



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

太田 俊介^{*1}, 神代 充^{*2}, 山内 仁^{*3}, 渡辺 富夫^{*4}

A mobile handshake robot system for generation of handshake request motion during active approach to a human

Shunsuke OTA^{*1}, Mitsuru JINDAI^{*2}, Hitoshi YAMAUCHI^{*3} and Tomio WATANABE^{*4}^{*1} Graduate School of Systems Engineering, Okayama Prefectural University
111 Kuboki, Soja-shi, Okayama 719-1197, Japan^{*2} Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama 930-8555, Japan^{*3,*4} Faculty of Computer Science and System Engineering, Okayama Prefectural University
111 Kuboki, Soja-shi, Okayama 719-1197, Japan

Received 12 June 2014

Abstract

Humans shake hands as a sign of greeting when they first meet, to greet one another and develop a rapport. A handshake is an embodied interaction through physical contact. In the case of a human and robot, the robot can smoothly begin to communicate and coexist with humans without eliciting feelings of aversion on the part of the humans, provided it generates a handshake motion that is emotionally acceptable to humans. Therefore, in this paper, we develop a handshake robot system that generates a handshake request motion during active approach to a human. First, we analyze handshake motions with approach between humans. Then, based on the analysis of handshake motions between humans, a handshake request motion model which is generated during an approaching motion is proposed. Furthermore, using the proposed model, a mobile handshake robot system is developed. This mobile handshake robot system actively approaches a human, and it generates a handshake request motion by extending its hand to the human. The developed handshake robot system is evaluated using a sensory evaluation to analyze handshake motion preferred by humans. Based on the sensory evaluation results, the developed mobile handshake robot system satisfactorily generates the handshake request motion during active approach to a human, and its effectiveness is demonstrated.

Key words : Human interface, Human-robot interaction, Handshake, Embodied interaction, Human emotion

1. 緒 言

人間は対面時の挨拶として、握手を交わす習慣がある。握手を交わすことにより、互いの身体的リズムを同調させ、信頼関係を築いていると考えられる。ロボットが人間と関わりを持つ場合においても、人間に好まれる自然な握手を行うことで円滑なコミュニケーションの開始が期待される。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 (Kasuga and Hashimoto, 2005), (大野, 稲葉, 2005), (Sato, et al., 2007)。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

No. 14-00316 [DOI: 10.1299/transjsme.14-00316], J-STAGE Advance Publication date : 20 April, 2015

^{*1} 正員, 岡山県立大学大学院情報系工学研究科 (〒719-1197 岡山県総社市窪木 111)

^{*2} 正員, 富山大学大学院理工学研究部 (〒930-8555 富山県富山市五福 3190)

^{*3} 岡山県立大学情報工学部

^{*4} 正員, フェロー, 岡山県立大学情報工学部

E-mail of corresponding author: s_oota@hint.cse.oka-pu.ac.jp

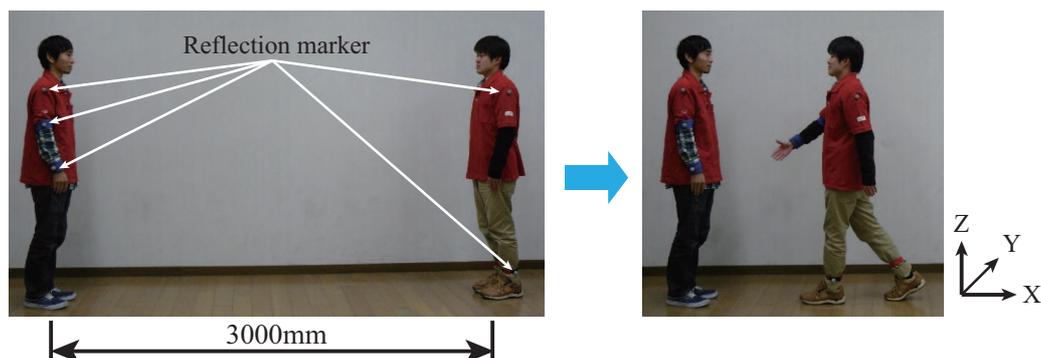


Fig. 1 Experimental scenery

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して研究が行われており、互いの手部を接近させ接触するまでの動作に関しては、研究が行われていない。そのため、著者らは、握手動作における手部同士を接近させる動作に着目し、ロボットから人間に握手を求めるとして手部を差し出す動作や人間が握手を求めてきた場合にそれに応じる動作を生成する握手動作モデルを提案してきた(神代他, 2011)。さらに、提案モデルが小型ロボットの場合においても有効であることを官能評価実験により示している(太田他, 2013)。これらの動作モデルではロボットが静止した状態における握手動作を生成している。しかしながら、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がより促進されると期待される。

