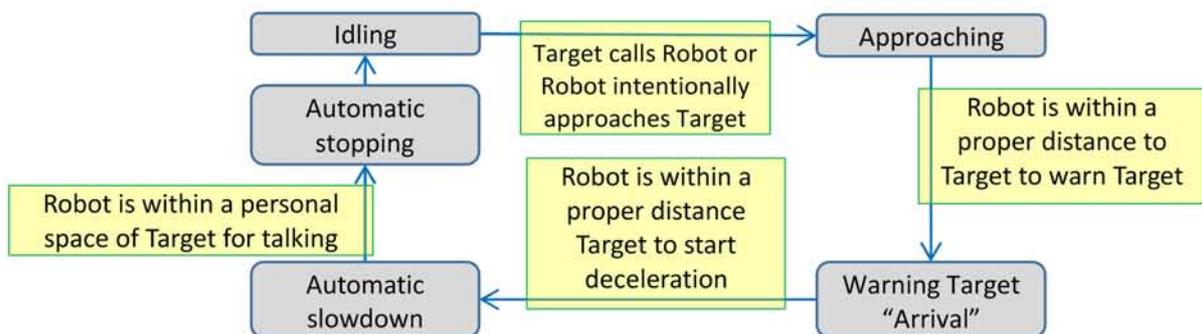


Fig. 40 ステートマシンダイアグラムによるアプローチ機能に関する Robot のモデル.

そして、Fig.40 の Robot のモデルを実現するために、次の値を必要とする。

- 停止のための Target への適切な距離
- 減速開始のための Target への適切な距離
- 警告のための Target への適切な距離

Robot は会話するために Target に近づくので、会話のためのパーソナルスペースが、停止する際の Target までの適切な距離と考えることができると仮定した。そのため、7名の被験者による実験によって会話のためのパーソナルスペースを調査した。その際、各被験者が広いホールにおいて徒歩で、前方の立ち止まっている人に近づき、前後に移動して距離を調整する方法で、パーソナルスペースを計測した。

Table 11 に、会話のためのパーソナルスペースの調査結果を示す。

Table 11 会話のためのパーソナルスペース.

会話のためのパーソナルスペース [mm]	
Average	700
Max	900
Min	350

また、人間が障害物に接近する際に減速を開始する距離が、Robot が Target に接近する際に減速を開始する適切な距離とすることが考えられると仮定した。そこで、7名の被験者による実験により、人間が障害物に対して減速を開始する距離を、Laser Range Finder (以下、LRF) によって調査した。調査方法としては、それぞれの被験者が自分の眼で直接 860 mm/s の速度で移動するサービスロボットを操作して、広いホールの前方の障害物に近づく方法で、計測を行った。

Table 12 に、減速を開始する障害物までの距離の調査結果を示す。

Table 12 減速を開始する障害物までの距離.

減速を開始する障害物までの距離 [mm]	
Average	1600
Max	3900
Min	920

また、反射時間において Target へ近づく距離が、Target への警告時に追加すべき適切な調整距離と仮定した。そこで、10名の被験者による実験を行い、警告音を聞いてからリアクションまでの反射時間を調査した。この調査では、警告音からリアクションとしてボタンを離すまでの時間を反射時間とした。

Table 13 に、警告音からリアクションまでの反射時間の調査結果を示す。

Table 13 警告音からリアクションまでの反射時間.

警告音からリアクションまでの反射時間 [s]	
Average	1.1
Max	1.4
Min	0.86

そして、注意力のある Target と注意力のない Target の両方のためのアプローチ機能を設計するために、注意力のある Target と注意力のない Target の振舞いの違いを明確にし、注意力のある Target と注意力のない Target を区別する方法を研究した。

注意力のない Target の振舞いとして、モバイルフォンの操作に焦点を当てた。そして、注意力のある Target と注意力のない Target を区別するために、モバイルフォンを操作する人のポーズを調査した。

Fig.41 の左側にモバイルフォンを操作していない Target のポーズ、右側にモバイルフォンを操作している Target のポーズをそれぞれ示す。

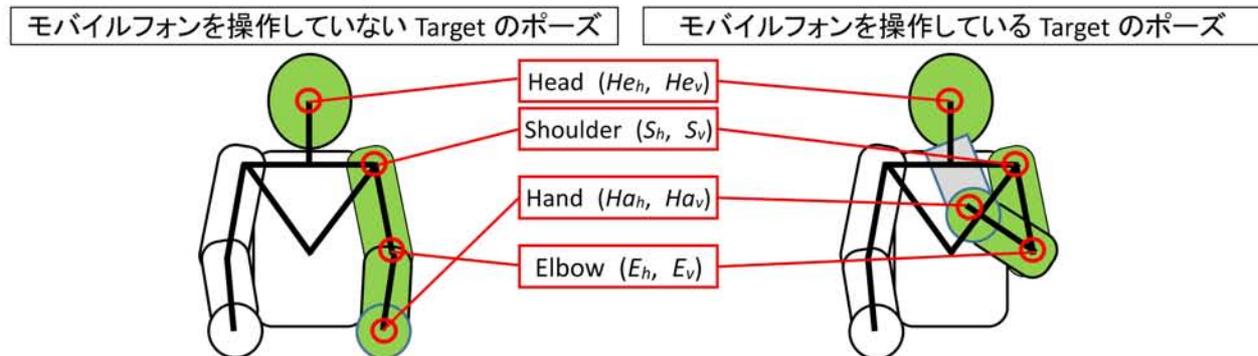


Fig. 41 Target のポーズ.

Fig.41 により、モバイルフォンを操作していない注意力のある人のポーズと、モバイルフォンを操作している注意力のない人のポーズを区別するために、頭、肩、肘、手の位置に着目した。そして、モバイルフォン操作時には水平方向では手は肩と頭の間であり、そして、垂直方向では手は肩と肘の間にあることが判明したため、「 $Ha_h - He_h$ 」と「 $Sh - He_h$ 」の比率と、「 $Ha_v - E_v$ 」と「 $S_v - E_v$ 」の比率に着目した。

- H_h [%] : 手の水平方向位置。

$$H_h = \frac{Ha_h - He_h}{Sh - He_h} * 100 \quad (1)$$

- H_v [%] : 手の垂直方向位置。

$$H_v = \frac{Ha_v - E_v}{S_v - E_v} * 100 \quad (2)$$

Fig.42 に、モバイルフォンを操作している Target のポーズと、式 (1)と(2)の要素を示す。

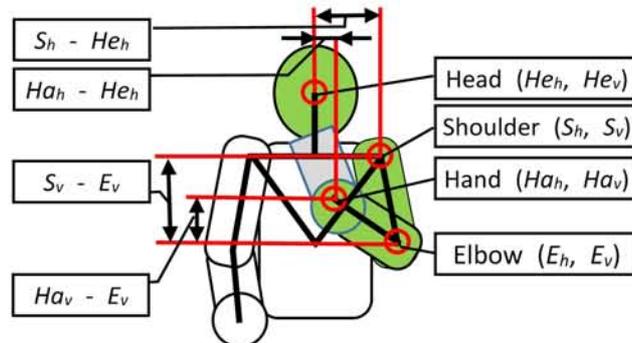


Fig. 42 モバイルフォンを操作している Target のポーズ。

そこで、14名の被験者により広い通路を徒歩で Kinect unit に接近する実験で、モバイルフォンを操作する人のポーズを調査した。その際、接近時に Kinect unit のデータが安定している間のデータを採用した。

Table 14 に、モバイルフォンを操作する注意力のない人のポーズの調査結果を示す。Table 14 において、「Always distinguished」の列は常時モバイルフォンを操作していると認識される被験者の比率を意味し、「Sometimes distinguished」の列は、時々モバイルフォンを操作していると認識される被験者の比率を意味し、そして、「Minimum recognition rate」の列は被験者の中のモバイルフォンを操作していると認識される最小認識率を示す。

Table 14 モバイルフォンを操作する注意力のない人のポーズ。

$H_h <$	$H_v >$	<i>Sometimes distinguished</i>	<i>Minimum recognition rate</i>	<i>Always distinguished</i>
50%	30%	93%	0%	21%
60%	30%	100%	8%	36%
70%	30%	100%	45%	57%
80%	30%	100%	48%	77%
80%	35%	100%	53%	79%
90%	40%	100%	55%	79%
100%	45%	100%	55%	85%

この表から、モバイルフォンを操作している人のポーズを認識するための H_h と H_v の組み合わせに関する選択基準を次のように設定した。

- 手は水平方向で体の中心に近く位置する。
- 手は垂直方向で肘よりも上方に位置する。
- すべての被験者が時々、 H_h と H_v の組合せを満足する。

- H_h と H_v の組合せの「Minimum recognition rate」が 50% を超える。

実験の結果により、スマートフォンを操作している人のポーズを、スマートフォンを操作していない人のポーズから区別するための境界の組合せとして「 $H_h < 80\%$ 」と「 $H_v > 35\%$ 」を選択した。

4.2.2.4. RTM における MBS のためのユーザ要求に適合した設計ソリューションの生成

HCD サイクルとしての MBD/UM の第 3 ステップとして、設計ソリューションはユーザ要求に適合するように生成される必要がある。そのため、ユーザ要求に適合するように、RTM 上のモデルベースシミュレーション（以下、MBS）のための Robot のアプローチ機能に関する設計ソリューションを生成した。

注意力のある Target と注意力のない Target の双方のためのアプローチ機能の設計ソリューションを生成するために、注意力のある Target と注意力のない Target の両方に適合するアプローチ機能に対して要求される能力を調査した。そして、アプローチ機能は、注意力のある Target から注意力のない Target のポーズを区別するための能力、Target への距離を計測するための能力、そして、Target に警告するための能力を持つ必要があると仮定した。そして、アプローチ機能の環境を単純化するために、Robot が広い通路やホールで Target に接近する環境を想定した。

Fig.43 に、Robot が注意力のある Target と注意力のない Target に接近する環境を示す。



Fig. 43 Robot が注意力のある Target と注意力のない Target に接近する環境。

そして、Fig.40 で示した Robot のモデルを基に、Robot を移動するための基本能力に加え、Target のポーズを認識する能力、Target への距離を計測する能力、Target に警告する能力を有する Robot のハードウェア構成を設計した。

Target のポーズを認識して区別するために Kinect unit を Kinect subsystem において採用し、Target への距離を計測するために Laser Range Finder（以下、LRF）unit を LRF subsystem において採用し、Target に警告するためにスピーカー装置を Warning for Target subsystem において採用し、Robot を移動するために駆動装置を Motor drive subsystem において採用した。

Fig.44 に、Robot のハードウェア構成を示す。

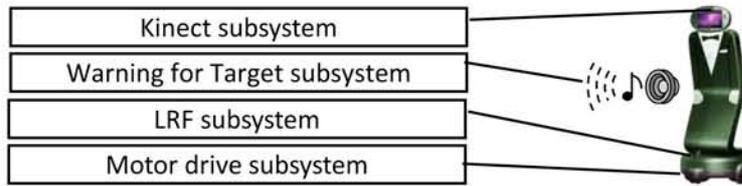


Fig. 44 Robot のハードウェア構成.

次に、RTM 上でアプローチ機能の環境を含めた製品サンプルの構成を定義した。この製品サンプルは Robot と Target で構成し、そして、Robot は Commander subsystem、Kinect subsystem、LRF subsystem、Master controller、Warning for Target subsystem、Motor drive subsystem により以下のように構成される。

- Commander subsystem は、Robot の移動を速度で指定する。
- Kinect subsystem は、Target のポーズを解析し、結果として、Target の注意力を出力する。
- LRF subsystem は、Target までの距離を解析し、結果として、Target のサイズ、Target への相対位置と相対速度を出力する。
- Master controller は、Commander subsystem、Kinect subsystem、LRF subsystem からの情報を評価し、アプローチ機能の結果としての適切な速度と適切な警告レベルを出力する。そして、Master controller はシミュレーションの状況や実験の状況を監視するために、Robot と Target の移動、位置、そして、重要な値を可視化する能力も持つ。
- Warning for Target subsystem は、入力で指定された警告レベルに従い、Target に警告する。
- Motor drive subsystem は、入力で指定された速度で、Robot を移動する。
- Target は、Kinect subsystem と LRF subsystem により監視され、そして Warning for Target subsystem により警告される。そして、Target は Robot への距離を監視し、Robot の速度を認識する。

Fig.45 に、製品サンプルの構成を示す。

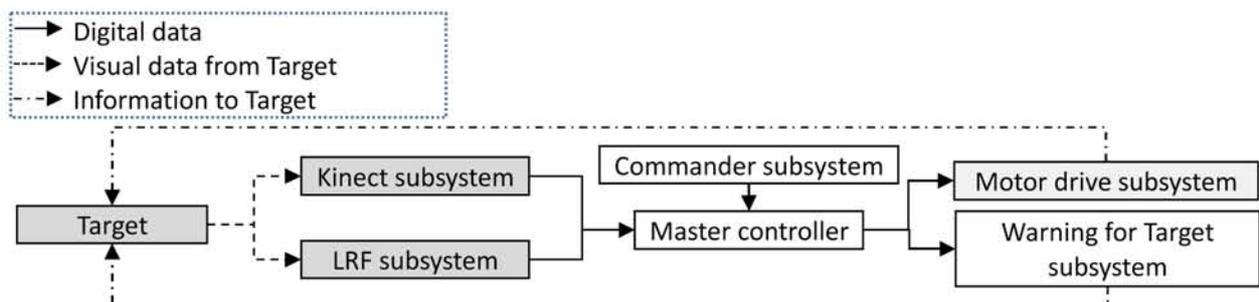


Fig. 45 製品サンプルの構成.

Fig.45 に基づき、MBS のための設計ソリューションの構成を定義した。設計ソリューションは、Robot のデバイスモデルと UM of Target with sensor subsystems で構成した。そして、Robot のデバイスモデルは、Commander subsystem、Warning for Target subsystem、Motor drive subsystem

をモデル化した Motor drive model subsystem、Master controller で構成した。また、UM of Target with sensor subsystems は、Target、Kinect subsystem、LRF subsystem の能力で構成した。

Fig.46 に、MBS のための設計ソリューションの構成を示す。

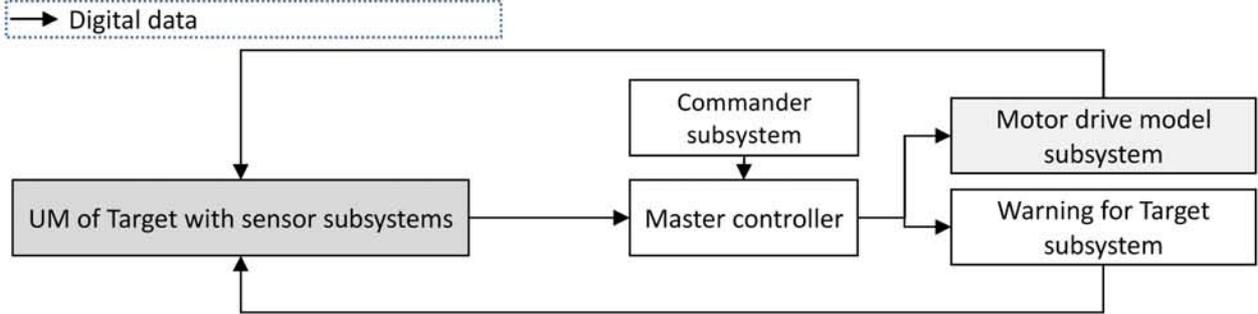


Fig. 46 MBS のための設計ソリューションの構成.

次に、以下の変数と式を定義した。サブスクリプト x は Robot の正面前方方向を意味する。

- $TD_x^{personal\ space}$ [mm] : Robot が停止すべき適切な Target への距離 (Target のパーソナルスペース)。
- $TD_x^{start\ deceleration}$ [mm] : Robot が減速を開始すべき適切な Target への距離。
- $TD_x^{slowdown}$ [mm] : 指定された Robot の減速を開始する Target への距離。
- t_n [s] : Robot が移動を開始した時からの時間。
- $t_n^{stopped}$ [s] : Robot が停止した時の時間。
- t_n^{warned} [s] : Robot が Target に警告した時の時間。
- $t_n^{approach}$ [s] : Robot が減速を開始した時からの時間。
- $Tv_x^{absolute}(t_n)$ [mm] : Target の速度。
- $TAt(t_n)$ [s] : Target の注意力 (注意力の状態によって異なる反射時間)。
- $Cv_x^{specified}(t_n)$ [mm/s] : Commander subsystem により指定された速度。
- $TD_x^{relative}(t_n)$ [mm] : LRF subsystem で計測する Robot から Target までの距離。

MBS では、この値は Target のユーザモデルによって以下の式で計算される。

$$TD_x^{relative}(t_n) = TD_x^{relative}(t_{n-1}) - Tv_x^{relative}(t_{n-1}) * (t_n - t_{n-1}) \quad (3)$$

- $Tv_x^{relative}(t_n)$ [mm/s] : Robot と Target の相対速度。

$$Tv_x^{relative}(t_n) = \frac{TD_x^{relative}(t_{n-1}) - TD_x^{relative}(t_n)}{t_n - t_{n-1}} \quad (4)$$

- $D_x^{notify}(t_n)$ [mm] : Robot が Target に警告する際の Robot から Target までの距離。

$$D_x^{notify}(t_n) = TD_x^{slowdown} + TAt(t_n) * Tv_x^{relative}(t_n) \quad (5)$$

- $D_x^{approach}(t_n, t_n^{approach})$ [mm] : アプローチ時の Robot から Target のパーソナルスペースまでの距離。

$$D_x^{approach}(t_n, t_n^{approach}) = D_x^{notify}(t_n) - TD_x^{personal\ space} - Tv_x^{relative}(t_{n-1}) * (t_n^{approach} - t_{n-1}^{approach}) \quad (6)$$

- $Rv_x^{absolute}(t_n)$ [mm/s] : Robot の速度。

If $TD_x^{relative}(t_n) > D_x^{notify}(t_n)$ then Robot は次のように指定された速度を維持する。

$$Rv_x^{absolute}(t_n) = Cv_x^{specified}(t_n) \quad (7)$$

Else if $TD_x^{relative}(t_n) > TD_x^{personal\ space}$ then Robot は次のように減速する。

$$Rv_x^{absolute}(t_n) = Rv_x^{absolute}(t_{n-1}) * \left(1 - \frac{Rv_x^{absolute}(t_{n-1}) * (t_n - t_{n-1})}{D_x^{approach}(t_{n-1}, t_{n-1})} \right) \quad (8)$$

Else Robot は次のように停止する。

$$Rv_x^{absolute}(t_n) = 0 \quad (9)$$

- $PHS_{at\ stop}$ [0_{worst} - 1_{best}] : 停止時の Target の物理的安全度。適切な停止距離としてのパーソナルスペースに対する Robot の実停止距離の比率。0 は衝突を意味する。

$$PHS_{at\ stop} = \frac{TD_x^{relative}(t_n^{stopped})}{TD_x^{personal\ space}} \quad (10)$$

- $PSS_{at\ warned}$ [0_{worst} - 1_{best}] : 警告時の Target の心理的安全度。適切な Target への警告距離に対する Robot の実警告距離の比率。1 は適切な距離で注意力を回復したことを意味する。

$$PSS_{at\ warned} = \frac{TD_x^{relative}(t_n^{warned})}{TD_x^{start\ deceleration} + TAt(t_n^{warned}) * Rv_x^{relative}(t_n^{warned})} \quad (11)$$

Fig.46 に示した構成を基に、RTM の MBS 用の設計ソリューションの構成を定義した。

Fig.47 に、RTM の MBS 用の設計ソリューションの構成を示す。

- Motor drive model subsystem は、SEvMotorDrive_Model0 で構成する。
- Warning for Target subsystem は、SEvSound_Unit_4_Target0 で構成する。
- Master controller は、SE_Master_Controller0 で構成する。
- Commander subsystem は、SEvCommander0 で構成する。
- UM of Target with sensor subsystems は、SEvTarget_Model0 で構成する。

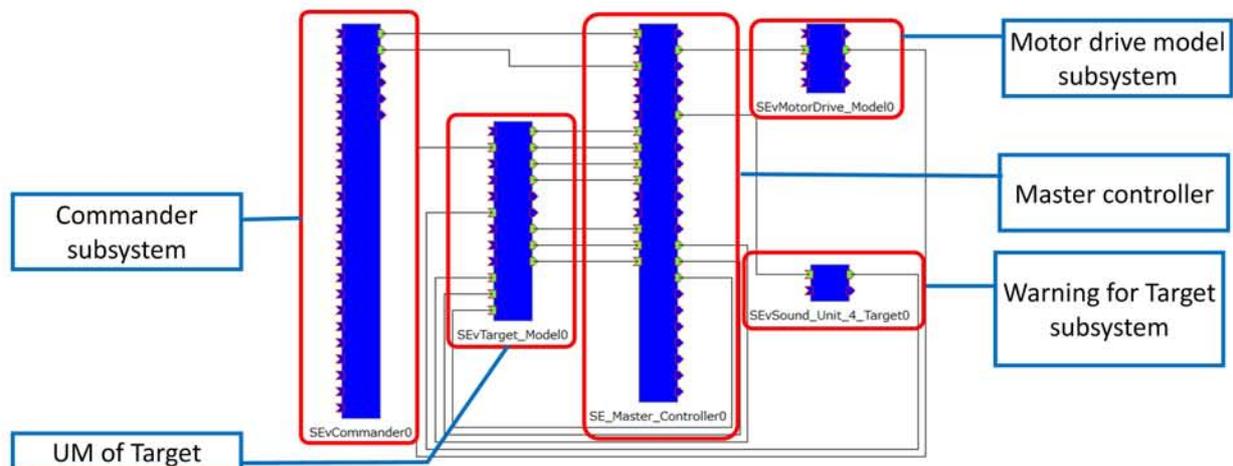


Fig. 47 RTM の MBS 用の設計ソリューションの構成.

