

博士學位論文

身体の接近を伴う握手動作を生成する
握手ロボットシステム

平成 27年 3 月

太田 俊介

岡山県立大学大学院
情報系工学研究科

身体の接近を伴う握手動作を生成する 握手ロボットシステム

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3
参考文献	6
第2章 握手動作モデル	9
2.1 緒言	9
2.2 握手応答動作モデル	10
2.2.1 握手応答動作の生成	10
2.2.2 握手応答動作モデルの評価実験	11
2.2.3 握手応答動作モデルの特徴	12
2.3 握手要求動作モデル	13
2.3.1 握手要求動作の生成	13
2.3.2 握手要求動作モデルの評価実験	16
2.3.3 握手要求動作モデルの特徴	16
2.4 手部追従動作	17
2.4.1 手部追従動作の生成	17
2.4.2 制御則の切り替え	18
2.5 考察	19
2.6 結言	19
参考文献	20
第3章 人間との握手接近動作を行う小型握手ロボットシステム	21
3.1 緒言	21

目次

3.2	小型握手ロボットシステム	22
3.3	画像処理とモデルを用いた手部位置認識	23
3.3.1	肌色抽出による手部認識	24
3.3.2	上肢モデル	24
3.3.3	画像処理と上肢モデルを用いた手部位置認識手法	25
3.4	握手接近動作の生成	26
3.5	手部位置認識手法の推定精度	27
3.6	小型握手ロボットを用いた官能評価実験	27
3.6.1	握手要求動作	28
3.6.2	握手応答動作	31
3.7	小型握手ロボット同士の握手システム	33
3.8	結言	35
	参考文献	36
第4章	人間の接近を伴う握手動作を生成する小型握手ロボットシステム	37
4.1	緒言	37
4.2	小型握手ロボットシステム	38
4.3	人間同士における握手応答動作解析	39
4.3.1	実験目的	39
4.3.2	実験方法	39
4.3.3	実験結果と考察	40
4.4	握手応答動作モデルの評価実験	44
4.4.1	実験目的	44
4.4.2	実験方法	44
4.4.3	実験結果	44
4.4.4	考察	48
4.5	人間同士における握手要求動作解析	49
4.5.1	実験目的	49
4.5.2	実験方法	49
4.5.3	実験結果	50
4.6	握手要求動作の開始タイミングの評価実験	52

目次

4.6.1	実験目的	52
4.6.2	実験方法	52
4.6.3	実験結果	53
4.6.4	考察	55
4.7	音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験	55
4.7.1	実験目的	55
4.7.2	実験方法	55
4.7.3	実験結果	56
4.7.4	考察	58
4.8	握手動作モデルの切替評価実験	58
4.8.1	実験目的	58
4.8.2	実験方法	58
4.8.3	実験結果および考察	60
4.9	結言	60
	参考文献	62
第5章	ロボットの接近を伴う握手動作を生成する小型握手ロボットシステム	63
5.1	緒言	63
5.2	移動握手ロボットシステム	64
5.3	人間同士における握手要求動作の解析	64
5.3.1	解析実験	65
5.3.2	実験結果	66
5.4	接近握手要求動作モデル	69
5.4.1	手部動作の生成	69
5.4.2	接近動作の生成	69
5.4.3	生成される握手要求動作	70
5.5	接近握手要求動作モデルの評価実験	71
5.5.1	接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験	71
5.5.2	音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験	75
5.6	人間同士における握手応答動作解析	78
5.6.1	解析実験	78

目次

5.6.2	実験結果	79
5.7	接近握手応答動作モデル	82
5.8	接近握手応答動作モデルの評価実験	83
5.8.1	握手応答動作の完了タイミングの評価実験	83
5.8.2	手部動作と音声挨拶の開始タイミングの評価実験	86
5.9	接近握手動作モデルの切替評価実験	89
5.9.1	実験目的	89
5.9.2	実験方法	89
5.9.3	考察	90
5.10	結言	91
	参考文献	92
第6章	結論	95
6.1	本研究のまとめ	95
6.2	今後の展望	98
	謝辞	101
	本論文に関する研究業績	103
	原著論文	103
	国際会議議事録	103
	口頭発表	104
	その他業績	105

第1章

序論

1.1 本研究の背景と目的

近年、少子高齢化にともない医療介護や生活支援などにおいて、ロボットに代表される知能機械の導入が期待されている。労働環境やさらには家庭においても、人とロボットが協調作業を行う機会が増えつつある。とくに、人間がロボットに対して、不安や不快感といった負のイメージを抱かせることは、協調して作業を行う場合には大きな妨げになる可能性がある。ロボットが人とともに協調作業を行うときには、初対面時でも人に受け入れられることが重要である。況してや、生活支援、遠隔コミュニケーション、医療介護を目的とした人のサポートを行うロボットは人との信頼関係を築くことが重要であり、利用者が心理的に受け入れられるものであることが必要である。また、人間とコンピュータのインタラクションは、人間同士のインタラクションと基本的に同じであると Reeves と Nass は示唆している [1.1]。そのため、ロボットと人間の関係においても、人間同士と同様のインタラクションを行うことが重要である。

人と人との対面コミュニケーションでは、人間は単に言葉だけでなくうなずきや身振り、手振りなどの身体動作でリズムを共有して、互いに引き込み合うことでコミュニケーションしている [1.2, 3]。非言語伝達によるコミュニケーション（ノンバーバルコミュニケーション）は話すことより早期にかつ無意識に習得されているため、人間の心理に大きく影響する。また、物理的な接触を伴うノンバーバルコミュニケーションは言葉では伝えることのできない肌の温もりを伝え、想いを伝え合うため、言葉より一步踏み込んだコミュニケーションとなる。人間は昔から、コミュニケーションの始まりとして接触を伴う握手を行う。握手はイスラムの習慣であり、武器を隠し持っていないことを示す目的で行ったことが由来とされている。現在では、世界中に握手を行う習慣が広まっており、信頼関係を築く方法の一つとなっている。さらに、Dolcos によると握手する事がプラスの効果を高め、相手に良い影響を与えることを示してい

第1章 序論

る [1.4]。さらに握手によって、脳内の中隔側坐核という報酬、快感などに重要な役割を果たすと考えられている箇所の大きな活動が示されている。握手はノンバーバルなコミュニケーションの一つであり、親愛の気持ちや喜びといった互いの好意を伝え合う方法として使われる。しかしながら、対面直後の人間同士では、互いの身体的リズムを同調させたコミュニケーションを行うことは難しい。そのため物理的接触を伴う握手によって、握手を求めるタイミング、握手に応じるタイミングなどから互いのリズムを同調させることで、信頼関係が持てるコミュニケーションの始まりとなる。これにより、円滑な信頼関係を築く助けとなり、コミュニケーションの開始を円滑に行える。握手においては、躊躇することなくスムーズに手を出して握手することが重要である。

人間とロボットとの握手動作に関する研究はこれまでにいくつか報告されている [1.5, 6, 7, 8]。これらの研究では、握手における手部同士を揺する動作に着目し、人間の揺すり動作の解析や同調制御による揺すり動作の生成を行っている。しかしながら、これらの研究では握手における接触後の揺すり動作に関する研究が行われており、互いに手部を差し出し、接近しながら接触するまでの動作に関しては、研究が行われていない。手部同士を接近させる動作は握手動作の導入部分であり、互いの身体的リズムを同調させる上では極めて重要である。こうしたことから、神代らによって人間の上肢と同じ大きさのロボットと人間とのコミュニケーションを行う握手ロボットシステムが開発されてきた [1.9, 10]。この研究では、人間同士の握手動作を解析し、握手を要求する側と要求された握手に応じる側が互いに静止した状態での、握手応答動作モデルと握手要求モデルを開発し、成人男性の大きさに合わせた握手ロボットを用いてその有効性を示している。

しかしながら、家庭用ロボットなどにおいては、ロボットは小型であることが望ましい。また、これらの研究は主に互いの手部が接近することなく届く状況を前提としている。しかしながら、一般的な握手動作では手の届く距離まで接近する必要があり、日常生活において多くの人間は、移動を伴いながら握手動作を行っている。ロボットが人間に対して接近する研究はこれまでに報告されている [1.11, 12, 13]。しかしながら、これらの研究は、主に非接触な場合におけるものであり、人間との身体的接触を伴う接近動作に関する研究はあまり行われていない。

ここで、人間とロボットとの接近を伴う握手動作の分類を表 1.1 に示す。表中の横の行は人間が静止しているか接近しているかを示し、縦の列はロボットが静止している

1.2 本論文の構成

表 1.1 接近を伴う握手動作の分類

		ロボット	
		静止	接近
人間	静止	要求 / 応答	要求 / 応答
	接近	要求 / 応答	要求 / 応答

か接近しているかを示している。表に示すように接近を伴う握手動作では、人間とロボットが互いに静止している場合、ロボットが静止しており人間がそれに接近する場合、人間が静止しておりロボットがそれに接近する場合、人間とロボットが互いに接近する場合の4つの状況が考えられる。本論文では、とくに人間とロボットが互いに静止している場合、ロボットが静止しており人間が接近する場合、および人間が静止しておりロボットが接近する場合の握手動作を対象とする。

そこで本論文では、まず小型ロボットにおいても先行研究で提案されている互いに静止状態において人間に握手を求める握手要求動作および人間が握手を求めてきた際に握手に応じる握手応答動作をそれぞれ生成する握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルが有効であることを示す。つぎに、人間、ロボットそれぞれが移動を伴う場合の握手を求める動作、および求められた握手に応じる動作を生成する動作モデルを提案する。さらに、提案モデルを適用した小型握手ロボットシステムを構築し、官能評価実験によりシステムの有効性を示す。

1.2 本論文の構成

本論文は本章を含め、全6章により構成されている。本章を除いた2章以降の概要を以下に述べる。

第2章では、先行研究によって有効性が示されている成人男性と同じサイズのロボットによる互いに握手可能な距離で静止した状態での、握手要求動作モデル、および握手応答動作モデルについて述べる。まず、ロボットから人間に対して握手を求める動

第1章 序論

作を生成するモデルである握手要求動作モデルについて述べ、官能評価実験の結果からその特徴について示す。次に、人間から求められた握手に応じる動作を生成するモデルである握手応答動作モデルについて述べ、官能評価実験の結果を示す。

第3章では、人間よりサイズの小さい小型握手ロボットシステムを開発している。また、この握手ロボットシステムには非接触により人の手部位置を推定するための画像処理による手部位置認識手法を適用している。そして、第2章で述べた2つのモデルを小型握手ロボットシステムに適用し、小型ロボットにおける握手要求動作モデル、および握手応答動作モデルの有効性を示している。

第4章では、接近してくる人間に対して、握手動作を生成する握手ロボットシステムを開発している。そして、人間が接近してきた場合における握手要求動作モデルおよび応答動作モデルを提案している。まず、人間同士における接近する人間に対する握手要求動作を計測し、その動作解析結果および第2章で述べた握手要求動作モデルを基に、人間が接近してきた場合における握手要求動作モデルを提案している。そして、開発したロボットシステムにモデルを適用し、官能評価実験により提案した握手要求動作モデルを適用した握手ロボットシステムの有効性を示している。つぎに、人間同士における接近する人間に対する握手応答動作を計測し、その動作解析結果および第2章で述べた握手応答動作モデルを基に、人間が接近してきた場合における握手応答動作モデルを提案している。そして、開発したロボットシステムにモデルを適用し、官能評価実験により提案した握手応答動作モデルを適用した握手ロボットシステムの有効性を示している。さらに、人間がロボットに対して接近する場合において、人間から先に握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合にはロボットから握手を求める動作を生成するために、人間の接近を伴う握手応答動作と握手要求動作を適切に切り替える握手ロボットシステムを構築している。そして、切り替え動作を適用した握手ロボットシステムを用いて、人間に好まれる握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを切り替えるタイミングについて官能評価により検証している。

第5章では、ロボットから人間に対して能動的に接近し、握手動作を生成する移動握手ロボットシステムを開発している。そして、ロボットから人間に対して接近する場合における握手要求動作モデルおよび応答動作モデルを提案している。まず、人間同士における接近する人間の握手要求動作を計測し、その動作解析結果および第2章で述べた握手要求動作モデルを基に、ロボットから人間に対して接近する場合にお

1.2 本論文の構成

る接近握手要求動作モデルを提案している。そして、開発したロボットシステムにモデルを適用し、官能評価実験により提案した接近握手要求動作モデルを適用した握手ロボットシステムの有効性を示している。つぎに、人間同士における接近する人間の握手応答動作を計測し、その動作解析結果を基に、ロボットから人間に対して接近する場合における接近握手応答動作モデルを提案している。そして、開発したロボットシステムにモデルを適用し、官能評価実験により提案した握手応答動作モデルを適用した握手ロボットシステムの有効性を示している。さらに、ロボットから人間に対して接近する場合において、人間から先に握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合にはロボットから握手を求める動作を生成するために、接近握手応答動作と接近握手要求動作を適切に切り替える移動握手ロボットシステムを構築している。そして、切り替え動作を適用した移動握手ロボットシステムを用いて、人間に好まれる接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを切り替えるタイミングについて官能評価により検証している。

第6章では、終章として本研究をまとめている。本研究の全体像として、目的、プロセス、方法、結果について述べ、これまでの研究を総括し、今後の展望を述べている。

参考文献

- [1.1] B. Reeves and C. Nass: The Media Equation: How people treat computers, television, and new media like real people and places; *University of Chicago Press*, (1996).
- [1.2] 渡辺富夫: 身体的コミュニケーションにおける引き込みと身体性—心が通う身体的コミュニケーションシステム E-COSMIC の開発を通して—; *ベビーサイエンス*, Vol.2, pp.4-12 (2003).
- [1.3] 長井弘志, 渡辺富夫, 山本倫也: うなずき反応を触覚提示する音声駆動型身体的引き込みシステムの開発; *ヒューマンインターフェイスシンポジウム 2003*, pp.525-528 (2003).
- [1.4] S. Dolcos, K. Sung, J.J. Argo, S. Flor-Henry and F. Dolcos: The power of a handshake neural correlates of evaluative judgments in observed social interactions; *Journal of cognitive neuroscience*, Vol.24, No.12, pp.2292-2305, (2012).
- [1.5] 國井康晴, Manorotkul Suradech, 橋本秀紀: 握手マシンの開発及びインターネットを介した遠隔握手; *電気学会論文誌*, Vol.117-C, No.5, pp.500-505, (1997).
- [1.6] T. Kasuga and M. Hashimoto: Human-robot handshaking using neural oscillators; *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3813-3818, (2005).
- [1.7] 大野慎吾, 稲葉毅: 人間とロボットの共創動作システムに関する研究: ロボットのインピーダンス調整による握手動作の誘導; *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 CD-ROM*, No.5-4, (2005).
- [1.8] T. Sato, M. Hashimoto and M. Tsukahara: Synchronization based control using online design of dynamics and its application to human-robot interaction; *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.652-657, (2007).

参考文献

- [1.9] 神代充, 渡辺富夫, 柴田論, 山本智規: 視線提示を考慮した握手要求動作モデルの開発; 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No.776, pp.1429-1440, (2011).
- [1.10] M. Jindai, T. Watanabe, S. Shibata and T. Yamamoto: Development of a handshake robot system based on a handshake approaching motion model; *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.20, No.4, pp.650-659, (2008).
- [1.11] Y. Hiroi and A. Ito: Effect of the size factor on psychological threat of a mobile robot moving toward human; *KANSEI Engineering International*, vol.8, no.1, pp.51-58, (2009).
- [1.12] 中島浩二, 佐藤陽彦: 移動体ロボットに対するヒトの個体距離; 人間工学, Vol.35, No.2, pp.87-95, (1999).
- [1.13] 山本智規, 柴田論, 神代充, 瀬濤喜信: 交差軌道上におけるロボットの人間衝突回避に関する研究 -シミュレーションによる心理評価-; 日本感性工学会論文誌, Vol.9, No.2, pp.361-367, (2010).

第2章

握手動作モデル

2.1 緒言

これまでに、神代らによって人間同士の握手動作が解析され、握手を要求する側と要求された握手に応じる側がお互いに静止した状態での、人間から求められた握手に応じる場合の動作を生成する握手応答動作モデル、およびロボットから人間に対して握手を求める場合の動作を生成する握手要求動作モデルが提案されている。さらに、平均的な成人男性のサイズで設計、製作されたロボットにおいて官能評価実験によりそれらのモデルの有効性が示されている [2.1, 2]。本章では、これら2つのモデルについて、その特徴を示す。

人間同士による握手動作の一例を図 2.1 に示す。図中の実線（青）は求める側の床面からの手部高さ、破線（赤）は応じる側の床面からの手部高さを示している。また、図中の「Handshake approaching motion」に示す範囲は、腕を鉛直下向きに伸ばした状態から互いに手を接近させ、互いの手を接触させた時点までの動作であり、「Shake-motion」に示す範囲は、互いの手を接触させた後、把持し揺するなどの動作である。本論文で扱う握手動作は、図 2.1 の「Handshake approaching motion」に示す人間が握手を行う際の互いの手を接触させた時点までの動作とする。

握手ロボットに適用するモデルの座標系を定義し、図 2.2 に示す。定義した座標系はロボットの右肩の中心を原点とする。また、ロボットの前方方向を X 軸正方向、ロボット左手方向を Y 軸正方向、ロボット上向き方向を Z 軸方向とし、X 軸周りの回転を Roll、Y 軸周りの回転を Pitch、Z 軸周りの回転を Yaw とする。

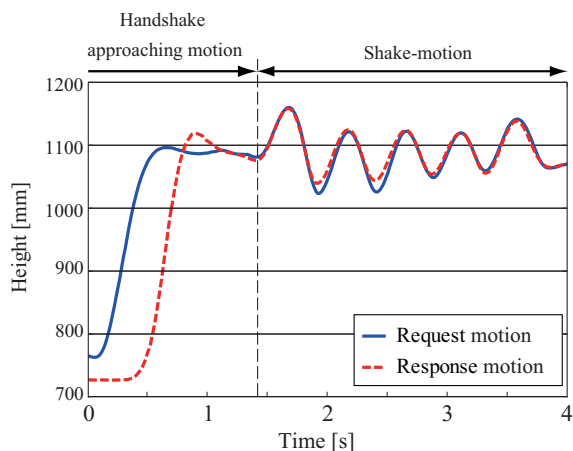


図 2.1 人間同士の軌跡 (z 軸)

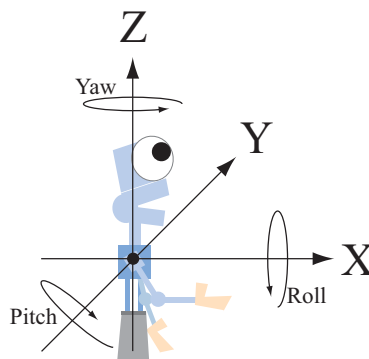


図 2.2 座標軸の説明

2.2 握手応答動作モデル

2.2.1 握手応答動作の生成

ここでは、人間から求められた握手に応じる動作を生成する握手応答動作モデル [2.1] について説明する。握手応答動作モデルは、人間の握手を求める右手動作に遅れを付加して模擬するものである。このモデルでは握手を求める側の動作軌道に2次遅れ要素とむだ時間を適用することで、握手に応じる動作を生成する。図 2.3 にモデルのコンセプトを示す。また、図 2.4 に 握手応答動作の速度波形の一例を示す。図中の横軸は求める側の動作が開始した点を0とした時間軸であり、縦軸は接線方向の速度を示している。また、図中の実線（黒）は求める側、点線は応じる側、実線（緑）は握手応答動作モデルによる速度パターンである。

X、Y、Z 軸の2次遅れ要素とむだ時間はそれぞれ式 (2.1)、式 (2.2)、式 (2.3) で表される伝達関数によって生成される。

$$G_x(s) = \frac{\omega_x^2}{s^2 + 2\zeta\omega_x s + \omega_x^2} e^{-\tau s} \quad (2.1)$$

$$G_y(s) = \frac{\omega_y^2}{s^2 + 2\zeta\omega_y s + \omega_y^2} e^{-\tau s} \quad (2.2)$$

$$G_z(s) = \frac{\omega_z^2}{s^2 + 2\zeta\omega_z s + \omega_z^2} e^{-\tau s} \quad (2.3)$$

2.2 握手応答動作モデル

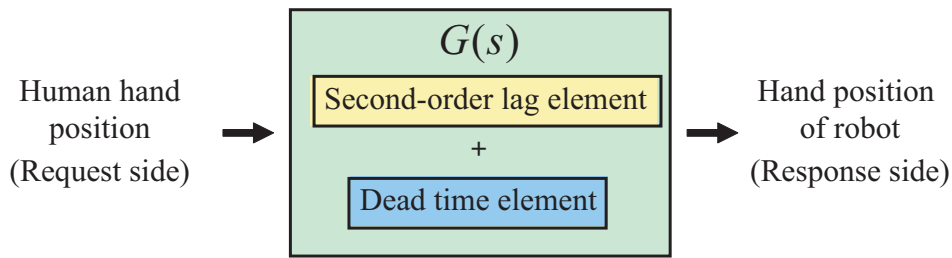


図 2.3 握手応答動作モデルのコンセプト

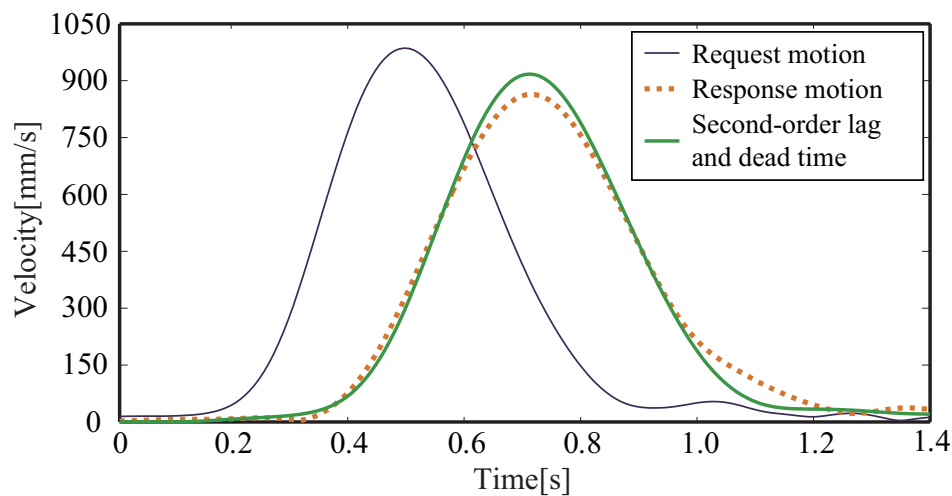


図 2.4 握手応答動作の一例

ただし ω は固有振動数、 ζ は減衰係数、 τ はむだ時間を表す。添え字は軸方向である。減衰係数 ζ は $1.0 > \zeta$ の場合は過制動となるため、動きが鈍くなりロボットの動きは不自然なものになってしまう。また $1.0 < \zeta$ の場合は不足制動となり、振動的な動作になってしまう。そこで、減衰係数 ζ は 1.0 となっている。

2.2.2 握手応答動作モデルの評価実験

本モデルの有効性を示すために音声挨拶を伴う場合と伴わない場合について官能評価実験が行われており、以下にその結果を示す。官能評価実験では、人間同士の動作解析から、(a) $\omega = 7.5$ による2次遅れ要素のみ、(b) $\omega = 15$ による2次遅れ要素のみ、(c) $\omega = 15$ による2次遅れ要素にむだ時間要素 ($\tau = 0.1$) を付加したモデルの3つのモードで行われている。実験では音声挨拶を伴う場合と伴わない場合について握手応

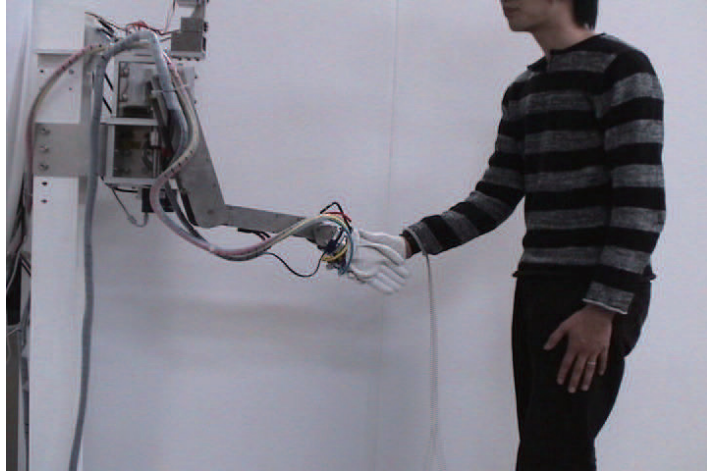


図 2.5 握手応答動作モデルの評価実験の様子

答動作モデルにより人間が求めてきた握手に応じる動作を生成している。実験風景を図 2.5 に示す。

実験の結果、音声挨拶を伴わない場合には、(b) $\omega = 15$ による 2 次遅れ要素のみ、(c) $\omega = 15$ による 2 次遅れ要素にむだ時間要素 ($\tau = 0.1$) を付加したモデル、(a) $\omega = 7.5$ による 2 次遅れ要素のみ、の順に好まれることが示されている。

また、音声挨拶を伴う場合には、(c) $\omega = 15$ による 2 次遅れ要素にむだ時間要素 ($\tau = 0.1$) を付加したモデル、(b) $\omega = 15$ による 2 次遅れ要素のみ、(a) $\omega = 7.5$ による 2 次遅れ要素のみ、の順に好まれることが示されている。

以上のことから、音声の有無によって人間に好まれるロボットの動作特性が異なることが示された。

2.2.3 握手応答動作モデルの特徴

人間同士の握手動作解析および評価実験により、握手応答動作モデルの特徴について示す。手部動作については、音声挨拶を伴わない場合においては、むだ時間を併用しない $\omega = 15$ による 2 次遅れ要素を用いた動作が好まれた。これは、人間同士が握手動作を行う際に多くの人間が行っている動作と同様の動作である。また、音声挨拶を伴う場合においては、人間同士の握手動作の場合では、音声挨拶は手部動作と同時もしくは手部動作より遅く発声している。しかしながら、人間とロボットの場合では $\omega = 15$ の 2 次遅れ要素に $\tau = 0.1$ によるむだ時間要素を付加した動作、すなわち音声

挨拶が手部動作より早く発声する握手応答動作が好まれる結果となっている。

2.3 握手要求動作モデル

2.3.1 握手要求動作の生成

ここでは、ロボットから人間に対して握手を求める握手要求動作モデル [2.2] について説明する。ロボットが人間に接近して動作を行う場合、速度、加速度といった運動特性が人間心理に大きく関係していると考えられる。とくに、池浦ら [2.3] は突然の加速度変化に対して人間が良い感情を抱かないことを報告している。そこで、人間に接近する運動においては、ロボットはとくに滑らかな運動を生成する必要がある。

一方、人間上肢の2点間運動は式 (2.4) に示される評価関数を最小にする躍度最小モデルにより表現することが可能であることが報告されている [2.4]。ただし、 T_f を動作時間、 (x,y) を手先位置とする。躍度最小モデルで再現された位置および速度の変化を図 2.6 に示す。図 2.6 に示されるように、位置の変化は非常に滑らかなものとなり、速度の変化についても左右対称の滑らかな釣り鐘型となる。そのため、躍度最小モデルを用いることで、人間に好まれるロボットの軌道が生成されると期待される。そこで握手要求動作モデルは、躍度最小モデルに基づいて肩と肘関節の動作を近似することで握手要求動作を生成する。

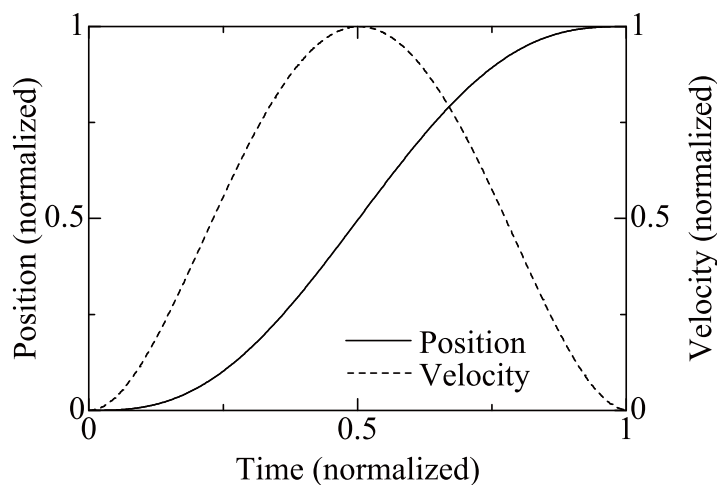


図 2.6 躍度最小モデル

$$C = \frac{1}{2} \int_0^{T_f} \left(\left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 \right) dt \quad (2.4)$$

握手要求動作モデルでは、肩関節2軸と肘関節の回転速度パターンを2つの躍度最小モデルを結合して握手軌道を近似することで、人間に対して握手を求める手部軌道をロボットに生成させる。