一方、近年では医療介護や生活支援など人間のサポートを行うロボットの活用が期待されている。これらのロボットは人間に対し積極的に関わりを持ち、接近することとなる。そのため、人間に心理的に受け入れられることが不可欠である。また、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(Hiroi and Ito, 2009),(中島, 佐藤, 1999)。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。

そこで、本研究では、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を求める動作(握手要求動作)を生成する接近握手要求動作モデルを提案する。このモデルはロボットから能動的に人間に接近し、握手要求動作を生成するものである。とくに、接近動作、握手要求動作の開始タイミング、および音声挨拶の発声タイミングについて人間同士の握手動作を解析し、それに基づいてロボットは人間の接近動作を基準として握手要求動作を行う。そして、人間上肢の約半分のサイズで設計した移動可能なロボットに提案する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を構築し、官能評価実験により提案モデルの有効性を示す。さらに、音声挨拶を伴う接近握手要求動作を生成し、提案モデルの動作と音声挨拶の発声タイミングを官能評価実験により検討する。

2. 人間同士の接近を伴う握手動作解析

ロボットが人間に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。

2.1 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1に示す。また、図1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、接近して握手をを求める側(要求側)と、静止してそれに応じる側(応答側)を予め定め、音声挨拶を伴う握手を行わせた。応答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、要求側には応答側の4カ所に加え、左右足首の2カ所(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±1mm、サンプリングレートは120Hzである。実験では、被験者二人を向かい合わせに3,000mmの間隔で

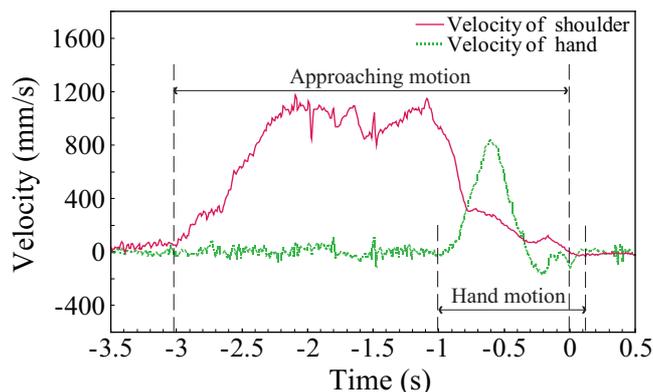


Fig. 2 The velocity of a shoulder as the approaching motion and the velocity of a right hand as a handshake motion were measured. The velocities of the shoulder and the hand are plotted with the solid line (red) and the dotted line (green) respectively.

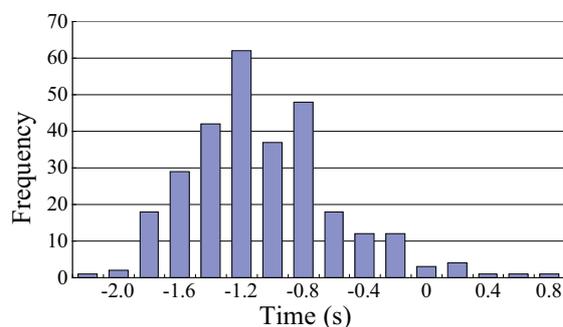


Fig. 3 Time lag of the start of hand motion to the end of approaching motion

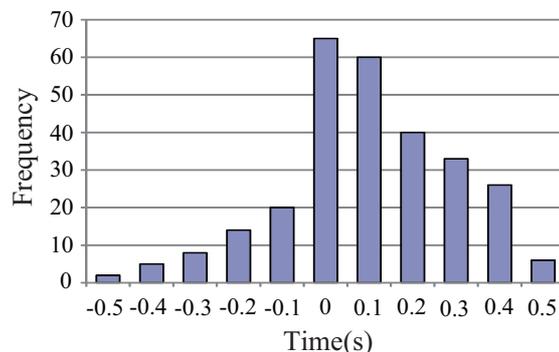


Fig. 4 Time lag of hand motion to voice greeting

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。要求側の人間の接近動作と手部動作を解析するために、要求側には応答側に接近させ、任意の距離およびタイミングで応答側に対し握手を求めるとして手部を差し出させた。応答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。