4.2.2.5. RTM における MBS によるユーザ要求に対する設計ソリューションの適合性評価

HCD サイクルとしての MBD/UM の第 4 ステップとして、ユーザ要求に対する設計ソリューションの適合性を評価する必要がある。そこで、Fig.47 で示した構成で、RTM 上の MBS により、設計ソリューションのユーザ要求に対する適合性を評価した。

Fig.48 に、Robot と Target の移動と位置、および、警告位置、減速開始位置、停止位置を可視化する能力による MBS におけるスクリーンショットを示す。

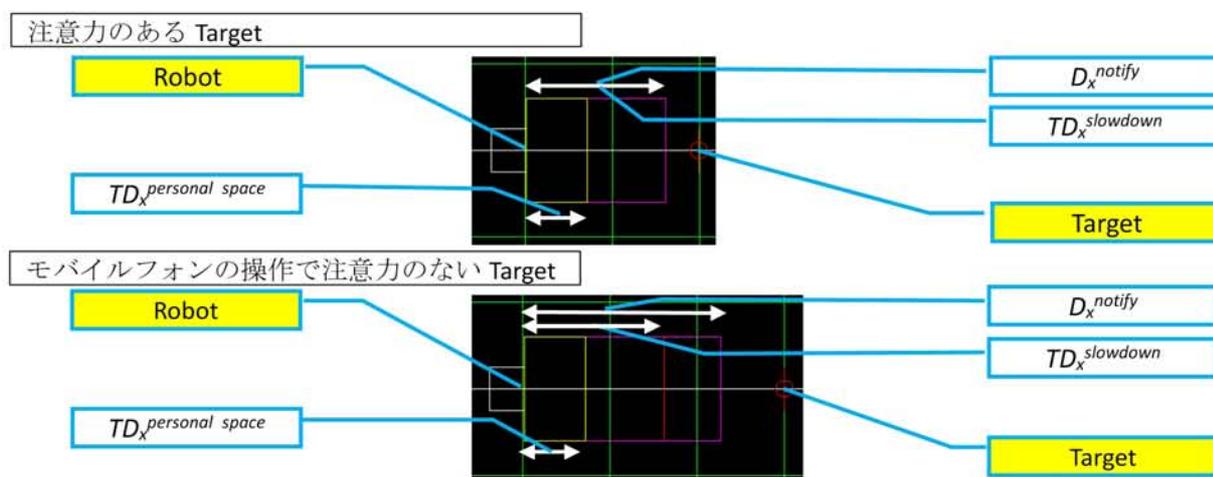


Fig. 48 MBS におけるスクリーンショット.

Fig.48 において、「Robot」は Robot の前面中央の位置を示し、「Target」は Target の前面中央の位置を示し、 D_x^{notify} は警告のために計算した位置を示し、 $TD_x^{slowdown}$ は指定された減速開始位置を示し、 $TD_x^{personal\ space}$ は Target のパーソナルスペースによって指定された停止位置を示す。

4.2.2.6. RTM での製品サンプルの生成

MBD/UM において HCD サイクルに追加した第 1 ステップとして、製品サンプルは、設計ソリューションに基づいて生成される必要がある。そこで、Fig.45 で示した製品サンプルの構成に基づいて、日本のベクトル株式会社が開発したコンシエルジュタイプ・ロボットを Robot の基礎として用い、製品サンプルを RTM 上で作成した。

Robot の基本ハードウェア仕様を以下に示す。

- Robot 本体
 - 外形仕様：幅 455mm / 奥行き 455mm / 高さ 1200mm.
 - 最高速度：500mm/s. (事前実験による)
- Kinect unit
 - 計測距離：0.8m - 3.5m.

計測範囲：水平方向 58° / 垂直方向 45° / 対角方向 70°.

- LRF unit
最大計測距離・角度：5600mm / 240°.

Fig.49 に、RTM 上で構築した製品サンプルの構成を示す。

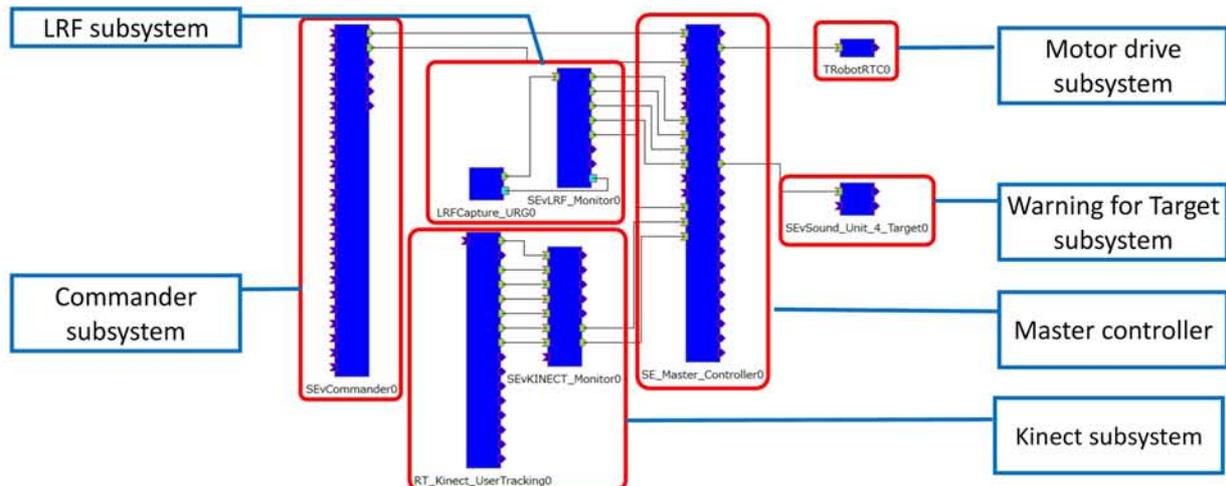


Fig. 49 RTM 上で構築した製品サンプルの構成.

製品サンプルでは MBS 用の設計ソリューションに対し、LRF subsystem と Kinect subsystem により UM of Target with sensor subsystems を置き換え、そして、Motor drive subsystem により Motor drive model subsystem を置き換えた。

- LRF subsystem は、SEvLRF_Monitor0 と国立研究開発法人 産業技術総合研究所からリリースされている LRFCapture_URG0 で構成した。
- Kinect subsystem は、SEvKINECT_Monitor0 と国立研究開発法人 産業技術総合研究所からリリースされている RT_Kinect_UserTracking0 で構成した。
- Motor drive subsystem は、東京都立産業技術研究センターが開発した TRobotRTC0 で構成した。

4.2.2.7. RTM での製品サンプルの検証

MBD/UM において HCD サイクルに追加した第 2 ステップとして、製品サンプルは、ユーザ要求に対する適合性を検証される必要がある。まず、Fig.49 の個々のハードウェアを実装した実サブシステムと対応するモデルによるサブシステムの互換性を、Fig.47 の MBS 用のサブシステムを実サブシステムに置き換えることで確認した。この方法で、LRF subsystem 及び Kinect subsystem と、UM of Target with sensor subsystems の互換性を検証し、そして、Motor drive subsystem と、Motor drive model subsystem の互換性を検証した。

各サブシステムの検証後、次に Fig.49 の構成で RTM 上に構築した製品サンプルを検証した。

Fig.50 に、Kinect unit による、注意力のある Target と、スマートフォンを操作する注意力のない Target のポーズのスクリーンショットを示す。

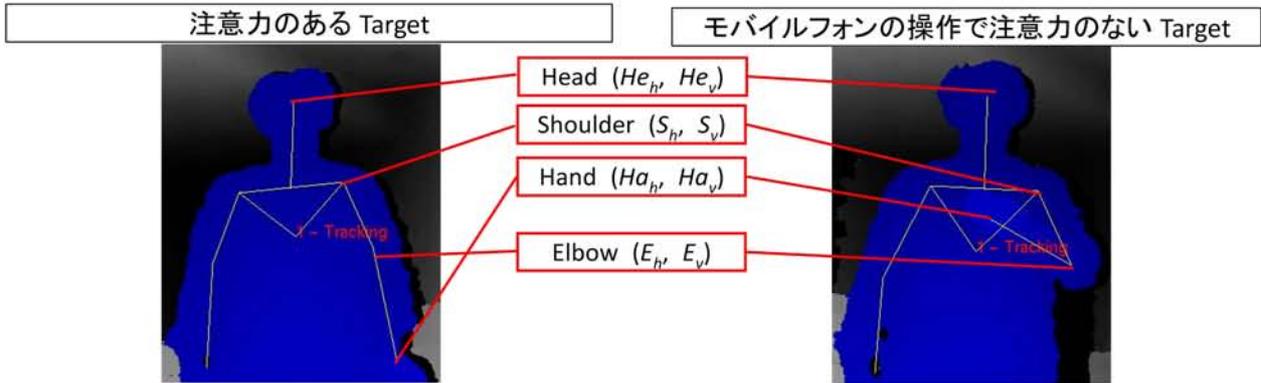


Fig. 50 注意力のある Target とスマートフォンの操作で注意力のない Target のスクリーンショット.

4.2.3. 設計ソリューションの評価結果と製品サンプルの検証結果

本項目では、設計ソリューションの評価結果と、製品サンプルの検証結果を示す。

4.2.3.1. 設計ソリューションの評価結果

Fig.47 で示した構成で MBS により、設計ソリューションのユーザ要求に対する適合性を評価した。本評価において、Robot は一般的な成人よりも小さく、低速なので、被験者を使って調査した値や式を適用できると仮定した。

- $Cv_x^{specified}(t_n)$ [mm/s] : 470
 470mm/s は、評価時と検証時で指定する速度である。
- $Tv_x^{absolute}(t_n)$ [mm/s] : 0
 0mm/s は、Target のユーザモデルが立ち止まっていることを意味する。
- $TD_x^{personal\ space}$ [mm] : 700
 700mm は、Target にとっての適正な停止距離として調査した会話のためのパーソナルスペースの調査結果として、Table 11 に示した距離の Average である。
- $TD_x^{slowdown}$ [mm] : 700 / 1600
 急停止と減速停止の心理的安心の違いを研究した。700mm は、会話のためのパーソナルスペースの境界で急停止させる実験のために採用した $TD_x^{personal\ space}$ の値であり、1600mm は、Target のユーザモデルのための適正な減速開始距離として仮定した Table 12 の Average である。1600mm は 860mm/s の速度の場合の適正な減速開始距離だが、470mm/s の速度での減速開始位置は 860mm/s の速度の場合よりも短いと仮定できたので、470mm/s の速度においても 1600mm を適用した。
- $TAt(t_n)$ [s] : 0.0 / 1.4

注意力のあるTargetと注意力のないTargetの間の心理的安心の違いを研究した。注意力のあるTargetの反射時間として0.0sを採用して、注意力のないTargetの反射時間として、Targetのユーザモデルのために調査したTable 13に示すMaxである1.4sを採用した。

Table 15 に、MBS による評価結果を示す。

この結果から、設計時の想定のように、 $TD_x^{relative}$ at warned が D_x^{notify} と類似し、 $TD_x^{relative}$ at stop が $TD_x^{personal\ space}$ と類似していることを確認した。

Table 15 MBS による評価結果.

TAt [s]	$TD_x^{personal\ space}$ [mm]	$TD_x^{slowdown}$ [mm]	D_x^{notify} [mm]	$TD_x^{relative}$ at warned [mm]	$TD_x^{relative}$ at stop [mm]
0.0	700	700	700	675	675
1.4	700	700	1358	1276	697
0.0	700	1600	1600	1599	700
1.4	700	1600	2258	2203	700

Table 16 に、MBS における物理的安全と心理的安心に関する評価結果を示す。

この結果により、Robot が減速接近する場合、 $PHS_{at\ stop}$ は常に非常に良く、 $PSS_{at\ warned}$ も非常に良いことを確認した。

Table 16 MBS における物理的安全と心理的安心に関する評価結果.

TAt [s]	$TD_x^{personal\ space}$ [mm]	$TD_x^{slowdown}$ [mm]	$PHS_{at\ stop}$	$PSS_{at\ warned}$
0.0	700	700	0.96	0.42
1.4	700	700	1.00	0.57
0.0	700	1600	1.00	1.00
1.4	700	1600	1.00	0.98

4.2.3.2. 製品サンプルの検証結果

Fig.49 で示した構成で、製品サンプルのアプローチ機能を4名の被験者で検証した。検証結果を評価結果と比較するために、評価時に適用した同じ値と式を次のように適用した。

- $Cv_x^{specified}(t_n)$ [mm/s] : 470
- $Tv_x^{absolute}(t_n)$ [mm/s] : 0 (被験者は立っている)
- $TD_x^{personal\ space}$ [mm] : 700
- $TD_x^{slowdown}$ [mm] : 700 / 1600
- $TAt(t_n)$ [s] : 0.0 / 1.4

Table 17 に、製品サンプルによる実験結果を示す。

この結果から、製品サンプルの作成時の想定のように $TD_x^{relative}$ at warned が D_x^{notify} と類似し、 $TD_x^{relative}$ at stop が $TD_x^{personal\ space}$ と類似していることを確認した。

Table 17 製品サンプルによる実験結果.

TAt [s]	$TD_x^{personal\ space}$ [mm]	$TD_x^{slowdown}$ [mm]	D_x^{notify} [mm]	$TD_x^{relative}$ at warned [mm]	$TD_x^{relative}$ at stop [mm]
0.0	700	700	700	657	657
1.4	700	700	1358	1332	689
0.0	700	1600	1600	1590	628
1.4	700	1600	2258	2237	700

Table 18 に、製品サンプルによる実験における物理的安全と心理的安心に関する検証結果を示す。この結果により、Robot が減速接近する場合、 $PHS_{at\ stop}$ は常に非常に良く、 $PSS_{at\ warned}$ も非常に良いことを確認した。

Table 18 製品サンプルによる実験における物理的安全と心理的安心に関する検証結果.

TAt [s]	$TD_x^{personal\ space}$ [mm]	$TD_x^{slowdown}$ [mm]	$PHS_{at\ stop}$	$PSS_{at\ warned}$
0.0	700	700	0.94	0.41
1.4	700	700	0.98	0.59
0.0	700	1600	0.90	0.99
1.4	700	1600	1.00	0.99

製品サンプル上のアプローチ機能は、被験者により、安全に検証された。そして、検証結果は MBS による評価結果と非常に類似していた。

検証時の心理的条件の調査方法として、脈拍と脳波に着目し、心理的安心や停止までの時間感覚の指標としての有効性を事前調査したが、本検証において期待できる脈拍や脳波の変化が確認できなかった。そこで、アンケートにより、検証時の心理的安心 (Psychological security) と Robot の停止までの時間に関する感覚 (Sense of time till stop) に関して調査した。

アンケート結果から、Robot の減速停止アプローチは、注意力のある Target と注意力のない Target の双方にとって、心理的安心が非常に良く、そして、待ち時間が適切であることを確認した。そして、減速停止アプローチと類似した Target への停止距離であっても、Robot が急停止した場合には心理的安心は非常に悪いことを確認した。

そして、心理的安心に関するアンケートの結果の傾向が実験における $PSS_{at\ warned}$ の結果の傾向に類

似しているため、 $PSS_{at\ warned}$ が心理的安心の評価基準になりうる可能性があることを確認した。

Table 19 に、検証時の心理的安心と Robot の停止までの時間に関する感覚のアンケート結果を示す。

Table 19 検証時の心理的安心と Robot の停止までの時間に関する感覚のアンケート結果.