そのため、この握手要求動作モデルにより手部の動作軌道を生成するためには、肩(2軸)と肘(1軸)の角速度が必要となる。図2.7に人間同士の握手動作における関節角速度の速度パターンの一例を示す。図の横軸は握手要求動作の開始を0として時間であり、縦軸は関節の角速度を示している。また、図中の赤線は肩のxz平面における角速度、青線は肩のxy平面における角速度、緑線は肘の角速度をそれぞれ示している。また、表2.1に先行研究によって得られた人間の握手動作における角速度の平均を示す。

図2.8は握手要求動作モデルにおける速度パターンの結合の一例を示したものである。躍度最小モデルでの時刻 s における速度 $V(s)$ は、式(2.5)より求められる最高速度 v_{max} と動作時間 t_f から式(2.6)で表される。ただし r_0 は始点角度、 r_f は終点角度

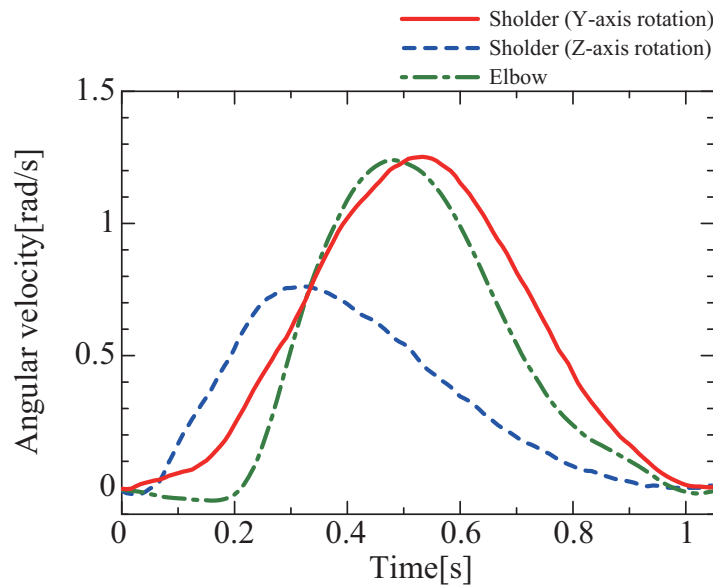


図 2.7 人間の関節角速度パターンの一例

2.3 握手要求動作モデル

表 2.1 角速度に関する平均値

	動作時間 (s)	最大角速度 (rad/s)	ピーク位置 (%)
肩(xz平面)	1.08	1.42	46
肩(xy平面)	1.00	0.81	28
肘(xz平面)	0.80	1.89	49

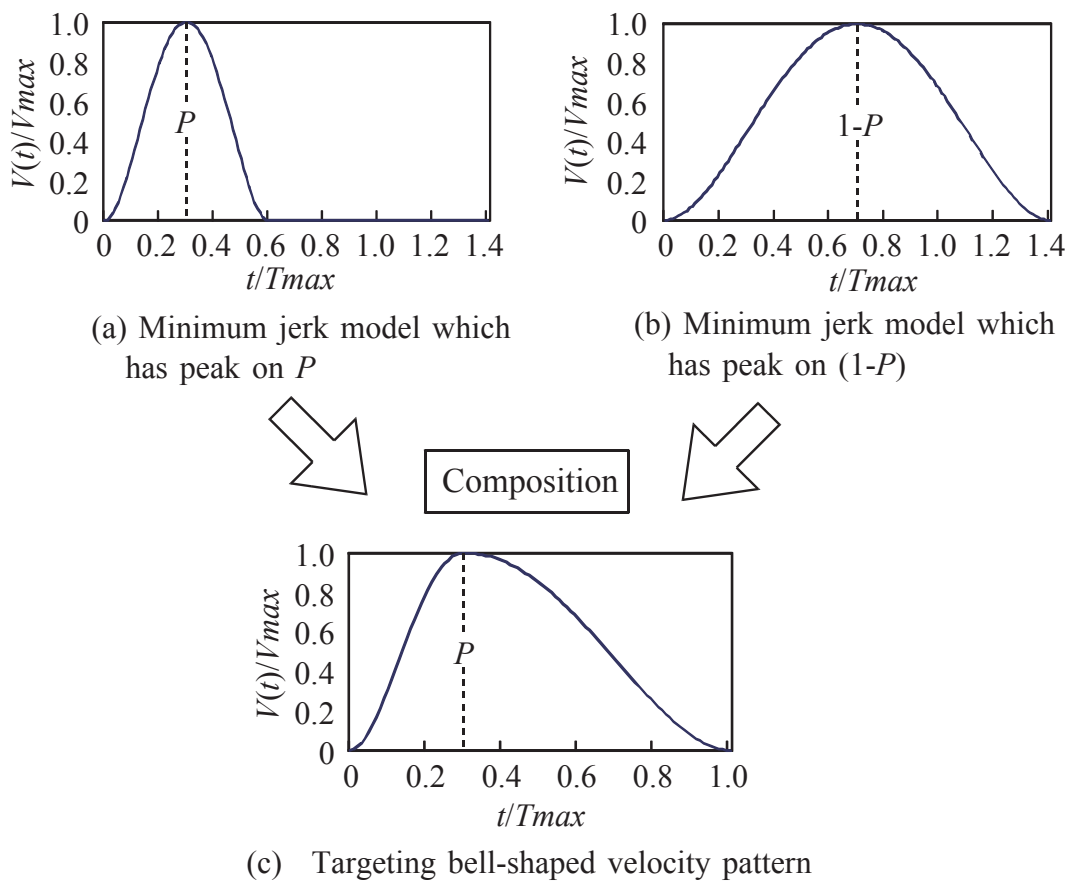


図 2.8 握手要求動作モデルにおける速度パターン

である。この躍度最小モデルでは、図 2.8(a) に示すように速度パターンが左右対称の釣鐘型となる。そのため図 2.7 に示すように xz 平面における肩、肘のピーク位置は動作時間の 50% 付近に分布しており式 (2.6) により近似が行える。

$$v_{max} = \frac{15}{8t_f}(r_f - r_0) \quad (2.5)$$

$$V(s) = v_{max} \frac{16}{t_f^4}(s^4 - 2t_f s^3 + t_f^2 s^2) \quad (2.6)$$

しかしながら、肩の xy 平面方向のピーク位置は表 2.1 に示されているように 28% の位置にあり、そのままでは近似が行えない。そこで、図 2.8(a)、(b) に示す、2 つの動作時間の異なる躍度最小モデルを同図 (c) で示すように結合することで近似を行う。

式 (2.5)、(2.6) を用いることにより、始点と終点の座標、動作時間及び腕の長さを与えることで握手の軌道が生成される。ただし、動作時間は人間どうしの動作解析から xz 平面の肩を t_u 、肘を $0.8 \times t_u$ 、xy 平面の肩を $0.9 \times t_u$ とし、動作完了時間を一致させた。

2.3.2 握手要求動作モデルの評価実験

本モデルの有効性を示すために官能評価実験が行われており、以下にその結果を示す。官能評価実験には、人間とロボットの挨拶インタラクションにおいて動作が音声挨拶より 0.3 秒早く開始することが有効であると示されていることから、(a) 音声挨拶が手部動作より 0.3 秒早く開始、(b) 音声挨拶と手部動作が同時に開始、(c) 手部動作が音声挨拶より 0.3 秒早く開始、の 3 つのモードを用意した。実験風景を図 2.9 に示す。

実験の結果、(a) 音声挨拶が手部動作より 0.3 秒早く開始、次いで (b) 音声挨拶と手部動作が同時に開始、(c) 手部動作が音声挨拶より 0.3 秒早く開始、の順に好まれることが示されている。

2.3.3 握手要求動作モデルの特徴

評価実験の結果から、握手要求動作モデルの特徴について示す。手部動作については、2 つの躍度最小モデルの結合により人間と同様の関節角速度パターンを生成する動作が好まれる。音声挨拶においては、人間同士の握手動作の場合では、音声挨拶は手

2.4 手部追従動作

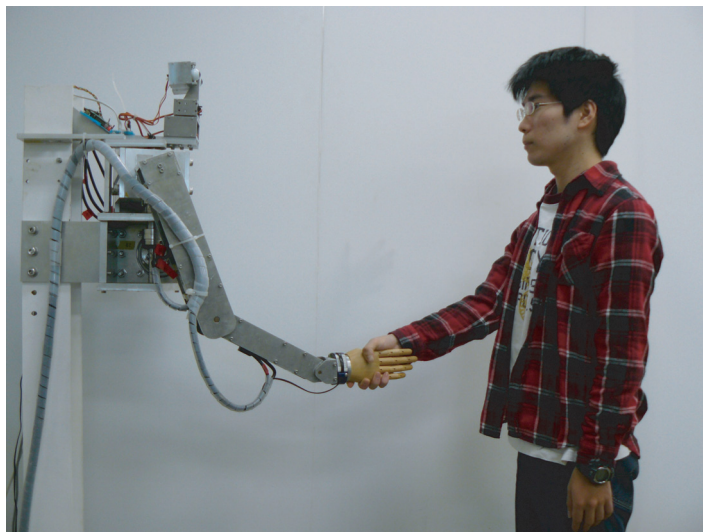


図 2.9 握手要求動作モデルの評価実験の様子

部動作と同時か手部動作より遅く発声している。しかしながら、このモデルによる人間とロボットとの握手動作では音声挨拶が手部動作より早く発声することが安心感や丁寧さを増し、人間に好まれる動作となることが示されている。

2.4 手部追従動作

2.4.1 手部追従動作の生成

握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルのみにより生成されるロボットの手部を人間に差し出す動作（差し出し動作）では、人間の手部動作に同調した動作を生成することは困難である。そこで、差し出し動作に人間の手部位置にロボットの手部を追従させる手部追従動作を併用する。手部追従動作は、ロボットの座標系において、人間の手部位置を目標位置として動作するものである。この動作は人間の手部を目指し直線的に移動するため、ロボット起動時の間隔 450mm を短時間で移動させなくてはならず、滑らかな動作を生成できない。また、ただ目標に向かう動作なので、人間らしい動きとは程遠いものである。しかしながら、言い換えれば確実に目的としている人間の手部にまで移動できるという利点がある。したがって、目標としている人間の手部付近にまで移動後に、信頼関係を築くためにしっかりとした握手をするために、

最後の調整としてこの追従動作を採用した。この追従動作は、人間の手部位置 $\mathbf{H}(t)$ ($H_x(t), H_y(t), H_z(t)$) をロボットの目標位置として制御するものである。

2.4.2 制御則の切り替え

差し出し動作と手部追従動作は、人間の手部の移動距離、および人間の手部とロボットのエンドエフェクタとの距離に応じて、それぞれの重み係数を変更することで、人間心理に受け入れられる差し出し動作を行いつつ、人間の手部位置での握手を実現する。ロボットの現在位置を $\mathbf{R}(t)$ ($R_x(t), R_y(t), R_z(t)$)、目標位置を $\mathbf{P}(t)$ ($P_x(t), P_y(t), P_z(t)$) とし、 X 軸方向の重み係数 $\alpha_x(t)$ を (2.7) 式～(2.9) 式により算出し、目標位置 $P_x(t)$ を (2.10) 式により算出する。これにより、ロボットは完全に追従動作に移行することがなく、人間がロボットのエンドエフェクタを把持する際に微妙な調節を可能としている。同様に Y, Z 軸に関して、それぞれに重み係数 $\alpha_y(t), \alpha_z(t)$ を用いて算出する。ただし重み係数 $\alpha_n(t)$ (ただし $n = x, y, z$) の最大値は 0.8 とした。

$$\alpha_{x_a}(t) = 1 - \sqrt{\frac{D_1 - M_x(t)}{D_1}} \quad (2.7)$$

$$\alpha_{x_b}(t) = \begin{cases} 0 & : (D_2 - \delta_x(t)) \leq 0 \\ 1 - \sqrt{1 - \frac{D_2 - \delta_x(t)}{D_2}} & : (D_2 - \delta_x(t)) > 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

ただし、 $\delta_x(t) = |H_x(t) - R_x(t)|$ とする。

D_1, D_2 は任意の定数とする。

$$\alpha_x(t) = \begin{cases} \alpha_{x_a}(t) & : (\alpha_{x_a}(t) \geq \alpha_{x_b}(t)) \\ \alpha_{x_b}(t) & : (\alpha_{x_a}(t) < \alpha_{x_b}(t)) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$P_x(t) = (1 - \alpha_x(t)) \cdot F_x(t) + \alpha_x(t) \cdot H_x(t) \quad (2.10)$$

2.5 考察

表 2.2 人間-人間、人間-ロボットの音声挨拶の特徴

	応答	要求
人間-人間	手部と同時か手部より遅く発声	手部と同時か手部より遅く発声
人間-ロボット	手部より早く発声	手部より早く発声

2.5 考察

以上の結果から、音声挨拶を伴う場合における手部動作と音声挨拶の特徴を表 2.2 にして示す。表 2.2 から、人間同士の握手動作（人間-人間）においては応答、要求にかかわらず音声挨拶の発声が手部動作と同時か手部動作より遅く発声している。人間とロボットの握手動作（人間-ロボット）においては応答、要求にかかわらず手部の動作より早く音声挨拶を発声する動作が人間に好まれる。

2.6 結言

本章では神代らによって提案された、人間から求められた握手に応じる動作を生成する握手応答動作モデル、およびロボットから人間に対して握手を求める握手要求動作モデルの2つのモデルについて述べた。さらに、2つのモデルについて、それぞれ官能評価実験の結果からその特徴について示した。

参考文献

- [2.1] M. Jindai, T. Watanabe, S. Shibata and T. Yamamoto: Development of a handshake robot system based on a handshake approaching motion model; *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.20, No.4, pp.650-659, (2008).
- [2.2] 神代充, 渡辺富夫, 柴田論, 山本智規: 視線提示を考慮した握手要求動作モデルの開発; 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No.776, pp.1429-1440, (2011).
- [2.3] 池浦良淳, 大塚英樹, 猪岡光: 皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する研究; 日本人間工学会誌, Vol.31, No.5, pp.355-358, (1995).
- [2.4] T. Flash and N. Hogan: The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model; *Journal of Neurosciences*, Vol.5, No.7, pp.1688-1703, (1985).

第3章

人間との握手接近動作を行う 小型握手ロボットシステム

3.1 緒言

2章では、ロボットの握手動作を生成するモデルとして、先行研究によって提案された握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルを示した。このモデルは平均的な成人男性のサイズで設計、製作された握手ロボットシステムによって有効性が示されている。一方、コミュニケーションロボットに代表されるようにロボットを物理的な情報メディアとして、遠隔コミュニケーション支援や情報発信支援に用いることが求められている。このようなロボットを家庭内で利用することが考えられる。ロボットを家庭内で用いる場合、ロボットは小型であることが望まれるが、その身体性を活かし、人間と積極的に身体的インタラクションを行う必要がある。とくに、人間との身体的インタラクションを促進させるために、人間との自然な握手動作を実現させることが重要である。

また、ロボットに人間との自然な握手動作を実現するためには、人間手部の3次元位置を非接触で認識することが望まれる。非接触による3次元位置の認識手法の一つに複数台のカメラを用いたステレオ法 [3.1] がある。この手法では、複数台のカメラからの入力画像それぞれから3次元位置を推定したい点（同一点）を認識する必要がある。そのため、この手法を手部の手先位置の推定に適用した場合には、手部の姿勢が変化することによって手先を認識することが難しくなり、認識精度が低下することがある。一方、神代らは画像処理に3次元モデルを併用した3次元対象物の認識手法を提案している [3.2]。この手法では、3次元モデルを用いて入力画像内での対象物の見え方を予測するものである。そのため、この手法を応用して人間の上肢モデルと画像処理とを併用することで、手部の姿勢が変化する場合にも対応できると期待される。

そこで本章では、2章で示した握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを用いて人

間との握手接近動作を生成する小型握手ロボットシステムを開発する。この小型握手ロボットシステムでは人間の上肢モデルと画像処理とを併用した手部位置認識手法を適用し、非接触により人間の手部位置を認識することを可能にしている。この小型握手ロボットシステムを用いて、人間に握手を求めると同時に手を差し出す握手要求動作と人間に握手を求められたときにそれに応じる握手応答動作を生成させる。さらに、2台の小型握手ロボットを用いて、ロボット同士による握手接近動作を生成させる。そして、これらの握手接近動作を官能評価実験により評価し、小型握手ロボットシステムの有効性を示す。

3.2 小型握手ロボットシステム

図3.1に開発した小型握手ロボットシステムを示す。ロボットアームは平均的な成人男性の大きさ [3.3] を基準として、その大きさの約 1/4 となるように設計、製作を行った。小型ロボットには5自由度を有するアームを双腕で備えている。ロボットの座標系を図3.1中に示し、その原点は小型握手ロボットの右肩部の中心としている。開発した握手ロボットでは、右腕の4自由度（肩（2軸）、肘、手首）を用いて握手動作を生成するものとした。

人間と小型握手ロボットとの距離はレーザ式測域センサを用いて計測し、人間手部の3次元位置は後述する画像処理と上肢モデルを用いた手部位置認識手法により計測する。そして、それらを基にロボットのエンドエフェクタの目標位置を算出する。この算出された目標位置から、逆運動計算を用いて各関節の角度を求め、シリアルサーボ（近藤科学社製）を用いて位置制御される。ロボットのサンプリング時間は10msであり、ロボットは目標軌道を正確に追従することが可能である。

握手ロボットの初期位置は、ある程度の自由度を得るために、上腕、前腕を鉛直下向きに伸ばした状態から手首位置を上方に10mm移動させた姿勢とした。ただし、手部角度は前腕の角度と一致させた。

3.3 画像処理とモデルを用いた手部位置認識

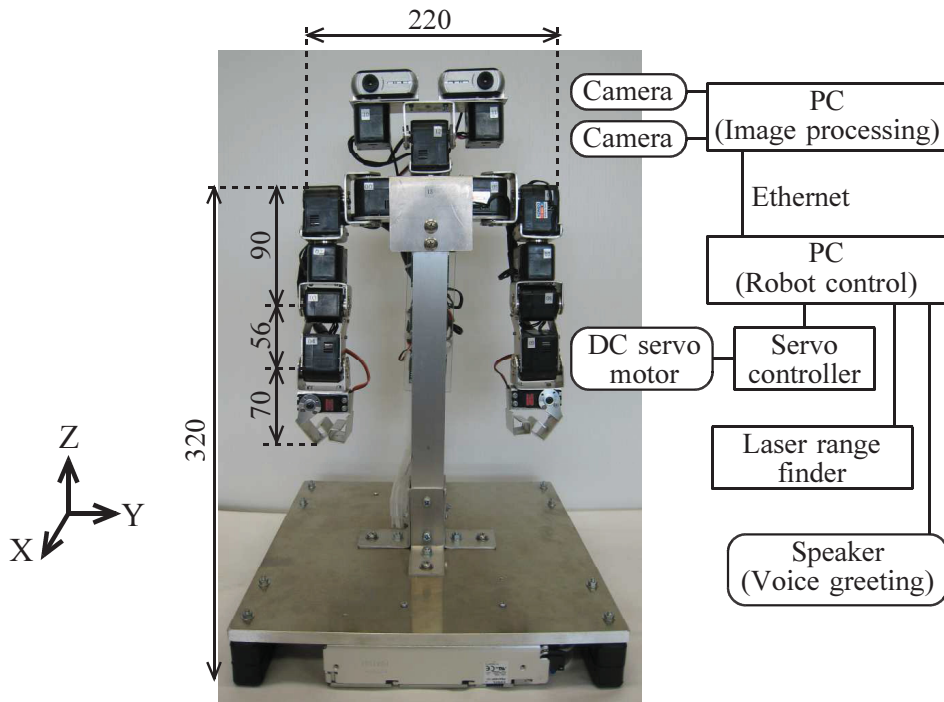


図 3.1 小型握手ロボットシステム

3.3 画像処理とモデルを用いた手部位置認識

画像処理のみを用いた3次元位置の認識には2台のカメラによるステレオ法 [3.1] が一般的である。この手法では、2台のカメラの入力画像それぞれから3次元位置を推定する点を正確に認識する必要がある。一方で、カメラの入力画像から人間の手部を抽出する手法として肌色抽出が多用される。しかしながら、この肌色抽出では手部の形状を正確に得ることが難しく、異なる画像から同一点を推定することが困難となる。また、手部の姿勢によっては、同一点がカメラから入力されない場合があり、推定精度が著しく低下する場合がある。

そこで本研究では、画像処理に人間上肢の3次元モデルを併用した手部位置認識手法を提案する。この手法では、人間の上肢モデルを用いてカメラの入力画像内での手部の見え方を予測することで、入力画像内での手部形状を予測し、その3次元位置の推定を行う。

3.3.1 肌色抽出による手部認識

入力画像からの手部領域の抽出には、色空間による肌色抽出を用いる。肌色抽出には、環境によって照明条件が変化することを考慮して、色情報が輝度と色相に分離される YCrCb と、肌色抽出に有効である修正 HSV[3.4] を併用する。RGB から YCrCb への変換を式 (3.1) に示す。Y は輝度、Cr は赤の差分、Cb は青の差分を表す。また、修正 HSV は、HSV の低輝度値における変換誤差の減少を目的として提案された色空間であり、RGB から修正 HSV への変換を式 (3.2) に示す。Q_c は修正彩度、H は色相、I は強度を表す。

$$\begin{cases} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ C_r = 0.500R - 0.419G - 0.081B \\ C_b = -0.169R - 0.331G + 0.500B \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} Q_c = \sqrt{\left(\frac{2R - G - B}{2}\right)^2 + 3\left(\frac{G - B}{2}\right)^2} \\ H = \cos^{-1}\left(\frac{2R - G - B}{2Q_c}\right) \\ I = \frac{R + G + B}{3} \end{cases} \quad (3.2)$$

YCrCb において肌色領域を抽出するための閾値を YCrCb 閾値として、予め定めておく。同様に修正 HSV についても肌色領域を抽出するための HSV 閾値を定める。ただし HSV 閾値は照明条件の変化にロバストに対応させるために、YCrCb の輝度 Y を用いて線形に補正している。肌色抽出としては、入力画像を YCrCb と修正 HSV それぞれに変換し、YCrCb 閾値と HSV 閾値を用いて共に抽出された領域のみを最終的な肌色領域とする。このように2種類の色空間を併用することで、ノイズに対してロバストな肌色抽出を可能にしている。

3.3.2 上肢モデル

人間の上肢モデルとして、図 3.2 に示すように、長袖用、半袖用、およびその中間の袖の長さの3つのモデルを用意する。そして、人間の握手動作を開始する前の状態

3.3 画像処理とモデルを用いた手部位置認識

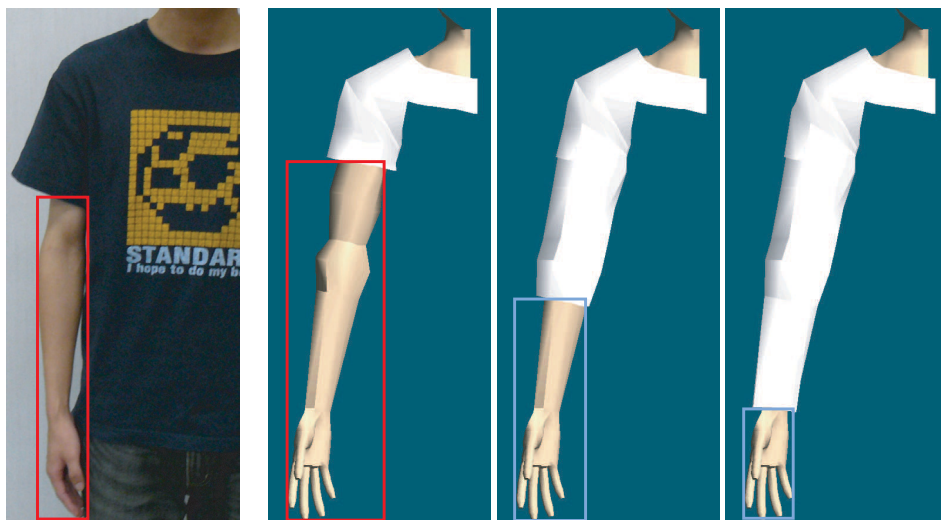


図 3.2 上肢モデル

(上肢を自然に降ろした状態)において肌色抽出を行い、抽出領域から得られる矩形の縦横比を求める。同様に、3つのモデルに対して縦横比を求め、入力画像より求めた比と最も一致するモデルを以降の手部位置認識に用いるモデルとして採用する。次に2台のカメラを用いて抽出領域から手部のおおまかな3次元位置を推定し、その位置に上肢モデルの手部位置を一致させることでモデルの肩位置を決定する。この肩位置は、モデルの姿勢を推定する際に用いるものとする。

3.3.3 画像処理と上肢モデルを用いた手部位置認識手法

提案する手部位置認識手法の処理手順を図 3.3 に示す。まず、2台のカメラから入力された画像(カメラ画像:図 3.3(a))について肌色抽出を行い、手部を抽出する。抽出された手部について、図 3.3(b)に示されるように、手部の先端位置を推定する。そして、2台のカメラ画像から得られた2点の手部の先端位置から、三角測量法を用いて手部の大まかな3次元位置を求める。この求められた3次元位置に、モデルの手部位置を一致させることでモデルの姿勢を決定し、カメラ画像と同一形態の画像(モデル画像)を生成する。図 3.3(c)は図 3.3(b)から求められた3次元位置を基に生成したモデル画像である。このモデル画像から、カメラ画像と同様にして手部を抽出し、その矩形を求める。さらに、図 3.3(d)に示すように、モデルを用いてモデル画像での中指の指先位置(手先位置)を算出する。ここで、矩形の左下を基準点とし、縦、横それぞれの

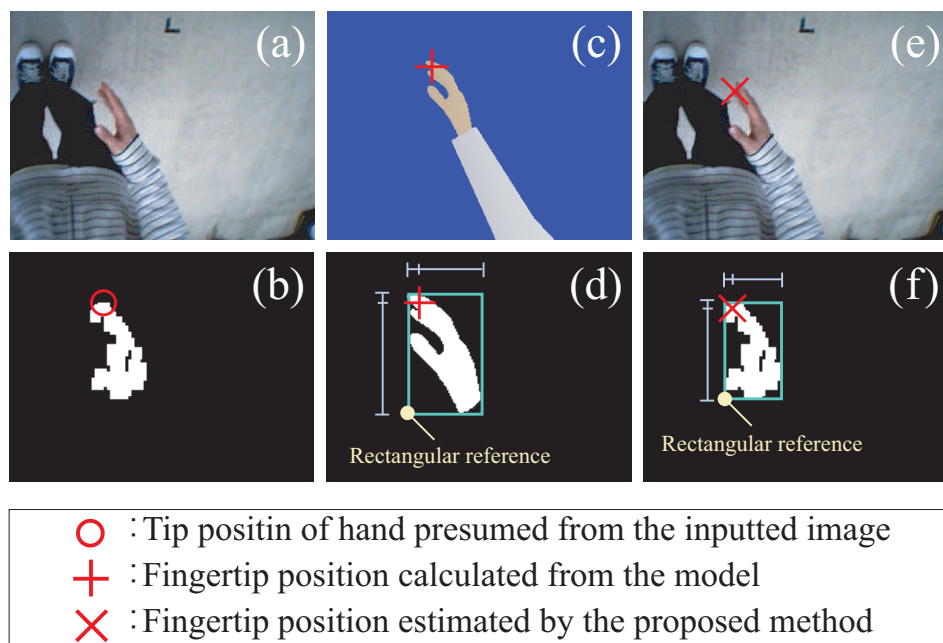


図 3.3 手部位置の認識

方向において、矩形の辺の長さに対する手先位置から基準点までの距離の比が、カメラ画像におけるその比と一致するように、図 3.3(f) に示めされるようにカメラ画像 (図 3.3(e)) での手先位置を求める。このようにして 2 台のカメラ画像での手先位置を求め、その 3 次元位置を推定する。

3.4 握手接近動作の生成

開発する小型握手ロボットシステムでは、人間に握手を求める握手要求動作と人間に握手を求められた場合にそれに応じる握手応答動作を生成する。握手要求動作と握手応答動作の生成にはそれぞれ 2 章で示した握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを適用する。

3.5 手部位置認識手法の推定精度

表 3.1 手部位置認識手法の推定精度

		(mm)	
		Proposed method	Only image processing
Maximum error	X axis	3.38	11.82
	Y axis	2.18	6.25
	Z axis	3.42	12.13
Mean and Standard deviation	X axis	1.86 (± 1.01)	7.10 (± 3.42)
	Y axis	1.00 (± 0.63)	3.87 (± 1.61)
	Z axis	2.20 (± 0.83)	8.28 (± 2.42)

3.5 手部位置認識手法の推定精度

表 3.1 に提案する手部位置認識手法における誤差の最大値、平均値、および標準偏差を示す。また、この表には上肢モデルを用いず画像処理のみにより手部位置を認識した場合の誤差も示している。この手法では肌色抽出により抽出された手部の先端を手先位置としている。これらの誤差は磁気センサ (POLHEMUS 社製) を用いて外部から手先位置を計測することで推定した。表より全ての軸において最大誤差が 3.5mm 以下であり、画像処理のみを用いた手法に比べて推定精度が向上していることが分かる。また、提案する手部位置認識手法の推定時間は 40ms(25frame/s) であった。さらに、この手部位置認識手法を小型握手ロボットシステムに適用することで、非接触による手部位置計測により人間との握手動作を生成することが可能であった。これらのことから提案する手部位置認識手法の有効性が示された。