2.2 実験結果

2.2.1 手部動作と接近動作のタイミング

図2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、図の横軸は要求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。そこで、図3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。時間が負の場合には被験者は接近動作中であり、時間が正の場合に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。

2.2.2 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4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に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に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、音声挨拶の発声タイミングが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

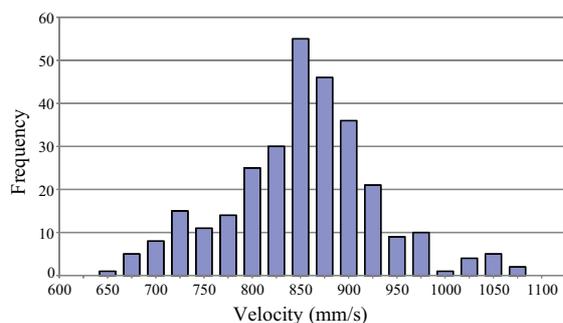


Fig. 5 Approaching velocity

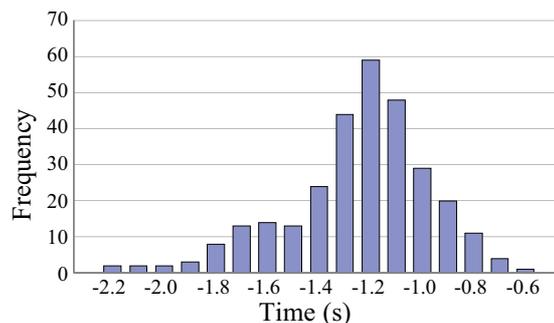


Fig. 6 Deceleration time

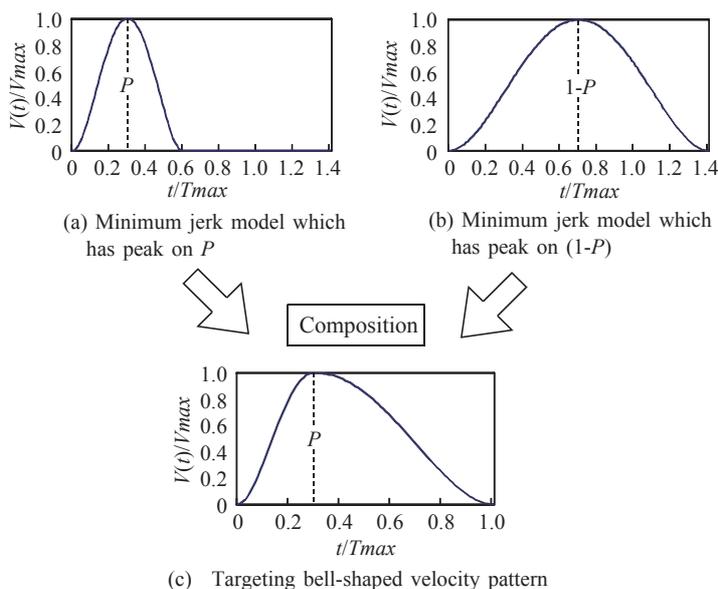


Fig. 7 Generation of bell-shaped velocity pattern

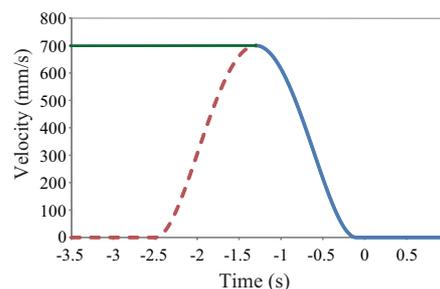


Fig. 8 An approaching velocity pattern is generated using minimum jerk model. A velocity of minimum jerk model is plotted with the dashed line (Red). An approaching velocity and a velocity during deceleration are plotted with the solid line (Green) and the solid line (Blue), respectively.