TAt [s]	$TD_x^{slowdown}$ [mm]	Psychological security (1 worst - 5 best)			Sense of time till stop (1 long - 3 proper - 5 short)		
		Average	Max	Min	Average	Max	Min
0.0	700	1.5	2	1	3.75	5	3
1.4	700	2.25	4	1	4	5	3
0.0	1600	4.75	5	4	2.5	3	2
1.4	1600	4.75	5	4	2.5	3	2

4.2.4. 考察

具体的 HCD プロセスとして MBD/UM を適用して、ユーザビリティとしての物理的安全と、UX としての心理的安心を備えたアプローチ機能を開発した。

最初に、注意力を有する Target の中心的利用者だけではなく、多様な利用者が存在することも想定し、スマートフォンを操作する注意力のない利用者に関しても、ペルソナを作成し、利用状況を理解し、明確にした。これにより、カスタマプロファイリング手法であるペルソナが、利用者プロファイリング手法としても利用可能であり、利用者プロファイルと Robot の利用状況を記述するために有効であることを確認した。

次に、MBSE が、ユーザ要求とモデルを、要求ダイアグラムやステートマシンダイアグラムなどのダイアグラムによって記述できることを明確にした。これにより、MBSE がユーザ要求の定義に有効であることを確認した。

更に、RTM 上で MBS を実施するために、RTM 上で MBS のためのサブシステムとして Robot のデバイスモデルと Target のユーザモデルを作成し、ハードウェアを必要とせずに設計ソリューションを生成した。これにより、MBD が設計ソリューションの生成に有効であることを確認した。

そして、Robot のデバイスモデルと Target のユーザモデルを協働させ、RTM 上の MBS によりユーザ要求に対する設計ソリューションを設計時評価し、設計ソリューションがユーザ要求に適合していることを確認した。

設計ソリューションがユーザ要求に適合したことを確認した後、Fig.47 の MBS 用の個々のサブシステムを、対応するハードウェアを実装した Fig.49 の実サブシステムに置き換えることによって、Fig.47 の RTM 上の MBS のための構成において、個々の実サブシステムを検証した。

すべての実サブシステムを個々に検証した後に、RTM 上ですべてのモデルによるサブシステムを、対応する実システムで置き換えることで、ハードウェアを実装したすべての実サブシステムにより

RTM 上で製品サンプルを構成し、次に、RTM 上で製品サンプルを検証した。

そして、実験とアンケート結果を解析し、ユーザビリティとしての物理的安全に関して、以下の結果を得た。

- パーソナルスペースの境界付近で Robot を停止する能力により、Robot が Target と衝突する危険性を低減でき、物理的安全が保障された。

そして、次に、UX としての心理的安全に関して、以下の結果を得た。

- 停止前に適切な距離で減速を開始する能力により、注意力のある利用者と注意力のない利用者の双方が、停止までの時間が適切であり、かつ、心理的安全が非常に良かったと感じた。他方、急停止に対して、注意力のある利用者と注意力のない利用者の双方が、停止までの時間が短すぎ、かつ、心理的安全が非常に悪かったと感じた。
- Target の注意力に基づく反射時間で調整した適切な距離で Target に警告する能力により、注意力のない Target は注意力を回復し、Robot の接近に気づくことができた。そのため、減速停止アプローチでは、注意力のない Target と注意力のある Target の両方が同じ心理的安全を感じた。そして、急停止においても、Target の心理的安全が少し改善された。

上述の結果から、具体的 HCD プロセスとしての MBD/UM により、パーソナルスペースの境界で停止する能力、適切な距離で減速を開始する能力、そして、注意力に基づいて適切な距離で Target に警告する能力を実装することで、製品サンプル上に注意力のある人と注意力のない人の両方に対する物理的安全と心理的安全を実現したアプローチ機能を開発できたことを確認した。

4.2.5. 結論

本検証では、コンシェルジュタイプ・ロボットにおいて、ユーザビリティとしての物理的安全と UX としての心理的安全を実現し、ユーザ要求に適合するアプローチ機能を実現するために、具体的 HCD プロセスとして MBD/UM を適用した。

アプローチ機能の評価段階では、利用者視点でユーザ要求を定義し、設計ソリューションがユーザ要求に適合するまでモデルによる評価を実施することで、製品サンプルのハードウェアの制作のために必要な期間とコストを削減した。更に、モデルによって評価済みの設計ソリューションに基づいて、製品サンプルを制作できることを確認した。

そして、注意力のある Target と注意力のない Target のユーザモデルを使い、様々な条件下や繰り返し同一条件下で、MBS によって設計ソリューションが評価できることを確認した。また、ユーザモデルによって評価することにより、MBD/UM が設計時評価における被験者の負傷のリスクを排除できることも確認した。次に、MBS 上で個別に実サブシステムを適用して、個々の実サブシステムの機能を検証した後に、実製品サンプルと被験者による検証を実施することで、MBD/UM が被験者の負傷のリスクを低減することを確認した。

これらの検証結果から、MBD/UM が利用者視点での高い利用時品質を実現し、境界の利用者を含む多様な利用者に適応し、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を実現し、被験者の負傷のリスクを排除した設計時評価を可能にすることを証明し、更に、MBD/UM が具体的 HCD プロセスとしても有効であり、HCD プロセスとして以下の優位性を有することを証明した。

- システム設計時評価のための製品サンプルのハードウェア制作に必要な期間とコストの低減
- システム設計時における様々な条件下や繰り返し同一条件下におけるシミュレーションによる評価
- システム設計時評価における被験者が負傷するリスクの排除と検証時のリスクの低減

第5章

利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の適用例

本章では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を、車椅子ロボットの開発、テレプレゼンス車椅子ロボットの開発、テレプレゼンスロボットの開発に適用して、その有効性を確認した。更に、テレプレゼンスロボットの開発においては、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を具体的人間中心設計プロセスとして適用し、その有効性を確認した。

5.1. 車椅子ロボットの開発への適用

高齢者や身体障害者の自立生活を支えるために、ロボットを用いたヘルスケアに関する様々な研究が実施されてきた[48] [49]。特に歩行は、人間の体を維持するために重要な運動であり、歩行能力回復支援のためのリハビリテーション支援機能に関する研究[50]も実施されてきた。本適用では、歩行能力回復支援のためのリハビリテーション支援機能を実装した車椅子ロボット[51]を日常的に電動車椅子として利用するために、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法（以下、MBD/UM）を適用して物理的安全を考慮した走行機能を開発し、本開発手法の有効性を確認する。

5.1.1. 車椅子ロボットにおける利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング

利用者視点で車椅子ロボットに対するユーザ要求を検討するために、最初にペルソナによって車椅子ロボットの利用者の利用者プロファイルを作成した。車椅子ロボットを日常的に電動車椅子として操作する際には、高齢や障害によって利用者に操縦能力の制約があることを前提に、利用者が引き起こす衝突の危険を考慮する必要がある。そこで、利用者による車椅子ロボットの移動において、物理的安全を実現するために必要な、自動緊急停止機能を研究した。

Fig.51 に、自動緊急停止機能のイメージを示す。

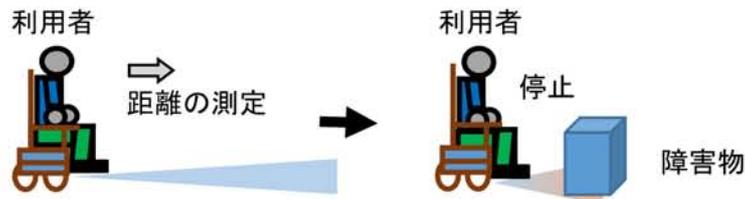


Fig. 51 自動緊急停止機能のイメージ.

5.1.2. 車椅子ロボットの実システム

車椅子ロボットのシステムは、車椅子ロボットコントローラ (Wheelchair robot controller) と、以下の7つのサブシステムで構成されている。

- Interaction subsystem
音や画像などによる利用者との意思疎通と、警告の役割を担う情報交換サブシステム。
- LRF front sensor subsystem
利用者の身長を計測する役割を担う Laser Range Finder (以下、LRF) 身長計測サブシステム。
- Grip touch sensor subsystem
利用者のハンドルの握り状態を検知する役割を担うハンドル保持状態確認サブシステム。
- Lift subsystem
車椅子ロボットの椅子を持ち上げることでハンドルの高さを調節する役割を担うシート昇降サブシステム。
- LRF foot sensor subsystem
利用者の足や障害物と車椅子ロボットとの間の距離を計測する役割を担う LRF 足検知サブシステム。
- Drive subsystem
車椅子ロボットを移動する役割を担う駆動サブシステム。
- Console subsystem
利用者によるゲームパッドの操作を認識する役割を担う操作サブシステム。

Fig.52 に、車椅子ロボットのシステム構成を示す。

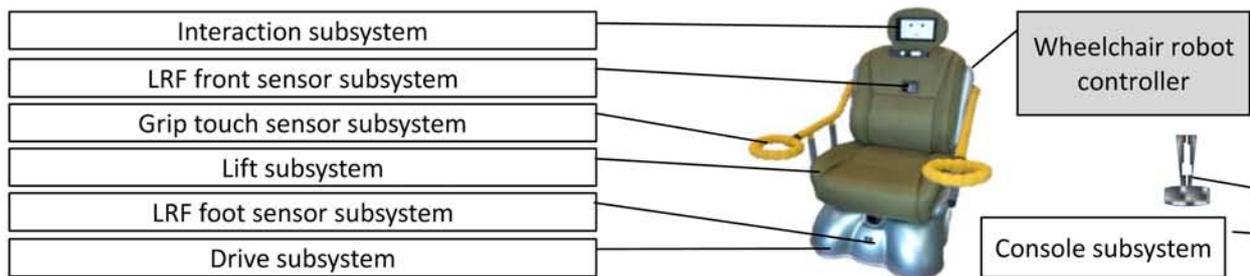


Fig. 52 車椅子ロボットのシステム構成.

Fig.53 に、利用者 (User)、障害物 (Obstacle)、サブシステム、そして、これらのサブシステムを制御する電動車椅子コントローラ (Wheelchair robot controller) の関係を示す。

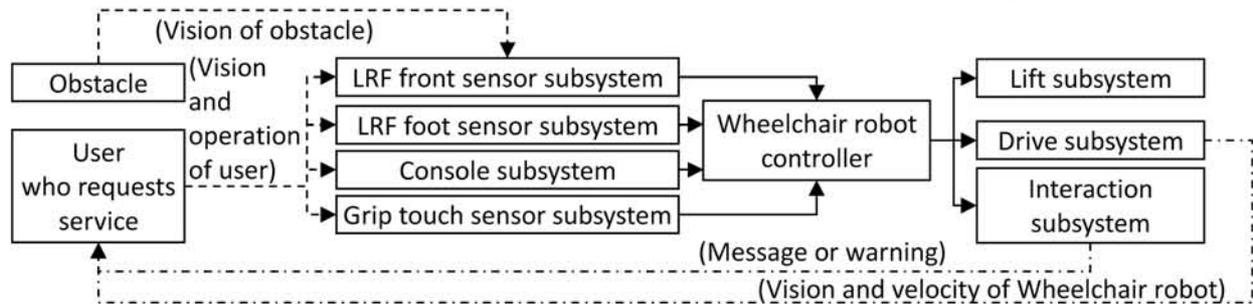


Fig. 53 利用者、障害物、サブシステム、電動車椅子コントローラの関係.

5.1.3. 車椅子ロボットのモデルベース開発用システム

本適用では、車椅子ロボットを電動車椅子として利用するために、物理的安全な走行機能を開発することを目的とした。そこで、この走行機能を開発するための MBD/UM によるモデルベース・シミュレーション (以下、MBS) 用のシステムを、車椅子ロボットコントローラ (Wheelchair robot controller)、警告の役割を担う情報交換サブシステム (Interaction subsystem) と、障害物モデル (Obstacle model)、ドライバのユーザモデル (User model)、駆動モデルサブシステム (Drive model subsystem) で構成した。ドライバのユーザモデルは、ドライバと操作サブシステム (Console subsystem) の役割を果たす。また、障害物モデルは、障害物と LRF 足検知サブシステム (LRF foot sensor subsystem) の役割を果たす。

Fig.54 に、MBS のためのシステム構成を示す。

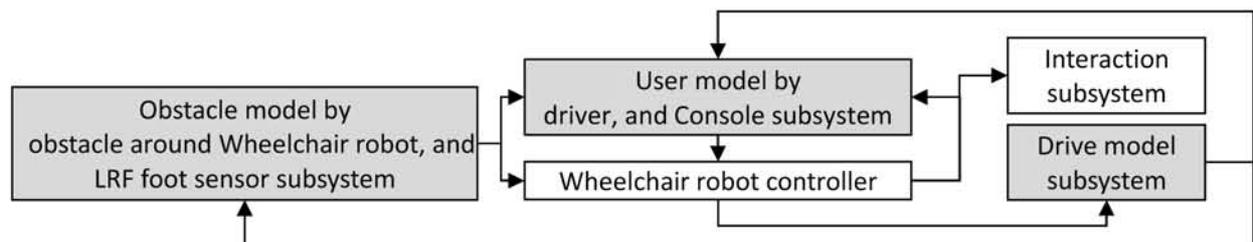


Fig. 54 MBS のためのシステム構成.

5.1.3.1. シミュレーションのための変数と式

利用者ごとに車椅子ロボットの操作能力は異なる。また、利用者の年齢や利用者の障害などの利用状況に伴って、反射神経などの操作者としての操作能力は変化する。本適用では、利用者の利用状況と利用目的を基に、衝突回避に必要な安全運転支援機能を調査し、自動緊急停止機能を採用した。本適用では、自動緊急停止機能を含む安全運転支援プロセスを、次の値と数式に基づいて制御することにした。変数や式のサブスクリプト x は、車椅子ロボットの正面前方方向を示す。

- $DD_x^{personal\ space}$ [mm] : 指定されたドライバのパーソナルスペースの x 方向の距離。
- $OD_x^{relative}(t_n)$ [mm] : 車椅子ロボットから障害物への x 方向の相対位置。実システムでは、LRF 足検知サブシステム (LRF foot sensor subsystem) により取得され、また、障害物モデルにおいては、次の式で計算される。

$$OD_x^{relative}(t_n) = OD_x^{relative}(t_{n-1}) - v_x^{relative\ obstacle}(t_{n-1}) * (t_n - t_{n-1}) \quad (1)$$

- $v_x^{absolute\ obstacle}(t_n)$ [mm/s] : 障害物モデルで指定する障害物の絶対速度の指定値。本適用では、0。
- $v_x^{specified\ by\ driver}(t_n)$ [mm/s] : 利用者のユーザモデルまたは実際の利用者が指定する車椅子の x 方向の絶対速度の値。
- $v_x^{absolute\ wheelchair}(t_n)$ [mm/s] : 車椅子ロボットの x 方向の絶対速度。

If $OD_x^{relative}(t_n) > DD_x^{personal\ space}$ then

$$v_x^{absolute\ wheelchair}(t_n) = v_x^{specified\ by\ driver}(t_n) \quad (2)$$

Else ($OD_x^{relative}(t_n) \leq DD_x^{personal\ space}$)

$$v_x^{absolute\ wheelchair}(t_n) = 0 \quad (3)$$

- $v_x^{relative\ obstacle}(t_n)$ [mm/s] : 障害物の x 方向の相対速度。

$v_x^{relative\ obstacle}$ が障害物モデルで指定される値の場合、

$$v_x^{relative\ obstacle}(t_n) = v_x^{absolute\ wheelchair}(t_n) - v_x^{absolute\ obstacle}(t_n) \quad (4)$$

$v_x^{relative\ obstacle}$ がセンサーユニットで収集される場合、

$$v_x^{relative\ obstacle}(t_n) = \frac{OD_x^{relative}(t_{n-1}) - OD_x^{relative}(t_n)}{t_n - t_{n-1}} \quad (5)$$

Fig.55に、自動緊急停止機能を含む安全運転支援プロセスを示す。

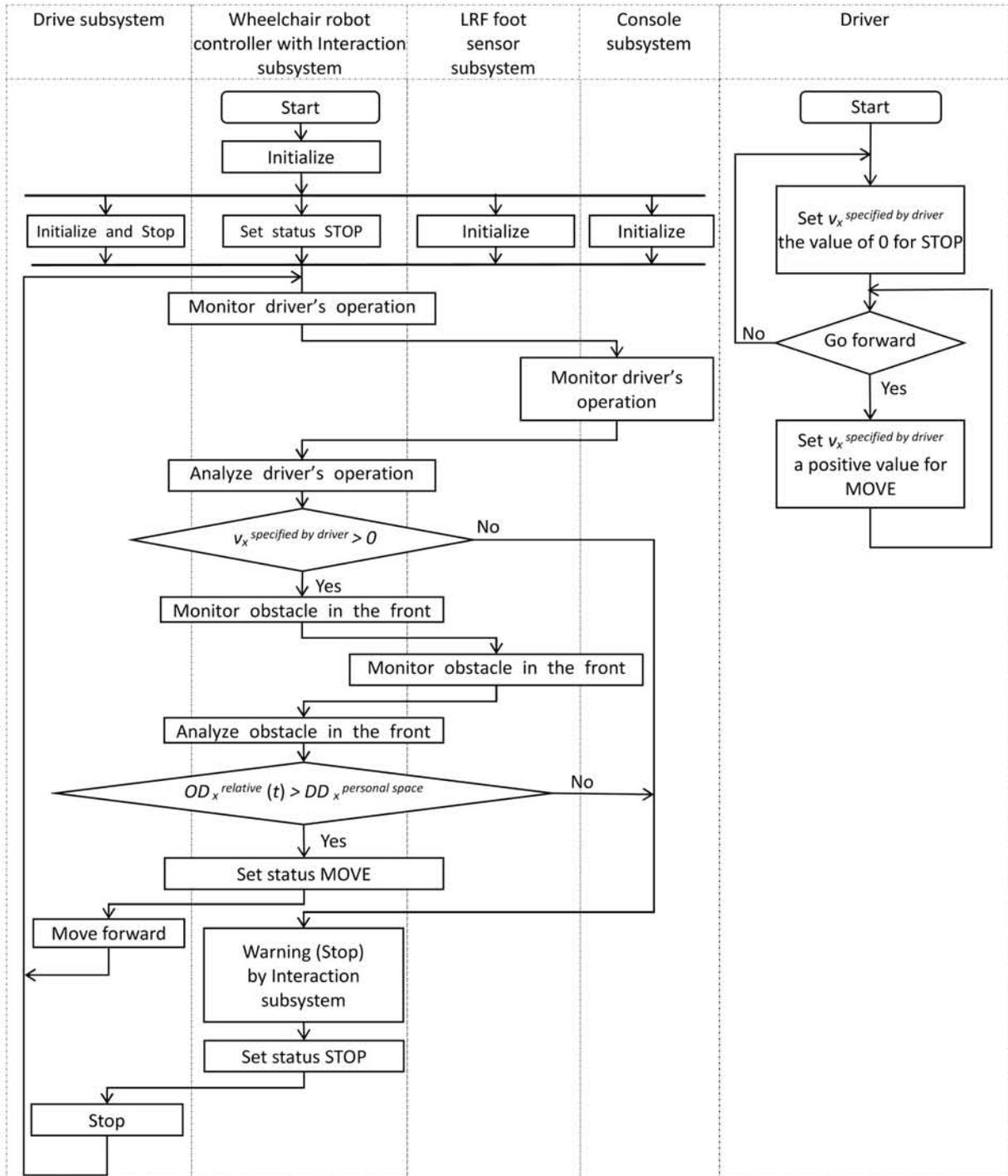


Fig. 55 自動緊急停止機能を含む安全運転支援プロセス.