3.6 小型握手ロボットを用いた官能評価実験

小型握手ロボットシステムによる人間との握手接近動作の有効性を確認するために官能評価実験を行った。実験では握手を求めるように手部を差し出す握手要求動作と人間に握手を求められた場合にそれに応じる握手応答動作を小型握手ロボットシステムに生成させ、その生成された動作を被験者に官能評価させた。実験風景を図 3.4 に示す。



図 3.4 実験風景

3.6.1 握手要求動作

提案する握手要求動作モデルにより生成される手部動作はロボットから動作を開始するため、手部動作と音声挨拶のタイミングにより人間に与える印象が変化すると考えられる。そこで、人間に好まれるロボットの手部動作と音声挨拶のタイミングについて官能評価実験により検討した。

実験方法

人間同士の握手動作解析の結果においては、多くの人間が音声挨拶と手部動作を同時に開始していることが示されている [3.5]。また、人間とロボットとのお辞儀を伴った挨拶インタラクションにおいては、音声挨拶に対してお辞儀動作を 0.3 秒早く開始することで、丁寧さが増すなど人間に好まれることが報告されている [3.6]。そのため、実験では手部動作と音声挨拶を開始するタイミングを変化させた 3 つのモードを用意した。3 つのモードは (a) 音声挨拶が手部動作より 0.3 秒早く開始するモード、(b) 音声挨拶と手部動作が同時に開始するモード、および (c) 音声挨拶が手部動作より 0.3 秒遅く開始するモードである。音声挨拶には「よろしく」を用いた。被験者には予め、ロボットが求めてきた握手に応じるよう指示した。実験では、一対比較を行い、その後、7 段階評価を行った。

一対比較は順序効果を考慮して、前後を入れ替えたすべての組み合わせ (計 6 回) に

3.6 小型握手ロボットを用いた官能評価実験

ついて行い、総合的にどちらのモードによる握手動作が良かったかについて答えさせた。また、7段階評価は「握手しやすさ」、「安心感」、「速さ（感じの良さ）」、「丁寧」の4項目について7段階（中立0）により評価させ、モードの提示順序はランダムとした。被験者は年齢20~24歳の右利きの健常な男女学生30人である。

実験結果

一対比較の結果を表3.2に示す。表中の数字は各行のモードの勝数、つまり各行のモードを選択した人数を表している。さらに、一対比較に基づく評価を一義的に定めるために、式(3.3)により求められるBradley-Terryモデル[3.7]を用いて各モードの好ましき π を最尤推定した。なお、モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましき π の妥当性が保証された。

$$P_{ij} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} \quad (3.3)$$

(π_i : i の強さの量、 P_{ij} : i が j に勝つ確率)

ただし、 $\sum_i \pi_i = Const. (= Total : 100)$

Bradley-Terryモデルにより得られた好ましき π を図3.5に示す。図よりモード(b)が最も高く評価されているもののモード(a)との間にはほとんど差は見られなかった。このことから、モード(a)と(b)が高く評価されていることが分かる。7段階評価の結果として、平均値と標準偏差、およびFriedmanの分散分析法による有意差を図3.6に示す。図より「安心感」の項目において、モード(a)と(b)がモード(c)より高く評価され、その間には有意水準5%の差が認められた。しかしながら、モード(a)と(b)の間には全ての項目において有意な差が見られなかった。また、このモード(a)と(b)で

表 3.2 握手要求動作モデルの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)	/	32	46	78
(b)	28	/	52	80
(c)	14	8	/	22

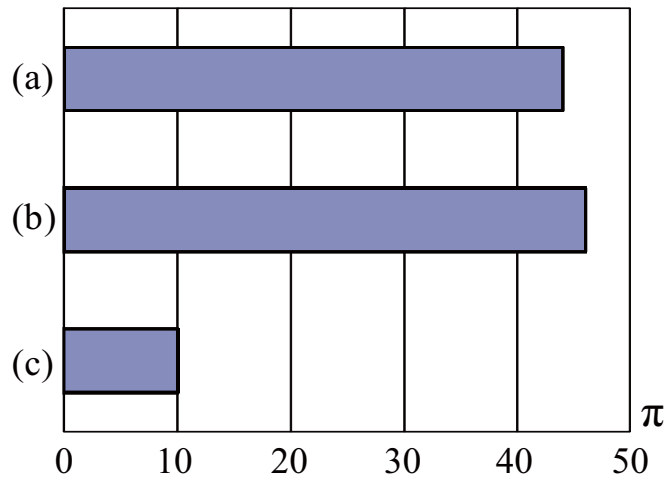


図 3.5 握手要求動作モデルの評価実験における好ましさ

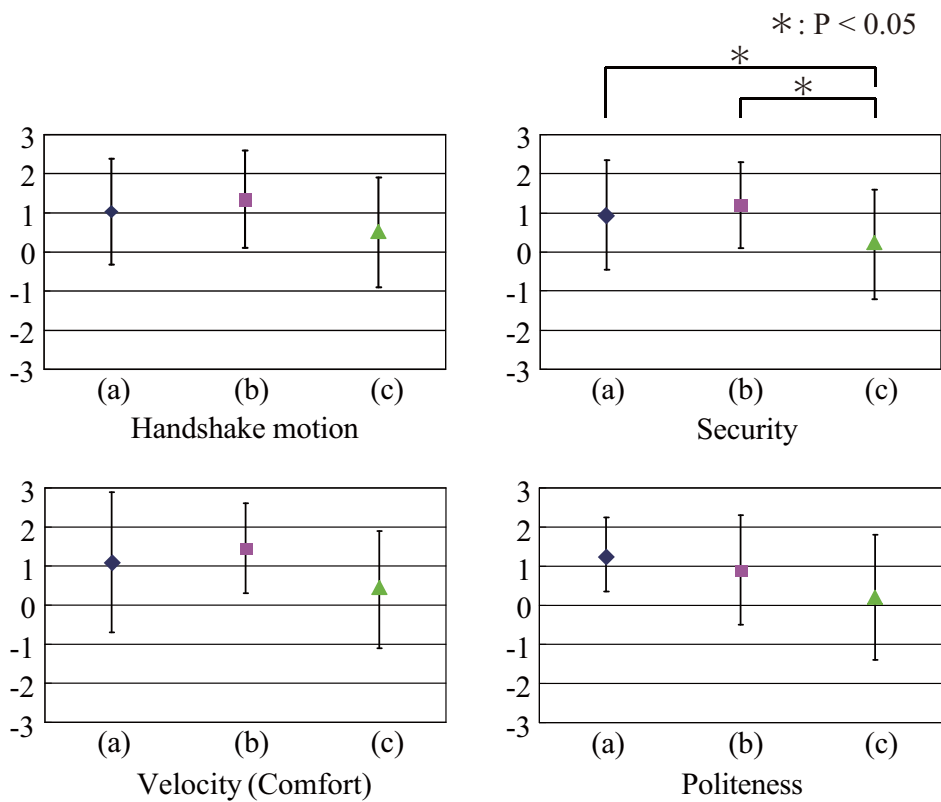


図 3.6 握手要求動作モデルの評価実験における7段階評価結果

は、7段階評価の全ての項目において肯定的に評価されており、人間に好まれたものとなっている。これらのことから、音声挨拶が手部動作より早く開始するモード(a)及び音声挨拶と手部動作が同時に開始するモード(b)が人間に好まれることが分かる。ま

3.6 小型握手ロボットを用いた官能評価実験

た、人間と同サイズの握手ロボットでは、手部動作を開始する前に音声挨拶を発声することで、人間に注意を喚起させられるため好まれた [3.5]。このことから、小型握手ロボットの場合では、ロボットが小型であるため注意の喚起が軽減され、人間同士の握手動作と同様に音声挨拶と手部動作が同時に開始する動作も好まれる結果となったと考えられる。また、握手要求動作モデルを適用することで小型握手ロボットに人間に好まれる握手要求動作を生成することが可能であり、その有効性が示された。

3.6.2 握手応答動作

人間に好まれる小型握手ロボットシステムによる握手応答動作を検討するために、官能評価実験を行った。

実験方法

実験には人間同士の握手動作解析に基づいて握手応答動作モデルの固有振動数 ω とむだ時間 τ を変化させた3つのモードを用意した。3つのモードは(a)2次遅れ要素($\omega = 15$)のモード、(b)2次遅れ要素とむだ時間要素($\omega = 15, \tau = 0.1$)のモード、(c)2次遅れ要素($\omega = 7.5$)のモードの3つを用意した。これらのモードは人間同士の握手動作の解析に基づいたものであり、人間と同じサイズの握手ロボットシステムを用いた評価実験では音声挨拶を伴わない場合にはモード(a)が好まれ、音声挨拶を伴う場合にはモード(b)が好まれた [3.8]。また、モード(c)はモード(b)の動作を2次遅れ要素のみで近似した場合のものである。被験者には予め、ロボットに対し被験者から握手を求めるよう指示した。実験では音声挨拶を伴う握手動作について一対比較と7段階評価を行い、実験条件は上述の実験と同一とした。また、音声挨拶には「よろしく」を用いた。

実験結果

一対比較の結果を表 3.3 に示す。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terry モデルを想定し、好ましさ π (3モード合計 100) を最尤推定した。Bradley-Terry モデルの結果を図 3.7 に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましさ π の妥当性が保証された。図より、モード(b)が最も高く評価されていることが分かる。

表 3.3 握手応答動作モデルの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		18	40	58
(b)	42		38	80
(c)	20	22		42

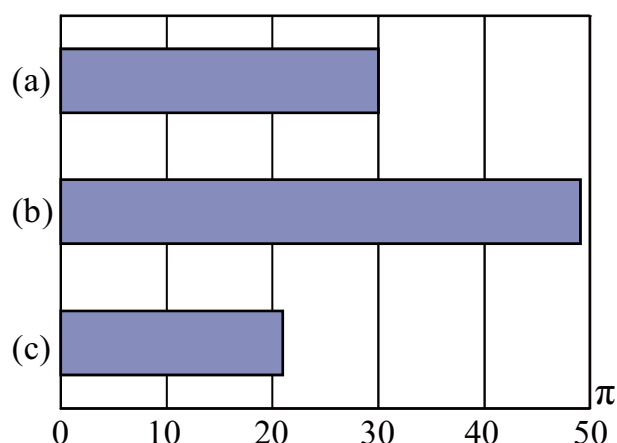


図 3.7 握手応答動作モデルの評価実験における好ましさ

7段階評価の結果として、平均値と標準偏差、およびFriedmanの分散分析法による有意差を図3.8に示す。図より、「速さ」の項目ではモード(a)と(b)はモード(c)より高く評価され、その間には有意水準5%の差が認められた。さらに、「安心感」の項目においてモード(b)はモード(a)より高く評価され、その間には有意水準5%の差が認められた。このことからモード(b)が最も高く評価されていることが示されており、Bradley-Terryモデルの結果とも一致した。また、このモード(b)では、7段階評価の全ての項目において肯定的に評価されており、人間に好まれたものとなっている。これらの結果は人間と同サイズのロボットによる握手動作実験と一致するものであった。

これらのことから、小型握手ロボットによる握手応答動作では、人間と同サイズのロボットと同様に求める側の動作に2次遅れ要素とむだ時間要素による遅れを付加した動作が人間に好まれることが示された。また、握手応答動作モデルを適用することで小型握手ロボットに人間に好まれる握手応答動作を生成することが可能であり、その有効性が示された。

3.7 小型握手ロボット同士の握手システム

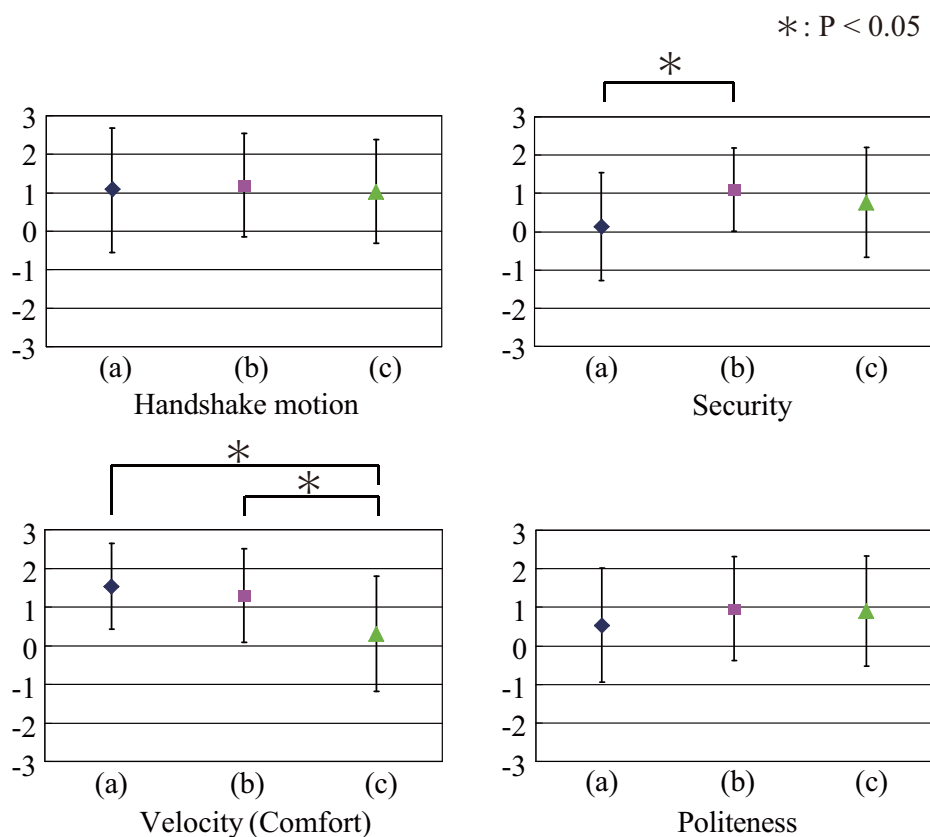


図 3.8 握手応答動作モデルの評価実験における 7 段階評価結果

3.7 小型握手ロボット同士の握手システム

握手要求動作モデルにより握手を求めるように手部を差し出し、その動作に握手応答動作モデルにより協調した動作を行わせることで、ロボット同士による握手接近動作が生成される。そこで、2 台の小型握手ロボットに握手要求動作モデルと握手応答動作モデルをそれぞれ適用し、ロボット同士による握手接近動作の生成を行わせた。システムの概観を図 3.9 に示す。

2 台のロボットは上述の実験に用いたものと同じ寸法であり、ロボット間の距離を 250 mm とした。また、ロボットの手部位置は磁気センサを用いて計測し、ロボットの入力として用いた。2 台の小型ロボットが生成する動作が握手接近動作となっていることを確認するために、官能評価実験を行った。実験はロボット同士の握手動作を 10 回被験者に見せ、「握手を行っているように見える」、「感じのよさ」、「安心感」、「生命感」、「丁寧」の 5 項目について 7 段階（中立 0）により評価させた。被験者は男女学

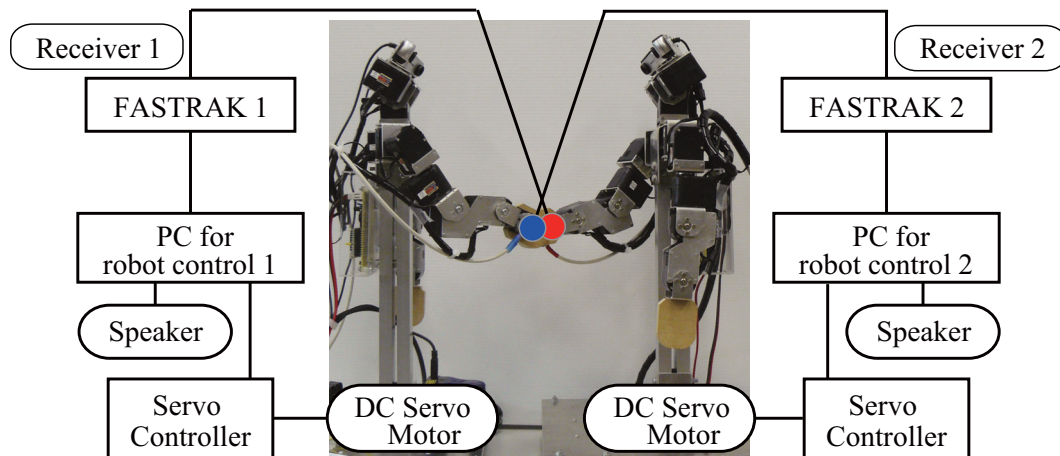


図 3.9 小型握手ロボット同士の握手システム

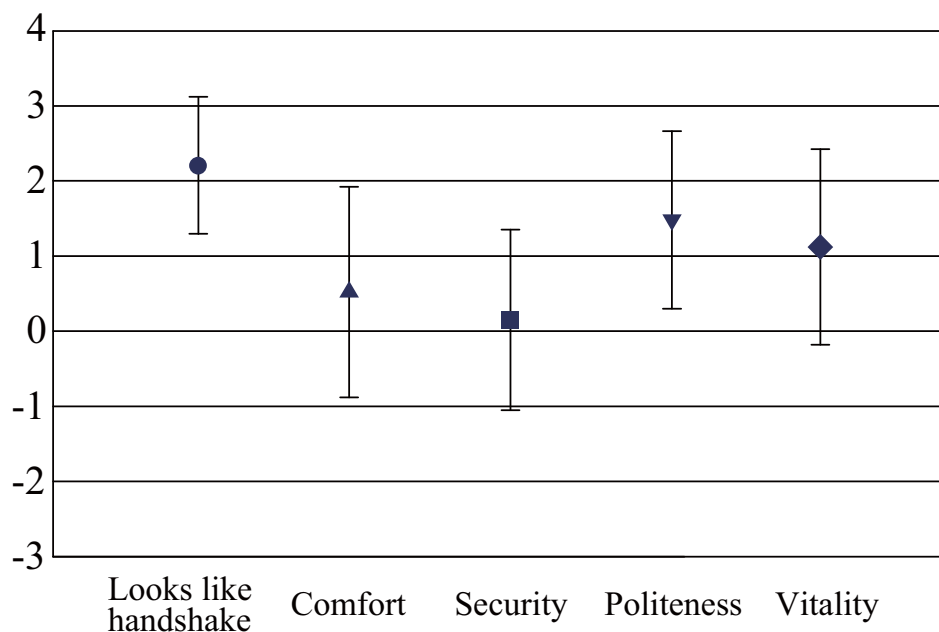


図 3.10 小型握手ロボット同士の握手システムにおける7段階評価結果

生 30 人である。

7段階評価の結果として、平均値と標準偏差を図 3.10 に示す。図より、すべての項目において、肯定的に評価されていることがわかる。とくに、「握手を行っているように見える」の項目では高い評価を得ている。このことから2台のロボットにより生成される動作が握手接近動作に感じられることが示され、ロボット同士の握手接近動作の生成に握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルが有効であることが示された。

3.8 結言

本章では、成人男性の約4分の1の大きさになるように設計・製作した小型握手ロボットに2章で示した握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを適用し、人間との握手接近動作を生成する小型握手ロボットシステムを開発した。さらに、本ロボットシステムを用いて人間との握手を行い、握手要求動作モデルと握手応答動作モデルが小型ロボットによる握手動作生成に有効であることを示した。

以下に、小型握手ロボットシステムを用いた官能評価実験により得られた結果について示す。

- (1) 画像処理と人間上肢の3次元モデルを併用することで人間手部の3次元位置を非接触により認識する手部位置認識手法を提案した。さらに、その手法を適用した小型握手ロボットにより、人間と握手を行うことが可能であった。このことから、提案する手部位置認識手法の有効性が示された。
- (2) 小型握手ロボットによる握手要求動作では、音声挨拶と手部動作を同時もしくは音声挨拶の発声を早めることで、人間に好まれる動作が生成されることが示された。これにより握手要求動作モデルが小型握手ロボットシステムに有効であることが示された。
- (3) 小型握手ロボットによる握手応答動作では、人間と同サイズのロボットによる握手動作と同様に求める側の動作に2次遅れ要素とむだ時間要素による遅れを付加することが有効であり、その動作が人間に好まれることが示された。これにより握手応答動作モデルが小型握手ロボットシステムに有効であることが示された。
- (4) 握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルを用いて2台の小型握手ロボットにより、人間に握手を行っていると感じさせるロボット同士の握手接近動作を生成した。これにより、ロボット同士の握手接近動作の生成に握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルが有効であることが示された。

参考文献

- [3.1] 佐藤淳：コンピュータビジョン；コロナ社，pp.118-144，(1999).
- [3.2] 神代充，山本倫也，柴田論，山本智規：画像処理と3次元CAD図形情報による形状・面情報を用いた認識手法；日本機械学会論文集C編，Vol.71，No.707，pp.2233-2240，(2005).
- [3.3] 川内まき子，持丸正明，岩澤洋，三谷誠二：日本人人体寸法データベース 1997-98；通商産業省工業技術院くらしとJISセンター，(2000).
- [3.4] 松橋聡，藤本研司，中村納，南敏：顔領域抽出に有効な修正HSV表色系の提案；テレビジョン学会誌，Vol.49，No.6，pp.787-797，(1995).
- [3.5] 神代充，渡辺富夫，柴田論，山本智規：視線提示を考慮した握手要求動作モデルの開発；日本機械学会論文集C編，Vol.77，No.776，pp.1429-1440，(2011).
- [3.6] 山本倫也，渡辺富夫：ロボットとのあいさつインタラクションにおける動作に対する発声遅延の効果；ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.6，No.3，pp.87-94，(2004).
- [3.7] R.A. Bradley and M.E. Terry: Rank analysis of incomplete block designs; *Biometrika*, Vol.39, pp.324-345, (1952).
- [3.8] M. Jindai, T. Watanabe, S. Shibata and T. Yamamoto: Development of a handshake robot system based on a handshake approaching motion model; *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.20, No.4, pp.650-659, (2008).

第4章

人間の接近を伴う握手動作を生成する 握手ロボットシステム

4.1 緒言

3章では、2章で示した握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを小型ロボットに適用することで、人間との握手接近動作を生成する小型握手ロボットシステムを開発し、官能評価実験によりそれらのモデルが小型ロボットにおいても有効であることを示した。

一方で、多くの場合、握手が行えない距離から接近し、握手を行うと考えられる。

そこで本章では、接近してくる人間との握手動作を生成する握手ロボットシステムを開発している。まず、握手ロボットに人間が接近中に求めてきた握手に応じる動作を生成させるために、人間同士の接近を伴う握手動作を計測し、その特性について解析を行っている。そして、2章で示した握手応答動作モデルと人間同士の接近を伴う握手動作の解析結果に基づいて、人間が接近中に求めてきた握手に応じる動作を生成する握手応答動作モデルを提案している。さらに、開発した小型握手ロボットシステムに提案モデルを適用し、官能評価実験によりシステムの有効性を示している。つぎに、接近中の人間にロボットから握手を求める動作を行わせるために、人間同士の接近を伴う握手動作を計測し、その特性について解析を行っている。そして、2章で示した握手要求動作モデルと人間同士の接近を伴う握手動作の解析結果に基づいて、人間の接近中にロボットから握手を求める動作を生成する握手要求動作モデルを提案している。さらに、小型握手ロボットシステムに提案モデルを適用し、官能評価実験によりシステムの有効性を示している。また、接近してくる人間が握手を求めてきた場合はそれに応じ、求めてこない場合は、ロボットから積極的に握手を求める必要がある。そこで、提案した人間の接近を伴う握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを適切に切り替えることで、人間が接近中に握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこな

第4章 人間の接近を伴う握手動作を生成する小型握手ロボットシステム

い場合にはロボットから握手を求める動作を生成している。さらに、官能評価実験により人間に好まれる切り替え動作が生成可能であることを示している。

4.2 小型握手ロボットシステム

図4.1にロボットシステムの構成を示す。ロボットアームは平均的な成人男性の大きさ [4.1] を基準として、その大きさの約1/2となるように設計、製作を行った [4.2]。握手ロボットには6自由度を有するアームを双腕で備えている。ロボットの座標系を図4.1中に示し、その原点は握手ロボットの右肩部の中心としている。開発した握手ロボットでは、右腕の4自由度（肩（2軸）、肘、手首）を用いて握手動作を生成するものとした。握手動作については、動作モデルおよび計測された人間の手部位置により計算されたロボット手部の目標位置、目標姿勢から逆運動学計算 [4.3] により各関節角度を求め、制御を行なっている。ただし、本ロボットシステムにおける逆運動学計算では、各関節角度として最大8組の解が求められるが、そのうち一周期前の各関節角度との

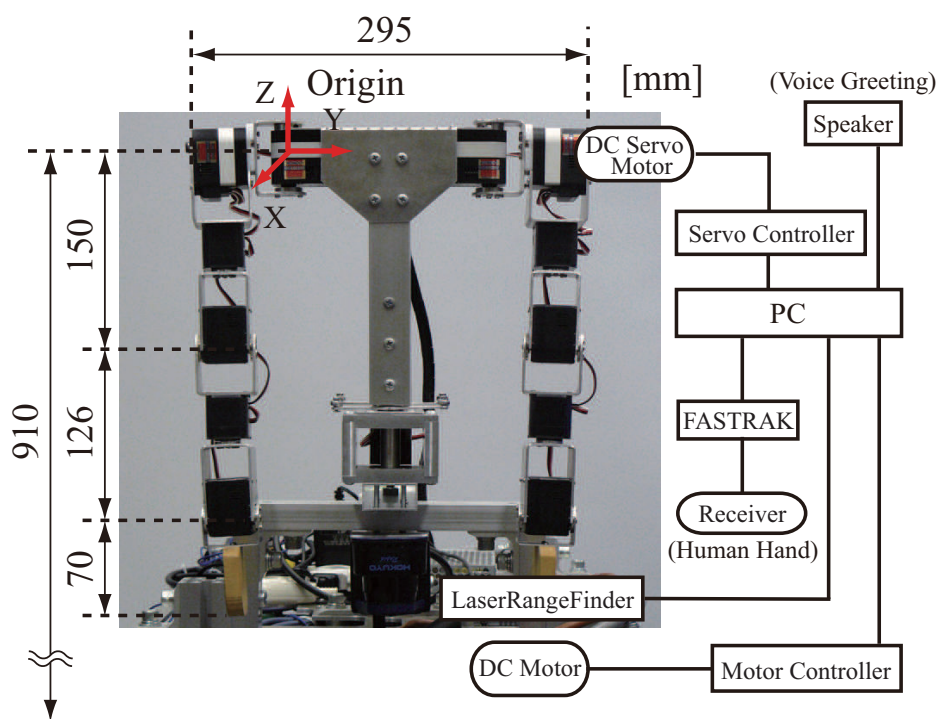


図 4.1 小型握手ロボットシステムの構成

4.3 人間同士における握手応答動作解析

差が最も小さい解を適用している。ロボットの各関節の角度はサーボモータからのシリアル信号として受信し、位置制御を行なっている。ロボットには音声挨拶を発声するためにスピーカを備えている。音声挨拶には、「よろしく」の音声を使用している。ロボットに備えた測域センサ (Laser Range Finder) によってロボットから人間までの距離を計測している。また、人間の手部には、磁気センサ (FASTRAK) を取り付け計測することで、人間が差し出した手部位置を計測している。計測された各データはPCに送信され、ロボットの制御量を計算する。

4.3 人間同士における握手応答動作解析

4.3.1 実験目的

人間が接近しながら求めてきた握手にロボットが応じる場合、ロボットは人間に自然な動作で手部を差し出す必要がある。そのため、人間同士の接近を伴う握手動作を計測し、手部動作についての解析を行った。

4.3.2 実験方法

実験は2人1組とし、握手動作は求める側、応じる側を予め定めた。合図と同時に握手を求める側から接近し、任意のタイミングで握手を行わせた。応じる側には求める側の握手動作に協調するようにして握手に応じさせた。被験者1人につき、接近を伴う握手動作を連続して10回行わせた。被験者は18~24歳の男女学生15組30人である。握手動作は3Dモーションキャプチャシステムにより計測した。被験者には向かい合って3,000 mmの間隔で立ってもらい、右手首、右肘、右肩、左肩と、さらに握手をを求める側には両足首に反射マーカを取り付け、その位置を10台のカメラを用いて測定した。実験は音声挨拶を伴わない場合と伴う場合の2種類により行った。音声挨拶には、一般的な音声挨拶である「よろしく」を用いた。実験の様子を図4.2に示す。