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。

2.2.3 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、要求側が応答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6に被験者が減速を開始するタイミングのヒストグラムを示す。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。

3. 接近握手要求動作モデル

3.1 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(神代他, 2011)を用いる。握手要求動作モデルは人間の手先の2点間運動を表現することが可能な躍度最小モデル(Flash and Hogan, 1985)に基づく速度パターンを用いて、人間に対し握手を求めるように手部を差し出す動作を生成するものである。

躍度最小モデルでの時刻 t における速度 $V(t)$ は、式(1)で求められる最大速度 V_{max} と動作時間 T_f から式(2)により求められる。ただし r_0 は始点角度、 r_f は終点角度である。この躍度最小モデルでは、速度パターンが左右対

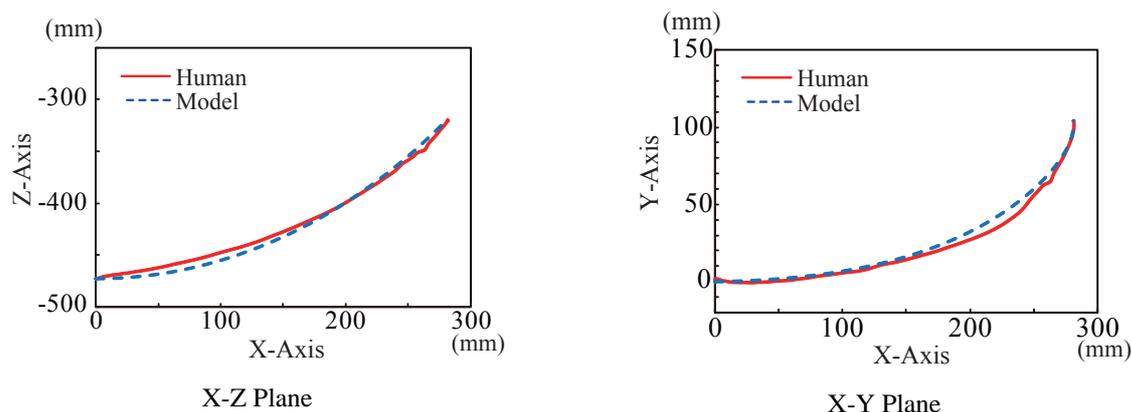


Fig. 9 A trajectory for a handshake with a human is generated by using the proposed model. The path of the generated trajectory is plotted with the dashed line (Blue). For comparison, a path of a human hand trajectory is plotted with the solid line (Red).

称の釣鐘型となることから速度がピークに達するまでの時間（速度ピーク位置）を調整することが困難である。

$$V_{max} = \frac{15}{8T_f}(r_f - r_0) \quad (1)$$

$$V(t) = V_{max} \frac{16}{T_f^4}(t^4 - 2T_f t^3 + T_f^2 t^2) \quad (2)$$

そこで、握手要求動作モデルでは、2つの動作時間の異なる躍度最小モデルを結合することで任意の位置に速度のピークを有する釣鐘型速度パターンを生成する。ここで、目標とする釣鐘型速度パターンの動作時間とピーク位置をそれぞれ T_{max} , P とする。また、ピーク位置 P は動作時間を 1 と正規化したときの値とする。まず、図 7(a), (b) に示すように、動作時間 T_f をそれぞれ $2 \cdot T_{max} \cdot P$ と $2 \cdot T_{max} \cdot (1 - P)$ とする躍度最小モデルを求める。そして、図 7(a) に示す躍度最小モデルの前半部分と、図 7(b) に示す躍度最小モデルの後半部分を結合することにより、図 7(c) に示される速度ピーク位置が P となる釣鐘型速度パターンが生成される。この任意の位置に速度ピークをもつ速度パターンを用いて、ロボットの肩および肘関節の動作を人間の動作と一致するように近似することで、人間の握手要求動作に類似した自然な手部動作を生成する。

3.2 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よる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 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、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。

3.3 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 9, 10 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 9 中の X-Z Plane および X-Y Plane はそれぞれ X-Z 平面、X-Y 平面の軌跡を示し、図 10 は接線方向の速度パターンを示している。図 9 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 10 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

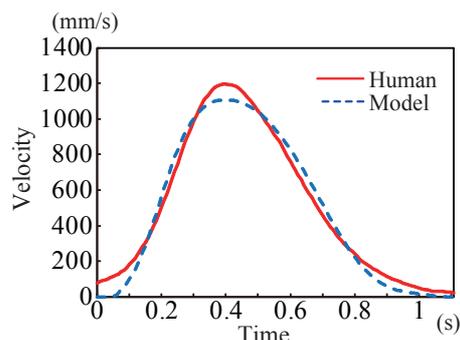


Fig. 10 A trajectory for a handshake with human is generated by using the proposed model. The velocity pattern of the generated trajectory is plotted with the dashed line (Blue). For comparison, a velocity pattern of a human hand trajectory is plotted with the solid line (Red).