5.1.3.2. シミュレーションによる評価結果

自動緊急停止機能の評価のために、Fig.54 の構成を基に、MBD/UM における MBS 用のシステムを作成した。

Fig.56 に、RTM 上での MBS 用のシステム構成を示す。

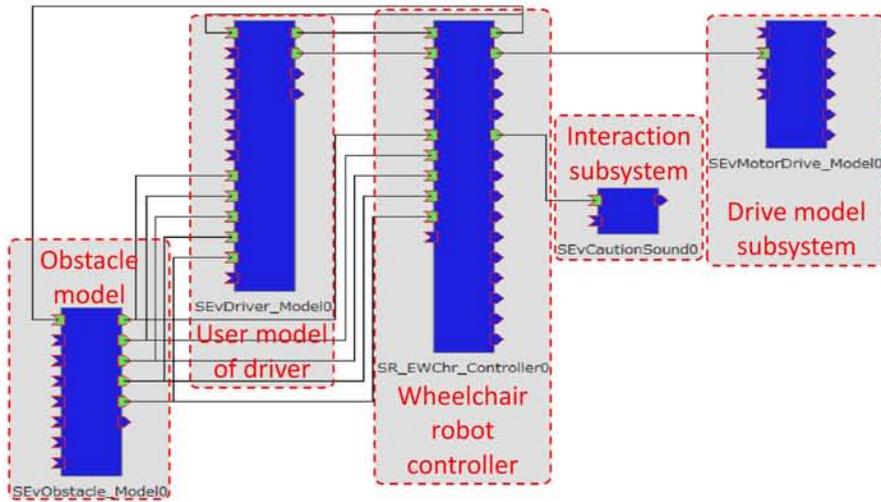


Fig. 56 RTM 上での MBS 用のシステム構成.

Fig.57 に、MBS におけるスクリーンショットを示す。左図は自動緊急停止前のスクリーンショットであり、右図が自動緊急停止時のスクリーンショットである。

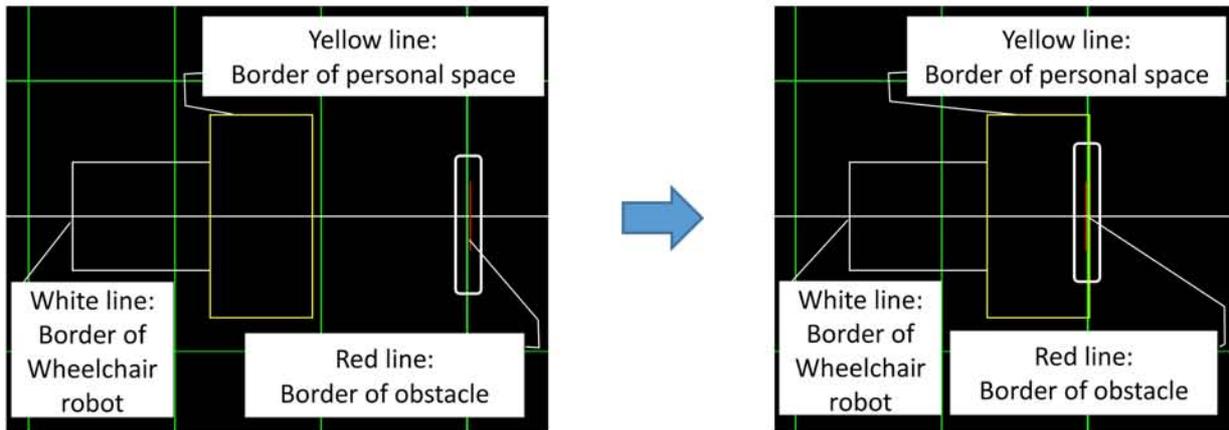


Fig. 57 MBS におけるスクリーンショット.

Table 20に、MBSの結果を示す。

Table 20 MBS の結果.

v_x specified by driver [mm/s]	DD_x personal space [mm]	OD_x relative at stop [mm]	v_x absolute wheelchair [mm/s]
500	700	697	0

5.1.4. 車椅子ロボットの実システム

本項目では、車椅子ロボットの実システムの構成と実システムによる検証結果を示す。

5.1.4.1. 車椅子ロボットの実システムの構成

シミュレーションで機能を評価した後に、Fig.54 の構成に基づいてモデルのコンポーネントを実デバイスのコンポーネントで置き換え、車椅子ロボットの実システムの自動緊急停止機能を実現した。

Fig.58 に、RTM 上で実現した実システムの構成を示す。

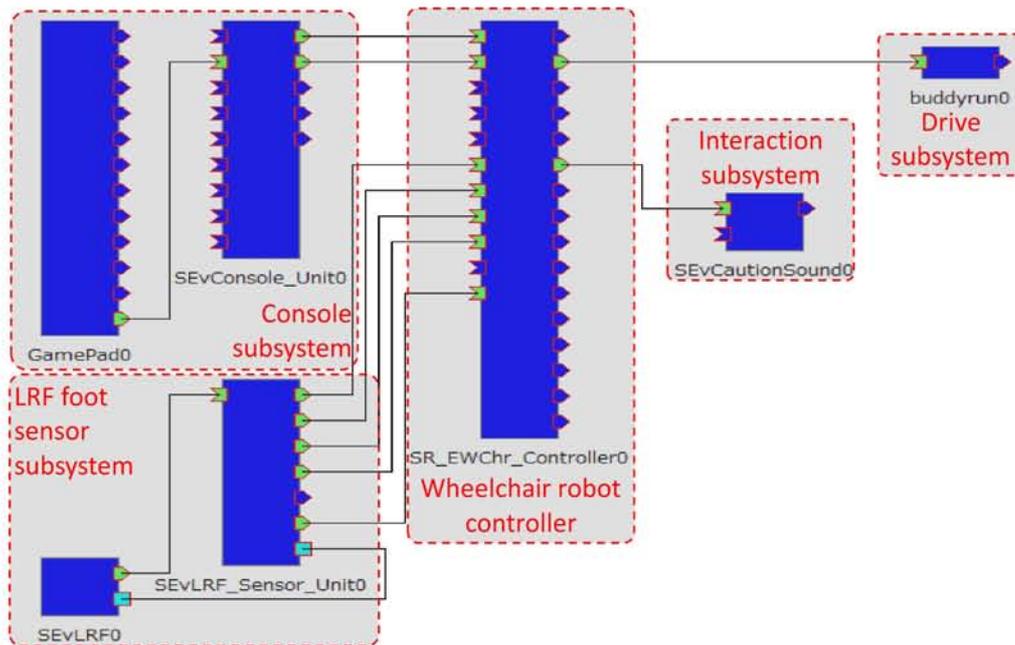


Fig. 58 RTM 上で実現した実システムの構成.

5.1.4.2. 実システムによる検証結果

Table 21 に、実システムによる検証結果を示す。

Table 21 実システムによる検証結果.

v_x specified by driver [mm/s]	DD_x personal space [mm]	OD_x relative at stop [mm]	v_x absolute wheelchair [mm/s]
500	700	696	0

5.1.5. 考察と結論

本適用では、自動緊急停止機能の開発において MBD/UM を適用し、MBS で評価することで、実システム上で、物理的安全にこれらの機能を実現できることを確認した。そして、MBS による評価結果が、被験者と実システムによる検証結果と類似していることを確認した。これらの結果から、物理的安全を考慮した機能開発における利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を確認した。

5.2. テレプレゼンス車椅子ロボットの開発への適用

本適用では、歩行能力回復支援のために、リハビリテーション支援機能を実装した車椅子ロボット [51] に対して、遠隔地（リモート側）の利用者（以下、Operator）が制御するテレプレゼンス機能を追加する。そして、テレプレゼンス機能の物理的安全だけではなく、心理的安全を実現するために、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法（以下、MBD/UM）を適用して安全運転支援機能を追加し、MBD/UM の有効性を確認する。

5.2.1. テレプレゼンス車椅子ロボットの利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング

本適用では、テレプレゼンス車椅子ロボット（以下、Robot）に関係する現地（ローカル側）の利用者（以下、Target）と Operator の利用者プロフィールを検討した。

Operator が操作する Robot に乗車する Target の利用者プロフィールを以下のように定義した。

- 移動するとき車椅子が必要。
- リモート側の家族から離れて居住。
- リモート側に住んでいる家族との会話が楽しみ。
- 反射時間が長い。
- 注意力が低い。
- 無線ネットワークとインターネットが利用可能。

また、Robot を遠隔操作する Operator の利用者プロフィールを以下のように定義した。

- ローカル側の家族から離れて居住。
- ローカル側に住んでいる家族が心配。
- ローカル側の家族の世話は困難。
- 反射時間が短い。
- 注意力が高い。
- 無線ネットワークとインターネットが利用可能。

Target の利用者プロフィールと Operator の利用者プロフィールから、Robot に必要な新たな能力を以下のように定義した。

- ビデオコール能力：Target と Operator との間の、ビデオチャットや音声チャットのための能力。
- 安全運転能力：Operator のための安全運転の能力。

車椅子ロボットのテレプレゼンスに必要なビデオコール能力と安全運転能力を実現するための新機能を調査し、テレコンファレンス機能、Operator によるアプローチ機能、Operator による運転機能が必要であることが判明した。

Fig.59 に、車椅子ロボットのテレプレゼンスに必要な新機能を示す。

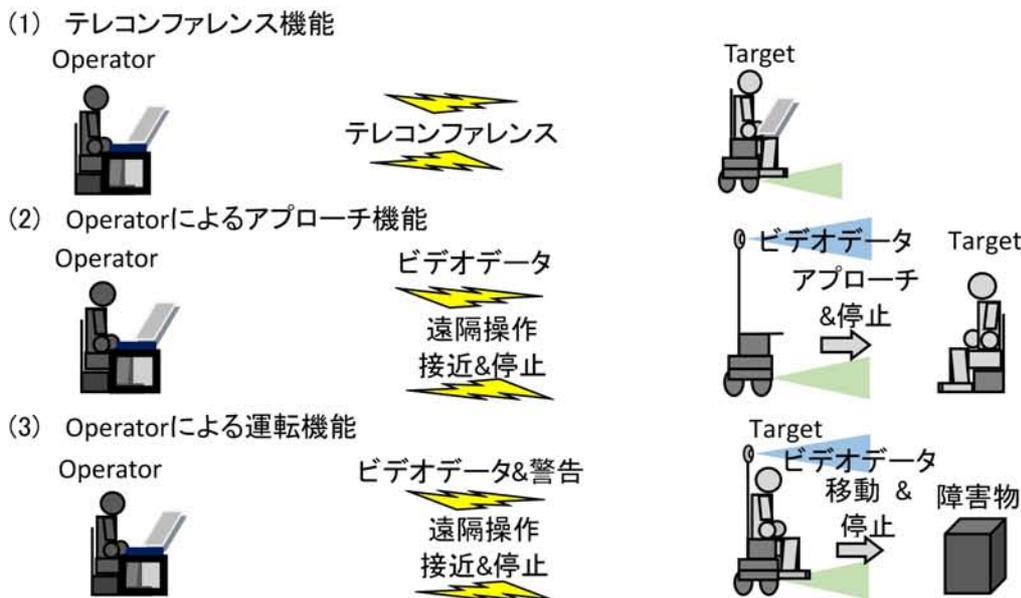


Fig. 59 車椅子ロボットのテレプレゼンスに必要な新機能.

そして、利用者プロフィールに基づいて、Robot に対するテレプレゼンスの環境を検討することで、以下の制約条件が判明した。

- ベストエフォートネットワーク：タイムラグを生じさせる制約条件。データ転送速度が遅く、ネットワークに切断の危険性がある。
- 制限された周囲監視能力：タイムラグを生じさせる制約条件。遠隔監視のためのビデオ処理に時間がかかる。そのため、リモート側からローカル側を監視する能力は、ローカル側で監視する能力に比べて制限される。

これらの制約条件から、テレプレゼンスによる Operator の運転では、タイムラグ、ネットワークの切断、および、制限された監視能力により、衝突のリスクが高くなるために、安全運転支援機能が必要になる。そこで、Operator によるアプローチ機能や運転機能に対して、安全運転支援機能を実装した。

5.2.2. 遠隔地の利用者のための安全運転支援機能

Operator のための安全運転支援機能に焦点を当て、遠隔操作によるアプローチと運転の双方のための自動停止共通基本機能を研究した。

- 制限された情報交換能力：データ転送速度が遅く、タイムラグがあり、接続断の危険性があるネットワークを介し、Operator は Robot を操作する。
- 制限された遠隔監視能力：タイムラグがあり、カメラを介して制限された視野で、Operator は Robot の活動域であるローカル側の環境を監視する。

このような遠隔操作の環境下では、Robot に対する Operator の操作能力が制限される。そのため、遠隔操作の環境下における Target の物理的安全と心理的安心や Operator の心理的安心に関する条件は、現地操作の環境下よりも悪い。

- Target の心理的状态：Robot を走行させる際、乗車している Target が障害物の侵入に衝突の不安を感じる領域に障害物が侵入した場合や、Robot が Target にアプローチする際に Robot が Target のパーソナルスペースに侵入した場合に、Target は衝突の危険を感じる。
- Operator の身体的・心理的状态：情報交換の能力や、遠隔監視・遠隔操作の能力が制限されているので、Operator が Robot を操作する総合的操作能力は低い。そのため、Operator は、Robot の操作時に Robot を衝突させる危険を感じる。

本適用では、Target のパーソナルスペースの境界を、Operator が Robot を停止させるべき境界として定義した。そして、人間を含む障害物がある領域に侵入した場合に、乗車している Target が衝突の危険を感じる領域として、Target の排他的パーソナルゾーン (Exclusive personal zone) を定義し、Robot が自動停止すべき境界とした。また、Operator に対して安全運転を支援するために、人間を含む障害物が Target の排他的パーソナルゾーンに侵入する危険性を Operator に警告したり、Robot が Target のパーソナルスペースに侵入する危険性を Operator に警告したりするための領域として、拡張排他的パーソナルゾーン (Extended exclusive personal zone) を定義した。

5.2.3. テレプレゼンス車椅子ロボットのシステム構成

本適用では、車椅子ロボットにテレプレゼンス能力を実装するために、Fig.52 に示す車椅子ロボットのシステム構成を基本構成として採用し、テレプレゼンスの能力を実現するために次のサブシステムを追加した。

- Remote warning subsystem (遠隔警告サブシステム)：Operator に警告を発するために、スピーカーを使ったコンポーネントとして実装するサブシステム。
- Remote console subsystem (遠隔操作サブシステム)：Robot の操作のために、リモート側のゲームコントローラを使ったコンポーネントとして実装するサブシステム。

- Remote monitoring subsystem (遠隔監視サブシステム)：リモート側からローカル側を監視するために、ビデオカメラを使ったコンポーネントとして実装するサブシステム。
- Video call subsystem (ビデオコールサブシステム)：ビデオチャットのために、スピーカーとマイク、カメラを搭載した2台のコンピュータを使ったコンポーネントとして実装するサブシステム。

Fig.60 に、車椅子ロボットに対して追加した、テレプレゼンスの能力に必要な新たなサブシステムを示す。

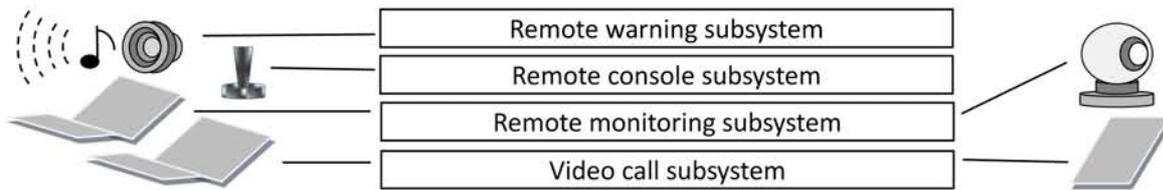


Fig. 60 テレプレゼンスの能力を追加するために必要な新たなサブシステム。

Fig.61 に、ビデオコール能力と安全運転能力を持つ Robot を実現するためのシステム構成を示す。本適用では、Operator によるアプローチ機能と Robot の運転機能のための安全運転能力として、自動停止共通基本機能に焦点を当てた。

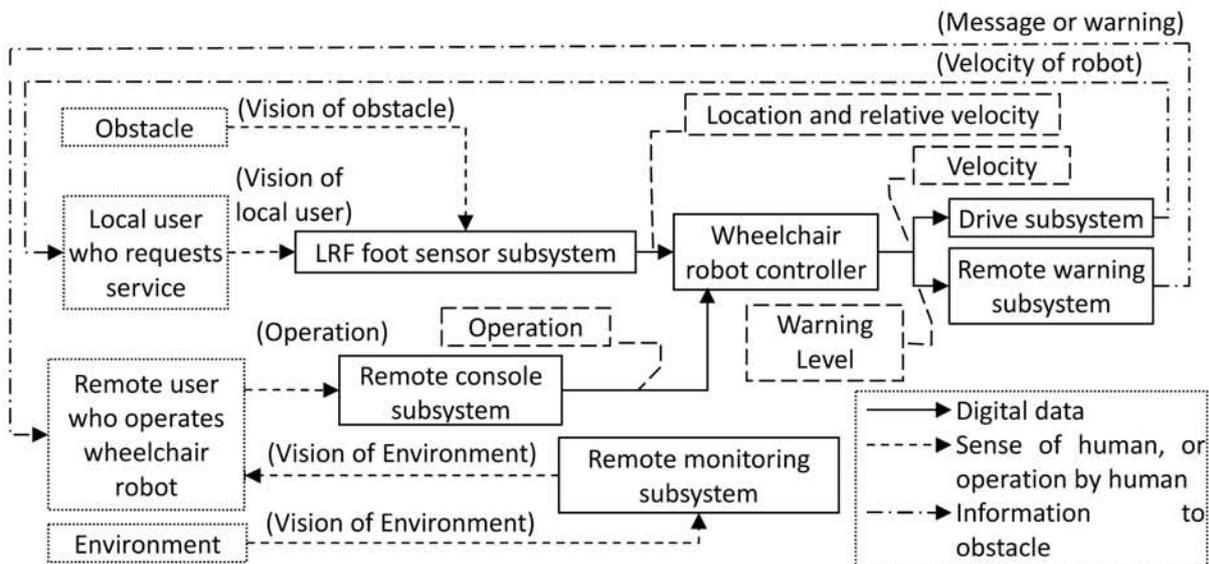


Fig. 61 ビデオコール能力と安全運転能力を持つ Robot を実現するためのシステム構成。

5.2.4. 自動停止共通基本機能のための処理手順

Operator が Robot を Target にアプローチさせる際の処理手順を以下のように想定した。

- (1) Operator は、Remote monitoring subsystem により、Robot の周囲を監視する。
- (2) Operator は、Remote console subsystem により、Robot を操作し、Target にアプローチする。
- (3) Robot が Target の拡張排他的パーソナルゾーンに侵入した場合、Robot は Remote warning

subsystemによりOperatorに警告を発する。

- (4) Operatorは、Targetのパーソナルスペースの境界付近で、Robotを停止させる。
- (5) RobotがTargetのパーソナルスペースに侵入してしまった場合、Robotは自動停止共通基本機能により停止し、Remote warning subsystemによりOperatorに警告を発する。

また、OperatorがRobotを操作する際の処理手順を以下のように想定した。

- (1) Operatorは、Remote monitoring subsystemにより、Robotの周囲を監視する。
- (2) Robotに乗車しているTargetの拡張排他的パーソナルゾーンに、障害物が存在しない場合、Operatorは、Remote console subsystemにより、目的地に向かってRobotを移動する。
- (3) Robotに乗車しているTargetの拡張排他的パーソナルゾーンに、障害物が侵入した場合、RobotはRemote warning subsystemによりOperatorに警告を発する。
- (4) Operatorは、目的地でRobotを停止させる。
- (5) Robotに乗車しているTargetの排他的パーソナルゾーンに、障害物が検知された場合、Robotは自動停止共通基本機能によって停止し、そして、Remote warning subsystemによりOperatorに警告を発する。