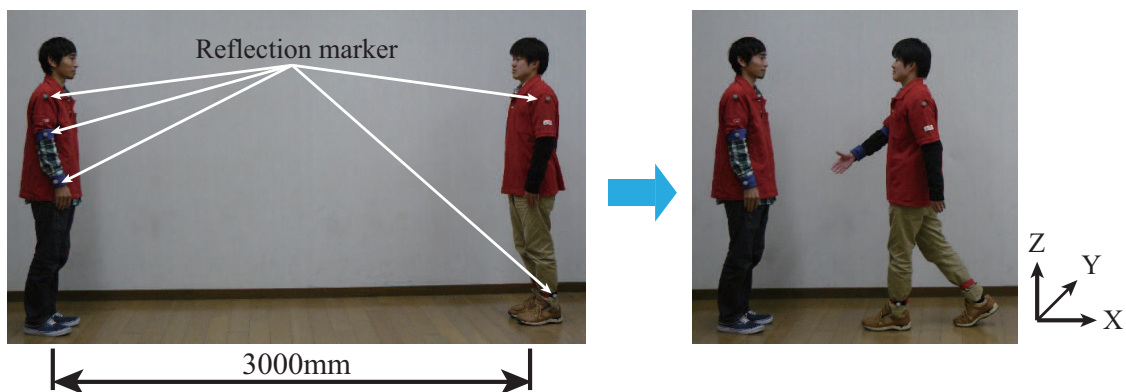


図 4.2 実験風景

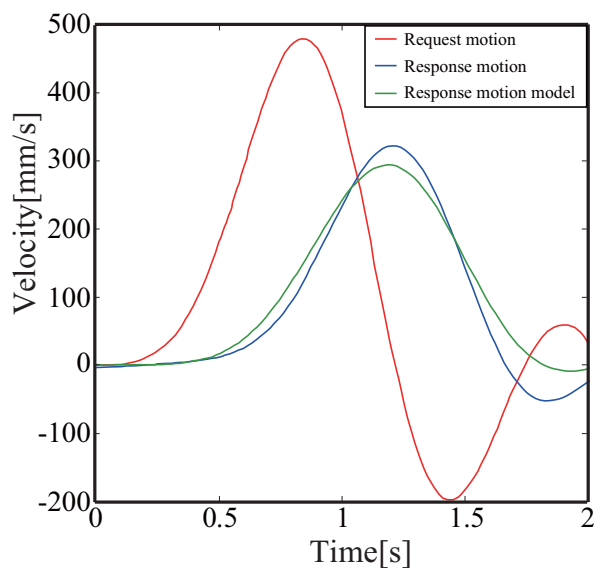


図 4.3 握手応答動作の一例

4.3.3 実験結果と考察

実験により得られた握手動作と先行研究による握手応答動作モデル [4.4] の速度パターンの一例を図 4.3 に示す。図の横軸は握手要求動作の開始を基準とした時間軸であり、縦軸は接線方向の速度である。また、図中の実線（赤）は人間の握手要求動作、実線（青）は人間の握手応答動作、実線（緑）は人間の握手要求動作を用いて握手応答動作モデルにより求められた速度パターンを示している。図に示されるようにモデルによる波形は人間の握手応答動作と類似しており、2章で示した握手応答動作モデルが適用できることを示している。

4.3 人間同士における握手応答動作解析

そこで、実験により得られたデータに基づいて、握手要求動作に2次遅れ要素とむだ時間を適用した動作と、計測された握手応答動作が一致するように固有振動数 ω とむだ時間 τ を推定した。なお、歩行動作と手部動作を分離するために肩を原点とした座標系を用いてパラメータの推定を行った。また、求める側における握手動作開始タイミングは、歩行動作から握手要求動作に移行する際の手部が描く軌道上において手部位置が最下点を通過した時点とした。むだ時間 τ は握手を求める側の握手動作開始時点を基準とした握手に応じる側との手部動作の開始タイミングの差である。つまり、むだ時間 τ が0とは、握手を求める側の手部動作と、握手に応じる側の手部動作の開始タイミングがほぼ同時であることを意味している。

人間同士での音声挨拶を伴わない場合の握手応答動作の固有振動数 ω とむだ時間 τ を、ヒストグラムとして図4.4、4.5に示す。図4.4より、固有振動数は $\omega = 6$ を頂点とする分布になっている。また、図4.5より、むだ時間は $\tau = 0.0 \sim 0.6$ の範囲に有効データの90%以上が分布していた。

また、音声挨拶を伴う場合の握手応答動作の固有振動数 ω とむだ時間 τ を図4.6、4.7に示す。図4.6より、音声挨拶を伴わない場合と同様に固有振動数は $\omega = 6$ を頂点とする分布になっている。また、図4.7より、音声挨拶を伴わない場合と同様にむだ時間は $\tau = 0.0 \sim 0.6$ の範囲に有効データの90%以上が分布していた。

このことから、音声挨拶の有無に拘らず固有振動数は $\omega = 6$ 、むだ時間は $\tau = 0.0 \sim 0.6$

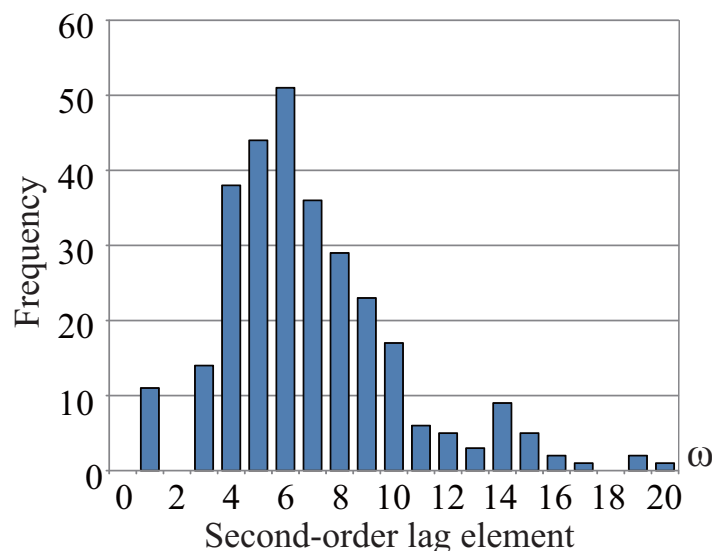


図 4.4 音声挨拶を伴わない場合の2次遅れ

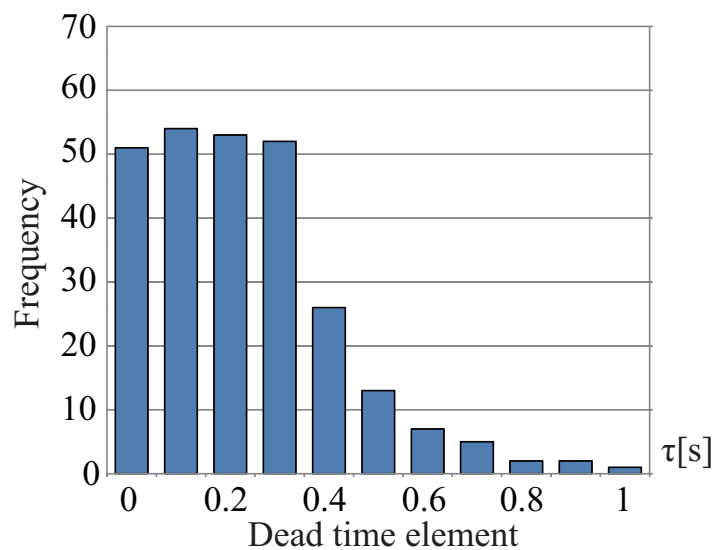


図 4.5 音声挨拶を伴わない場合のむだ時間

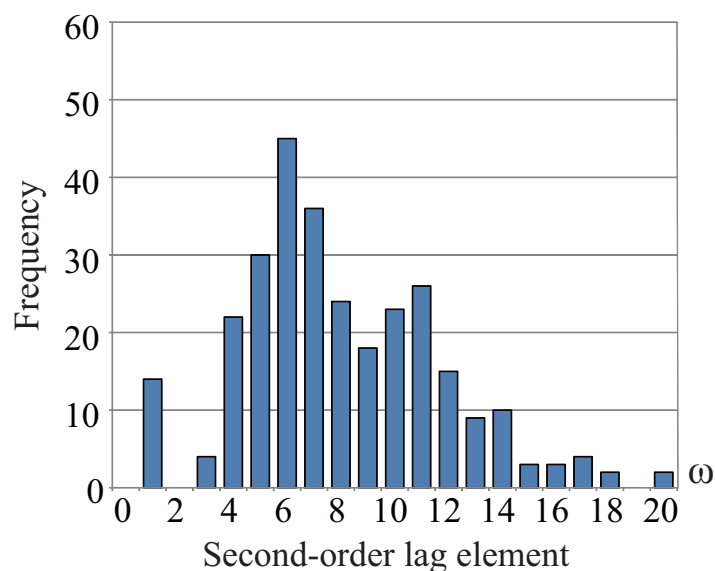


図 4.6 音声挨拶を伴う場合の2次遅れ

の範囲に分布しており、人間同士においては接近を伴う握手要求動作に対して同様の握手応答動作を行っていることが示された。

次に、求める側の手部動作と音声挨拶のタイミングについて計測を行った。図4.8に計測した-1.0秒から1.0秒までのヒストグラムを示す。図の横軸は、負の場合では手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が早く、正の場合では手部動作の開始に対して音

4.3 人間同士における握手応答動作解析

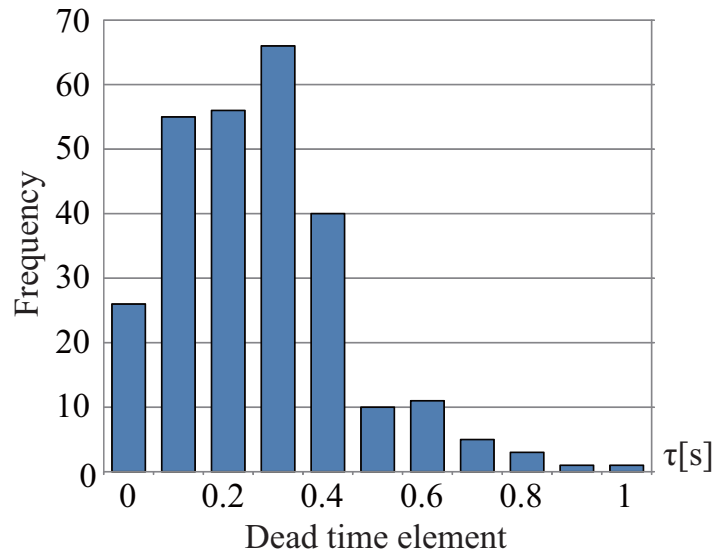


図 4.7 音声挨拶を伴う場合のむだ時間

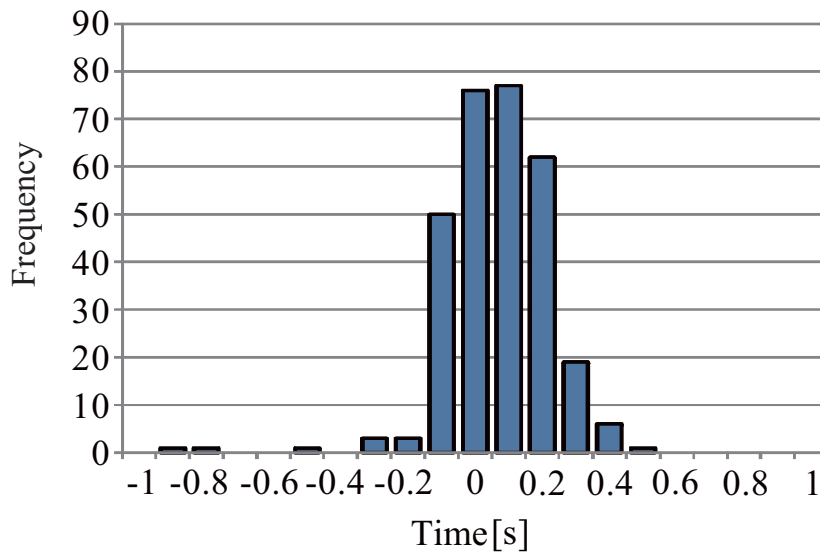


図 4.8 音声と手部動作の開始タイミング

声挨拶の発声が遅いことを表している。図より、0秒付近に多く分布していることが分かる。また、手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が遅いタイミングに多く分布していることが示された。これらの結果から、人間同士の握手動作では多くの被験者が手部動作の開始に対して音声挨拶を同時または遅くに開始していることが示された。

4.4 握手応答動作モデルの評価実験

4.4.1 実験目的

提案する握手応答動作モデルでは、人間の動きに応じてロボットが動作するため、モデルにより生成されるロボットの手部動作により人間に与える印象が変化すると考えられる。そこで、握手応答動作モデルを適用した小型握手ロボットシステムを用いて、人間に好まれる握手応答動作を検討するために官能評価実験を行った。

4.4.2 実験方法

握手ロボットを用いて、人間に好まれる握手応答動作を検討するために官能評価実験を行った。被験者にはロボットと 3,000 mm 離れた地点からロボットに接近し、握手を行わせた。人間同士の握手動作の解析結果に基づいて、実験に用いる握手応答動作モデルの固有振動数は、最も頻度が高い $\omega = 6$ を採用した。また、むだ時間は音声挨拶を伴う場合において最も頻度が高い $\tau = 0.3$ 、及び全体の 90%以上が分布していた範囲における、両極となる $\tau = 0.0$ 、 0.6 を採用した。

実験では (a) $\tau = 0.0$ 、(b) $\tau = 0.3$ 、(c) $\tau = 0.6$ の 3 モードとし、音声挨拶を伴わない場合と伴う場合の 2 種類の実験を行った。被験者には予め、ロボットに対し被験者から握手を求めるよう指示した。実験ではまず一対比較を行った。一対比較では順序効果を考慮し、6 通り全ての組み合わせをランダムに提示した。その後、「握手しやすさ」、「速さ」、「安心感」、「丁寧さ」の 4 項目について 7 段階評価（中立 0）により評価させた。モードの提示順序は、被験者ごとにランダムとした。被験者は 18~24 歳の男女学生 30 人である。実験の様子を図 4.9 に示す。

4.4.3 実験結果

音声挨拶を伴わない場合における一対比較の結果を表 4.1 に示す。表 4.1 中の数値は各行の反応に対する各列の反応の勝数、つまり各行の反応をより好ましいと答えた被験者の数を表している。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terry モデル [4.5] を想定し、好ましさ π を最尤推定した。Bradley-Terry モデルの結果

4.4 握手応答動作モデルの評価実験

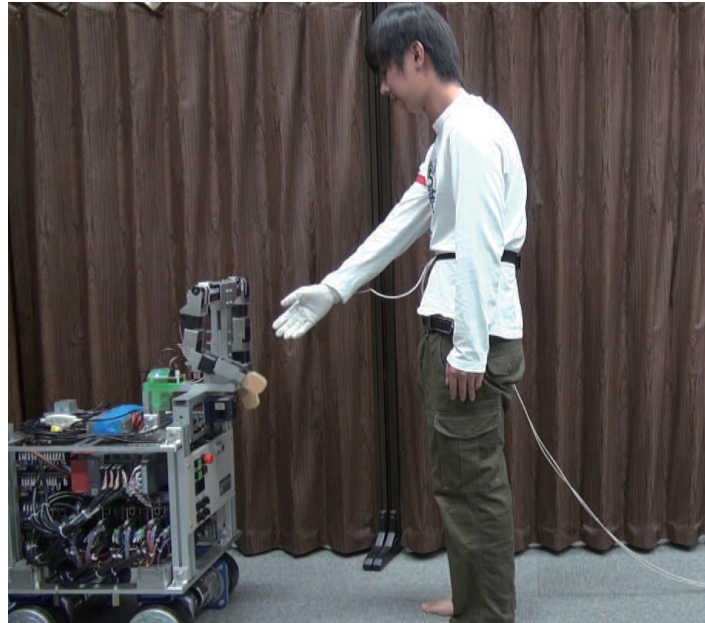


図 4.9 握手応答動作モデルの評価実験の様子

表 4.1 音声挨拶を伴わない握手応答動作モデルの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)	/	50	56	106
(b)	10	/	54	64
(c)	4	6	/	10

を図 4.10 に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましさ π の妥当性が保証された。図よりモード (a) が最も高く評価され、次いで (b)、(c) の順で好まれていることがわかる。

7段階評価の結果として、平均値と標準偏差、及びFriedmanの分散分析法による有意差を図 4.11 に示す。図中のアスタリスクは、この結果をFriedmanの分散分析法で検定した結果で、**は有意水準1%を示し、*は有意水準5%の有意差を示す。Friedmanの分散分析法とは、ノンパラメトリック検定の一つで、多変量解析を行うことができる検定である。図より「握手しやすさ」の項目でモード(a)と(c)の間に有意水準1%の有意差が認められ、モード(a)が高く評価された。「速さ」の項目でモード(a)と(c)の間に有意水準1%の有意差が、(b)と(c)の間に有意水準5%の有意差が認められ、モード(a)と(b)が高く評価された。「安心感」、「丁寧さ」の項目では有意な差は認められ

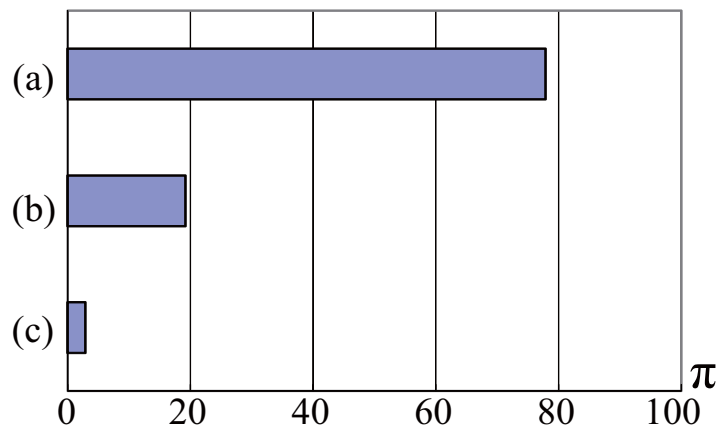


図 4.10 音声挨拶を伴わない握手応答動作モデルの評価実験における好ましさ

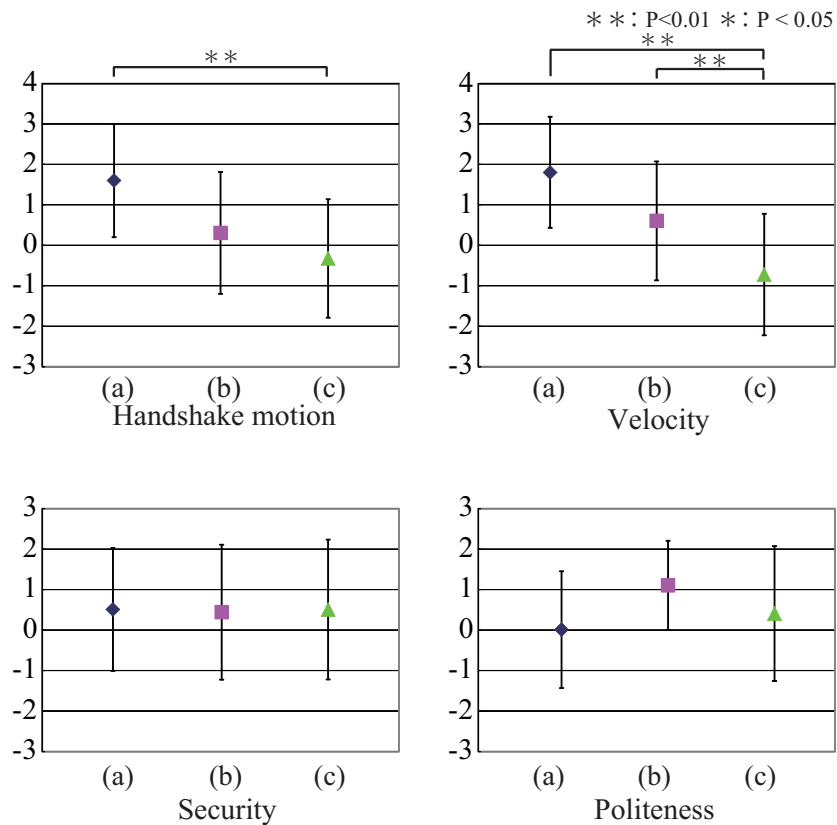


図 4.11 音声挨拶を伴わない握手応答動作モデルの評価実験における7段階評価結果

なかった。このモード (a) は Bradley-Terry モデルにおいて最も高く評価され、7段階評価の全ての項目においても肯定的に評価されていることから、人間に好まれたものとなっている。

4.4 握手応答動作モデルの評価実験

表 4.2 音声挨拶を伴う握手応答動作モデルの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		29	45	74
(b)	31		48	79
(c)	15	12		27

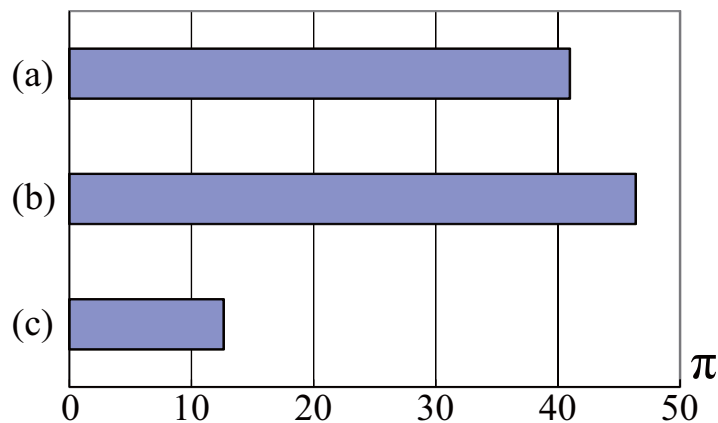


図 4.12 音声挨拶を伴う握手応答動作モデルの評価実験における好ましき

続いて音声挨拶を伴う場合における一対比較の結果を表 4.2 に示す。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terry モデルを想定し、好ましき π を最尤推定した。Bradley-Terry モデルの結果を図 4.12 に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましき π の妥当性が保証された。図よりモード (b) が最も高く評価され、次いで (a)、(c) の順で好まれていることがわかる。音声を伴う場合における、「握手しやすさ」、「速さ」、「安心感」、「丁寧さ」の 4 項目について 7 段階の官能評価を行った結果を図 4.13 に示す。

官能評価の結果より、「握手しやすさ」の項目でモード (b) と (c) の間に有意水準 1% の有意差が認められ、モード (b) が高く評価された。「速さ」の項目でモード (a) と (c)、(b) と (c) の間に有意水準 1% で有意差が認められ、モード (a) と (b) が高く評価された。「安心感」、「丁寧さ」の項目においては有意な差は認められなかった。また、高く評価されたモード (a) と (b) は 7 段階評価のすべての項目において肯定的に評価されており、これらのモードにより生成された握手動作が人間に好まれたものとなっていることが示されている。

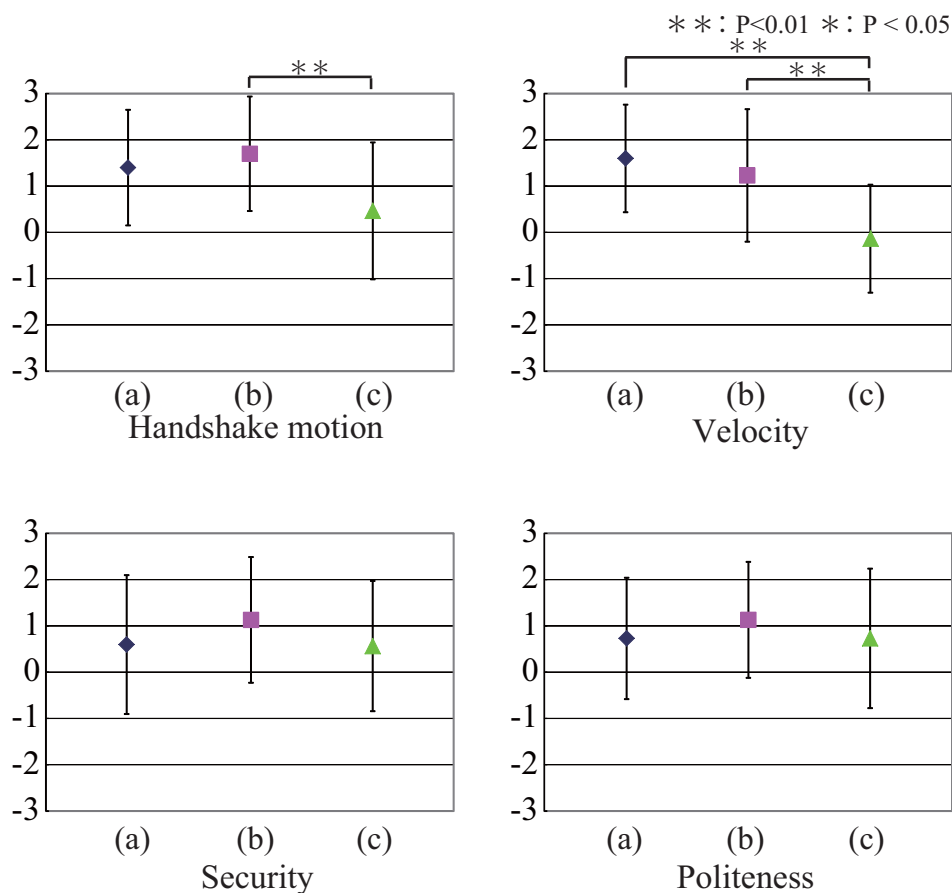


図 4.13 音声挨拶を伴う握手応答動作モデルの評価実験における7段階評価結果

4.4.4 考察

音声挨拶を伴わない場合、一対比較の実験結果より、(a) $\tau=0.0$ が最も高く評価され、次いで (b)、(c) の順に好まれた。したがって、人間とロボットの握手では、応答動作を人間の要求動作と同時に開始する動作が好まれることが示された。(a) のモードが好まれた理由として、人間の動作から遅延なくロボットが動作することで、最も自然であったと感じられたためだと考えられる。逆に、(b)、(c) は人間の動作から 0.3 秒、もしくは 0.6 秒遅延するため、人間にとってもどかしく感じられたため評価が低かったと考えられる。

また音声挨拶を伴う場合について、一対比較の実験結果より、(b) $\tau=0.3$ が最も高く評価され、次いで (a)、(c) の順に好まれた。したがって、音声挨拶を伴う場合において、手部動作を人間の要求動作より 0.3 秒遅く開始する動作が好まれることが示された。(b) のモードが好まれた理由として、音声挨拶を伴う場合には発声分の遅延を考慮

4.5 人間同士における握手要求動作解析

したように感じられ、肯定的な評価が得られたと考えられる。逆に、(a) は発声分の遅延を考慮しないため、被験者にとってロボットの応答動作が早すぎるように感じられ、評価が低く、(c) は被験者にとってもどかしく感じられたため評価が低くなったと考えられる。

以上のことから、音声挨拶の有無によって人間に好まれる動作が異なることが示された。この結果は、静止している人間とロボットとの握手動作の結果と一致するものである。

4.5 人間同士における握手要求動作解析

4.5.1 実験目的

ロボットが人間に対して接近し握手を求める場合、自然なタイミングで手部を差し出す動作を生成する必要がある。そこで、人間同士の接近を伴う手部動作を計測しその特性について解析する。

4.5.2 実験方法

人間同士の握手における接近動作と手部動作のタイミングの解析を行う。動作解析には3D モーションキャプチャシステム (Vicon) を用いた。被験者には右手首、右肘、右肩、左肩、右足首および左足首の計6カ所に反射マークを取り付け、その位置を9台のカメラを用いて測定した。

実験は2人1組で行い、握手動作は静止して握手を求める側、接近して握手に応じる側をあらかじめ定めた。実験では、まず、被験者2人を向かい合わせに3,000 mmの間隔で立たせた。その後、合図により握手に応じる側が相手に接近していき、求める側が任意のタイミングで応じる側に握手を求めさせた。そして、応じる側にはそれに協調するようにして握手動作を行わせた。また、被験者には握手動作と共に音声挨拶(よろしく)を発声させた。被験者には握手動作を連続して10回行わせ、計測した。被験者は18~24歳の男女学生15組30人である。実験の様子を図4.14に示す。