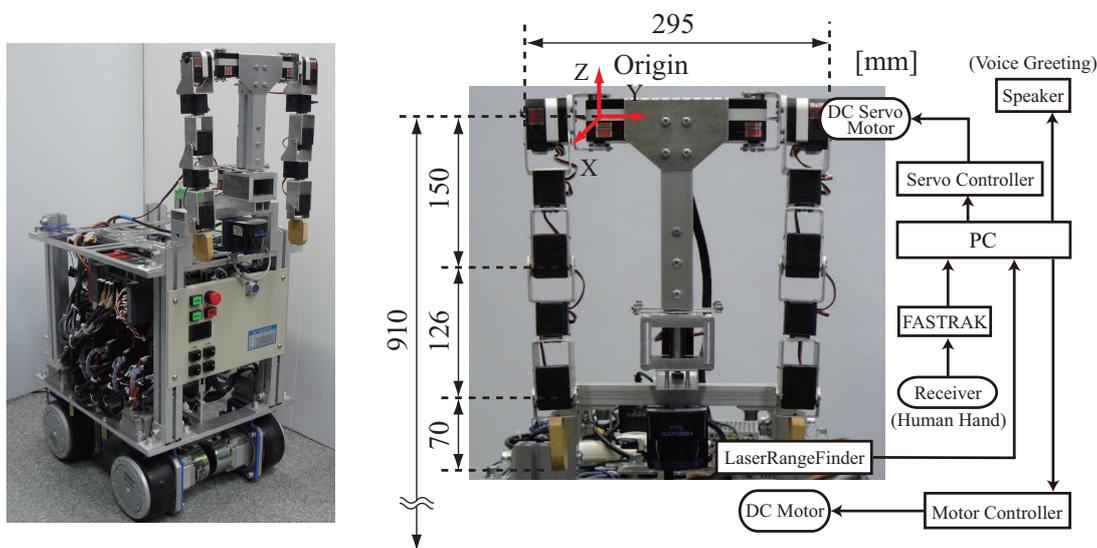


Fig. 11 Mobile Handshake Robot System

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求める側の動作を再現していることが分かる。

4. 移動握手ロボットシステム

能動的に接近し、握手動作を行わせるために移動可能な握手ロボットシステムを開発した。図 11 に開発した握手ロボットシステムを示す。ロボットの上半身の大きさは日本人の平均的な成人男性の寸法(川内他, 2000)を基にして、約 2 分の 1 となるように設計・製作した。握手ロボットは、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 11 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 自由度), 肘, 手首)を用いて握手動作を生成するものとした。ロボットのエンドエフェクタは、提案した接近握手要求動作モデルにより、制御周期ごとの各関節の目標位置を算出し、シリアルサーボ(近藤科学社製)を用いて制御される。サンプリング時間は 10 ms 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。ロボットの腰部には、レーザ式測域センサ(北陽電機製)が取り付けられており、移動握手ロボットから人間までの相対距離を計測する。また、人間の差し出した手部位置を磁気センサ(FASTRAK)により計測する。そのため、人間の右手甲には磁気センサのレーザを取り付けている。そして、手部動作開始から停止するまでの時間を基に接近動作モデルにより算出された距離と、測域センサにより計測した距離により、握手動作の開始タイミングを制御している。移動機構部には四輪操舵を採用することで、その場での旋回や全方位への移動を実現している。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た。また、握手ロボットの

初期姿勢は、上腕、前腕を鉛直下向きに伸ばした状態とした。

5. 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。

5.1 実験方法

人間同士の握手動作解析の結果において、多くの人間は接近を停止する 1.2 秒前に手部動作を開始していることが示された。また、多くの人間は停止する 1.2 秒前に減速を開始していることが示された。そこで、ロボットが停止した時、減速中、減速を開始する直前というフェーズを想定し、実験では (a) 停止と同時に手部動作を開始、(b) 減速中に手部動作を開始することとなる停止する 0.6 秒前に手部動作を開始、(c) 減速の開始と同時に手部動作を開始することとなる停止する 1.2 秒前に手部動作を開始の 3 つのモードを用意した。また、多くの人間は手部動作と同時に音声挨拶を発生している。そこで、ロボットには手部動作の開始と同時に音声挨拶を発生させた。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、接近握手要求動作モデルにより握手要求動作を生成した。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 段階評価ではロボットにより生成される握手動作の印象を評価する「握手しやすさ」、「安心感」、「丁寧さ」、および機械的な動作でないことを評価する「生命感」の 4 項目を採用した。7 段階評価では、各項目を 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。