5.2.5. シミュレーションと実験のための変数と式

自動停止共通基本機能のシミュレーションと実験の評価基準として、次の変数と式を採用した。

- $t_{ability\ of\ reflection}$ [s] : 反射能力（時間）。実際のOperatorの反射能力だけではなく、タイムラグによる遅延も含む。タイムラグは、Operatorからのデータ転送およびデータ処理のための制御に必要な時間である。本適用では、2.0s、または、3.0sと仮定した。
- $DD_x^{exclusive\ personal\ zone}$ [mm] : 排他的パーソナルゾーンのx方向（進行方向）の距離。人間を含む障害物が存在する場合、Targetが衝突の危険を感じるエリアである。また、パーソナルスペースはRobotがTargetに接近したときの $DD_x^{exclusive\ personal\ zone}$ として取り扱う。本適用では、500mm、700mm、900mmと仮定した。
- $OD_x^{relative}(t_n)$ [mm] : 障害物とロボットの間のx方向の相対距離。実験においては、センサーユニットにより収集し、シミュレーションでは次の式で計算する。

$$OD_x^{relative}(t_n) = OD_x^{relative}(t_{n-1}) - v_x^{relative}(t_{n-1}) * (t_n - t_{n-1}) \quad (1)$$

- $v_x^{obstacle}(t_n)$ [mm/s] : 障害物の絶対速度。本適用では、0 mm/sと仮定した。
- $v_x^{operation}(t_n)$ [mm/s] : ユーザモデルまたはリモート側の利用者であるOperatorがRobotを操作する際に指定する絶対速度。本適用では、500mm/sと仮定した。
- $v_x^{wheelchair}(t_n)$ [mm/s] : Robotのx方向の絶対速度。

If $OD_x^{relative}(t_n) > DD_x^{exclusive\ personal\ zone}$ then

$$v_x^{wheelchair}(t_n) = v_x^{operation}(t_n) \quad (2)$$

Else ($OD_x^{relative}(t_n) \leq DD_x^{exclusive\ personal\ zone}$)

$$v_x^{wheelchair}(t_n) = 0 \quad (3)$$

- $v_x^{relative}(t_n)$ [mm/s]: 障害物とロボットの間の x 方向の相対速度。

$$v_x^{relative}(t_n) = v_x^{wheelchair}(t_n) - v_x^{obstacle}(t_n) \quad (4)$$

- $DD_x^{extended\ exclusive\ personal\ zone}(t_n)$ [mm]: 拡張排他的パーソナルゾーンの x 方向の距離。障害物が拡張排他的パーソナルゾーンに存在する場合、Robot が障害物の排他的パーソナルゾーンに侵入する危険性があり、また、Robot が利用者のパーソナルスペースに侵入する危険性もある。

$$OD_x^{extended\ exclusive\ personal\ zone}(t_n) = OD_x^{exclusive\ personal\ zone}(t_n) + v_x^{relative}(t_n) * t_{ability\ of\ reflection} \quad (5)$$

5.2.6. 自動停止共通基本機能のシミュレーションと実験

モデルベース・シミュレーション（以下、MBS）により、Robot システムを評価した後、実システムによる検証を実施した。以下に、シミュレーションと実験の結果を示す。

5.2.6.1. 自動停止共通基本機能の開発環境

RTM は、ロボットを開発するためのミドルウェアである。RTM では、コンポーネントの交換が可能であり、モデルベース開発ツールとして RTM を採用し、モデルを含むサブシステムを RTM のコンポーネントとして開発した。

5.2.6.2. シミュレーションのためのシステム構成

MBS による自動停止共通基本機能の評価のためのシステムを、Operator のユーザモデル (User model of remote user)、障害物モデル (Obstacle model)、車椅子ロボットコントローラ (Wheelchair robot controller)、駆動モデルサブシステム (Drive model subsystem)、および、遠隔警告サブシステム (Remote warning subsystem) で構成した。

Fig.62 に、MBS による自動停止共通基本機能のためのシステム構成を示す。

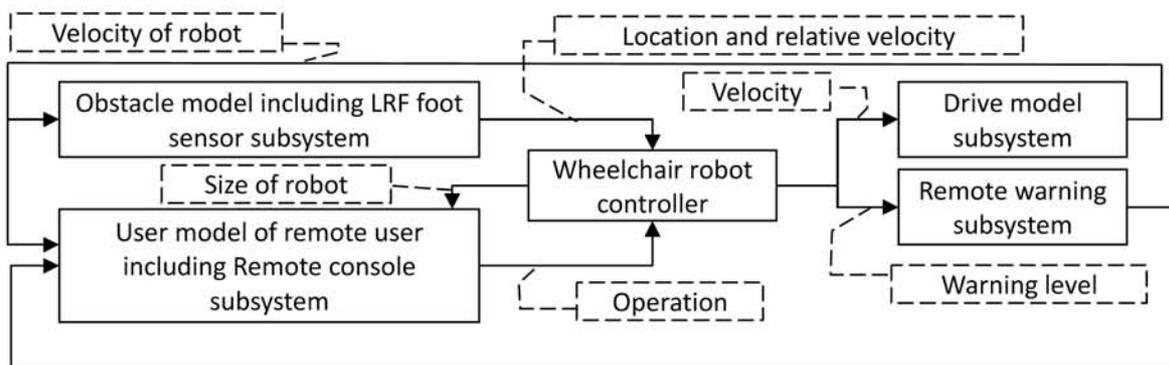


Fig. 62 MBS による自動停止共通基本機能のシステム構成.

- User model of remote user (Operator のユーザモデル) : Robot を操作する Operator の代理として動作するユーザモデルのコンポーネント。このモデルは遠隔操作サブシステムを含む。
- Obstacle model (障害物モデル) : 障害物の代理として動作する環境のモデルのコンポーネント。このモデルは LRF foot sensor subsystem を含む。ただし、アプローチ機能の場合は、Target の代理として振舞うユーザモデルのコンポーネント。
- Wheelchair robot controller (車椅子ロボットコントローラ) : 車椅子ロボットコントローラのコンポーネント。
- Drive model subsystem (駆動モデルサブシステム) : Drive subsystem (駆動サブシステム) の代理として動作するデバイスモデルのコンポーネント。
- Remote warning subsystem (遠隔警告サブシステム) : Operator に警告を発するためのコンポーネント。

5.2.6.3. シミュレーションの結果

MBS のためのサブシステムをコンポーネントとして開発し、シミュレーションを実施した。Fig.63 に、MBS のためのシステム構成を示す。

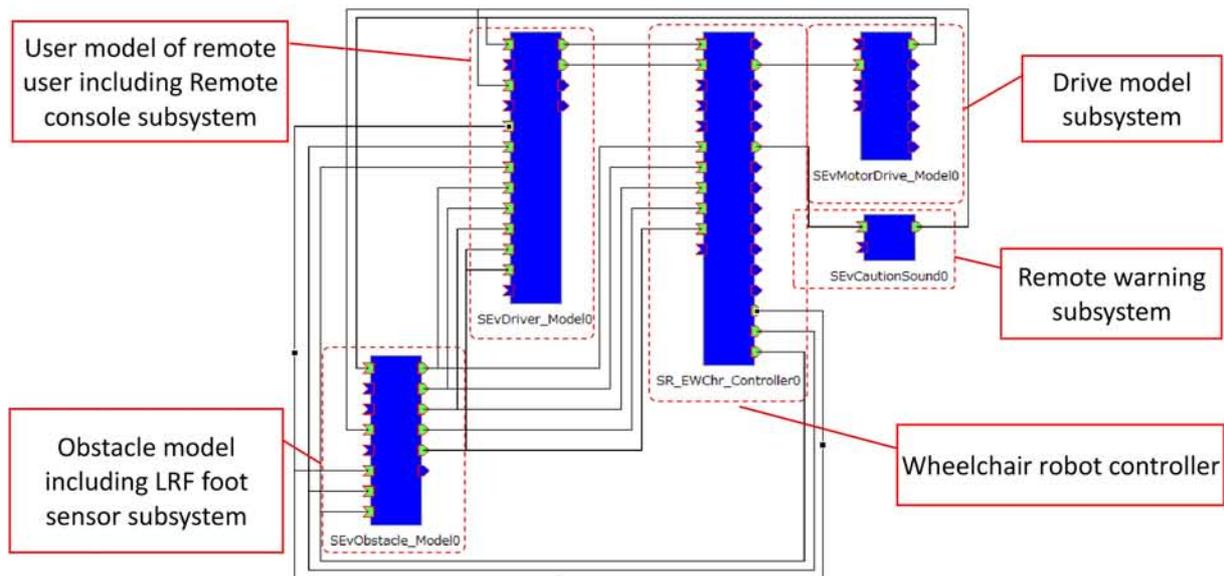


Fig. 63 MBS のためのシステム構成.

Fig.64 に、MBS におけるスクリーンショットを示す。

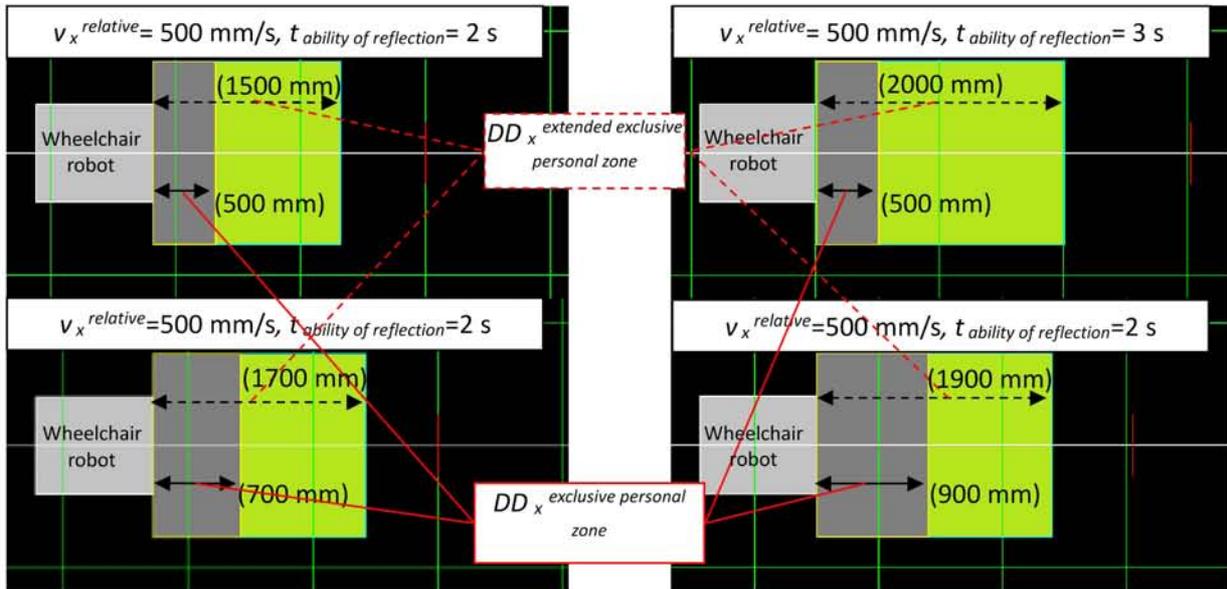


Fig. 64 MBS におけるスクリーンショット.

Table 22 に、MBS の結果を示す。

Table 22 MBS の結果.

$v_x^{relative}$ [mm/s]	$DD_x^{exclusive\ personal\ zone}$ [mm]	$OD_x^{relative}$ at stop [mm]	$t_{ability\ of\ reflection}$ [s]	$DD_x^{extended\ exclusive\ personal\ zone}$ [mm]
500	500	495	2	1500
500	500	495	3	2000
500	700	699	2	1700
500	900	895	2	1900

5.2.6.4. 実験の結果

シミュレーションと同様に、実験で使用する実システムのためのコンポーネントを開発した。

Fig.65 に、実験のためのテレプレゼンス車椅子の実システムの構成を示す。

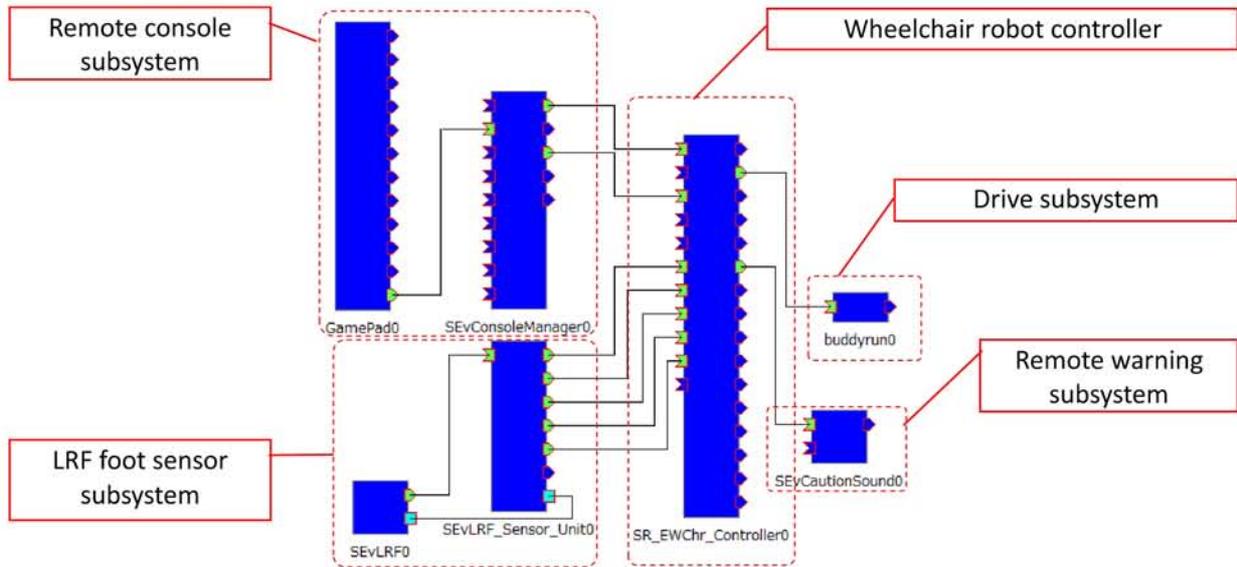


Fig. 65 実験のためのテレプレゼンス車椅子の実システムの構成.

Table 23 に、テレプレゼンス車椅子の実験結果を示す。

Table 23 テレプレゼンス車椅子の実験結果.

v_x relative [mm/s]	DD_x exclusive personal zone [mm]	OD_x relative at stop [mm]	t ability of reflection [s]	DD_x extended exclusive personal zone [mm]
500	500	444	2	1500
500	500	437	3	2000
500	700	661	2	1700
500	900	861	2	1900

5.2.7. 考察と結論

本適用において、MBD/UM によるシミュレーションの評価の後に、ハードウェアを実装した実システムによる実験を実施し、衝突のリスクなしに検証を終了し、テレプレゼンス車椅子ロボットにおける安全運転支援機能の実装を完了した。シミュレーションの結果と実験の結果を比較することにより、MBS において良好な結果で完了できれば、実システムを用いた検証時に、被験者の負傷のリスクを低減した実験が可能であることを確認した。また、MBD/UM を実施することで、利用者の心理的安心を考慮した高い利用時品質を実現することが可能であることを確認した。そして、被験者の負傷のリスクを低減した、物理的安全と心理的安心を含む高い利用時品質を実現するための開発手法としての利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を確認した。

5.3. 具体的人間中心設計プロセスとしての適用

サービスロボットは、高いユーザビリティと高いユーザエクスペリエンス（以下、UX）を有する高い利用時品質を持つサービスを、利用者や周囲にいる人間に提供することを期待されており、人間中心設計（以下、HCD）が必要となることが予想される。しかし、サービスロボットのための具体的 HCD プロセスは提案されていない。そこで、本適用では、本論文で提案する利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法（以下、MBD/UM）が、サービスロボットのための具体的 HCD プロセスとして有効であることを確認する。

5.3.1. 目標とアプローチ

本適用では、本論文で提案する MBD/UM を具体的 HCD プロセスとしてテレプレゼンスロボット（以下、Robot）の開発に適用して、利用者視点での高い利用時品質を実現し、境界の利用者を含む多様な利用者に適応し、製品サンプルも被験者も必要としない設計時評価を実現し、被験者の負傷のリスクを低減した設計時評価を可能にする手法であることを確認し、更に、MBD/UM の具体的 HCD プロセスとしての有効性と、HCD プロセスとしての以下の優位性を確認する。

- システム設計時評価のための製品サンプルのハードウェア制作に必要な期間とコストの低減
- システム設計時における様々な条件下や繰り返し同一条件下におけるシミュレーションによる評価
- システム設計時評価における被験者が負傷するリスクの排除と検証時のリスクの低減

5.3.2. 対象サービスロボットと対象機能

本適用では、Robot の遠隔操作における身体的安全と心理的安心を実現するために、遠隔操作における課題を調査した。そして、遠隔地の利用者（以下、Operator）が Robot を操作することの難しさの原因として、Robot の活動域の視界と Robot の操作における制約があり、Robot を操縦する際に、障害物や人に衝突させてしまう危険があることが判明した。そこで、本適用では、Operator が Robot を操作して、Robot をその活動域の対象者（以下、Target）にアプローチさせる状況に焦点を当て、身体的安全と心理的安心を実現するアプローチ機能を研究した。

そして、Robot のアプローチ機能の研究の際に、ユーザビリティとしての物理的安全と UX としての心理的安心を実現するために、MBD/UM を具体的 HCD プロセスとして適用した。

Fig.66 に、Operator が Robot を操作して Target にアプローチさせる際の、Operator、Robot、Target の関係を示す。

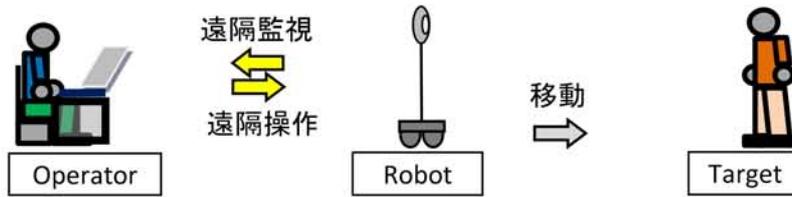


Fig. 66 Target への接近時の Operator、Robot、Target の関係。

アプローチ機能の環境を単純化するために、Robot がショッピングモールや病院、介護施設などの建築物の広い通路やホールにおいて Target に近づくことを前提とした。

5.3.3. 具体的人間中心設計プロセスに基づく開発

本適用では、Robot のアプローチ機能の研究において、物理的安全と心理的安心を実現するために、具体的 HCD プロセスとして MBD/UM を適用した。

5.3.3.1. ペルソナによる利用状況の理解と明確化

HCD サイクルとしての MBD/UM の第 1 ステップとして、アプローチ機能の利用状況をペルソナにより理解し、明確にするために、アプローチ機能の物理的安全と心理的安心に関して検討した。そして、Target への接近における衝突や衝突の危険が、解決すべき問題であると仮定した。そこで、この仮定の真偽を検証するために、10 人の回答者に対してアンケートを実施し、歩行者間の衝突や衝突の危険の経験について調査した。

Table 24 に、衝突や衝突の危険の経験に関するアンケートの結果を示す。

Table 24 衝突や衝突の危険の経験に関するアンケートの結果。

衝突や衝突の危険の経験	Ratio [%]
注意力不足の人との衝突や衝突の危険の経験	100
注意力のある人との衝突や衝突の危険の経験	30

Table 24 のアンケートの結果として、回答者全員が歩行時に、他の歩行者との衝突や衝突の危険の経験があると回答した。この結果により、通路やホールにおいて Robot と Target の衝突や衝突の危険を経験するリスクがあると仮定した。

また、衝突の不安を与える歩行者のアプローチパターンに関して調査した。歩行者のアプローチパターンに関するアンケート結果から、20%の回答者が減速接近に不安を感じていたのに対し、90%の回答者が定速接近に対して不安を感じていた。

Table 25 に、衝突の不安を感じさせる歩行者のアプローチパターンに関するアンケート結果を示す。

Table 25 衝突の不安を感じさせる歩行者のアプローチパターンに関するアンケート結果.