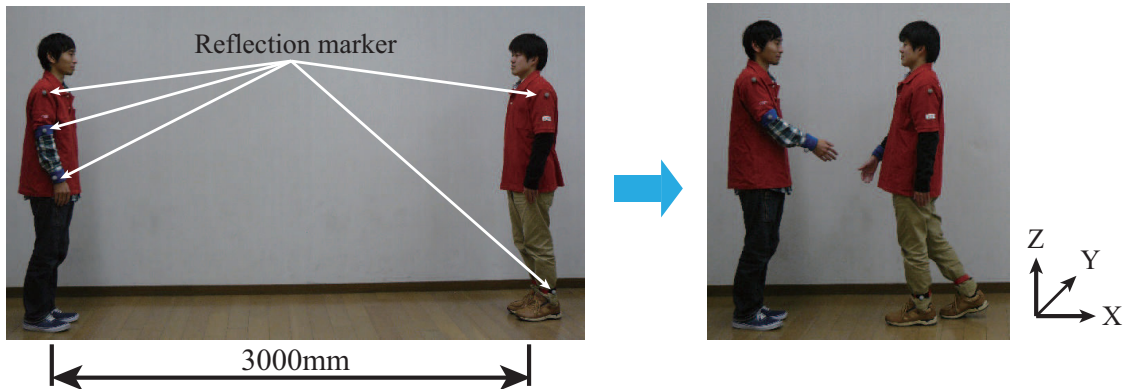


図 4.14 実験風景

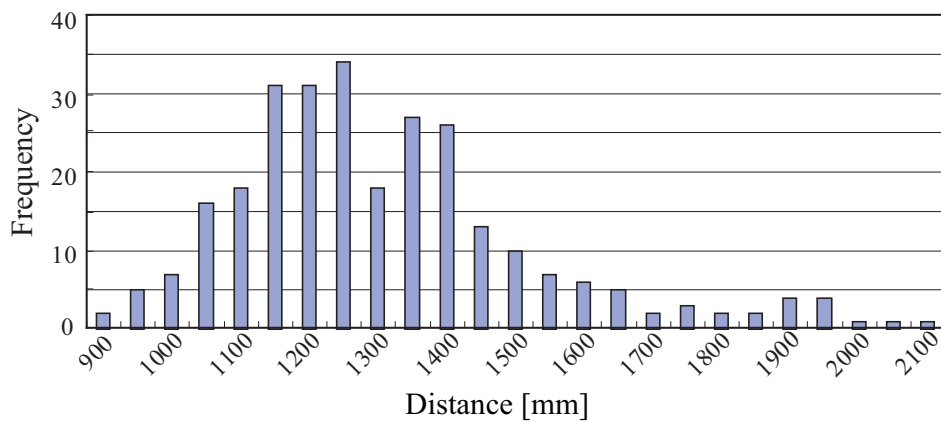


図 4.15 動作開始のタイミングと距離

4.5.3 実験結果

実験結果より、握手動作開始のタイミングと被験者間の距離の関係をヒストグラムにし図 4.15 に示す。図 4.15 より、握手動作を開始するタイミングでの被験者間の距離は 1,250 mm を中心に山型の分布となっている。被験者の接近終了後の距離はおおよそ 1,000 mm なので、接近者が停止する前に静止側は握手動作を開始していることが分かる。そこで、静止側の握手動作開始と接近側の歩行とのタイミングをヒストグラムとして、図 4.16 に示す。図 4.16 の横軸は接近側の (a) 最後の一步、(b) 最後から一步前、(c) 最後から二歩前が着地したタイミングをそれぞれ 0、-100、-200 とした時間軸である。図より、接近側の最後から一步前が着地するタイミング付近で静止側の握手動作開始が集中していることが分かる。以上の結果から、求める側は応じる側の歩行リズム

4.5 人間同士における握手要求動作解析

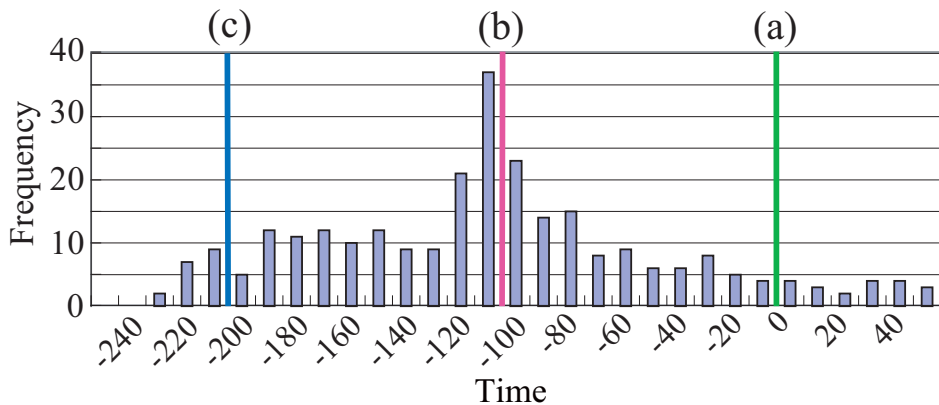


図 4.16 握手動作と歩行との関係

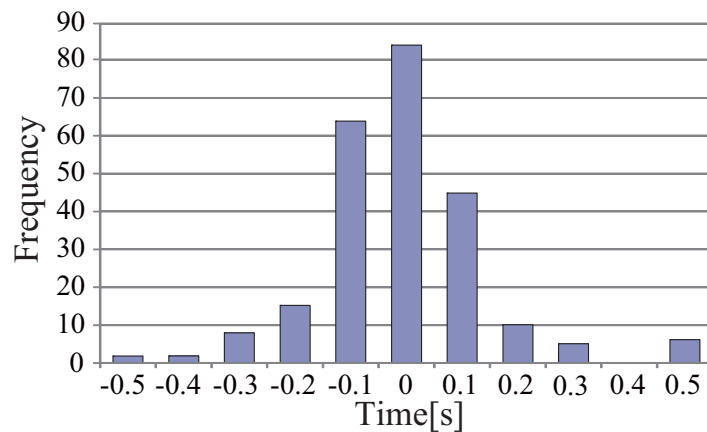


図 4.17 音声挨拶と手部動作の開始タイミング

ムを基に握手動作を開始していることが示された。

次に、求める側の手部動作と音声挨拶のタイミングについて計測を行った。図 4.17 に計測した-1.0秒から1.0秒までのヒストグラムを示す。図の横軸は、負の場合では手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が早く、正の場合では手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が遅いことを表している。図より、0秒付近に多く分布していることが分かる。また、手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が遅いタイミングに多く分布していることが示された。これらの結果から、人間同士の握手動作では多くの被験者が手部動作の開始に対して音声挨拶を同時または遅くに開始していることが示された。

4.6 握手要求動作の開始タイミングの評価実験

4.6.1 実験目的

開発した握手ロボットシステムを用いて、接近してくる人間に対するロボットの握手要求動作における、人間に好まれる手部動作の開始タイミングの検討するために評価実験を行った。

4.6.2 実験方法

人間同士の握手動作においては、多くの人間が接近側の停止する最後から一步前が着地するタイミング付近で握手要求動作を開始している。そのため、実験では手部動作を開始するタイミングを変化させた3つのモードを用意した。ただし、手部動作と同時に音声挨拶を発生させ、音声挨拶には「よろしく」を用いた。実験には、人間同士の握手動作解析より得られたデータをもとに (a) 最後の一步と同時に手部動作を開始、(b) 最後の一步前に手部動作を開始、(c) 最後の二歩前に手部動作を開始の3つのモードを用意した。被験者には予め、ロボットが求めてきた握手に応じるよう指示した。実験では、順序効果を考慮して、すべての組み合わせをランダムに提示し、一対



図 4.18 握手要求動作の開始タイミングの評価実験の様子

4.6 握手要求動作の開始タイミングの評価実験

比較を行った。その後「握手しやすさ」、「速さ」、「安心感」、「丁寧さ」の4項目について7段階評価（中立0）により評価させた。被験者は18~24歳の男女学生30人である。

本実験において、握手動作は右腕によって行った。ロボットの握手軌道は肩（2軸）、上腕、肘、前腕、手首の6軸により握手要求動作モデル[4.6]を用いて生成した。実験の様子を図4.18に示す。

4.6.3 実験結果

一対比較の結果を表4.3に示す。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terryモデルを想定し、好ましさ π を最尤推定した。Bradley-Terryモデルの結果を図4.19に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましさ π の妥当性が保証された。図よりモード(b)が最も高く評価され、次いで(a)、(c)の順で好まれていることがわかる。

表 4.3 握手要求動作の開始タイミングの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		11	52	63
(b)	49		57	106
(c)	8	3		11

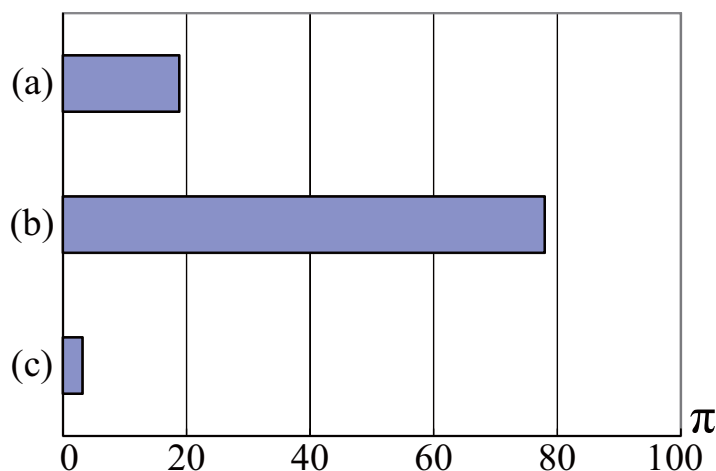


図 4.19 握手要求動作の開始タイミングの評価実験における好ましさ

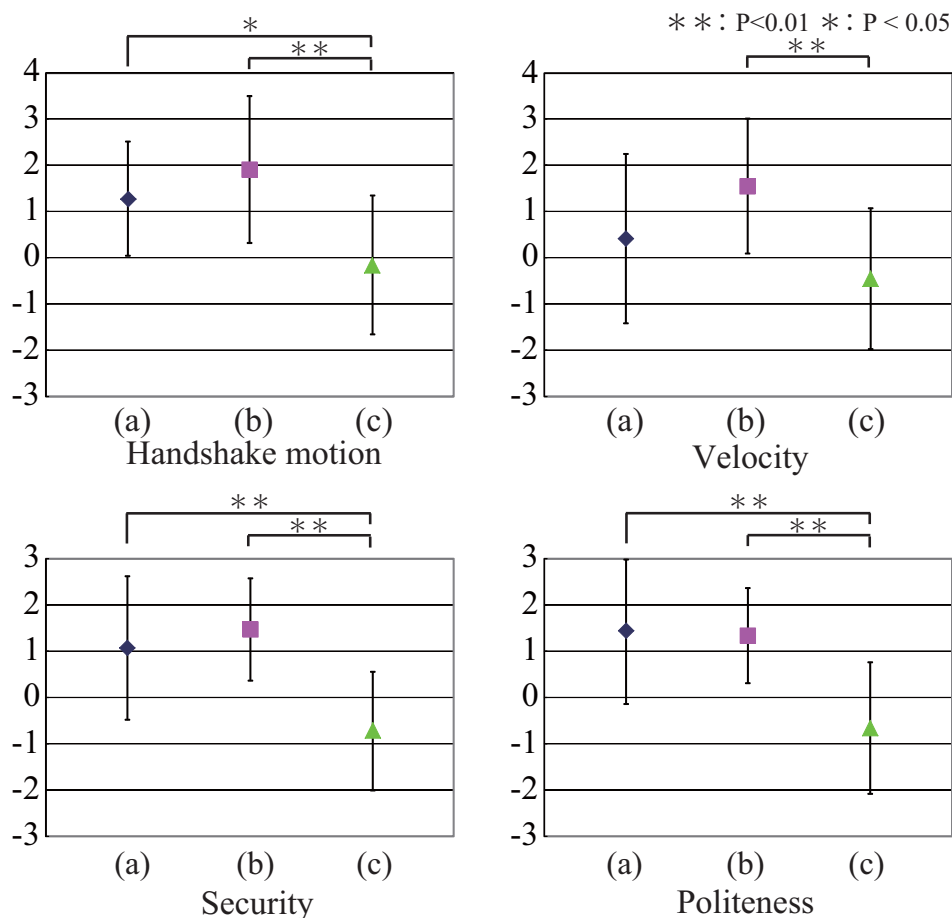


図 4.20 握手要求動作の開始タイミングの評価実験における7段階評価結果

7段階評価の結果を図 4.20 に示す。図は、被験者の7段階評価における評価の平均値と標準偏差を示している。

官能評価の結果より、「握手しやすさ」の項目でモード (a) と (c) の間に有意水準 5%の有意差が、(b) と (c) の間に有意水準 1%の有意差が認められ、モード (a) と (b) が高く評価された。「速さ」の項目でモード (b) と (c) の間に有意水準 1%の有意差が認められ、モード (b) が高く評価された。「安心感」と「丁寧さ」の項目でモード (a)、(b) と (c) の間に有意水準 1%で有意差が認められ、モード (a) と (b) が高く評価された。また、高く評価されたモード (a) と (b) は7段階評価のすべての項目において肯定的に評価されており、これらのモードにより生成された握手動作が人間に好まれたものとなっていることが示されている。

4.6.4 考察

一対比較の実験結果より、(b)最後の一步前に手部動作を開始が最も高く評価され、次いで(a)、(c)の順に好まれた。したがって、人間とロボットの握手では、人間同士の握手動作と同じく、手部動作を最後の一步前に開始する動作が好まれることが示された。(b)のモードが好まれた理由として最後の一步前に手部動作を開始する動作は人間と同じ動作であり、ロボットの動作が自然であったと感じられたためだと考えられる。しかし、(a)は接近者が完全に停止してから手部動作を行うため、人間が予想したタイミングよりも遅く要求動作が生成されるため、評価が低かったと考えられる。(c)は人間の予想より遠い地点から手部動作を開始するため、急かす様な印象や不自然な感覚を被験者に与えてしまうために全体的に否定的な評価となったと考えられる。

4.7 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験

4.7.1 実験目的

握手要求動作ではロボットから手部を差し出すため、ロボットによる手部動作の開始と音声挨拶の発声タイミングにより人間に与える印象が変化すると考えられる。そこで、音声挨拶のタイミングによる人間に好まれる握手動作を検討するために評価実験を行った。

4.7.2 実験方法

人間同士の握手動作においては、多くの人間が音声挨拶と手部動作を同時に開始している。一方で、人間とロボットのお辞儀を伴った挨拶インタラクションにおいて、音声挨拶に対してお辞儀動作を0.3秒早く開始することで、丁寧さが増すなど人間に好まれることが示されている[4.7]。そのため、実験では音声挨拶を発声するタイミングを変化させた3つのモードを用意した。手部動作の開始タイミングは、接近者に対する握手要求動作の開始タイミングの評価実験で最も高く評価された最後の一步前とし、(a)最後の一步と同時に音声挨拶を開始、(b)最後の一步前に音声挨拶を開始、(c)最後の二歩前に音声挨拶を開始の3つのモードを用意した。実験では、順序効果を考慮

第4章 人間の接近を伴う握手動作を生成する小型握手ロボットシステム

して、すべての組み合わせをランダムに提示し、一対比較を行った。その後「握手しやすさ」、「速さ」、「安心感」、「丁寧さ」の4項目について7段階評価（中立0）により評価させた。被験者は18~24歳の男女学生30人である。

4.7.3 実験結果

一対比較の結果を表4.4に示す。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terryモデルを想定し、好ましさ π を最尤推定した。Bradley-Terryモデルの結果を図4.21に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましさ π の妥当性が保証された。図よりモード(b)が最も高く評価され、次いで(a)、(c)の順で好まれていることがわかる。

本実験における、「握手しやすさ」、「速さ」、「安心感」、「丁寧さ」の4項目について

表 4.4 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		6	39	45
(b)	54		57	111
(c)	21	3		24

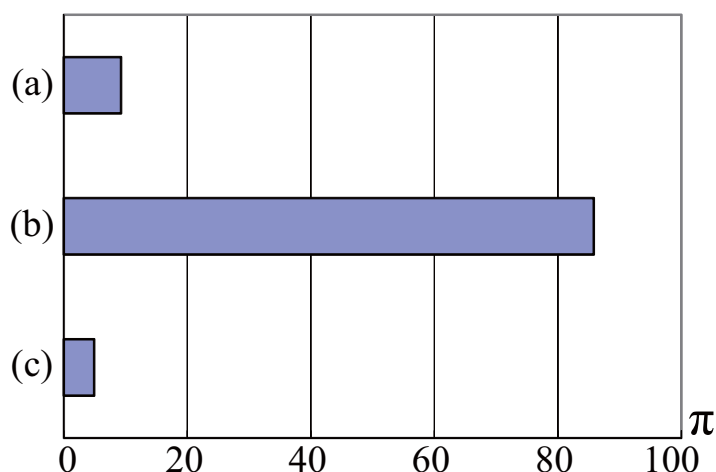


図 4.21 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験における好ましさ

4.7 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験

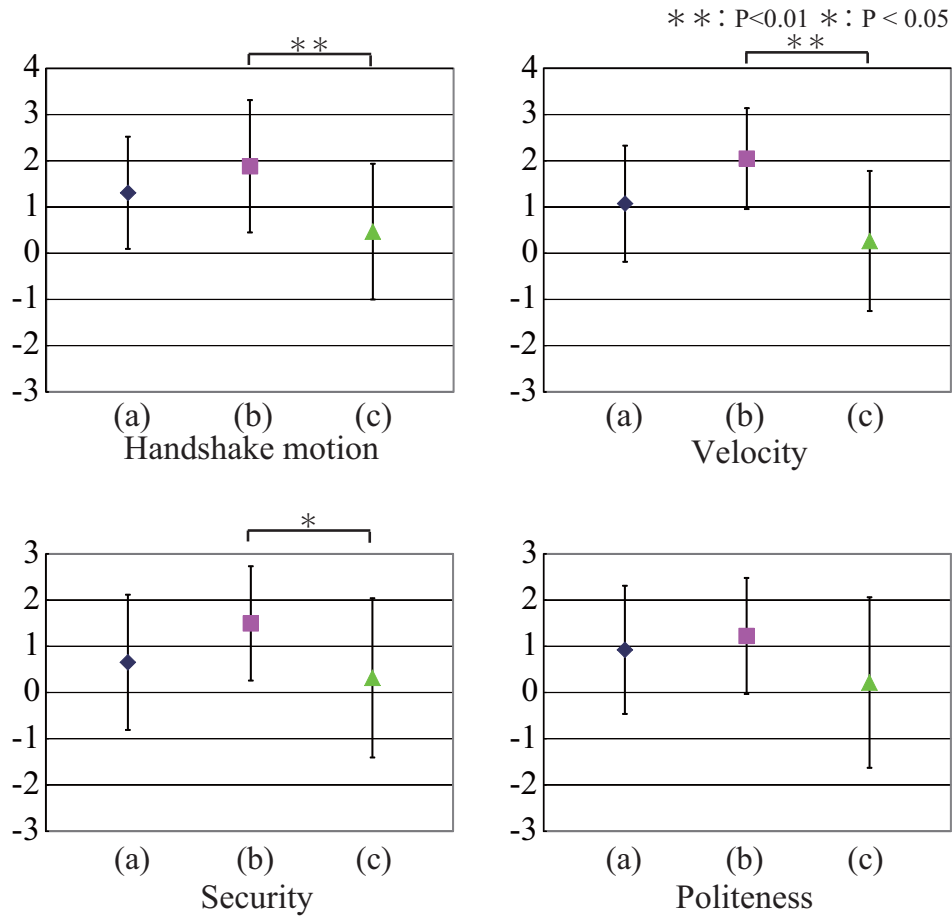


図 4.22 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験における 7 段階評価結果

7 段階の官能評価を行った結果を図 4.22 に示す。図は、被験者の 7 段階評価における評価の平均値と標準偏差を示している。

官能評価の結果より、「握手しやすさ」、「速さ」および「安心感」の項目において、モード (b) と (c) の間に有意水準 1% または 5% で有意差が認められ (b) が高く評価された。また、モード (a) と (b) の間には全ての項目において有意な差は認められなかった。また、高く評価されたモード (b) は 7 段階評価のすべての項目において肯定的に評価されており、このモードにより生成された握手動作が人間に好まれたものとなっていることが示されている。

4.7.4 考察

一対比較の実験結果より、(b)最後の一步前に音声挨拶を開始が最も高く評価され次いで(a)、(c)の順に好まれた。したがって、音声挨拶において、最後の一步前に音声挨拶を開始する動作が好まれることが示された。また、2章で示したように人間と同サイズの握手ロボットでは、手部動作を開始する前に音声挨拶を発声することで、人間に注意を喚起させられるため好まれた。そのため、2章の結果と同様に人間の接近を伴う握手ロボットの場合でも、ロボットが先に音声挨拶を発声することにより注意を喚起させ、人間同士の握手動作と同様に音声挨拶と手部動作が同時に開始する動作も好まれる結果となったと考えられる。以上の結果より、最後の一步前で音声挨拶と手部動作を同時に開始するモードが高く評価されることが示された。

4.8 握手動作モデルの切替評価実験

4.8.1 実験目的

多くの人間は接近してくる人間が握手を求めかどうかをその場に応じて判断している。そのため、ロボットにも接近してくる人間が握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合には握手を求め動作を生成する必要がある。そこで、握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを切り替えることで、そのような動作を生成する。

本章では、開発した握手ロボットを用いて、人間に好まれる握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを切り替えるタイミングについて官能評価により検証している。

4.8.2 実験方法

開発した握手ロボットシステムを用いて、人間に好まれる握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを切り替えるタイミングの検討するために評価実験を行った。本実験における握手要求動作は、官能評価実験により最も高く評価された接近動作の最後の一步前に手部動作を開始し、最後の一步前に音声挨拶を開始する動作とした。また、握手応答動作は、官能評価実験により最も高く評価された $\omega = 6$ 、 $\tau = 0.3$ による動作を用いた。モデルの切り替えタイミングは接近してくる人間が停止する最後の一步前

4.8 握手動作モデルの切替評価実験

とし、被験者が切り替えタイミングよりも前に手部動作を開始している場合には握手応答動作モデルにより動作を生成し、切り替えタイミングに到達した時点で握手要求動作モデルによる動作を生成した。音声挨拶には、一般的な音声挨拶である「よろしく」を採用した。

実験では被験者をロボットに向かい合わせに3,000 mmの間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。その状態から任意のタイミングでロボットに接近してもらい、握手要求動作もしくは握手応答動作を行わせた。実験では、被験者の動作について要求・応答などの動作は予め定めず、被験者に任意の動作を複数回行わせた。ただし、被験者には要求・応答の両方の動作をかならず行ってもらった。その後「握手しやすさ」、「(ロボットが)握手に応じてくれたか」、「(ロボットが)握手を求めてくれたか」、「安心感」、「丁寧さ」、「生命感」の6項目について7段階評価(中立0)により評価させた。被験者は18~24歳の男女学生30人である。

本実験における、「握手しやすさ」、「(ロボットが)握手に応じてくれたか」、「(ロボットが)握手を求めてくれたか」、「安心感」、「丁寧さ」、「生命感」の6項目について7段階の官能評価を行った結果を図4.23に示す。図は、被験者の7段階評価における評価の平均値と標準偏差を示している。

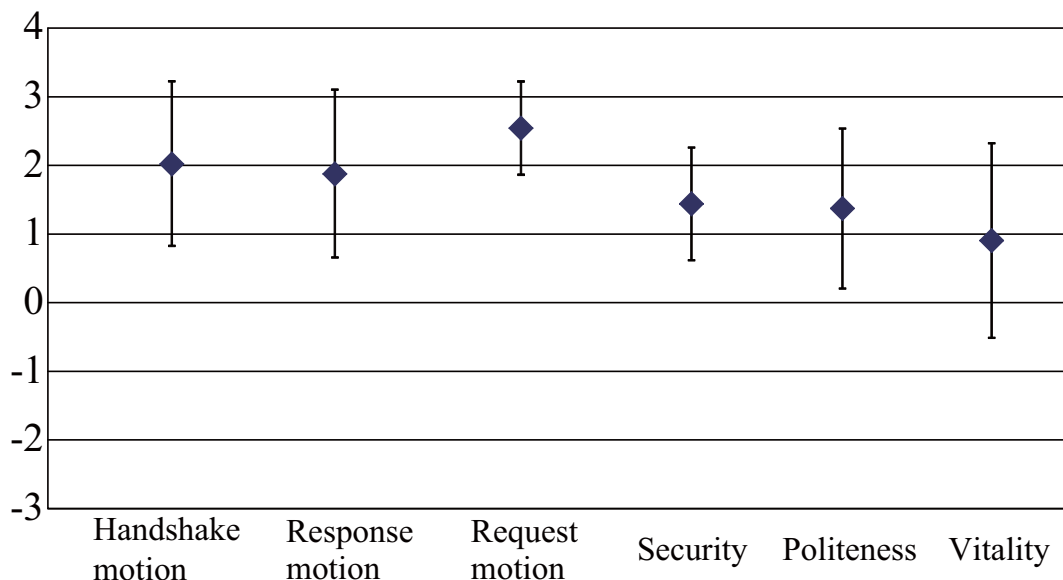


図 4.23 握手動作モデル切替実験における7段階評価結果

4.8.3 実験結果および考察

官能評価の結果より、全ての項目に関して肯定的に評価されたことから、人間に好まれていることがわかる。また、「(ロボットが)握手に応じてくれたか」、「(ロボットが)握手を求めてくれたか」の項目が高く評価されていることから、適切に動作モデルの切り替えが行われており、切り替えるタイミングが人間に好まれるタイミングであったことが示された。このことから、接近してくる人間が握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合には握手を求める動作をロボットに生成することが可能であった。

4.9 結言

本章では、接近してくる人間との握手動作を生成する小型握手ロボットシステムを開発した。さらに、握手ロボットに自然なタイミングで手部を差し出す動作を行わせるために、人間同士の接近を伴う手部動作を計測し、その特性について解析を行った。そして、人間同士の握手動作解析に基づき、人間に好まれる接近を伴う場合の手部動作の開始タイミング、および音声挨拶のタイミングを官能評価実験により検証し提案モデルおよびそれを適用したロボットシステムの有効性を示した。

また、握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを接近中に適切に切り替えることで、ロボットが接近中の人間から握手を求められた場合にはそれに応じ、求められない場合にはロボットから握手を求める動作を実現した。

以下に、握手ロボットシステムを用いた官能評価実験により得られた結果について示す。

- (1) 握手ロボットによる握手応答動作では、音声挨拶を伴わない場合では、 $\omega = 6$ 、 $\tau = 0.0$ による動作が好まれ、音声挨拶を伴う場合では、 $\omega = 6$ 、 $\tau = 0.3$ もしくは $\tau = 0.6$ による動作が好まれることが示された。以上の結果から、音声挨拶の有無によって、人間に好まれる動作特性が異なることが示された。これによりそれらの動作を生成する握手応答動作モデル、およびそのモデルを適用した握手ロボットシステムが有効であることが示された。

4.9 結言

- (2) 握手ロボットによる握手要求動作では、接近者の停止する最後の一步前にロボットが手部動作を開始する動作が人間に好まれることが示された。また、音声挨拶を伴う場合では、接近者の停止する最後の一步前にロボットが音声挨拶を開始する動作が人間に好まれることが示された。これによりそれらの動作を生成する握手要求動作モデル、およびそのモデルを適用した握手ロボットシステムが有効であることが示された。
- (3) 握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを接近してくる人間が停止する最後の一步前で切り替えることで、人間から握手を求められた場合にはそれに応じ、求められない場合にはロボットから握手を求めてくると感じさせる動作を生成できることが示された。

参考文献

- [4.1] 川内まき子, 持丸正明, 岩澤洋, 三谷誠二: 日本人人体寸法データベース 1997-98; 通商産業省工業技術院くらしと JIS センター, (2000).
- [4.2] 太田俊介, 神代充, 山内仁, 渡辺富夫: 四輪操舵移動機構を有する握手ロボットシステムの開発; 第 20 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp.180-181, (2011).
- [4.3] 高野 政晴: 詳説 ロボットの運動学; Ohmsha, (2004).
- [4.4] M. Jindai, T. Watanabe, S. Shibata and T. Yamamoto: Development of a handshake robot system based on a handshake approaching motion model; Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.20, No.4, pp.650-659, (2008).
- [4.5] 竹内啓: 現象と行動の中の統計数理; 新曜社, (1978).
- [4.6] 神代充, 渡辺富夫, 柴田論, 山本智規: 視線提示を考慮した握手要求動作モデルの開発; 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.776, pp.1429-1440, (2011).
- [4.7] 山本倫也, 渡辺富夫: ロボットとのあいさつインタラクションにおける動作に対する発声遅延の効果; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.87-94, (2004).