5.2 実験結果

一対比較の結果を表 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、式 (3) により求められる Bradley-Terry モデル (Bradley and Terry, 1952) 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。

$$P_{ij} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} \quad (3)$$

(π_i : i の強さの量, P_{ij} : i が j に勝つ確率)

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

Bradley-Terry モデルにより得られた好ましき π を図 12 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 13 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」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」の項目でモード (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。「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ポジティブに評価されており、ロボットにより生成された動作は握手が行いやすく、安心感のある人間に好まれたものとなっているといえる。

Table 1 Result of paired comparison in the experiment on handshake request motion during approach

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		8	33	41
(b)	52		46	98
(c)	27	14		41

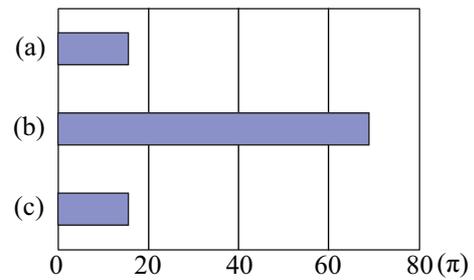


Fig. 12 Result of Bradley-Terry model in the experiment on handshake request motion during approach

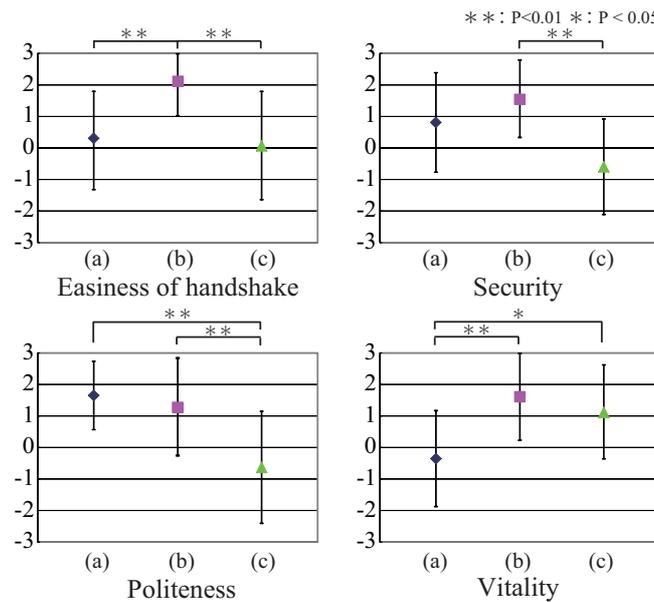


Fig. 13 Result of seven points bipolar rating in the experiment on handshake request motion during approach

以上の結果より、人間とロボットとの音声挨拶を伴う握手動作で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知覚し、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知覚できることにより好まれたと考えられる。これらのことから、減速中に手部動作を開始する握手要求動作が人間に好まれることが示された。

6. 減速中における手部動作の開始タイミングの評価実験

接近停止と手部動作の開始タイミングの評価実験では、ロボットが減速中に手部動作を開始する握手要求動作が、人間に好まれることが示された。そこで、減速中における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。

6.1 実験方法

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(Kadota and Gomi, 2010)。また、ロボットは1.2秒間減速し停止することとなることから、実験では、減速中の動作となる(a)停止する0.3秒前に手部動作を開始、(b)停止する0.6秒前に手部動作を開始、(c)停止する0.9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、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

Table 2 Result of paired comparison in the experiment on handshake request motion during deceleration

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		13	28	41
(b)	47		40	87
(c)	32	20		52

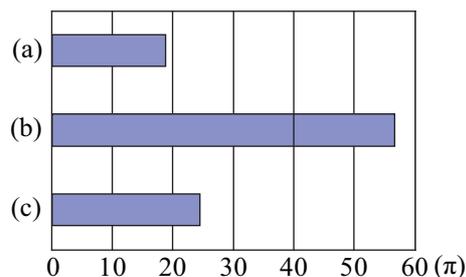


Fig. 14 Result of Bradley-Terry mode in the experiment on handshake request motion during deceleration