歩行者のアプローチパターン	Ratio [%]
定速接近	90
減速接近	20

Table 25 により、減速接近が定速接近よりも良いアプローチパターンであると仮定できた。そして、物理的に安全で、心理的に安心なアプローチ機能を開発するために、次の値が重要な 2 つのキーとなることが判明した。

- Operator が Robot を減速開始させる際に適切な距離
- Operator が Robot を停止させる際に適切な距離

また、Robot の操作には次の 2 つの方法がある。

- ダイレクトステアリング：Robot の活動域で Operator が自らの眼で操作する方法
- リモートステアリング：遠隔地から Operator がビデオカメライメージを基に Robot を操作する方法

そこで、7 人の被験者により、ダイレクトステアリングとリモートステアリングの実験を実施し、それぞれの被験者における減速開始距離と停止距離に関する違いを調査した。この実験は、本形態での操作に未習熟の被験者を対象に、Robot を約 5m の距離から対象に近づける方法で実施した。

そして、実験後にアンケートを実施し、ダイレクトステアリングとリモートステアリングにおける Operator の不安レベルの違いを調査した。Operator の不安レベルに関するアンケート結果では、遠隔地から、2 次元画面を通して監視する Robot の活動域に対する制約された視野と距離感覚により、リモートステアリングに強い不安を感じたことが判明した。

Table 26 に、Operator の不安レベルに関するアンケート結果を示す。

Table 26 ダイレクトステアリングとリモートステアリングにおける Operator の不安レベル.

Operator の不安レベル (1 low – 4 high)	リモートステアリング	ダイレクトステアリング
Average	3.3	1.9

Table 27 にリモートステアリングとダイレクトステアリングにおける減速開始距離と停止距離の実験結果を示す。

リモートステアリングとダイレクトステアリングにおける減速開始距離と停止距離の Average を、最初の 2 ケタを丸めることによって作成した。

Table 27 リモートステアリングとダイレクトステアリングにおける減速開始距離と停止距離.

Operator	リモートステアリング		ダイレクトステアリング	
	減速開始距離 [mm]	停止距離 [mm]	減速開始距離 [mm]	停止距離 [mm]
TP1 No1	2400	940	1000	470
TP1 No2	1990	770	920	560
TP1 No3	1730	810	1060	530
TP2 No1	1910	1070	1370	300
TP2 No2	1920	1290	1500	420
TP2 No3	3300	730	1470	380
TP3 No1	1780	1030	3890	390
TP3 No2	2150	930	1850	550
TP4 No1	2690	840	2610	300
TP4 No2	3210	2090	2410	350
TP4 No3	2630	1040	1670	110
TP4 No4	2800	870	1870	70
TP5 No1	2660	1100	1360	440
TP5 No2	2300	1060	1980	560
TP5 No3	3580	890	1580	500
TP6 No1	2840	1130	1610	330
TP6 No2	3150	1050	1040	410
TP6 No3	3200	1310	960	490
TP7 No1	1860	650	920	430
TP7 No2	2290	690	1220	610
TP7 No3	2090	340	1440	630
Max	3580	2090	3890	630
Min	1730	340	920	70
Average	2500	980	1600	420

TP は被験者を表す。

これらの調査結果を基に、Target と Operator の利用者プロフィールをペルソナで定義した。

Target に関する利用者プロフィールを以下のように定義した。

- Target は、衝突や衝突の危険を経験している。
- Target は、Robot の定速接近急停止に対して不安を感じる。

更に、実験後のインタビューにより、次の仮定を追加した。

- Target は、Robot が接近しすぎると衝突の不安を感じる。
- Target は、Robot が Target よりも高速に移動する際に衝突の不安を感じる。

また、Operator に関する利用者プロファイルを以下のように定義した。

- Operator は、リモートステアリングの際に衝突の不安を感じる。
- Operator は、停止の前に減速する。
- Operator は、Robot の活動域の視界の制約により、Robot と Target の間の距離を認識することが困難である。

更に、実験後のインタビューにより、次の仮定を追加した。

- Operator は、ネットワークなどによるタイムラグにより、Robot の操作が難しいと感じる。

5.3.3.2. モデルベース・システムズエンジニアリングによるユーザ要求の明確化

HCD サイクルとしての MBD/UM の第 2 ステップとして、最初に、Target に適合するアプローチ機能に関するユーザ要求を明確にするために、MBSE により Target のモデルを定義した。

Fig.67 に、MBSE のステートマシンダイアグラムによる Target のモデルを示す。Robot は Target よりも遅く移動するので、歩いている Target に追いつけないという前提に立って心理的安心を調査したため、この Fig.67 において「Standing carefully」の状態に焦点を当てた。

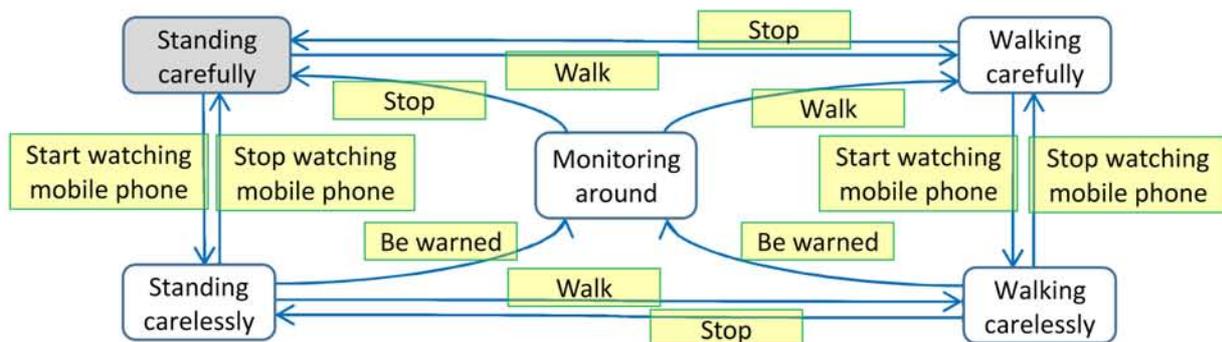


Fig. 67 ステートマシンダイアグラムによる Target のモデル。

次に、Operator に必要なアプローチ機能に関するユーザ要求を MBSE で明確にするために、Operator のモデルを定義した。

Fig.68 に、MBSE におけるステートマシンダイアグラムによる Operator のモデルを示す。Operator が注意深くロボットを操作する際の、Operator の心理的安心を調査したため、Fig.68 において「Idling」、「Remote steering carefully」、「Decelerate Robot」に焦点を当てた。

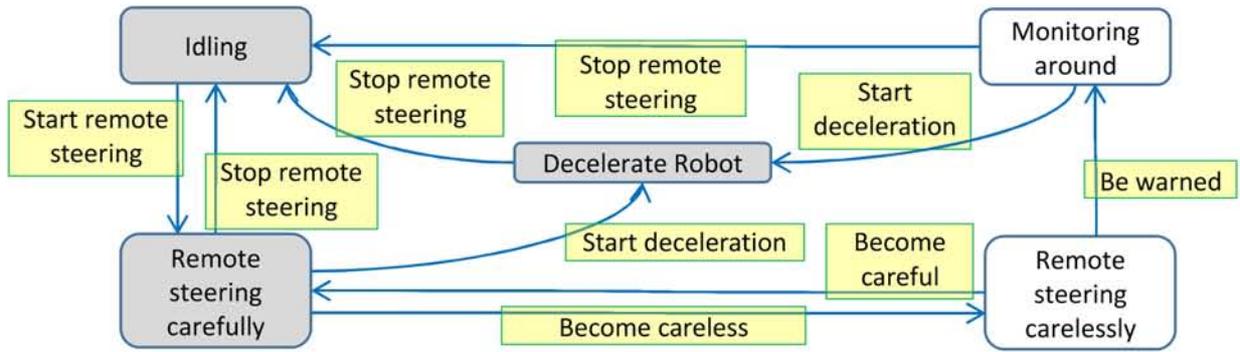


Fig. 68 ステートマシンダイアグラムによる Operator のモデル.

Target と Operator のプロファイルとモデルに基づき、アプローチ機能に関するユーザ要求を MBSE の要求ダイアグラムを用いて定義した。そして、ユーザ要求を以下のように要約した。

- アプローチ機能は、Target と Operator の双方のために設計されなければならない。
- Operator が遠隔地から Robot を適切な距離で停止させることは難しく、そして、Robot が近づきすぎると Target は衝突の危険を感じるため、アプローチ機能は、Robot を適切な距離で自動的に停止させなければならない。
- Operator が Target と会話することが、Robot を Target に近づける目的であるため、Target の会話のためのパーソナルスペースの境界が、Operator が Robot を停止させる位置である。
- Operator が遠隔地から Robot を適切な距離で減速を開始させることは難しいため、アプローチ機能は、Target への適切な距離で Robot を自動的に減速させなければならない。

次に、Target と Operator のユーザ要求に基づいて、MBSE によりアプローチ機能に関する Robot のモデルを定義した。

Fig.69 に、MBSE のステートマシンダイアグラムによるアプローチ機能の Robot のモデルを示す。Target と Operator に注意があることを前提にしているため、Fig.69 において「Idling」「Remote steering」「Automatic deceleration」、「Automatic brake」に焦点を当てた。

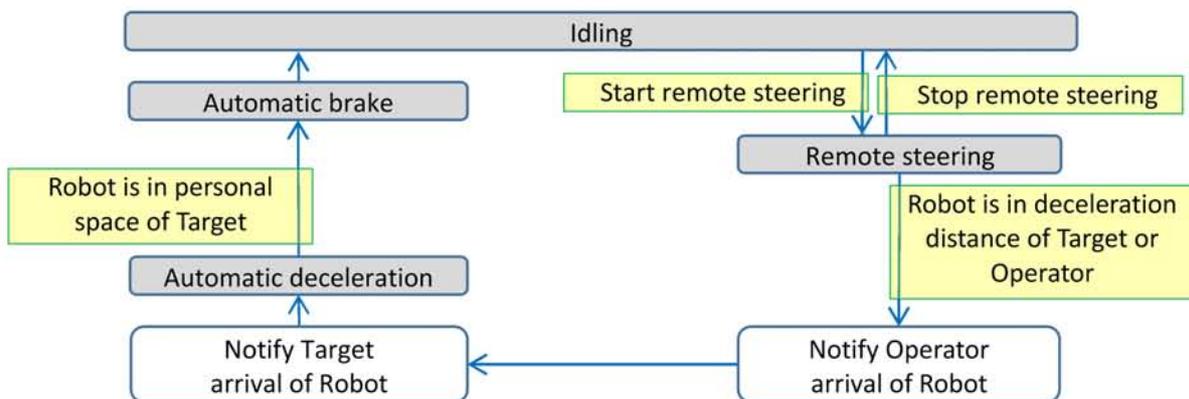


Fig. 69 ステートマシンダイアグラムによるアプローチ機能の Robot のモデル.

Fig.69 の Robot のモデルを実現する上で、次の値を必要とする。

- 減速を開始する適切な Target までの距離
- 停止する適切な Target までの距離

Table 27 に示したリモートステアリングにおける減速開始距離の Average を、シミュレーションと実験における Target への適切な減速開始距離とした。

そして、Target への適切な停止距離としてのパーソナルスペースを、7名の被験者により、広いホールにおいて徒歩で、前方の同性で同年代の対象者に近づき、前後に移動して距離を調整する方法で、計測した。

Table 28 に、会話のためのパーソナルスペースの実験結果を示す。Table 28 では、物理的安全の観点から、適切な Target までの停止距離の Average の計算において、切り上げを適用した。

Table 28 会話のためのパーソナルスペースの実験結果.

会話のためのパーソナルスペース	距離 [mm]
TP1	900
TP2	900
TP3	520
TP4	350
TP5	630
TP6	810
TP7	750
Max	900
Min	350
Average	700

5.3.3.3. RTM における MBS のためのユーザ要求に適合した設計ソリューションの生成

HCD サイクルとしての MBD/UM の第3ステップとして、MBS のためのユーザ要求に適合した設計ソリューションを生成するため、最初に、Robot において、Fig.69 で示した「Idling」「Remote steering」「Automatic deceleration」、「Automatic brake」の機能に焦点を当て、これらの機能を実現するために必要な能力を調査した。

これらの機能を実現するには2つの能力が必要であることが判明した。一つは、自動停止と自動減速のために Target までの距離を計測する能力であり、もう一つは遠隔操作のために、リモートから操作領域を監視する能力である。

そこで、リモート領域から Robot を操作する基本能力に加え、Robot が Target までの距離を計測

する能力、そして、リモートから操作領域を監視する能力を実現するためのハードウェア構成を設計して、アプローチ機能の設計ソリューションを検討した。

Fig.70 に、Operator が Robot を Target に近づける際の環境を示す。

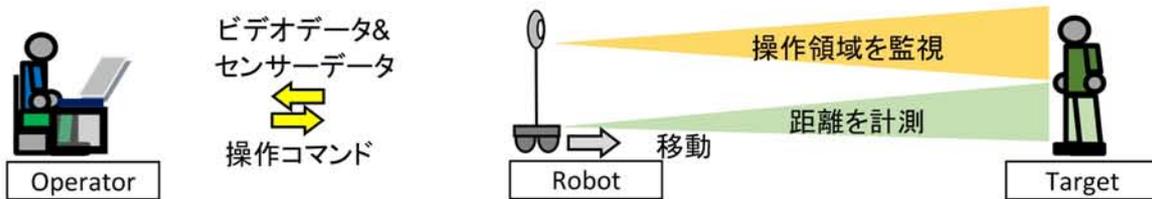


Fig. 70 Operator が Robot を Target に近づける際の環境.

Fig.71 に、Robot のハードウェア構成を示す。

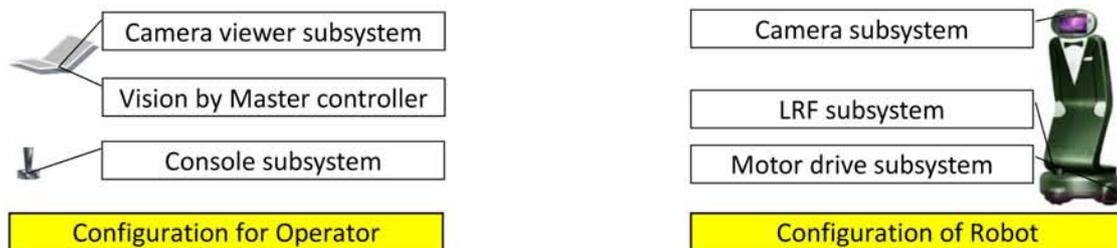


Fig. 71 Robot のハードウェア構成.

そして、距離を計測するための Laser Range Finder (以下、LRF) unit を LRF subsystem のための装置として採用し、Robot の活動域の周囲のリアルタイムビデオを撮影するためのビデオカメラを Camera subsystem のための装置として採用し、Robot を移動するための駆動装置を Motor drive subsystem のための装置として採用した。

また、ゲームパッドを Console subsystem における Robot の速度の指定のための装置として採用し、PC を Camera viewer subsystem のためのリアルタイム動画の表示と、Master controller による Robot と Target の移動と位置の表示のための装置として採用した。

本適用の Robot が必要とするいくつかのハードウェアをもともと装備していた、日本のベクトル株式会社が開発したコンシエルジュタイプ・ロボットを Robot のベースとして採用した。

- Robot の基本仕様
 - 外形仕様： 横455mm、奥行き455mm、高さ1200mm
 - 最大速度（事前実験による実測）：500mm/s（1.8km/h）
- Video Camera の基本仕様
 - 解像度：横640pixel、縦480pixel
 - フレームレート：実質6.18frame/s（fps）、最大 30fps
- LRF の基本仕様
 - 最大計測範囲：距離5600mm、角度240°

RTM 上で Robot、Target、Operator で構成する製品サンプルを定義した。Robot は LRF subsystem、Motor drive subsystem、Camera subsystem で構成する。そして、Operator は Console subsystem、Camera viewer subsystem、そして、Master controller による Robot と Target の移動と位置の可視化する能力で構成する。

Fig.72 に、Target と Operator を加えた Robot の製品サンプルの構成を示す。

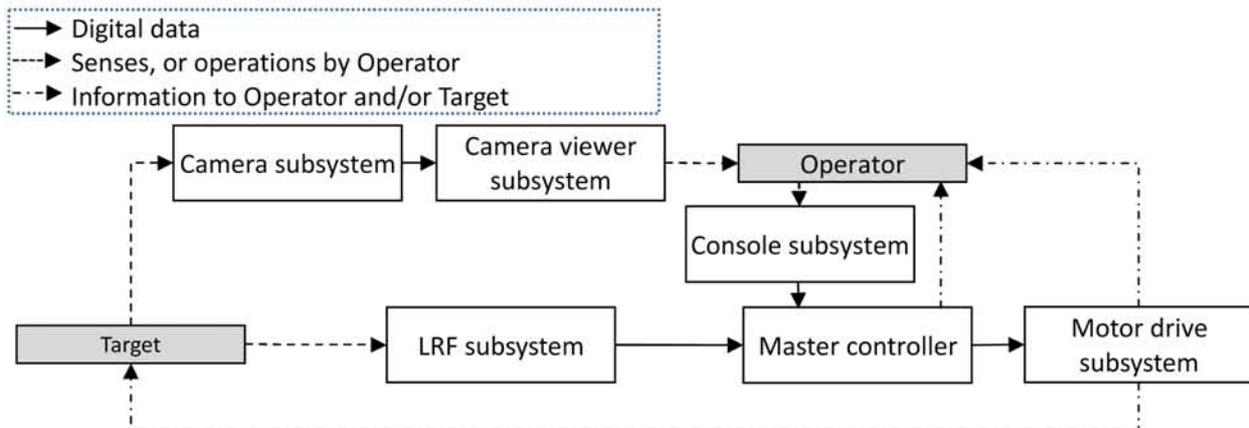


Fig. 72 Target と Operator を加えた Robot の製品サンプルの構成.