第5章

ロボットの接近を伴う握手動作を生成する 小型握手ロボットシステム

5.1 緒言

4章では、接近してくる人間に対して静止したロボットが握手動作を生成する握手動作モデルを提案し、その有効性を示してきた。しかしながら、医療介護や生活支援など人間のサポートを行うといったサービスロボットにおいては、ロボットは人間に対し積極的に関わりを持つこととなる。そのような場合には、ロボットが静止しているのではなく、ロボットから人間に能動的に接近し、握手を求めることで人間との身体的インタラクションをより促進される必要がある。

そこで本章では、人間に対して能動的に接近し握手動作を生成する移動握手ロボットシステムを開発している。まず、接近中のロボットから人間に握手を求める動作を行わせるために、人間同士の接近を伴う握手動作を計測し、その特性について解析を行っている。そして、2章で示した握手要求動作モデルと人間同士の接近を伴う握手動作の解析結果に基づいて接近中のロボットから人間に握手を求める動作を生成する接近握手要求動作モデルを提案している。さらに、移動握手ロボットシステムに提案モデルを適用し、官能評価実験によりシステムの有効性を示している。つぎに、接近中のロボットが人間の求めてきた握手に応じる動作を生成させるために、人間同士の接近を伴う握手動作を計測し、その特性について解析を行っている。そして、人間同士の接近を伴う握手動作の解析結果に基づいて、接近中のロボットが人間の求めてきた握手に応じる動作を生成する握手応答動作モデルを提案している。さらに、開発した移動握手ロボットシステムに提案モデルを適用し、官能評価実験によりシステムの有効性を示している。また、人間が握手を求めてきた場合はそれに応じ、求めてこない場合は、ロボットから積極的に握手を求める必要がある。そこで、提案した接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを適切に切り替えることで、人間が接近中

のロボットに握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合にはロボットから握手を求める動作を生成している。さらに、官能評価実験により人間に好まれる切り替え動作が生成可能であることを示している。

5.2 移動握手ロボットシステム

ロボットから能動的に接近するため、移動可能な握手ロボットシステムを開発した。図5.1に開発した握手ロボットシステムの外観を示す。構築した移動ロボットの上半身は4章で開発した握手ロボットを用いており、平均的な成人男性の大きさ [5.1] を基準として、その大きさの約1/2となるように設計、製作を行った [5.2]。また、移動機構部分は車輪駆動型であり、4輪操舵、4輪駆動を採用し、その場での回転や平行移動を可能にしている。移動ロボットの各車輪には駆動用のサーボモータと車輪の回転角を計測するロータリーエンコーダ、および操舵用のサーボモータと操舵角を計測するロータリーエンコーダが取り付けられている。これらのサーボモータとロータリーエンコーダは Programmable Logic Controller (PLC) (三菱電機社製) に接続されており、制御用 PC により生成された目標軌道を追従するように制御される。ロボットから人間までの距離はロボットに備えた測域センサ (LaserRangeFinder) により計測している。また、人間の手部には、磁気センサ (FASTRAK) を取り付け計測することで、人間が差し出した手部位置および接線方向の速度を計測している。計測された各データは PC に送信され、ロボットの制御量を計算する。ロボットには音声挨拶を発声するためにスピーカを備えている。音声挨拶には、「よろしく」の音声を使用している。

5.3 人間同士における握手要求動作の解析

ロボットが人間に接近し握手を求める場合、ロボットは人間に自然なタイミングで手部を差し出す必要がある。そのため、人間同士の接近を伴う握手動作を計測し、接近動作、手部動作および音声挨拶のタイミングについて解析を行った。

5.3 人間同士における握手要求動作の解析

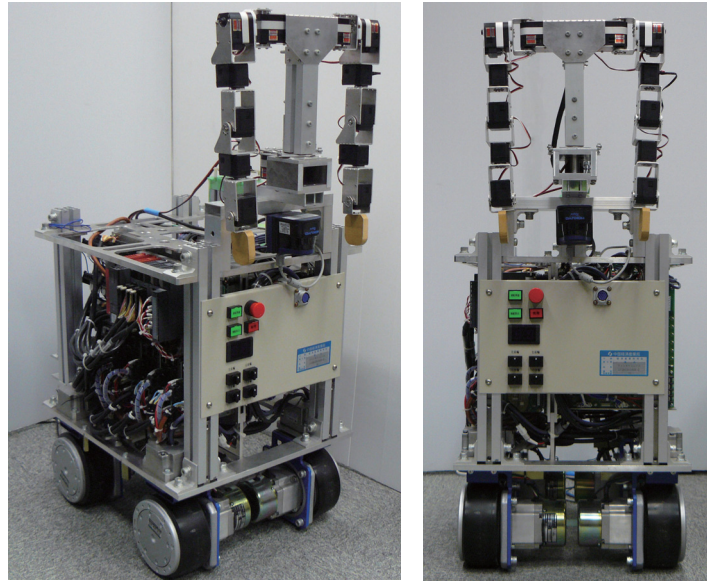


図 5.1 握手ロボットシステムの外観

5.3.1 解析実験

接近動作を伴う人間同士の握手動作を3次元モーションキャプチャ（OXFORD METRICS 社製）を用いて計測した。実験風景を図 5.2 に示す。また、図 5.2 中に示すように、3次元空間には直交座標系 (X-Y-Z) を定義する。握手動作実験では2人1組となり、接近して握手を求める側と、静止してそれに応じる側を定めて音声挨拶を伴う握手を行わせた。応じる側の被験者には右手首、右肘、右肩、左肩の計4カ所のマークを取り付け、求める側には応じる側と同じ位置の4カ所に加え、左右足首の計6カ所に反射マークを取り付けた。そして、それらのマークの位置を10台のカメラを用いて測定した。なお、3次元モーションキャプチャの空間分解能は ± 1 mm、サンプリングレートは120 Hzである。被験2人を向かい合わせに3,000 mmの間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。求める側の人間の接近動作と手部動作を解析するために、求める側には応じる側に接近させ、任意の距離およびタイミングで応じる側に対し握手を求めるように手部を差し出させた。応じる側はそれに協調するようにして握手を行わせた。また、音声挨拶には「よろしく」を用い、発声のタイミングは被験者の任意とした。1組の被験者それぞれに対して握手を求める側とそれに応じる側を行わせ、握手動作を10回ずつ記録した。被験者は年齢18~24歳の右利きの健常な男女学生15組30名である。

5.3.2 実験結果

手部動作と接近動作のタイミング

図 5.3 に肩、および右手部の速度の一例を示す。接近動作として肩部の速度を、手部動作として肩からの相対的な右手部の速度を求めた。また、図の横軸は求める側の接近動作が完了した時刻を 0 秒とした時間軸である。図より被験者は接近動作中に手部動作を開始していることが分かる。そこで、図 5.4 に全被験者の手部動作を開始するタイミングをヒストグラムとして示す。図の横軸は接近動作が完了した時刻を基準とする手部動作の開始の相対的な時間のずれである。時間が負の場合では被験者は接近動作

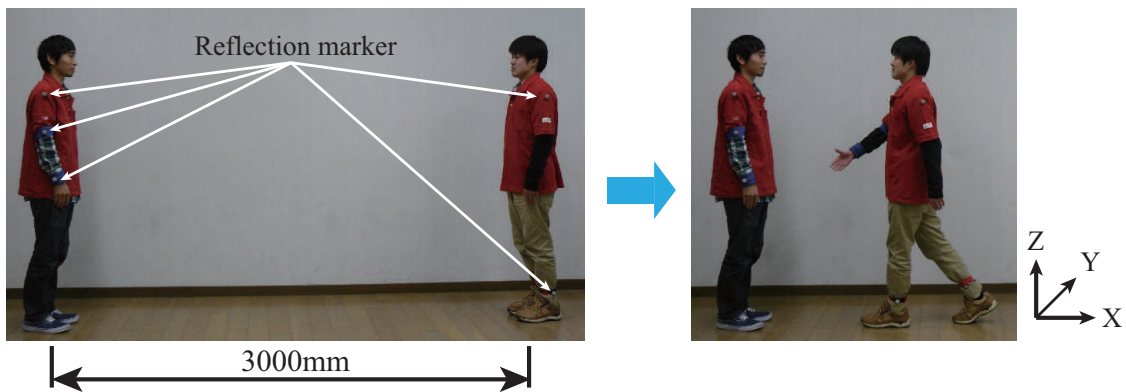


図 5.2 実験風景

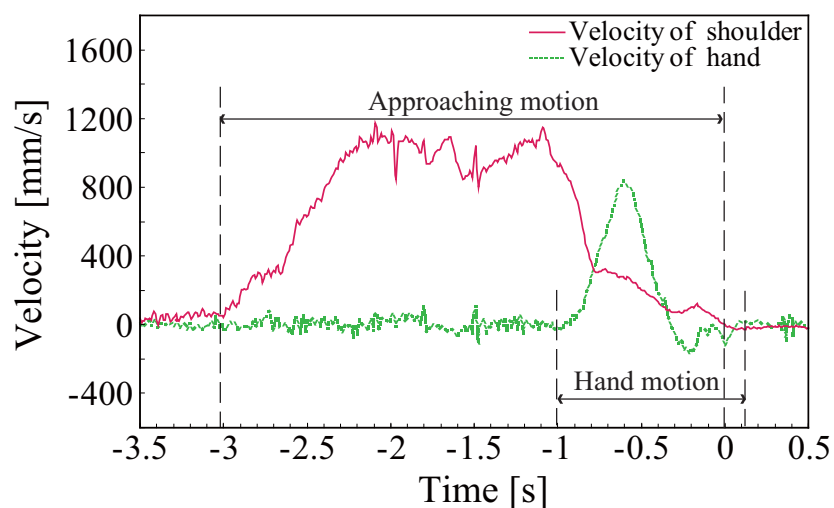


図 5.3 肩と手部の速度パターンの一例

5.3 人間同士における握手要求動作の解析

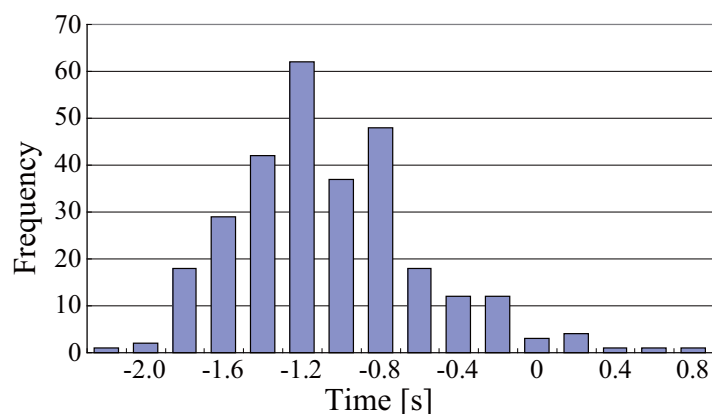


図 5.4 接近停止と握手動作の開始タイミング

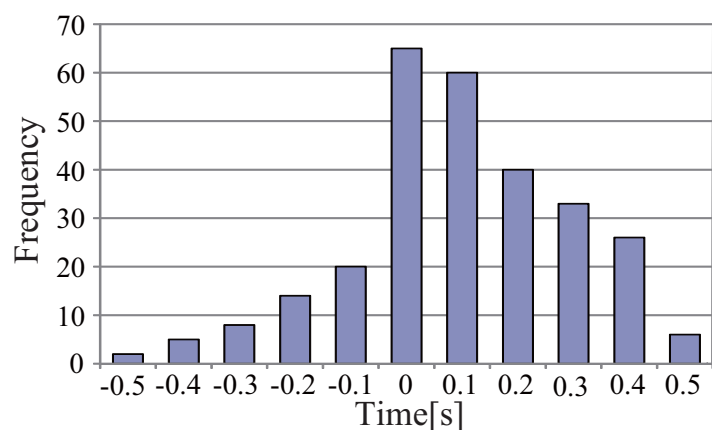


図 5.5 音声挨拶と手部動作の開始タイミング

中であり、時間が正の場合では接近を停止していることを表している。図より多くの被験者が接近動作を完了する約 1.2 秒前に手部動作を開始していることが示された。また、被験者の約 98% が接近動作を完了するまでに手部動作を開始することが示された。

手部動作と音声挨拶のタイミング

握手を求める側の手部動作と音声挨拶のタイミングについて計測を行った。図 5.5 に計測したタイミングの 90% 以上が分布した -0.5 秒から 0.5 秒までのヒストグラムを示す。図の横軸は、タイミングが負の場合では手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が早く、タイミングが正の場合では手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が遅いこ

第5章 ロボットの接近を伴う握手動作を生成する小型握手ロボットシステム

とを表している。図より、0秒付近に多く分布していることが分かる。また、手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が遅いタイミングに多く分布していることが示された。これらの結果から、人間同士の握手動作では多くの被験者が手部動作の開始に対して音声挨拶を同時または遅くに開始していることが示された。

接近動作

ロボットの接近動作を生成するために、人間の握手要求時における接近速度の計測を行った。図5.6に全実験における被験者の接近速度のヒストグラムを示す。図の横軸は、求める側が応じる側に対して接近する速度である。図より850 mm/sを頂点とする分布となることが示された。また、図5.7に被験者が減速を開始するタイミングのヒ

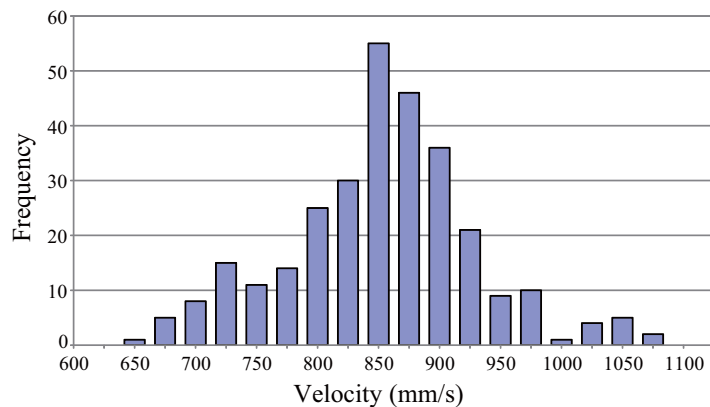


図 5.6 接近速度

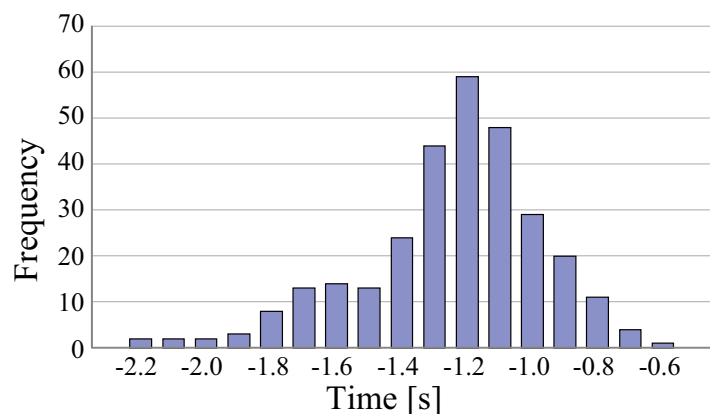


図 5.7 減速開始時間

5.4 接近握手要求動作モデル

ストグラムを示す。図の横軸は接近動作が完了した時刻を基準とする手部動作の開始の相対的な時間のずれである。時間が負の場合では被験者は接近動作中であることを表している。図より-1.2秒を頂点とする分布となることが示された。

5.4 接近握手要求動作モデル

人間同士の動作解析から、求める側は接近動作を完了するまでに手部動作を開始することが示されている。そこで、提案モデルではロボットから能動的に接近し、減速しながら人間に対し握手を求める握手要求動作を生成する。

5.4.1 手部動作の生成

ロボットから人間に握手を求める動作の生成には2章で示した、互いに静止した状態において有効性が示されている握手要求動作モデル [5.3] を用いる。握手要求動作モデルは、動作時間の異なる2つの躍度最小モデル [5.4] を結合することで任意の位置に速度ピークを有する釣鐘型速度パターンを生成し、そのパターンを用いてロボットの肩と肘関節を回転動作させることで、握手要求動作を生成するものである。

また、人間同士の動作解析から、多くの被験者が接近動作を完了する約1.2秒前に手部動作を開始しており、接近動作を完了するまでに手部動作を開始している。そこで本モデルでは、接近動作の停止が完了する前に手部動作を開始することにより人間に好まれる握手動作を生成する。

5.4.2 接近動作の生成

ロボットが人間に接近する場合、ロボットは人間に恐怖感や不快感を与えないように滑らかな運動を生成する必要がある。そこで、ロボットが人間に対し接近する動作を等速度の接近、および躍度最小モデルに基づく減速により生成する。ロボットが人間に接近する速度波形を図5.8に示す。人間同士の握手動作解析の結果においては、多くの人間は接近速度850 mm/sで接近し、停止する約1.2秒前に減速を開始していることが示されている。しかし、中島らによれば、移動体ロボットが800 mm/s以上の移動

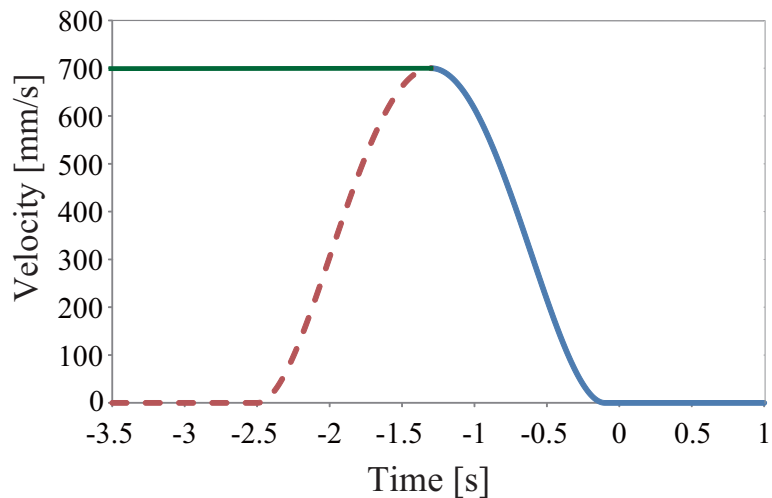


図 5.8 接近動作の速度パターン

速度で接近すると人間に対し威圧感などの心理的变化を与えると示している [5.5]。また、予備実験の結果、ロボットが 850 mm/s で接近すると恐怖感を感じるという結果が得られたため、接近速度は 700 mm/s とした。そして、滑らかに停止するために、動作時間を 2.4 s、最大速度を 700 mm/s とする躍度最小モデルの後半 1.2 s の速度パターンを用いて減速する動作を生成する。

5.4.3 生成される握手要求動作

提案する接近握手要求動作モデルの有効性を示すために、人間同士の握手動作における求める側の手部軌道の一例と本モデルにより生成された軌道との比較を行った。本モデルにより生成された握手ロボットの手部軌道を図 5.9~5.11 に示す。ただし、握手ロボットにおける手部の始点と終点の位置および動作時間は人間の手部動作と一致させた。図 5.9、5.10 はそれぞれ X-Z 平面、X-Y 平面の軌跡を示し、図 5.11 は接線方向の速度パターンを示している。図 5.9、5.10 より生成された握手ロボットの軌跡は滑らかな曲線となっており、その概形が人間の軌跡と非常に類似していることが分かる。また図 5.11 より、生成された握手ロボットの軌跡に対する接線方向の速度パターンについても滑らかなものとなっており、その概形は人間の速度パターンと類似している。これらのことから、提案する接近握手要求動作モデルにより生成される手部動作は人間同士の握手をを求める側の動作を再現していることが分かる。

5.5 接近握手要求動作モデルの評価実験

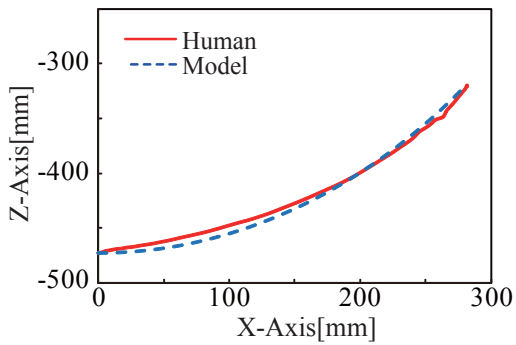


図 5.9 モデルの軌道 ((X-Z 平面))

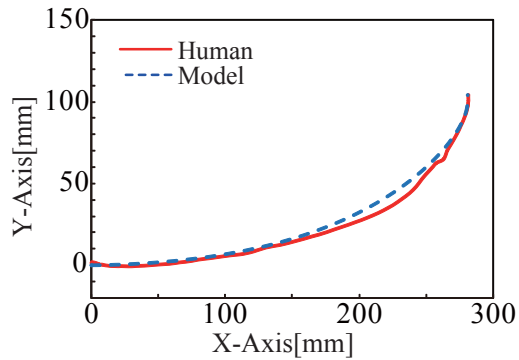


図 5.10 モデルの軌道 (X-Y 平面)

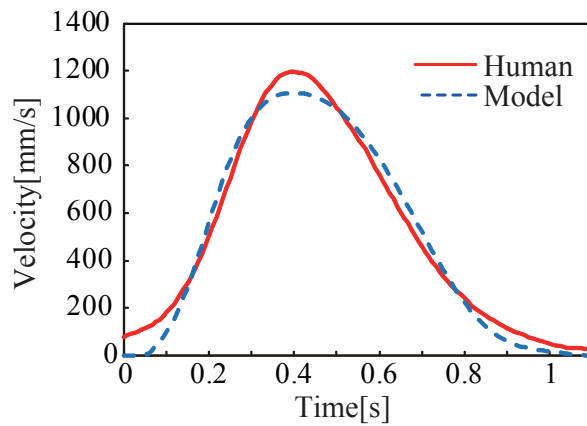


図 5.11 モデルによる速度パターン

5.5 接近握手要求動作モデルの評価実験

5.5.1 接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験

提案する接近を伴う握手要求動作はロボットから動作を開始するため、接近動作中の手部動作を開始するタイミングにより人間に対し与える印象が変化すると考えられる。そこで、人間に好まれるロボットの手部動作の開始タイミングを移動握手ロボットシステムを用いた官能評価実験により検討する。

実験方法

人間同士の握手動作解析の結果においては、多くの人間が接近を停止する 1.2 秒前に手部動作を開始していることが示されている。そのため、実験では、(a) 停止と同時に手部動作を開始、(b) 停止する 0.6 秒前に手部動作を開始、(c) 停止する 1.2 秒前に手部動作を開始の 3 つのモードを用意した。実験では、被験者をロボットと向かい合わせに 3,000 mm の間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。その後、合図によりロボットが被験者に接近していき、接近握手要求動作モデルにより握手要求動作を生成した。被験者には予め、ロボットが求めてきた握手に応じるよう指示した。実験では、一対比較を行い、その後、7 段階評価を行った。一対比較は順序効果を考慮して、前後を入れ替えたすべての組み合わせ（計 6 回）について行い、総合的にどちらのモードによる握手動作が良かったかについて答えさせた。また、7 段階評価は「握手しやすさ」、「安心感」、「丁寧さ」、「生命感」の 4 項目について 7 段階（中立 0）により評価させた。被験者は 18~24 歳の男女学生 30 人である。実験の様子を図 5.12 に示す。



図 5.12 接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験の様子

5.5 接近握手要求動作モデルの評価実験

実験結果

一対比較の結果を表 5.1 に示す。表中の数字は各行のモードの勝数、つまり各行のモードを選択した人数を表している。さらに、一対比較に基づく評価を一義的に定めるために、Bradley-Terry モデル [5.6] を用いて各モードの好ましき π を最尤推定した。なお、モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましき π の妥当性が保証された。

Bradley-Terry モデルにより得られた好ましき π を図 5.13 に示す。図よりモード (b) である停止する 0.6 秒前に手部動作を開始する動作が最も高く評価されていることが分かる。

次に、各評価項目における、3つのモードの7段階評価の平均値と標準偏差を図 5.14 に示す。図中のアスタリスクは、この結果を Friedman の分散分析法により検定した結果である。図より「握手しやすさ」、「安心感」の項目でモード (b) が (a)、(c) に対し高く評価され、その間には有意水準 1% で有意差が認められた。これは Bradley-Terry モ

表 5.1 接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		19	26	45
(b)	41		38	79
(c)	34	22		56

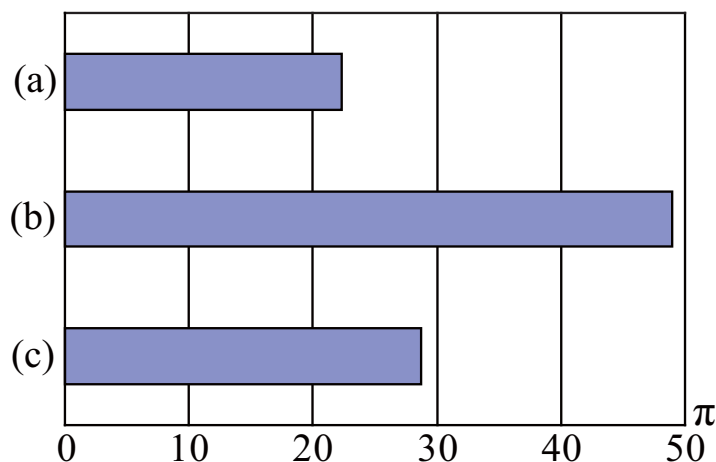


図 5.13 接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験における好ましき

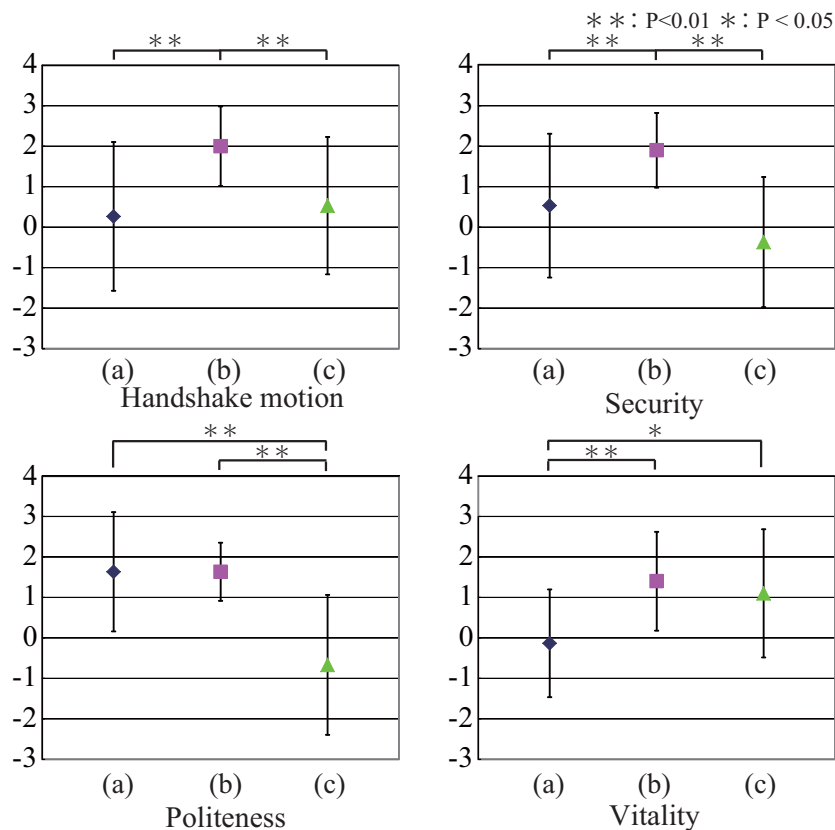


図 5.14 接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験における7段階評価結果

デルの結果とも一致するものである。また、「丁寧さ」の項目でモード (a)、(b) が (c) に対し高く評価され、その間には有意水準1%で有意差が認められた。「生命感」の項目でモード (b)、(c) が (a) に対し高く評価され、その間には有意水準1%および5%の有意差が認められた。以上の結果より (b) 停止する0.6秒前に手部動作を開始するモードが高く評価されていることが示された。この最も高く評価されたモード (b) では、7段階評価の全ての項目において肯定的に評価されており、ロボットにより生成された動作は握手が行いやすく安心感があり、人間に好まれたものとなっているといえる。

以上の結果より、ロボットの握手動作は人間同士の場合と比べ、手部動作の開始を0.6秒遅延させた動作が好まれることが示された。これは、人間同士の握手動作において、停止する1.2秒前に手部動作を開始する被験者が最も多い、という結果とは異なるものとなった。握手要求動作ではロボットから動作を開始するため、人間はロボットが動作を開始することを感知し、身体的リズムを同調させる必要がある。本ロボットシステムでは、接近動作を減速するタイミングが停止する1.2秒前となっている。その

5.5 接近握手要求動作モデルの評価実験

ため、減速を開始した後に手部動作を開始することで、人間がロボットの動作を感知できることにより好まれたと考えられる。また、手部動作の開始を遅らせると「丁寧さ」が高く評価される傾向が見られた。これは、減速による注意喚起によって丁寧さを感じたためと考えられる。一方、手部動作の開始を早めると「生命感」が高く評価される傾向が見られた。これは、低く評価されたモード (a) の完全に動作を停止してから次の動作を行うことが、不自然に感じられたためと考えられる。以上の結果から、提案する接近握手要求動作モデルにより人間に好まれる握手要求動作が生成可能であり、その有効性が示された。

5.5.2 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験

手部動作と音声挨拶のタイミングにより人間に与える印象が変化すると考えられる。そこで、人間に好まれるロボットの手部動作と音声挨拶のタイミングについて握手ロボットシステムを用いた官能評価実験により検討する。

実験方法

人間同士の握手動作解析の結果においては、多くの人間が音声挨拶と手部動作を同時に開始している。一方で、人間とロボットのお辞儀を伴った挨拶インタラクションにおいて、音声挨拶に対してお辞儀動作を0.3秒早く開始することで、丁寧さが増すなど人間に好まれることが示されている。また、人間の視覚から運動処理系の反応速度は0.3秒程度であることが報告されている [5,7, 8, 9]。よって、0.3秒未満のずれでは、動作に関するタイミングの評価が大きく変化しないと考えられる。そのため、実験では手部動作と音声挨拶を開始するタイミングを変化させた3つのモードを用意した。3つのモードは (a) 音声挨拶が手部動作より0.3秒遅く開始、(b) 音声挨拶と手部動作が同時に開始、(c) 音声挨拶が手部動作より0.3秒早く開始とした。また、音声挨拶には「よろしく」を用いた。実験では、被験者をロボットと向かい合わせに3,000 mmの間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。その後、合図によりロボットが被験者に接近していき、接近を伴う握手要求動作を生成した。握手ロボットの動作には、接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験によって最も高く評価された動作である、接近を停止する0.6秒前に握手要求を開始する動作を用いた。

第5章 ロボットの接近を伴う握手動作を生成する小型握手ロボットシステム

実験では、一対比較を行い、その後、7段階評価を行った。その他の実験条件は上述の実験と一致させた。

実験結果

一対比較の結果を表5.2に示す。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terryモデルを想定し、好ましさ π を最尤推定した。Bradley-Terryモデルの結果を図5.15に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましさ π の妥当性が保証された。図よりモード(b)が最も高く評価されているもののモード(c)との間には大きな差は見られなかった。