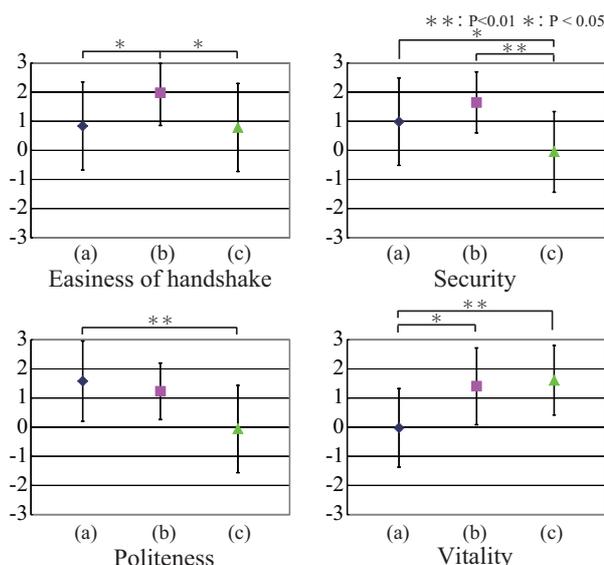


Fig. 15 Result of seven points bipolar rating in the experiment on handshake request motion during deceleration

一致させた。

6.2 実験結果

一対比較の結果を表 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 14 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) 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。

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 15 に示す。図より「握手しやすさ」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 5% 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」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% および 5% の有意差が認められた。「丁寧さ」の項目でモード (a) 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ポジティブに評価されており、ロボットにより生成された動作は握手が行いやすく、安心感や生命感のある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、ロボットが接近を停止する 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。これは、接近速度が半分程度まで減速することで、人間がロボットの減速を明確に感知できることにな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、十分に

Table 3 Result of paired comparison in the experiment on handshake request motion with voice greeting

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

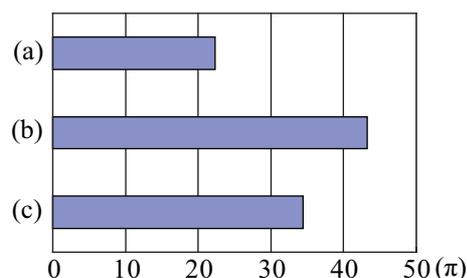


Fig. 16 Result of Bradley-Terry model in the experiment on handshake request motion with voice greeting

減速した後、手部動作を開始することで、1つ1つの動作を確実にやっていくような動作となり、丁寧さが感じられ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。人間同士の動作解析では、多くの人間が停止する0.3秒以上前に手部動作を開始しており、手部動作の開始を早めると、人間と同じような動作になり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。

7. 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。

7.1 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(山本, 渡辺, 2004)。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。

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。

7.2 実験結果

一対比較の結果を表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16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17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。

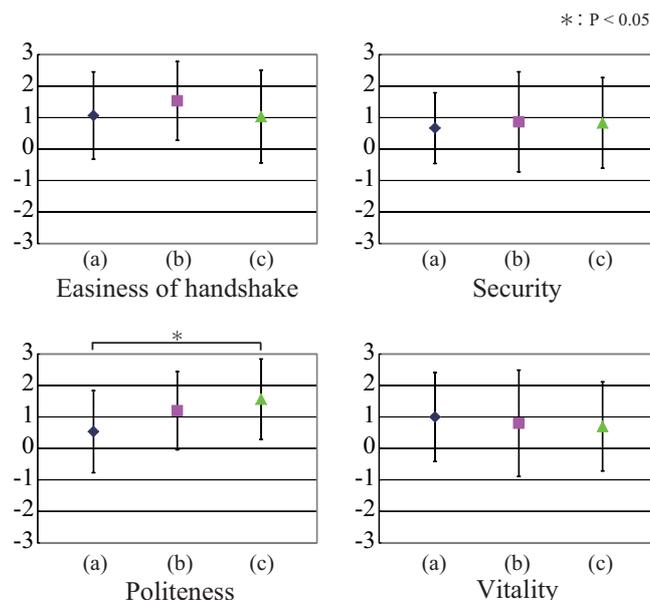


Fig. 17 Result of seven points bipolar rating in experiment on handshake request motion with voice greeting

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。これは、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により示されている。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。

8. 結 言

本研究では、人間同士の接近を伴う握手動作を解析し、その解析結果に基づいて、人間に対して能動的に接近し、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た。さらに、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を構築した。そして、官能評価実験により、握手における人間に好まれる手部動作と音声挨拶の発声タイミングを検討するとともに、提案モデルの有効性を示した。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。