- Master controller は、LRF subsystem と Console subsystem からの情報を評価し、アプローチの際の減速を含めた適切な速度を出力する。また、Master controller は、Robot と Target の移動と位置を可視化する能力を持つ。
- LRF subsystem は、Target までの距離を計測し、Target への相対位置と相対速度を出力する。
- Console subsystem は、Operator による操縦操作を認識し、Robot の指定速度を出力する。
- Motor drive subsystem は、入力で指定された速度で Robot を移動する。
- Camera subsystem は、Robot の活動域のリアルタイムビデオを撮影し、リアルタイムビデオを出力する。
- Camera viewer subsystem は、入力に従って Robot の活動域のリアルタイムビデオを表示する。

Fig.72 を基に、Robot のデバイスモデル、センサーを含む Target のユーザモデル、Console を含む Operator のユーザモデルによるモデルベース・シミュレーション（以下、MBS）のための設計ソリューションの構成を定義した。

Fig.67 で示した Target のモデルを元に、センサーを含む Target のユーザモデルを定義し、Fig.68 で示した Operator のモデルを基に、Console subsystem の能力を持つ Operator のユーザモデルを定義した。

Fig.73 に、MBS のための設計ソリューションの構成を示す。

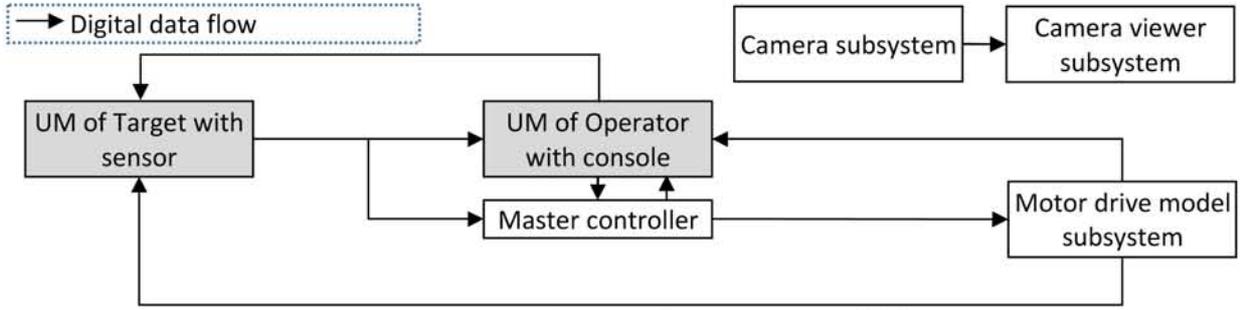


Fig. 73 MBS のための設計ソリューションの構成.

そして、次のように変数と関数を定義した。変数名や関数名のサブスクリプト x は、Robot の正面前方方向を意味する。

- $TD_x^{personal\ space}$ [mm]: Robot が停止する適切な Target との距離 (Target のパーソナルスペース)。
- $TD_x^{decelerate}$ [mm]: アプローチの際に Robot が減速を開始する適切な Target との距離。
- t_n [s]: Robot が移動を開始した時からの時間。
- $Cv_x^{specified}(t_n)$ [mm/s]: Console subsystem を使って Operator が指定する Robot の速度。
- $TD_x^{relative}(t_n)$ [mm]: LRF subsystem によって計測する Robot から Target への距離。

MBS においては、次の式を適用。

$$TD_x^{relative}(t_n) = TD_x^{relative}(t_{n-1}) - Tv_x^{relative}(t_{n-1}) * (t_n - t_{n-1}) \quad (1)$$

- $Tv_x^{absolute}(t_n)$ [mm/s]: MBS における Target の速度。
- $Tv_x^{relative}(t_n)$ [mm/s]: Target と Robot の間の相対速度。

$$Tv_x^{relative}(t_n) = \frac{TD_x^{relative}(t_{n-1}) - TD_x^{relative}(t_n)}{t_n - t_{n-1}} \quad (2)$$

MBS においては次の式を適用。

$$Tv_x^{relative}(t_n) = Rv_x^{absolute}(t_n) - Tv_x^{absolute}(t_n) \quad (3)$$

- $RD_x^{approach}(t_n)$ [mm]: アプローチ時の Robot から Target のパーソナルスペースの境界までの距離。

$$RD_x^{approach}(t_n) = TD_x^{relative}(t_n) - TD_x^{personal\ space} \quad (4)$$

- $Rv_x^{absolute}(t_n)$ [mm/s]: Robot の速度。

If $TD_x^{relative}(t_n) > TD_x^{decelerate}$ then

$$Rv_x^{absolute}(t_n) = Cv_x^{specified}(t_n) \quad (5)$$

Else if $TD_x^{relative}(t_n) > TD_x^{personal\ space}$ then Robot は次のように減速。

$$Rv_x^{absolute}(t_n) = \min \left(Cv_x^{specified}(t_n), Rv_x^{absolute}(t_{n-1}) * \left(1 - \frac{TD_x^{relative}(t_{n-1}) - TD_x^{relative}(t_n)}{RD_x^{approach}(t_{n-1})} \right) \right) \quad (6)$$

Else Robot は次のように停止。

$$Rv_x^{absolute}(t_n) = 0 \quad (7)$$

Fig.73 の設計ソリューションの構成に基づいて、RTM 上で MBS の設計ソリューションを生成し

た。

Fig.74 に、RTM 上における MBS の設計ソリューションの構成を示す。

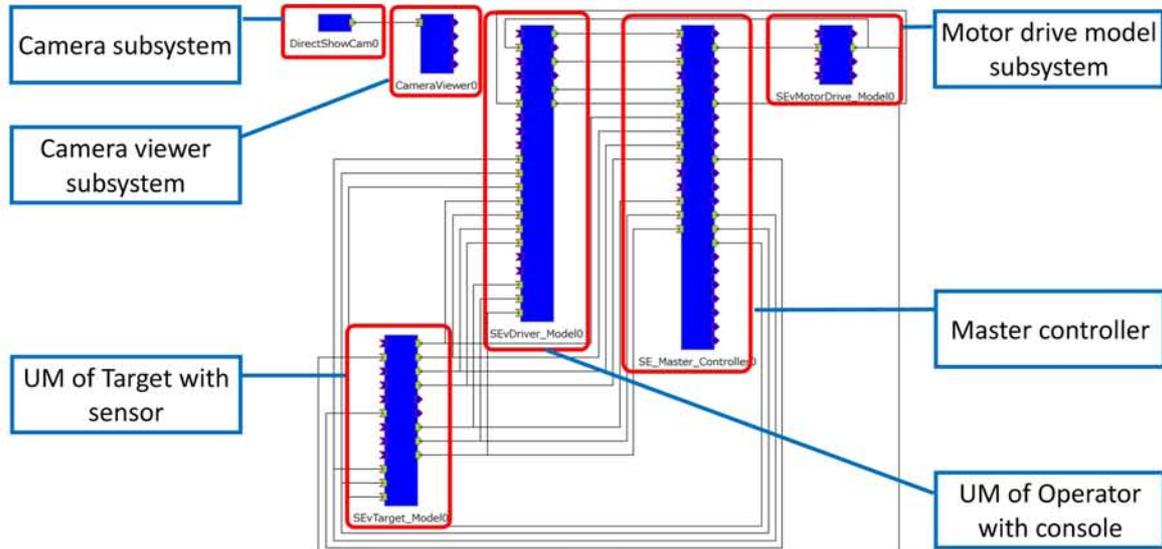


Fig. 74 RTM 上における MBS の設計ソリューションの構成.

5.3.3.4. RTM における MBS によるユーザ要求に対する設計ソリューションの適合性評価

HCD サイクルとしての MBD/UM の第 4 ステップとして、Robot のデバイスモデルと Target のユーザモデルの移動と位置を可視化する Master controller の能力を追加した Fig.74 の構成を用いて、MBS によって、ユーザ要求に対する設計ソリューションの適応性を評価した。

Fig.75 に MBS におけるスクリーンショットを示す。

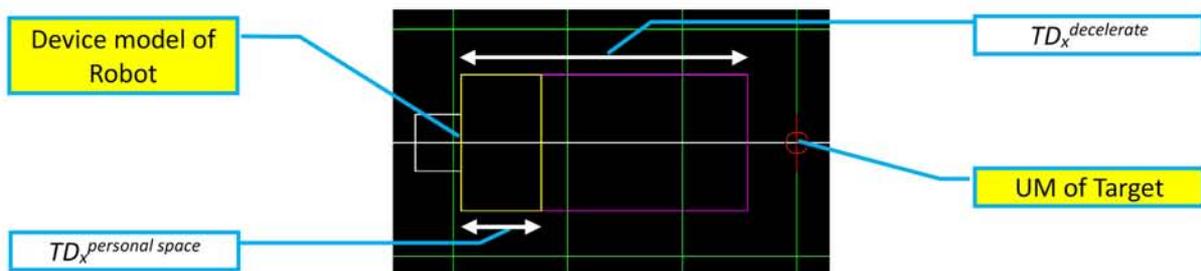


Fig. 75 MBS におけるスクリーンショット.

5.3.3.5. RTM での製品サンプルの生成

MBD/UM において HCD サイクルに追加した第 1 ステップとして、Fig.72 の製品サンプルの構成を基に、RTM 上における製品サンプルを生成した。

LRF subsystem により UM of Target with sensor を置き換え、Console subsystem により UM of

Operator with console を置き換え、そして、Motor drive subsystem により Motor drive model subsystem を置き換えた。

- LRF subsystem は、SEvLRF_Monitor0 と国立研究開発法人 産業技術総合研究所からリリースされた LRFCapture_URG0 で構成する。
- Console subsystem は、SEvConsole_Unit0 と国立研究開発法人 産業技術総合研究所からリリースされた GamePad0 で構成する。
- Motor drive subsystem は、東京都立産業技術研究センターで開発された TRobotRTC0 で構成する。

Fig.76 に、RTM 上の製品サンプルの構成を示す。

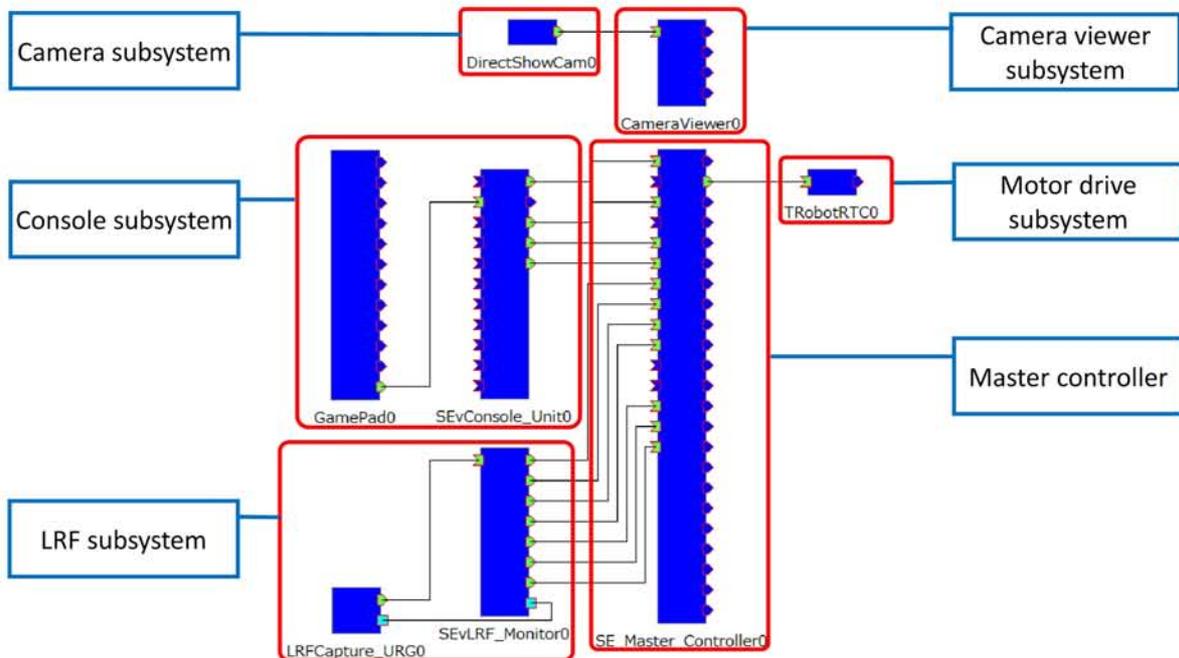


Fig. 76 RTM 上の製品サンプルの構成.

次に、遠隔地の Operator における距離認識の向上を目的とした、LRF subsystem のデータによる Robot と Target の移動と位置を可視化する能力を採用した。

Fig.77 に、LRF subsystem からのデータによる Robot と Target の移動と位置を可視化する能力によるスクリーンショットを示す。

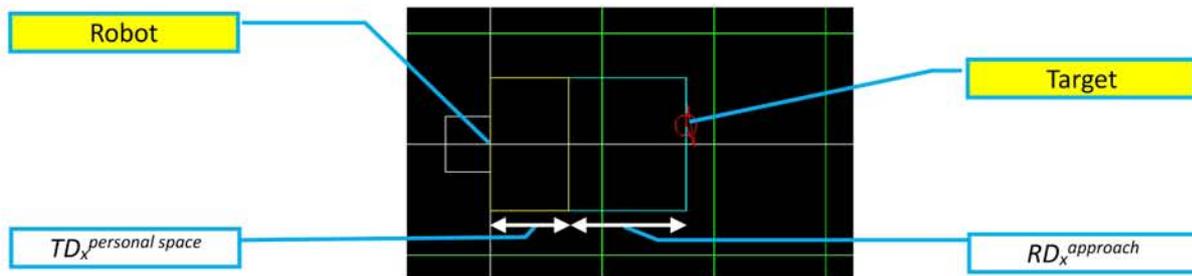


Fig. 77 RobotとTargetの移動と位置を可視化する能力によるスクリーンショット.

5.3.3.6. RTM での製品サンプルの検証

MBD/UM において HCD サイクルに追加した第 2 ステップとして、RTM において製品サンプルを検証するために、最初に、Fig.74 のモデルによる個々のサブシステムを、対応する Fig.76 のハードウェアによる実サブシステムで置き換えて検証することで、それぞれのサブシステム間の互換性を確認する。本適用ではこの方法で、LRF subsystem と UM of Target with sensor の互換性、Console subsystem と UM of Operator with console の互換性、そして、Motor drive subsystem と Motor drive model subsystem の互換性を順次確認した。

次に、Fig.76 の RTM 上の構成で、Robot のアプローチ機能がユーザ要求に適合していることを検証した。

また、Fig.77 で示した、LRF からのデータによる Robot と Target の移動と位置の可視化能力の有効性も検証した。

5.3.4. 設計ソリューションの評価結果と製品サンプルの検証結果

本項目では、設計ソリューションの評価結果と、製品サンプルの検証結果を示す。

5.3.4.1. 設計ソリューションの評価結果

Fig.74 の構成を用いた MBS によるユーザ要求に対する設計ソリューションの評価を、以下の値と関数を適用して実施した。

- $Cv_x^{specified}(t_n)$ [mm/s] : 470
470mm/s は、評価と検証において指定する速度である。
- $TD_x^{personal\ space}$ [mm] : 700
700mm は Table 28 で示した会話のためのパーソナルスペースの Average である。
- $TD_x^{decelerate}$ [mm] : 700 / 1600 / 2500
パーソナルスペースの境界での急停止のための 700mm と、Table 27 で示したダイレクトステアリングにおける減速開始位置である 1600mm とリモートステアリングにおける減速開始位置である 2500mm を使うことで、急停止と減速停止における心理的安心の違いを調査する。

- $Tv_x^{absolute}(t_n)$ [mm/s] : 0
0mm/s は Target が立ち止まっていることを意味している。

Table 29 に、MBS における Target のユーザモデルの減速開始時と停止時の距離に関する評価結果を示す。

Table 29 MBS における Target のユーザモデルの減速開始時と停止時の距離に関する評価結果.

$TD_x^{deceleration}$ [mm]	$TD_x^{relative}$ at starting deceleration [mm]	$TD_x^{relative}$ at stop [mm]
700	700	700
1600	1600	700
2500	2500	700

5.3.4.2. 製品サンプルによる検証結果

5名の被験者により、Robot の製品サンプル上のアプローチ機能を検証した。検証時の結果を評価時の結果と比較するために、検証において、評価時に適用した値と式を適用した。

- $Cv_x^{specified}(t_n)$ [mm/s] : 470
470mm/s は、評価において指定した速度と同速度である。
- $TD_x^{personal\ space}$ [mm] : 700
700mm は、評価において指定したパーソナルスペースの距離と同距離である。
- $TD_x^{decelerate}$ [mm] : 700 / 1600 / 2500
700mm、1600mm、2500mm は、評価で使用した値と同じ、緊急停止を含む減速開始のための Target への距離である。
- $Tv_x^{absolute}(t_n)$ [mm/s] : 0
Target は立ち止まっているため、結果的に 0mm/s になる。

Table 30 に、製品サンプルによる検証結果を示す。

Table 30 製品サンプルによる減速開始時と停止時の Target への距離に関する検証結果.

$TD_x^{deceleration}$ [mm]	$TD_x^{relative}$ at starting deceleration [mm]	$TD_x^{relative}$ at stop [mm]
700	680	560
1600	1580	670
2500	2460	690

Robot の製品サンプル上のアプローチ機能は、被験者によって物理的安全に検証でき、検証結果は MBS による評価結果と非常に類似していた。また、実験後に Target と Operator に対して心理的安

心に関するアンケートを実施した。

Table 31 に、実験後の Target としての心理的安心に関するアンケート結果を示す。

Table 31 実験後の Target としての心理的安心に関するアンケート結果.

$TD_x^{decelerate}$ [mm]	Target としての心理的安心 (1 _{worst} - 5 _{best})
700	2
1600	3.8
2500	4.2

Table 32 に、実験後の Operator としての心理的安心に関するアンケート結果を示す。

Table 32 実験後の Operator としての心理的安心に関するアンケート結果.

$TD_x^{decelerate}$ [mm]	Operator としての心理的安心 (1 _{worst} - 5 _{best})
700	1.8
1600	3.6
2500	4.0

そして、5名の被験者によって、Robot と Target の移動と位置の可視化能力による心理的安心に関する実験を実施し、実験後に Operator に対してアンケートを実施した。

自動減速能力がないために心理的安心の度合いは全体的に低いですが、Robot と Target の移動と位置を可視化する能力により、心理的安心のレベルは高くなった。

Table 33 に、Robot と Target の移動と位置の可視化能力による Operator の心理的安心に関するアンケートの結果を示す。

Table 33 Robot と Target の移動と位置の可視化能力による Operator の心理的安心に関するアンケート.