7段階評価の結果として、平均値と標準偏差、及びFriedmanの分散分析法による有意差を図5.16に示す。図より「丁寧さ」の項目において、モード(c)が(a)より高く評価され、その間に有意水準5%で有意差が認められた。しかしながら、モード(b)と(c)の間には全ての項目において有意な差が見られなかった。このモード(b)と(c)はBradley-Terryモデルにおいて高く評価され、7段階評価の全ての項目においても肯定

表 5.2 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		16	28	44
(b)	44		29	73
(c)	32	31		63

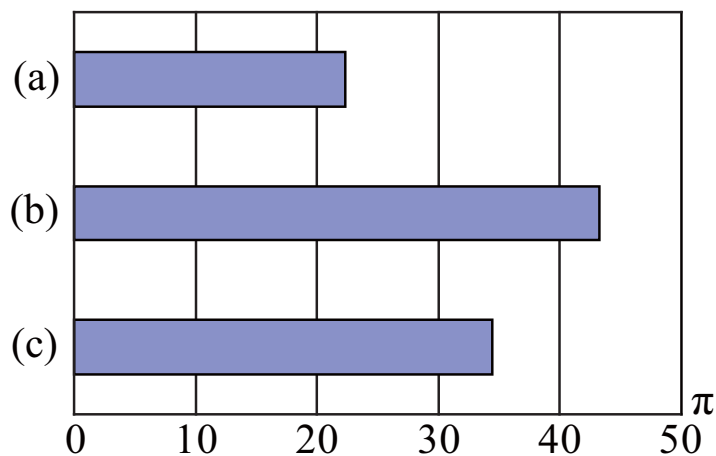


図 5.15 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験における好ましさ

5.5 接近握手要求動作モデルの評価実験

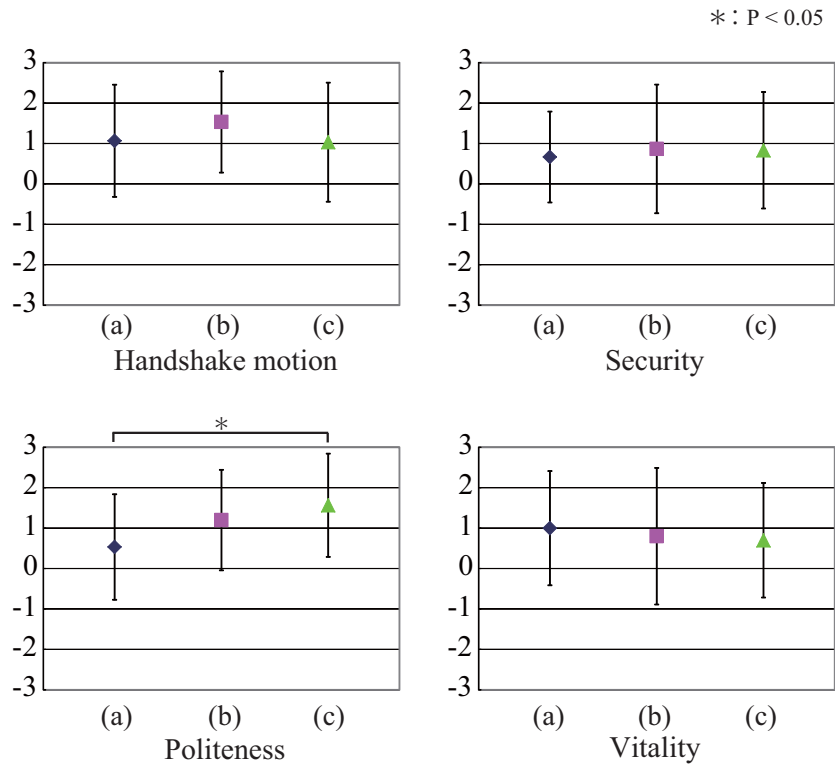


図 5.16 音声挨拶と手部動作の開始タイミングの評価実験における7段階評価結果

的に評価されていることから、人間に好まれたものとなっている。

以上の結果より、音声挨拶と手部動作が同時、もしくは音声挨拶が手部動作より0.3秒早く開始するモードが高く評価されることが示された。これは、人間同士の握手動作における0秒付近に多く分布する結果と同様となったが、手部動作の開始に対して音声挨拶の発声が遅いタイミングに分布する結果とは異なるものとなった。また、人間と同サイズの握手ロボットによる静止している場合での握手動作では、手部動作を開始する前に音声挨拶を発声することで、人間に注意を喚起させられるため好まれることが報告されている。ロボットの接近を伴う握手動作の場合でも、ロボットが手部動作を開始する前に音声挨拶を発声することで、人間同士の握手動作と同様に人間に注意を喚起させられるとともに、身体リズムの同調が容易となるためと考えられる。また、ロボットのお辞儀動作を音声挨拶に対して0.3秒早く開始する動作が人間に好まれることが山本ら [5.10] により報告されている。しかしながら、本実験においては逆に、音声挨拶に対して手部動作を0.3秒遅く開始する握手動作が人間に好まれた。これは、握手動作がお辞儀動作と異なり人間に対して物理的に接触する行動であり、音声によ

る注意喚起が好まれたためだと考えられる。

5.6 人間同士における握手応答動作解析

接近中のロボットに人間が握手を求め、ロボットがそれに応じる場合、ロボットは自然なタイミングで人間に手部を差し出す必要がある。そのため、人間同士の接近を伴う握手動作を計測し、接近動作、手部動作および音声挨拶のタイミングについて解析を行った。

5.6.1 解析実験

接近動作を伴う人間同士の握手動作を3次元モーションキャプチャ（OXFORD METRICS 社製）を用いて計測した。実験風景を図5.17に示す。また、図5.17中に示すように、3次元空間には直交座標系（X-Y-Z）を定義する。握手動作実験では2人1組となり、静止して握手を求める側と、接近してそれに応じる側を定めて音声挨拶を伴う握手を行わせた。求める側の被験者には右手首、右肘、右肩、左肩の計4カ所のマーカを取り付け、応じる側には求める側と同じ位置の4カ所に加え、左右足首の計6カ所に反射マーカを取り付けた。そして、それらのマーカの位置を10台のカメラを用いて測定した。なお、3次元モーションキャプチャの空間分解能は ± 1 mm、サンプリングレートは120 Hzである。被験者2人を向かい合わせに3,000 mmの間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。

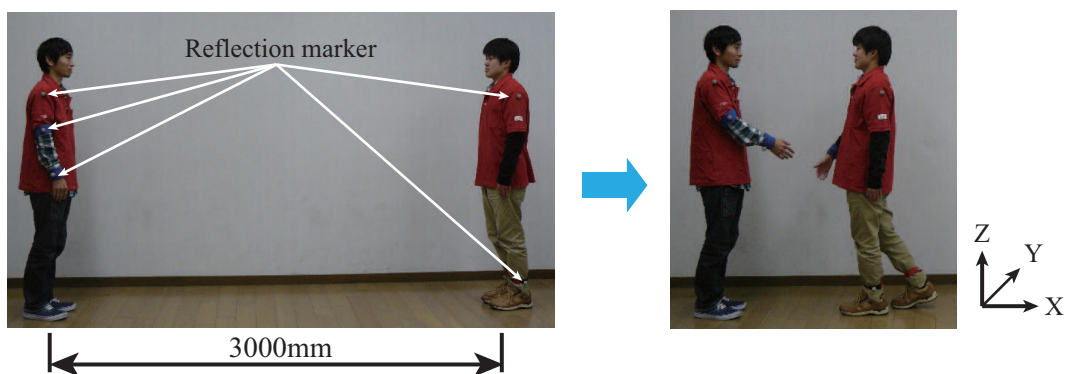


図 5.17 実験風景

5.6 人間同士における握手応答動作解析

応じる側の人間の接近動作と手部動作を解析するために、求める側には接近してくる応じる側に対し任意の距離およびタイミングで握手を求めるように手部を差し出させた。応じる側はそれに協調するようにして握手を行わせた。また、音声挨拶には「よろしく」を用い、発声のタイミングは被験者の任意とした。1組の被験者それぞれに対して握手を求める側とそれに応じる側を行わせ、握手動作を10回ずつ記録した。被験者は年齢18~24歳の右利きの健常な男女学生15組30名である。

5.6.2 実験結果

図5.18に求める側および応じる側の手部速度の一例を示す。また、図の横軸は求める側の握手動作が開始した時刻を0秒とした時間軸である。図より求める側、応じる側ともに滑らかな釣鐘型の速度パターンである。しかしながら、求める側に比べ応じる側のピーク速度は大きく、動作時間も短いことがわかる。

そこで、求める側と応じる側の動作時間の散布図を図5.19に示す。図の横軸は求める側の握手動作時間、縦軸は応じる側の握手動作時間とした時間軸である。また、図中の斜線は求める側の動作時間と応じる側の動作時間が等しい部分を示し、斜線の右下では応じる側の動作時間が求める側の動作時間より短く、斜線の左上では求める側の動作時間が応じる側の動作時間より短いことを示している。図より多くの被験者において、求める側に比べ応じる側の手部動作時間のほう短いことが示された。

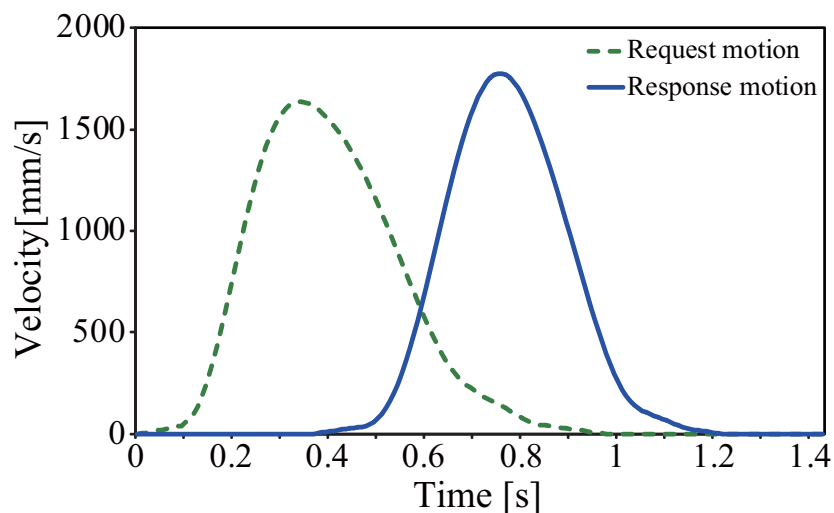


図 5.18 求める側と応じる側の速度パターン

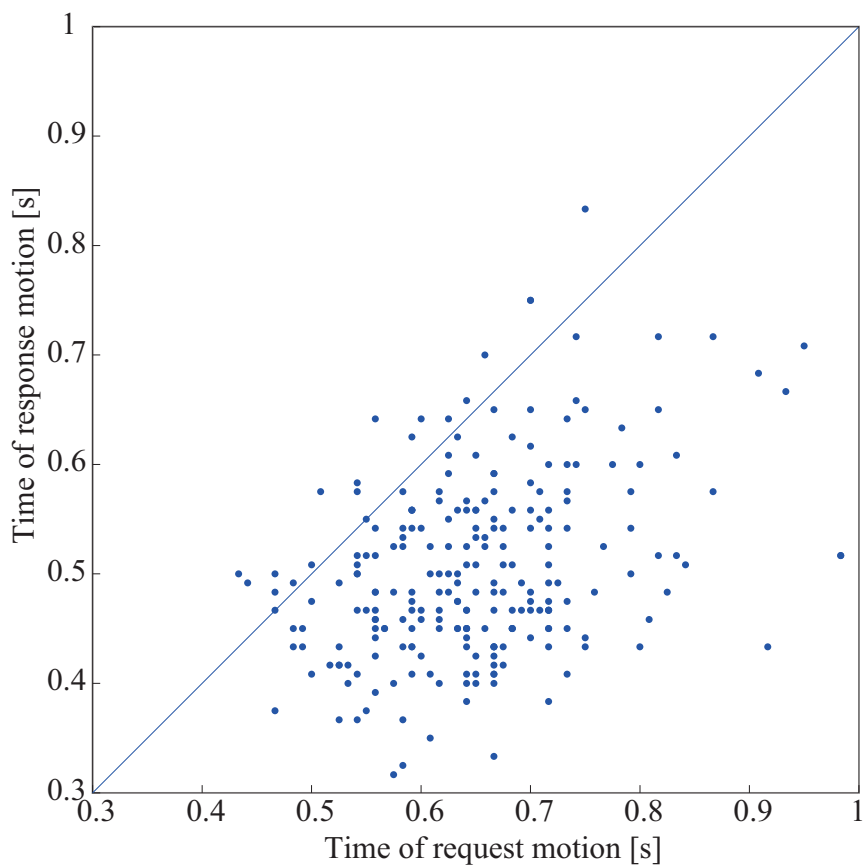


図 5.19 求める側と応じる側の手部動作時間の分布

そこで、図 5.20 に全被験者の要求動作と応答動作の開始するタイミングの遅れをヒストグラムとして示す。また、図 5.21 に要求動作と応答動作の完了するタイミングの遅れをヒストグラムとして示す。図の横軸は要求動作を基準とした時間の遅れである。

5.6 人間同士における握手応答動作解析

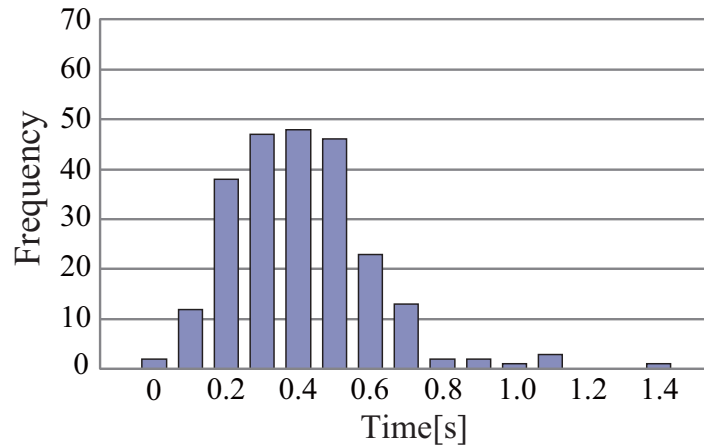


図 5.20 要求動作開始と応答動作開始のタイミング

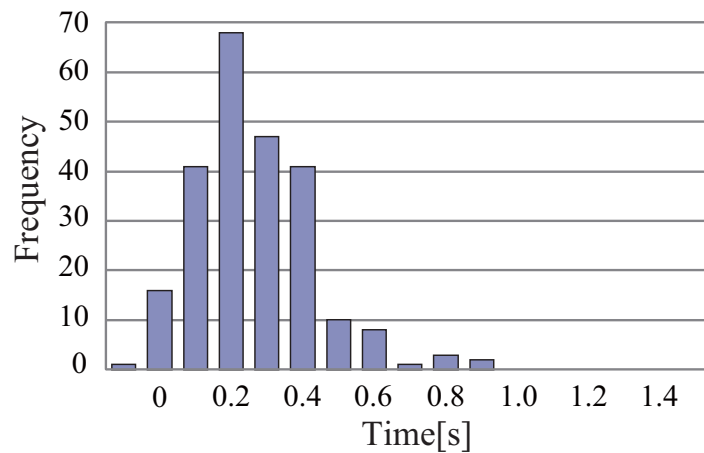


図 5.21 要求動作完了と応答動作完了のタイミング

図 5.20 では、0.4 秒を頂点とし、0.1~0.7 秒の範囲に分布しているが、図 5.21 では、0.2 秒を頂点とし、0~0.4 秒の範囲に分布している。

以上の結果より、図 5.20 では分布の頂点が 0.4 秒であるが、図 5.21 では分布の頂点が 0.2 秒となっており、握手動作の開始タイミングの遅れに対して、握手動作の完了タイミングの遅れが 0.2 秒短くなっていることが示されている。また、応じる側は求める側の動作が完了する 0.2 秒後に応答動作を完了させていることが示された。

5.7 接近握手応答動作モデル

図5.19から、求める側に比べ応じる側の手部動作時間のほうが短いことが示された。2章において示した握手応答動作モデル [5.11] は2次遅れ要素にむだ時間を適用することでロボットの動作を生成するものである。そのため、このモデルによって生成された握手応答動作は握手要求動作の動作時間より長くなるため、接近時の握手応答動作を生成できない。一方で、人間同士の動作解析から、動作開始の遅れに比べ、動作完了の遅れが減少していることが示された。これは、求める側の動作完了に合わせて、応じる側が動作を完了していると考えられる。そこで、提案する接近握手応答動作モデルでは、求める側の手部の速度パターンから握手要求動作の完了時刻を推定し、その時刻に合わせて応答動作を完了する。人間同士の握手動作解析から、手部の速度パターンは1つのピークを有する釣鐘型の滑らかな波形となることが示されている。そこで、本モデルでは、握手要求動作における手部の接線方向の速度は2つの躍度最小モデルの結合によって表されるものとし、2つの躍度最小モデルの前半部分を推定することで動作時間を推定する。さらに、推定した前半部分の動作時間をもとに握手要求動作全体の動作時間を推定する。

人間同士の握手動作解析から多くの人は握手要求動作が開始して0.4秒後に握手応答動作を開始している。そこで、まず握手要求動作の開始から0.4秒までの速度データを計測し、その速度データにモデル関数を非線形最小二乗法 [5.12] によりフィッティングさせ、フィッティングパラメータをもとめる。ここで、モデル関数として躍度最小モデルである式 (5.1) を用い、式 (5.1) 中のフィッティングパラメータ T_f , Δr を求める。ここで、 T_f , Δr は、握手動作の動作時間および移動量である。この結果、2つの躍度最小モデルの前半部分の動作時間 T_f が求められる。そして、推定された T_f から握手要求動作全体の動作時間 T_{max} を式 (5.2) により求める。ここで、 P は動作時間全体における速度ピーク位置であり、本モデルにおいては人間同士の動作解析から 0.47 を用いている。以上の手法により、求める側は要求動作の開始から T_{max} 秒後に動作を完了すると推定される。そこで提案モデルでは、本手法により推定された完了時刻に合わせて握手応答動作を完了するように、2章で示した握手要求動作モデルの動作時間を決定する。

5.8 接近握手応答動作モデルの評価実験

$$V(t) = \frac{30 \cdot \Delta r}{T_f^5} (t^4 - 2 \cdot T_f \cdot t^3 + T_f^2 \cdot t^2) \quad (5.1)$$

$$T_{max} = \frac{T_f}{2 \cdot P} \quad (5.2)$$

図 5.22 にフィッティングによる動作時間推定の例を示す。図中の丸（赤）は握手要求動作開始後 0.4 秒まで、四角（青）は握手要求動作開始後 0.4 秒から握手要求動作完了までの計測された速度を示している。また、実線（緑）は握手要求動作開始後 0.4 秒までの計測された速度から推定した握手要求動作の速度パターンである。図から握手要求動作開始後 0.4 秒までの手部速度を用いて、求める側の手部速度パターンが推定できることが示された。

5.8 接近握手応答動作モデルの評価実験

5.8.1 握手応答動作の完了タイミングの評価実験

実験方法

人間同士の握手動作解析の結果においては、多くの人間が握手要求動作の完了して 0.2 秒後に応答動作を完了することが示されている。さらに、その遅れは 0~0.4 秒後ま

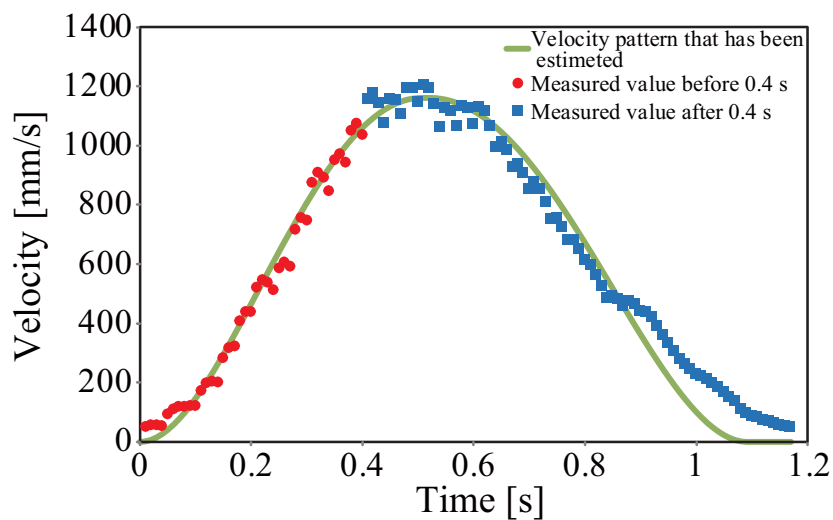


図 5.22 速度パターンの推定

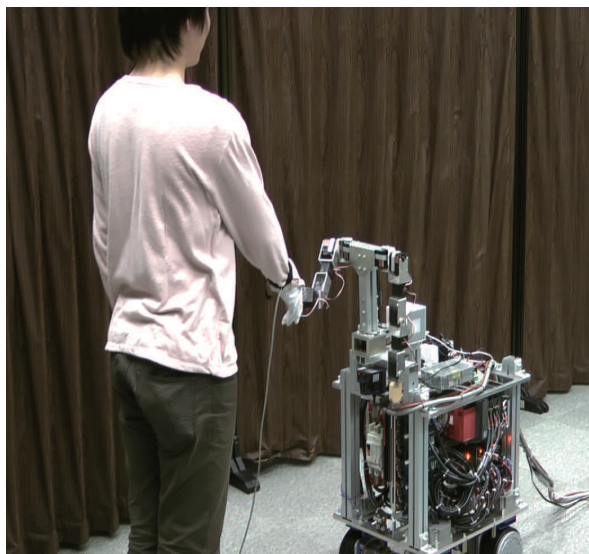


図 5.23 握手応答動作の完了タイミングの評価実験の様子

でに多く分布している。そのため、実験では、(a) 要求動作と同時に完了、(b) 要求動作の 0.2 秒後に完了、(c) 要求動作の 0.4 秒後に完了 の 3 つのモードを用意した。実験では、被験者をロボットと向かい合わせに 3,000 mm の間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。その後、合図によりロボットが被験者に接近していき、接近握手応答動作モデルにより握手応答動作を生成した。被験者には予め、ロボットに対し被験者から握手を求めるよう指示した。実験では、一対比較を行い、その後、7 段階評価を行った。一対比較は順序効果を考慮して、前後を入れ替えたすべての組み合わせ（計 6 回）について行い、総合的にどちらのモードによる握手動作が良かったかについて答えさせた。また、7 段階評価は「握手しやすさ」、「安心感」、「丁寧さ」、「生命感」の 4 項目について 7 段階（中立 0）により評価させた。被験者は 18~24 歳の男女学生 30 人である。実験の様子を図 5.23 に示す。

実験結果

一対比較の結果を表 5.3 に示す。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terry モデルを想定し、好ましさ π を最尤推定した。Bradley-Terry モデルの結果を図 5.24 に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましさ π の妥当性が保証された。図よりモード (b) が最も高く評価されているものの

5.8 接近握手応答動作モデルの評価実験

表 5.3 握手応答動作の完了タイミングの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		6	9	15
(b)	54		30	84
(c)	51	30		81

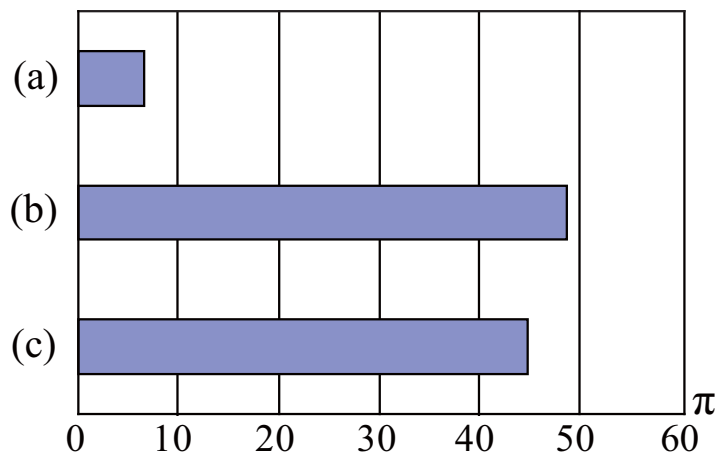


図 5.24 握手応答動作の完了タイミングの評価実験における好ましさ

モード (c) との間には大きな差は見られなかった。

7段階評価の結果として、平均値と標準偏差、及びFriedmanの分散分析法による有意差を図5.25に示す。図よりすべての項目において、モード(b)と(c)が(a)より高く評価され、その間に有意水準1%および5%で有意差が認められた。しかしながら、モード(b)と(c)の間には全ての項目において有意な差が見られなかった。このモード(b)と(c)はBradley-Terryモデルにおいて高く評価され、7段階評価の全ての項目においても肯定的に評価されていることから、人間に好まれたものとなっている。

以上の結果より、応答動作を要求動作完了の0.2秒後および0.4秒後に完了するモードが高く評価されることが示された。これは、人間同士の握手動作における0.2秒を頂点とし、0.2~0.4秒の範囲に多く分布する結果と一致するものとなった。また、モード(a)の要求動作と同時に完了は、一対比較で非常に低く評価されており、また7段階評価の結果でもネガティブに評価されている。これは、要求動作と同時に完了させるためにロボットの握手動作が高速となり、人間に恐怖感を抱かせたためだと考えられる。

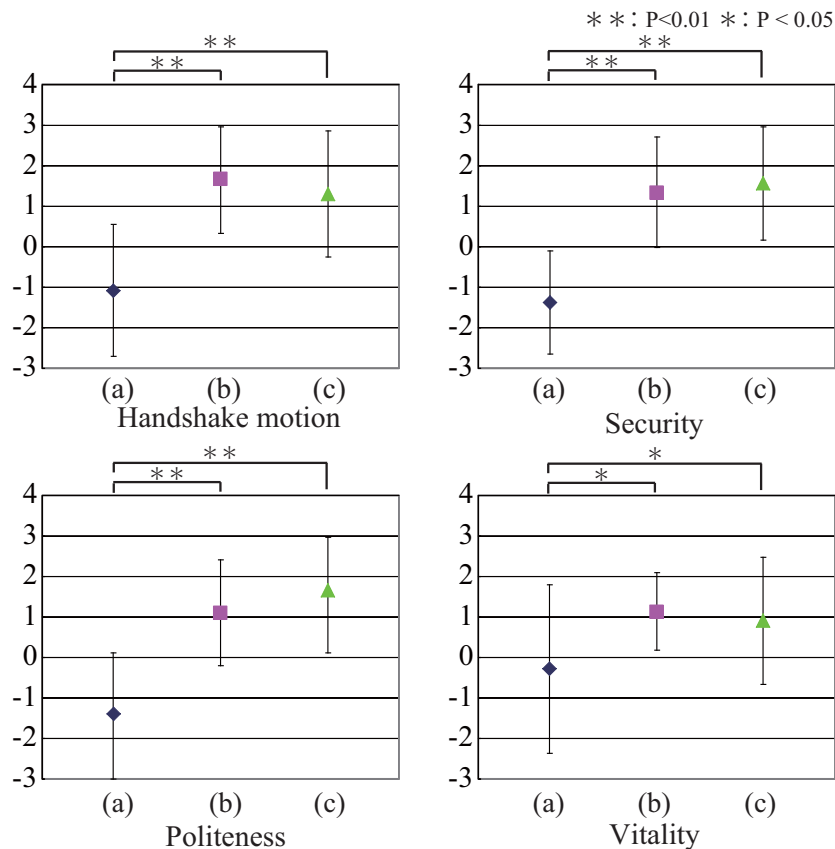


図 5.25 握手応答動作の完了タイミングの評価実験における7段階評価結果

5.8.2 手部動作と音声挨拶の開始タイミングの評価実験

手部動作と音声挨拶のタイミングにより人間に与える印象が変化すると考えられる。そこで、人間に好まれるロボットの手部動作と音声挨拶のタイミングについて握手ロボットシステムを用いた官能評価実験により検討する。

実験方法

実験では手部動作と音声挨拶を開始するタイミングを変化させた3つのモードを用意した。3つのモードは (a) 音声挨拶が手部動作より0.3秒早く開始、(b) 音声挨拶と手部動作が同時に開始、(c) 音声挨拶が手部動作より0.3秒遅く開始とした。また、音声挨拶には「よろしく」を用いた。実験では、被験者をロボットと向かい合わせに3,000 mmの間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。その後、合図によりロボットが被験者に接近していき、接近を伴う握手応答動作を生成した。握

5.8 接近握手応答動作モデルの評価実験

表 5.4 手部動作と音声挨拶の開始タイミングの評価実験における一対比較結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		16	28	44
(b)	44		43	87
(c)	32	17		49