- 人間の握手動作解析に基づいてロボットから能動的に接近し、人間に手部を差し出す動作を生成する接近握手要求動作モデルの提案を行った。さらに、提案モデルにより人間に好まれる握手動作が生成可能であり、その有効性が示された。
- 提案する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による官能評価実験により、人間にはロボットが減速中に手部動作を開始することが好まれ、接近を停止する0.6秒前に手部動作を開始することで、人間に良い印象を与えつつ、握手動作を開始させられることが示された。
- 音声挨拶を伴っ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による官能評価実験により、ロボットの音声挨拶は手部動作と同時、もしくは手部動作より0.3秒早く開始するものが好まれることが示された。

本研究では、握手における動作とそのタイミングに着目し、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を用いて、人間に好まれる握手動作やその開始タイミングを示した。しかしながら、これらの動作特性以外にも、接近速度、減速方法、握手動作の速度など動作に関するものやロボットの大きさ、形状、外装の素材などロボットの外観に関するものなどにより、人間の印象は影響を受けると考えられる。そのため、人間の印象に影響を与えるロボットの動作特性や外観、およびそれらの相互関係に関する検討は今後の課題とする。

謝 辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金（25330239, 26280077）の助成により実施されたものである。

文 献

- Bradley, W. R. A. and Terry, M. E., Rank analysis of incomplete block designs, *Biometrika*, Vol.39 (1952), pp.324-345.
- Flash, T. and Hogan, N., The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, *Journal of Neurosciences*, Vol.5, No.7 (1985), pp.1688-1703.
- Hiroi, Y. and Ito, A., Effect of the size factor on psychological threat of a mobile robot moving toward human, *KANSEI Engineering International*, Vol.8, No.1 (2009), pp.51-58.
- 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 (2011), pp.1429-1440.
- Kadota, K. and Gomi, H., Implicit visuomotor processing for quick online reactions is robust against aging, *Journal of Neuroscience*, Vol.30, No.1 (2010), pp.205-209.
- Kasuga, T. and Hashimoto, M., Human-robot handshaking using neural oscillators, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2005)*, pp.3813-3818.
- 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).
- 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 (1999), pp.87-95.
- 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*, No.5-4 (2005), CD-ROM.
- 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 (2013), pp.2383-2393.
- Sato, T., Hashimoto, M. and Tsukahara, M., 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 (2007)*, pp.652-657.
- 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 (2004), pp.87-94.

References

- Bradley, W. R. A. and Terry, M. E., Rank analysis of incomplete block designs, *Biometrika*, Vol.39 (1952), pp.324-345.
- Flash, T. and Hogan, N., The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, *Journal of Neurosciences*, Vol.5, No.7 (1985), pp.1688-1703.
- Hiroi, Y. and Ito, A., Effect of the size factor on psychological threat of a mobile robot moving toward human, *KANSEI Engineering International*, Vol.8, No.1 (2009), pp.51-58.
- Jindai, M., Watanabe, T., Shibata, S. and Yamamoto, T., Development of a handshake request motion model considering gaze presentation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.77, No.776 (2011), pp.1429-1440 (in Japanese).
- Kadota, K. and Gomi, H., Implicit visuomotor processing for quick online reactions is robust against aging, *Journal of Neuroscience*, Vol.30, No.1 (2010), pp.205-209.
- Kasuga, T. and Hashimoto, M., Human-robot handshaking using neural oscillators, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2005)*, pp.3813-3818.
- Kouchi, M., Mochimaru, M., Iwasawa, H. and Mitani, S., Anthropometric database for Japanese population, *Japanese Industrial Standards Center 1997-98 (AIST, MITI) (2000)* (in Japanese).
- Nakashima, K. and Sato, H., Personal distance against mobile robot, *The Japanese Journal of Ergonomics*, Vol.35, No.2 (1999), pp.87-95 (in Japanese).

- Ohno, S. and Inaba, T., A Study on human-robot co-creative motion system : inducing of handshake motion by adjusting the robot impedance, Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, No.5-4 (2005), CD-ROM (in Japanese).
- Ota, S., Jindai, M., Yamauchi, H., Watanabe, T., Shibata, S. and Yamamoto, T., A small-size handshake robot system for a generation of handshake approaching motion with humans, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.803 (2013), pp.2383-2393 (in Japanese).
- Sato, T., Hashimoto, M. and Tsukahara, M., 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 (2007), pp.652-657.
- Yamamoto, M. and Watanabe, T., Time lag effects of utterance to communicative actions on human-robot greeting interaction, The transaction of Human Interface Society, Vol.6, No.3 (2004), pp.87-94 (in Japanese).