Camera viewer subsystem だけによる心理的安心 (1 _{worst} - 5 _{best})	Camera viewer subsystem および Robot と Target の移動と位置の可視化能力による心理的安心 (1 _{worst} - 5 _{best})
1.4	2.8

5.3.5. 考察

MBD/UM を具体的 HCD プロセスとしてテレプレゼンスロボットの開発に適用し、MBD/UM の具体的 HCD プロセスとしての有効性と、HCD プロセスとしての優位性を以下のように確認した。

- ペルソナにより、Target と Operator のプロファイル、および、Operator が Robot をどのように操縦してアプローチするのか、Robot のアプローチ時に Target がどのように感じるのかという利用状況を記述できたので、ペルソナは、利用状況の理解と明確化に有効であった。

- MBSE の要求ダイアグラムによりユーザ要求を特定でき、また、ステートマシンダイアグラムにより Robot、Target、Operator のモデルを記述できたので、MBSE はユーザ要求を特定することに有効であった。
- RTM は、Robot のデバイスモデル、および、Target と Operator のユーザモデルにより、RTM で MBD による MBS のための設計ソリューションを生成できたので、ユーザ要求に適合する設計ソリューションを生成するための MBD ツールとして有効であった。
- RTM 上で、製品サンプルも被験者も使わず、Robot のデバイスモデルと Target と Operator のユーザモデルにより、デザインの全評価を実施できたので、RTM 上での MBS はユーザ要求に対して設計を評価する上で有効であった。

そして次に、Robot の製品サンプルを制作し、Robot のデバイスモデル、および、Target と Operator のユーザモデルで構成した MBS 用設計ソリューションと、製品サンプルとの互換性を検証した。

- モデルによるサブシステムを、対応するハードウェアを有する実サブシステムで置き換え、モデル以外の MBS のサブシステムをそのまま流用することで製品サンプルを作成できたので、RTM は有用であった。
- 事前に、モデルによるサブシステムごとに、対応する実サブシステムとの互換性を検証した後に、製品サンプルを検証できたので、製品サンプルの検証に RTM は有用であった。

製品サンプルの検証時に、アンケートで Target および Operator の心理的安心について調査を行い、以下の結果を得た。

- Operator が Robot を操作して Target に接近する際、Target および Operator の双方は、定速接近よりも減速接近に、高い心理的安心を感じた。
- Operator が Robot を操作して Target に接近する際、Target および Operator の双方は、Target から 1600mm の位置での減速開始よりも、ユーザ要求で指定した 2500mm の位置での減速開始に対し、高い心理的安心を感じた。
- 減速停止接近においても急停止接近においても、Target と Operator は心理的安心に関して類似傾向を持っていた。
- Operator は、Camera viewer subsystem によるリアルタイムビデオだけを使った Robot の制御よりも、リアルタイムビデオに Robot と Target の移動と位置を可視化する能力を加えた Robot の制御に対して、高い心理的安心を感じた。

更に、具体的 HCD プロセスとしての MBD/UM による設計ソリューションの作成時に設計した減速停止の能力、Robot の活動域のリアルタイムビデオの撮影・表示能力に加え、Robot と Target の移動と位置を可視化する能力により、Robot の製品サンプル上に設計ソリューションの作成時に想定した物理的安全と心理的安心を実現したアプローチ機能を完成した。

5.3.6. 結論

本適用では、具体的 HCD プロセスとして MBD/UM を Robot のアプローチ機能の開発に適用し、利用者視点での設計を実施し、Target の物理的安全と Target と Operator の心理的安心を実現したアプローチ機能を完成した。

また、デバイスモデルとユーザモデルを使うことにより、MBD/UM は、設計時評価において必要な製品サンプルのハードウェアの制作の期間とコストと、設計時評価のための期間とコストを削減した。そして、デバイスモデルとユーザモデルを使うことで、MBS により、設計ソリューションを様々な条件下や繰り返し同一条件下で評価した。更に、ユーザモデルを使うことで、MBD/UM は設計ソリューションの評価時における被験者の負傷のリスクを排除し、製品サンプルの検証前にハードウェアを実装した個々の実サブシステムの動作を確認することで、製品サンプルの検証時における被験者の負傷のリスクを低減した。

以上の結果から、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の具体的 HCD プロセスとしての有効性を確認し、更に、MBD/UM の次の優位性に関しても、本適用で確認した。

- システム設計時評価のための製品サンプルのハードウェア制作に必要な期間とコストの低減
- システム設計時における様々な条件下や繰り返し同一条件下におけるシミュレーションによる評価
- システム設計時評価における被験者が負傷するリスクの排除と検証時のリスクの低減

第6章

結言

本論文では、利用者視点での高い利用時品質を実現したサービスを利用者に提供するためのシステム開発手法として、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を提案した。提案の手法では、これまでの開発手法における課題であった、利用者視点に立ったユーザ要求に適合するシステムの開発、境界の利用者を含む多様な利用者に適応するシステムの開発、評価を含む開発期間の短縮や開発コストの低減、システム開発時における被験者の負傷のリスクの低減に関しても実現した。

利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法では、利用者視点での高い利用時品質を実現したサービスを利用者に提供し、これまでの開発手法における課題を解決するために、人間中心設計、ペルソナ、モデルベース・システムズエンジニアリング、モデルベース開発を採用した。そして、本論文では、利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の検証や確認において、サービスロボットを対象としたので、モデルベース開発ツールとして、ロボット開発のためのミドルウェアであるRTMを採用した。

本論文では、提案の利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を、以下の構成で検証し、確認した。

第1章では、本論文における、背景と目的、そして、本論文の構成を示した。

第2章では、本論文における基本情報として、本論文における用語、これまでのシステム開発手法の課題、本論文で採用した基本技術、本論文で提案するシステム開発手法の構成、本論文の各章の位置付けを説明した。基本技術としては、本論文で提案する利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法で採用した、人間中心設計、ペルソナ、モデルベース・システムズエンジニアリング、モデルベース開発およびモデルベース開発ツールとして採用したRTMについて説明した。また、本論文で提案する利用者の特徴と特性に基づくモデルベース開発手法とそれを構成する利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の構成についても説明した。

第3章では、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の検証を実施した。最初に、電気自動車の蓄電池利用による家庭部門の需要電力平準化の研究において、ログデータに基づく利用者のモデリング手法との比較により、利用者の特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法の有効性を証明した。そして、電気自動車の蓄電池利用による広域供給電力平準化の可能性の研究において、利

ユーザーの特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法を複数の家族セグメントに適用し、家族セグメント間の比較により、その有効性を証明した。

第4章では、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の検証を実施した。最初に、自走式サービスロボットの開発において、ユーザーの特徴と特性に基づく利用者のモデリング手法により身体的形状と物理的動作、そして、心理的な振舞いを対象とする利用者のモデルを定義し、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法に適用し、その有効性を証明した。次に、コンシェルジュタイプ・ロボットのアプローチ機能の開発において、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を人間中心設計の具体的プロセスとして適用し、人間中心設計の具体的プロセスとしての有効性も証明した。

第5章では、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の適用例として、車椅子ロボットの開発への適用、テレプレゼンス車椅子ロボットの開発への適用、テレプレゼンスロボットの開発への適用を実施し、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法の有効性を確認した。更に、テレプレゼンスロボットの開発においては、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を具体的人間中心設計プロセスとして適用し、具体的人間中心設計プロセスとしての有効性も確認した。

そして、本第6章で結言を述べた。

本論文では、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法を提案し、サービスロボットの開発において本開発手法の有効性を証明した。本開発手法が今後、サービスロボットのパーソナライゼーションの研究などに適用されれば、幸いである。更に、自動車などの産業分野においても、それぞれに最適なモデルベース開発ツールを適用することで、ユーザーの特徴と特性に基づくモデルベース開発手法が実現されれば、幸甚である。

謝辞

本論文をまとめるに当たって、懇切・丁寧なご指導およびご校閲を賜った首都大学東京大学院教授 山口亨先生、首都大学東京大学院助教 下川原英理先生に衷心より感謝の意を表します。更に、芝浦工業大学大学院教授 松日楽信人先生、首都大学東京大学院教授 田川憲男先生、同大学院教授 高間康史先生には、本論文をまとめるにあたり、ご指導ご鞭撻を賜りましたこと、心より感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり、貴重なご意見をいただきました首都大学東京特任研究員 藤本泰成先生に深く感謝の意を表します。

本論文において提案いたしました手法およびその応用研究は、首都大学東京によるものであり、既に卒業された首都大学東京大学院システムデザイン研究科および首都大学東京システムデザイン学部 山口研究室の皆様方に心から感謝いたします。

引用論文および参考文献

- [1] Y. Akimoto, T. Mizutome, Y. Ho, and T. Yamaguchi, "A Possibility of the Power Supply Leveling By Using Electric Vehicles As Storage Batteries," Proc. of the 22nd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2013), DVD, Art. No. 6563749, 6 pages, 2013.
- [2] Y. Akimoto, E. Sato-Shimokawara, and T. Yamaguchi, "A Peak Shift Simulation with Persona by Electric Power Supply Leveling with Electric Vehicle," Proc. of the 3rd International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (IWACIII 2013), CD, 6 pages, 2013.
- [3] Y. Akimoto, E. Sato-Shimokawara, Y. Fujimoto, and T. Yamaguchi, "Model-Based Simulation for Power Supply Leveling over a Wide Area by Electric Vehicles in Home Sector," Journal of Signal Processing, Vol. 18, No. 5, pp. 241-249, 2014.
- [4] Y. Akimoto, E. Sato-Shimokawara, Y. Fujimoto, and T. Yamaguchi, "An Effectiveness of Model-Based Development with User Model in Consideration of Human," Proc. of the 21st International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2014), Part III, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8836, pp.587-595, 2014.
- [5] Y. Akimoto, E. Sato-Shimokawara, Y. Fujimoto, and T. Yamaguchi, "Approach Function Study for Concierge-type Robot by Model-Based Development with User Model for Human-Centred Design," ROBOMECH Journal, Art. No.3:26, 13 pages, 2016.
- [6] Y. Akimoto, E. Sato-Shimokawara, Y. Fujimoto, and T. Yamaguchi, "A Model-Based System Development of a Walking Support Wheelchair Robot," Proc. of the 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014), pp. 613-618, 2014.
- [7] Y. Akimoto, E. Sato-Shimokawara, Y. Fujimoto, and T. Yamaguchi, "An Effectiveness of Model-Based Development with User Model in Developing a Wheelchair Robot with an Ability of Telepresence," Proc. of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2014), pp. 408-413, 2014.
- [8] Y. Akimoto, E. Sato-Shimokawara, Y. Fujimoto, and T. Yamaguchi, "Model-Based Development with User Model as Practical Process of HCD for Developing Robots," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 28, No. 4, pp. 579-590, 2016.
- [9] J. Pruitt and T. Adlin, "THE PERSONA LIFECY-CLE," Morgan Kaufmann, 2006.
- [10] 高井紳二 (編), "実践ペルソナ・マーケティング," 日本経営新聞出版社, 2014.
- [11] "ISO 9241-210:2010 - Ergonomics of human-system interaction -- Part 210: Human-centred design for interactive systems," International Standardization Organization, 2010. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=52075 [Accessed October 05, 2016]

-
- [12] S. Friedenthal, A. Moore, and R. Steiner, "A Practical Guide to SysML – The Systems Modeling Language," ELSEVIER Inc., 2009.
- [13] "モデルベースシステムズエンジニアリング導入の手引き," 独立行政法人 情報処理推進機構, 2013. <https://www.ipa.go.jp/files/000033609.pdf> [Accessed October 05, 2016]
- [14] 新 吉高, 鯨井 俊宏, 土井 敬司, 深谷 直彦, 原 隆浩, 西尾 章治郎, "組込みシステム向け HMI ツールのモデルベース開発," 一般社団法人電子情報通信学会, 電子情報通信学会技術研究報告. DE, データ工学, vol. 107, no. 131, pp. 1-6, 2007.
- [15] H. Arima, Y. Nakamura, and F. Kurokawa, "Development of a Home Energy System using model based development technology," Proc. of the 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2014), pp. 740-743, 2014.
- [16] dSPACE Japan (監修), "モデルベース開発 – モデリング、プラント・モデル、コントロール・モデル," 日経 BP 社, 2013.
- [17] "VERITAS Project – FP 7 IP Home," VERITAS Project –FP 7 IP, 2010. <http://veritas-project.eu/> [Accessed October 05, 2016]
- [18] D. Tzovaras and M. Dangelmeier, "VERITAS Final Project Report," VERITAS Project –FP 7 IP, 2010. http://veritas-project.eu/deliverables/Veritas_D4.1.13.pdf [Accessed October 05, 2016]
- [19] N. Kaklanis, P. Moschonas, K. Moustakas, and D. Tzovaras, "Virtual user models for the elderly and disabled for automatic simulated accessibility and ergonomics evaluation of designs," Universal Access in the Information Society, vol.12, no. 4, pp. 403-425, 2013.
- [20] M. Peissner, M. Dangelmaier, P. Biswas, Y. Mohamad, C. Jung, and N. Kaklanis, "White Paper: Virtual User Modelling Public Document," Cluster on Virtual User Modelling and Simulation, 2012. <http://vums.iti.gr/wp-content/uploads/2012/07/White-Paperv2.pdf> [Accessed October 05, 2016]
- [21] "AIST: About AIST," National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2001. http://www.aist.go.jp/aist_e/about_aist/index.html [Accessed December 27, 2015]
- [22] Y. Endo, M. Tada, and M. Mochimaru, "Hand Modeling and Motion Reconstruction for Individuals," International Journal of Automation Technology, vol. 8, no. 3, pp. 376-387, 2013.
- [23] "Digital Human for Human Centered Design," Digital Human Research Group, HIRI, AIST, 2003. <http://www.dh.aist.go.jp/en/research/centered/> [Accessed October 05, 2016]
- [24] N. Ando, T. Suehiro, K. Kitagaki, T. Kotoku, and W.K. Yoon, "RT-middleware: distributed component middleware for RT (robot technology)," Proc. of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), pp. 3555–3560, 2005.
- [25] G. Biggs, N. Ando, and T. Kotoku, "Open-source software in the RT-Middleware project,"

- Proc. of the 29th Annual Conference on Robotics Society of Japan, pp. 2Q1-1, 2011.
- [26] H. Yaguchi, T. Yoshikai, K. Okada, and M. Inaba, "RTMEXTender: Developer Support Tool for OpenRTM," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 24, no. 2, pp. 408-415, 2012.
- [27] K. Yamazaki, "Approach to Human Centered Design Innovation by Utilized Paper Prototyping," Proc. of the 1st International Conference on Human Centered Design (HCD 2009), *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5619, pp. 367-373, 2009.
- [28] H. Zempo, "Effective Practice of HCD by Usability Modeling and Standardization," Proc. of the 15th International Conference, HCI International 2013, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8016, pp. 393-399, 2013.
- [29] N. Hirasawa, "Challenges for Incorporating "Quality in Use" in Embedded System Development," Proc. of the 15th International Conference, HCI International 2013, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8018, pp. 467-474, 2013.
- [30] Y. Wakizaka, K. Tomioka, and H. Ikemoto, "Practice of Universal Design for a Front-Loading Washing Machine Based on the Human Centered Design Processes," Proc. of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction, 2005.
- [31] J. A. Michon, "A CRITICAL VIEW OF DRIVER BEHAVIOR MODELS: WHAT DO WE KNOW, WHAT SHOULD WE DO?," *Human behavior and traffic safety*, Springer US, pp. 485-524, 1985.
- [32] "平成 22 年度エネルギーに関する年次報告 第 1 部 エネルギーを巡る課題と対応," 経済産業省資源エネルギー庁, 2011.
http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2011pdf/whitepaper2011pdf_1.pdf
[Accessed October 05, 2016]
- [33] "2010 年 国民生活時間調査報告書," NHK 放送文化研究所(NHK), 2011.
<https://www.nhk.or.jp/bunken/summary/yoron/lifetime/pdf/110223.pdf>, 2011, [Accessed October 05, 2016]
- [34] "世帯類型別の住宅の状況," 国土交通省. <http://www.mlit.go.jp/common/000145916.pdf>
[Accessed October 05, 2016]
- [35] "平成 22 年国勢調査 人口等基本集計結果," 総務省, 2011.
<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/kihon1/pdf/gaiyou1.pdf> [Accessed October 05, 2016]
- [36] "平成 23 年 (2011) 人口動態統計 (確定数) の概況," 厚生労働省, 2012.
http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei11/dl/00_all.pdf [Accessed October 05, 2016]
- [37] "Specifications 日産リーフ 主要諸元," 日産自動車株式会社.
http://ev.nissan.co.jp/LEAF/PDF/leaf_specification.pdf [Accessed April 27, 2013]

-
- [38] “過去の電力使用実績データのダウンロード 2011/6/21 9:13 UPDATE,” 東京電力ホールディングス株式会社(TEPCO), 2011. <http://www.tepco.co.jp/forecast/html/images/juyo-2010.csv> [Accessed October 05, 2016]
- [39] “自動車利用と環境に関する世論調査,” 東京都生活文化局, p. 53, 2010. <http://www.metro.tokyo.jp/INET/CHOUSA/2010/05/DATA/60k5v106.pdf> [Accessed April 27, 2013]
- [40] “都道府県別・車種別自動車保有台数（軽自動車含む）平成 25 年 3 月末現在,” 一般財団法人自動車検査登録情報協会, 2013. <https://www.airia.or.jp/publish/file/e49tph0000000583-att/e49tph000000058a.pdf> [Accessed October 05, 2016]
- [41] “次世代自動車普及戦略,” 次世代自動車普及戦略検討会, 2009. <http://www.env.go.jp/air/report/h21-01/> [Accessed October 05, 2016]
- [42] “Customer Communication / Customer Support,” Tokyo Electric Power Company Holdings, Incorporated. <http://www.tepco.co.jp/en/customer/support/top-e.html> [Accessed October 05, 2016]
- [43] S.N. Woods, M.L. Walters, K.L. Koay, and K. Dautenhahn, “Methodological Issues in HRI: A Comparison of Live and Video-Based Methods in Robot to Human Approach Direction Trials,” Proc. of the 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN 2006), pp. 51-58, 2006.
- [44] D. Hennes, D. Claes, W. Meeussen, and K. Tuyls, “Multi-robot collision avoidance with localization uncertainty,” Proc. of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2012), vol. 1, pp. 147-154, 2012.
- [45] N. Pelechano, J.M. Allbeck, and N.I. Badler, “Controlling individual agents in high-density crowd simulation,” Proc. of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2007), pp. 99–108, 2007.
- [46] J.S. Guy, M.C. Lin, and D. Manocha, “Modeling collision avoidance behavior for virtual humans,” Proc. of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010), vol. 2, pp. 575-582, 2010.
- [47] K.W. Byington, and D.C. Schwebel, “Effects of mobile Internet use on college student pedestrian injury risk,” Elsevier, Accident Analysis & Prevention, vol. 51, pp.78-83, 2013.
- [48] K. Zsiga, G. Edelmayer, P. Rumeau, O. Péter, A. Tóth, and G. Fazekas, “Home care robot for socially supporting the elderly: Focus group studies in three European countries to screen user attitudes and requirements,” International Journal of Rehabilitation Research, vol. 36, no. 4, pp. 375-378, 2013.
- [49] M. Suzuki, K. Masamune, L. J. Ji, T. Dohi, H. Yano, “Development of a robot arm controlled by force sensors as a walking aid for elderly,” Robotica, vol. 16, no. 5, pp. 537-542, 1998.

-
- [50] A. Nakamura, Y. Fujimoto, O. Nitta, and T. Yamaguchi, "Intelligent Powered Wheelchair Assistance in Daily Use," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol.14, no.3, pp. 281-287, 2010.
- [51] S. Mitsumura, Y. Fujimoto, and T. Yamaguchi, "Development of a Walking Rehabilitation Robot based on Technique of Physical Therapist," *Proc. of the 2014 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'14)*, pp.629-632, 2014.