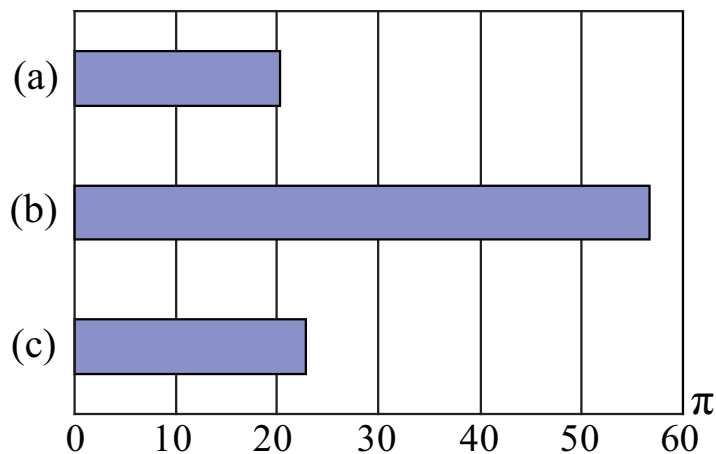


図 5.26 手部動作と音声挨拶の開始タイミングの評価実験における好ましさ

手ロボットの動作には、前述の評価実験によって最も高く評価された動作である、応答動作を要求動作の0.2秒後に完了する動作を用いた。

実験では、一対比較を行い、その後、7段階評価を行った。その他の実験条件は上述の実験と一致させた。

実験結果

一対比較の結果を表5.4に示す。また、各モードの好ましさを定量的に評価するために、Bradley-Terryモデルを想定し、好ましさ π を最尤推定した。Bradley-Terryモデルの結果を図5.26に示す。モデルは適合度検定及び尤度比検定により棄却されず、好ましさ π の妥当性が保証された。図よりモード(b)が最も高く評価されていることがわかる。7段階評価の結果として、平均値と標準偏差、及びFriedmanの分散分析法による有意差を図5.27に示す。図より「握手しやすさ」、「丁寧さ」の項目でモード(b)が(a)、(c)に対し高く評価され、その間には有意水準1%で有意差が認められた。これはBradley-Terryモデルの結果とも一致するものである。また、「安心感」、「生命感」

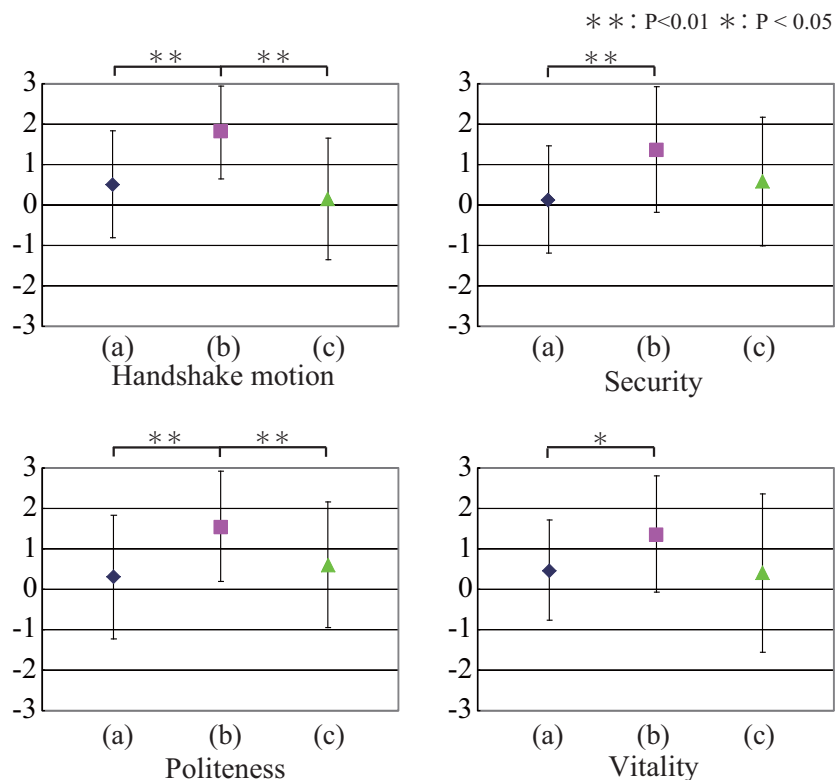


図 5.27 手部動作と音声挨拶の開始タイミングの評価実験における7段階評価結果

の項目でモード (b) が (a) に対し高く評価され、その間には有意水準1%および5%の有意差が認められた。モード (b) はすべての7段階評価のすべての項目において肯定的に評価されていることから、人間に好まれたものとなっている。以上の結果より、音声挨拶と手部動作が同時に開始するモードが高く評価されることが示された。

また、人間と同サイズの握手ロボットによる静止した場合での握手動作では、手部動作を開始する前に音声挨拶を発声することが、人間に注意を喚起させられるため好まれたと報告されている。しかしながら、本実験においては、音声挨拶と手部動作が同時に開始する握手動作が人間に好まれ、異なる結果となった。これは、人間は接近動作速度や減速によってロボットの停止位置やタイミングなどが予測できるため、手部動作を開始する前に音声挨拶を発声することが不自然に感じられ、人間と同様の音声挨拶と手部動作が同時に開始する握手動作が好まれたと考えられる。

5.9 接近握手動作モデルの切替評価実験

5.9.1 実験目的

多くの人間は静止している人間が握手を求めかどうかをその場に応じて判断している。そのため、ロボットにも静止している人間が握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合には握手を求める動作を生成する必要がある。そこで、接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを接近中に適切に切り替えることで、そのような動作を生成する。

本実験では、開発した握手ロボットを用いて、人間に好まれる接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを切り替えるタイミングについて官能評価により検討している。

5.9.2 実験方法

開発した移動握手ロボットシステムを用いて、人間に好まれる握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを切り替えるタイミングの検討するために評価実験を行った。本実験における接近握手要求動作は、官能評価実験により最も高く評価された、接近を停止する0.6秒前に握手要求を開始し、音声挨拶と手部動作が同時に開始する動作とした。また、接近握手応答動作は、官能評価実験により最も高く評価された、応答動作を要求動作の0.2秒後に完了し、音声挨拶と手部動作が同時に開始する動作とした。モデルの切り替えタイミングはロボットが接近を停止する0.6秒前とし、被験者が切り替えタイミングよりも前に手部動作を開始している場合には接近握手応答動作モデルにより動作を生成し、切り替えタイミングに到達した時点で接近握手要求動作モデルによる動作を生成した。音声挨拶には、一般的な音声挨拶である「よろしく」を採用した。

実験では被験者をロボットに向かい合わせに3,000 mmの間隔で立たせ、初期姿勢は右腕を下に伸ばした自然な状態とした。その状態でロボットから接近させ、接近握手要求動作もしくは接近握手応答動作を行わせた。実験では、被験者の動作について要求・応答などの動作はあらかじめ定めず、被験者に任意の動作を複数回行わせた。ただし、被験者には要求・応答の両方の動作を必ず行ってもらった。その後「握手しやすさ」、「(ロボットが)握手に応じてくれたか」、「(ロボットが)握手を求めてくれたか」、

第5章 ロボットの接近を伴う握手動作を生成する小型握手ロボットシステム

「安心感」、「丁寧さ」、「生命感」の6項目について7段階評価（中立0）により評価させた。被験者は18~24歳の男女学生30人である。

本実験における、7段階の官能評価を行った結果を図5.28に示す。図は、被験者の7段階評価における評価の平均値と標準偏差を示している。

5.9.3 考察

官能評価の結果より、全ての項目に関して肯定的に評価されたことから、人間に好まれていることがわかる。また、「(ロボットが)握手に応じてくれたか」、「(ロボットが)握手を求めてくれたか」の項目が高く評価されていることから、適切に動作モデルの切り替えが行われており、切り替えるタイミングが人間に好まれていることが示された。このことから、ロボットが接近中に人間から握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合にはロボットから握手を求める動作を生成することが可能となった。

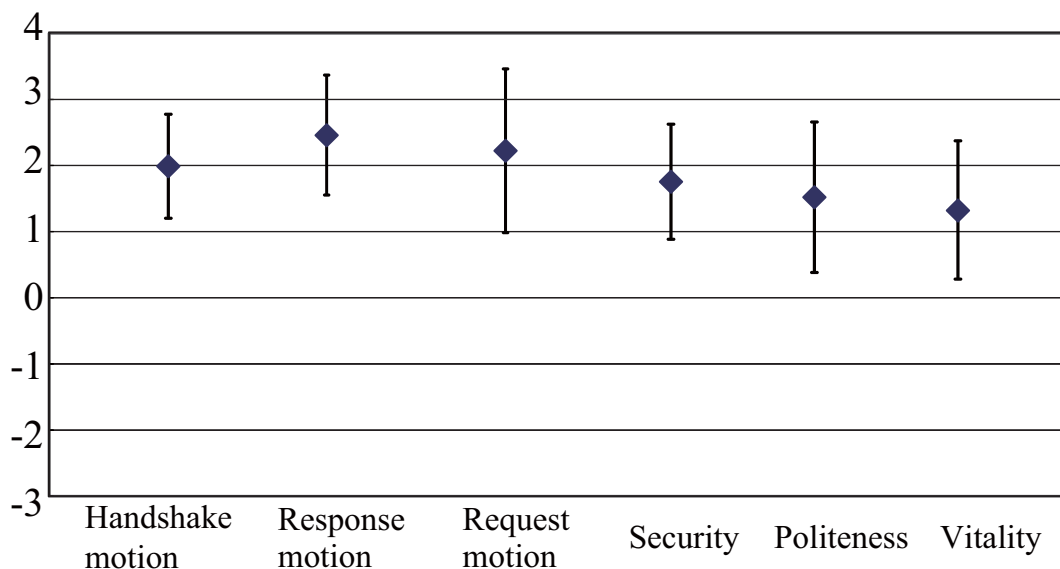


図 5.28 接近握手動作モデル切替実験における7段階評価結果

5.10 結言

本章では、人間同士の接近を伴う握手動作の解析結果に基づいて、接近しながら握手を求める動作を生成する接近握手要求動作モデルおよび接近中に求められた握手に応じる動作を生成する接近握手応答動作モデルを提案した。さらに、提案モデルを適用した移動握手ロボットシステムを開発した。そして、官能評価実験により提案モデルおよびそれを適用したロボットシステムの有効性を示した。

また、接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを接近中に適切に切り替えることで、ロボットが接近中に人間から握手を求められた場合にはそれに応じ、求められない場合にはロボットから握手を求める動作を実現した。

以下に、移動握手ロボットシステムを用いた官能評価実験により得られた結果について示す。

- (1) 移動握手ロボットによる握手要求動作では、停止する0.6秒前に手部動作を開始する動作が人間に好まれることが示された。また、音声挨拶の開始タイミングについては、音声挨拶と手部動作が同時、もしくは音声挨拶が手部動作より0.3秒早く開始する動作が人間に好まれることが示された。これによりそれらの動作を生成する接近握手要求動作モデル、およびそのモデルを適用した移動握手ロボットシステムが有効であることが示された。
- (2) 移動握手ロボットによる握手応答動作では、応答動作を要求動作完了の0.2秒後および0.4秒後に完了する動作が人間に好まれることが示された。また、音声挨拶の開始タイミングについては、音声挨拶と手部動作が同時に開始する動作が人間に好まれることが示された。これによりそれらの動作を生成する接近握手応答動作モデル、およびそのモデルを適用した移動握手ロボットシステムが有効であることが示された。
- (3) 接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルをロボットが接近を停止する0.6秒前で切り替えることで、静止している人間から握手を求められた場合にはそれに応じ、求められない場合にはロボットから握手を求める動作を生成した。これにより、接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを適切に切り替えることで人間の意図に合わせた握手動作を生成することが可能であった。

参考文献

- [5.1] 川内まき子, 持丸正明, 岩澤洋, 三谷誠二: 日本人人体寸法データベース 1997-98; 通商産業省工業技術院くらしと JIS センター, (2000).
- [5.2] 太田俊介, 神代充, 山内仁, 渡辺富夫, 柴田論, 山本智規: 人間との握手接近動作を行う小型握手ロボットシステム; 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.803, pp.2383-2393, (2013).
- [5.3] 神代充, 渡辺富夫, 柴田論, 山本智規: 視線提示を考慮した握手要求動作モデルの開発; 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.776, pp.1429-1440, (2011).
- [5.4] T. Flash and N. Hogan: The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model; *Journal of Neurosciences*, Vol.5, No.7, pp.1688-1703, (1985).
- [5.5] 中島浩二, 佐藤 陽彦: 移動体ロボットに対するヒトの個体距離; 人間工学, Vol.35, No.2, pp.87-95, (1999).
- [5.6] R.A. Bradley and M.E. Terry: Rank analysis of incomplete block designs; *Biometrika*, Vol.39, pp.324-345, (1952).
- [5.7] 熊谷晋一郎: リハビリの夜; 医学書院, pp.24-31, (2009).
- [5.8] K. Kadota, and H. Gomi: Implicit visuomotor processing for quick online reactions is robust against aging; *Journal of Neuroscience*, Vol.30, No.1, pp.205-209, (2010).
- [5.9] 門田浩二: 潜在的な視覚運動制御からみたスポーツ動作; スポーツ心理学研究, Vol.37, No.2, pp.123-131, (2010).
- [5.10] 山本倫也, 渡辺富夫: ロボットとのあいさつインタラクションにおける動作に対する発声遅延の効果; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.87-94, (2004).

参考文献

- [5.11] M. Jindai, T. Watanabe, S. Shibata and T. Yamamoto: Development of a handshake robot system based on a handshake approaching motion model; *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.20, No.4, pp.650-659, (2008).
- [5.12] 本間仁, 春日屋伸昌 : 次元解析・最小二乗法と実験式 ; コロナ社, (1989).

第6章

結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では、近年、社会進出が期待されているロボットが人間に対して、不安や不快感といった負のイメージを抱かせることがないように、身体的インタラクションの一つであり、コミュニケーションの開始を円滑にすると考えられる握手動作をロボットに生成させるものである。とくに、家庭用ロボットは小型であることが望まれ、一般的に握手動作は移動を伴ったものであることから、人間よりも小さなロボットにより人間、ロボットそれぞれが接近を伴う、人間に好まれる握手動作の生成を目指した。そこで本研究では、先行研究によって有効性が示されている握手動作モデルが小型のロボットにおいても有効であることを示した。また、人間、ロボットそれぞれが移動を伴う場合の握手を求める動作、および求められた握手に応じる動作を生成する動作モデルを提案した。さらに、提案モデルを適用した握手ロボットシステムを構築し、官能評価実験によりシステムの有効性を示した。以上のことから、本研究成果によって、人間よりも小さなロボットにより人間、ロボットそれぞれの接近を伴う、人間に好まれる握手動作の生成が可能となった。これにより、ロボットは人間とのコミュニケーションの開始をより円滑に行えると考えられる。さらに、人間よりも小さなロボットにより、人間とロボットが静止または一方が接近を伴う握手動作の生成が可能であった。そして、その生成された小型ロボットによる握手動作は人間に好まれるものであった。

以下、本論文における各章の成果をまとめる。

第1章では、本論文の背景と目的を示し、あわせて論文の概要について述べた。

第2章では、先行研究によって有効性が示されている成人男性と同じサイズのロボットによる互いに握手可能な距離で静止した状態での握手要求動作モデル、および握手応答動作モデルについて述べた。まず、ロボットから人間に対して握手を求める動作を生成するモデルである握手要求動作モデルについて述べ、官能評価実験の結果から

第6章 結論

その特徴について示した。次に、人間から求められた握手に応じる動作を生成するモデルである握手応答動作モデルについて述べ、官能評価実験の結果からその特徴について示した。

第3章では、第2章で示した握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを用いて人間との握手接近動作を生成する小型握手ロボットシステムを開発した。この小型握手ロボットシステムには画像処理と人間上肢の3次元モデルを併用することで人間手部の3次元位置を非接触により認識する手部位置認識手法を適用した。さらに、その手法により推定された手部位置により、人間と握手を行うことが可能であった。このことから、提案する手部位置認識手法の有効性が示された。この小型握手ロボットシステムを用いて、人間に握手を求めるように手部を差し出す握手要求動作と人間に握手を求められたときにそれに応じる握手応答動作を生成させた。さらに、それぞれの動作について官能評価実験を行い開発したシステムの有効性を示した。握手要求動作では、握手要求動作モデルによる手部動作によって、音声挨拶と手部動作を同時もしくは音声挨拶の発声を早めることで、人間に好まれる動作が生成されることが示された。これにより握手要求動作モデルが小型握手ロボットシステムにおいても有効であることが示された。また、握手応答動作では、人間と同サイズのロボットによる握手動作と同様に求める側の動作に2次遅れ要素とむだ時間要素による遅れを付加することが有効であり、その動作が人間に好まれることが示された。これにより握手応答動作モデルが小型握手ロボットシステムに有効であることが示された。さらに、握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルを用いて2台の小型握手ロボットにより、ロボット同士の握手接近動作を生成した。そして、この握手接近動作を官能評価実験により評価した。その結果、人間に握手を行っていると感じさせる握手接近動作を生成し、ロボット同士の握手接近動作の生成に握手要求動作モデルおよび握手応答動作モデルが有効であることが示された。

第4章では、接近してくる人間との握手動作を生成する小型握手ロボットシステムを開発した。まず、握手ロボットに人間が接近中に求めてきた握手に応じる動作を行わせるために、接近してくる人間に対しての人間同士の握手動作を計測し、その特性について解析を行った。そして、第2章で示した握手応答動作モデルと人間同士の接近を伴う握手動作の解析結果に基づいて、人間が接近中に求めてきた握手に応じる動作を生成する握手応答動作モデルを提案した。さらに、開発した小型握手ロボットシス

6.1 本研究のまとめ

テムに提案モデルを適用し、官能評価実験を行った。実験の結果、音声を伴わない場合では、 $\omega = 6$ の2次遅れ要素、 $\tau = 0.0$ のむだ時間要素による動作が好まれ、音声を伴う場合では、 $\omega = 6$ 、 $\tau = 0.3$ もしくは $\tau = 0.6$ による動作が人間に好まれることが示された。これにより人間に好まれる握手動作を生成することが可能な握手応答動作モデル、およびそのモデルを適用した握手ロボットシステムが有効であることが示された。つぎに、接近中の人間にロボットから握手を求める動作を行わせるために、人間同士の接近を伴う手部動作を計測し、その特性について解析を行った。そして、第2章で示した握手要求動作モデルと人間同士の接近を伴う握手動作の解析結果に基づいて、人間の接近中にロボットから握手を求める動作を生成する握手要求動作モデルを提案した。さらに、握手ロボットシステムに提案モデルを適用し、官能評価実験を行った。実験の結果、接近者の停止する最後の一步前にロボットが手部動作を開始する動作が人間に好まれることが示された。また、音声挨拶を伴う場合では、接近者の停止する最後の一步前にロボットが音声挨拶を開始する動作が人間に好まれることが示された。これにより人間に好まれる握手動作を生成することが可能な握手要求動作モデル、およびそのモデルを適用した握手ロボットシステムが有効であることが示された。また、握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを接近してくる人間が停止する最後の一步前で切り替えることで、人間から先に握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合にはロボットから握手を求める動作を生成する握手ロボットシステムを構築した。そして、構築した握手ロボットシステムを用いて人間に好まれる握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを切り替えるタイミングについて官能評価実験を行った。実験の結果、提案した切り替え動作は人間に高く評価され、握手要求動作モデルと握手応答動作モデルを適切に切り替えることで人間の意図に合わせた握手動作が生成できることが示された。

第5章では、ロボットから人間に対して能動的に接近し、握手動作を生成する小型握手ロボットシステムを開発した。そして、ロボットから人間に対して接近する場合における握手要求動作モデルおよび応答動作モデルを提案した。まず、人間同士における接近する人間の握手要求動作を計測し、その動作解析結果および第2章で述べた握手要求動作モデルを基に、ロボットから人間に対して接近する場合における接近握手要求動作モデルを提案した。そして、開発したロボットシステムに提案した接近握手要求動作モデルを適用し、官能評価実験を行った。実験の結果、ロボットが停止す

る0.6秒前に手部動作を開始する動作が好まれることが示された。また、音声挨拶の開始タイミングについては、音声挨拶と手部動作が同時、もしくは音声挨拶が手部動作より0.3秒早く開始する動作が人間に好まれることが示された。これにより人間に好まれる握手動作を生成することが可能な接近握手要求動作モデル、およびそのモデルを適用した移動握手ロボットシステムが有効であることが示された。つぎに、人間同士における接近する人間の握手応答動作を計測し、その動作解析結果を基に、ロボットから人間に対して接近する場合における接近握手応答動作モデルを提案した。そして、開発したロボットシステムに提案した接近握手応答動作モデルを適用し、官能評価実験を行った。実験の結果、移動握手ロボットによる握手応答動作では、応答動作を要求動作完了の0.2秒後および0.4秒後に完了する動作が人間に好まれることが示された。また、音声挨拶の開始タイミングについては、音声挨拶と手部動作が同時に開始する動作が人間に好まれることが示された。これにより人間に好まれる握手動作を生成することが可能な接近握手応答動作モデル、およびそのモデルを適用した移動握手ロボットシステムが有効であることが示された。また、接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルをロボットが接近を停止する0.6秒前で切り替えることで、人間から先に握手を求めてきた場合にはそれに応じ、求めてこない場合にはロボットから握手を求める動作を生成する移動握手ロボットシステムを構築した。そして、構築した移動握手ロボットシステムを用いて人間に好まれる接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを切り替えるタイミングについて官能評価実験を行った。実験の結果、提案した切り替えタイミングは人間に高く評価され、接近握手要求動作モデルと接近握手応答動作モデルを適切に切り替えることで人間の意図に合わせた握手動作が生成できることが示された。

6.2 今後の展望

近年の少子高齢化によって、人間にサービスを提供する分野において、ロボットに代表される知能機械の活用が期待されている。とくに、医療介護や生活支援といった分野にロボットの活用が注目を集めている。このようなロボットには今まで工場等で使用されてきた産業用ロボットとは異なり、人間社会の中で人間との協調作業が必要となる。そのためには、人間とロボットとの円滑なコミュニケーションが重要であると

6.2 今後の展望

考えられる。本研究で開発した握手動作モデルおよび握手ロボットシステムでは、互いの身体的リズムを同調させ、コミュニケーションを円滑に始めることが可能である。さらに、本ロボットシステムが生成する握手動作により、ロボットは人間に不安や不快感を与えることなく、共存や協調できると期待され、他の様々な技術と融合することによって、人間社会に受け入れられるロボット技術として発展することが考えられる。

また、本研究では、日常的な握手動作は移動を伴うものであるという観点から動作モデルを提案し、握手ロボットシステムを開発してきた。しかしながら、開発したモデルは求める側と応じる側のどちらかが静止した状態の動作モデルであり、両者がともに接近することを考慮していない。また、真正面からの接近のみ考慮した動作モデルとなっており、斜めや横方向から接近する場合などにおいても十分に対応できるとはいえない。接近動作には様々な場面が考えられるのでそれらに対応できる動作モデルを開発することが今後の課題である。さらには、移動を伴う動作としては握手動作だけでなく、物を手渡す動作や家庭における家事など様々な場面が存在する。今後の課題として、握手動作だけに限らずさまざまな場面における接近するモデルを開発し、接近する速度パターンや減速タイミングの効果や影響を明らかにしていく予定である。

謝辞

本研究は、著者が岡山県立大学情報工学部に在籍していた2009年から6年間、岡山県立大学情報工学部教授、渡辺富夫博士のご指導のもと進めてきたものです。本研究を行う上で、渡辺富夫博士には、多くの時間を費やして貴重な御意見及び終始熱意に溢れた御指導、御鞭撻を賜りました。改めてここに深く感謝の意を表します。

また、富山大学理工学研究部教授、神代充博士には、岡山県立大学情報工学部教授として在任時より、システム開発やデータ分析手法、論文作成など本研究に関する数多くの有益な御助言、適切な御指導に加え、渡辺教授とともに公私にわたり様々な御支援を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

岡山県立大学情報工学部教授、佐藤洋一郎博士並びに岡山県立大学情報工学部准教授、山崎大河博士には、本論文に関して数多くの有益な御助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

愛媛大学工学部教授、柴田論博士並びに愛媛大学工学部助教、山本智規博士には論文作成に関する有益な御助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

岡山県立大学情報工学部准教授、福田忠生博士には論文作成や博士後期課程での学生生活に関する有益な御助言を公私ともに頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

岡山県立大学情報工学部准教授、山内仁博士にはシステム開発や論文作成に関する有益な御助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

岡山県立大学情報工学部准教授、石井裕博士には研究に対する姿勢や考え方など、数多くの御助言や支援を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

岡山県立大学情報工学部助教、瀬島吉裕博士には研究に対する姿勢や博士後期課程での学生生活に関する有益な御助言を公私ともに頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

岡山県立大学大学院情報系工学研究科を御卒業された湛増赳史さん、古山勇樹さん、宍倉康文さん、大矢哲士君、時枝和平君には、本研究の一部を御協力頂きました。深く感謝の意を表します。

また、渡辺研究室の皆さんにはシステム開発や実験の補助などにおいて数多くの御協力を頂きました。心より感謝の意を表します。

謝辞

渡辺研究室秘書として様々な雑務に快く対応していただきました岡正子秘書に心より感謝の意を表します。

各種実験に被験者として御協力頂いた岡山県立大学大学院情報系工学研究科、岡山県立大学情報工学部、保健福祉学部、デザイン学部の多くの学生の皆様に感謝の意を表します。

最後に、著者を温かく見守り、研究に没頭する生活を可能にしてくれた家族に感謝します。

本論文に関する研究業績

原著論文

- [1] 太田俊介, 神代充, 山内仁, 渡辺富夫, 柴田論, 山本智規: 人間との握手接近動作を行う小型握手ロボットシステム, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.79, No.803, pp.2383-2393, (2013).
- [2] 太田俊介, 神代充, 山内仁, 渡辺富夫: 接近を伴う握手要求動作を生成する握手ロボットシステム, 日本機械学会論文集, 投稿中.

国際会議議事録

- [1] M. Jindai, S. Ota, H. Yamauchi, and T. Watanabe: A Small-Size Handshake Robot System for a Generation of Handshake Approaching Motion, Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (IEEE-CYBER 2012), pp.80-85, (2012).
- [2] S. Ota, M. Jindai, H. Yamauchi, and T. Watanabe: A Mobile Handshake Robot System for Generation of Handshake Request Motion during Active Approach to a Human, Proceedings of First International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems, No.26, pp.1-6, (2012).
- [3] S. Ota, M. Jindai, T. Fukuta, and T. Watanabe: A Handshake Response Motion Model during Active Approach to a Human, Proceedings of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2014), pp.310-315, (2014).

口頭発表

- [1] 太田俊介, 神代充, 山内仁, 渡辺富夫: 接近を伴う握手要求動作を生成する握手ロボットシステム, 第 14 回 IEEE 中国支部学生シンポジウム論文集, pp.7-8, (2012).
- [2] 太田俊介, 時枝和平, 神代充, 渡辺富夫: 人間の接近を伴う握手要求への応答動作を生成する握手ロボットシステムの開発, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, No.S121022, pp.1-4, (2013).
- [3] 太田俊介, 時枝和平, 神代充, 渡辺富夫: 接近する人間に握手要求動作を生成する握手ロボットシステム, 第 14 回 計測自動制御学会, システムインテグレーション部門講演会 (SI2013) 論文集, pp.2637-2638, (2013).
- [4] 太田俊介, 神代充, 渡辺富夫: 接近する人間への音声挨拶を伴う握手要求動作生成モデルの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (ROBOMECH2014), 2A1-G07, (2014).

その他業績

原著論文

- [1] 神代充, 太田俊介, 池本有助, 笹木亮: 人の手部動作および発声解析に基づく手渡し動作モデル, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.817, pp.1-13, (2014).

国際会議議事録

- [1] M. Jindai, S. Ota, H. Yamauchi, and T. Watanabe: Timing of Utterance and Hand Motion in Greeting Interactions Between Human and Robot, Proceedings of IADIS International Conference Interfaces and Human Computer Interaction 2012, pp.19-26, (2012).
- [2] M. Jindai, S. Ota, Y. Ikemoto, and T. Sasaki: Hand-over Motion Model Based on Timing between Voice Utterances and Release Motions of Humans, Proceedings of the Recent Advances in Robotics and Mechatronics 2013 (RARM2013), pp.107-112, (2013).
- [3] M. Jindai, S. Kohyama, S. Ota, H. Yamauchi, H. Takimoto, and M. Kameda: A Location System Based on Comparing Image Processing with Surrounding Model Using Corner Feature Points, Proceedings of The Twelfth International Conference on Industrial Management, pp.327-332 (2014).

口頭発表

- [1] 時枝和平, 太田俊介, 神代充, 渡辺富夫: 手渡しロボットシステムのための音声と手放し動作のタイミングに基づく手渡し動作モデル, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, No.S121021, pp.1-4, (2013).
- [2] 神代充, 太田俊介, 池本有助, 笹木亮: 人の手渡し軌道及び発声解析に基づく直交型手渡しロボットシステムの開発, 日本機械学会第 23 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No.3203, (2013).

本論文に関する研究業績

- [3] 友永聖樹, 太田俊介, 神代充, 笹木亮, 池本有助: 人間の動作解析に基づくハグ動作生成モデルの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (ROBOMECH2014), 2A1-G05, (2014).