

協調的身体動作に基づく人-ロボット対話の実現

坂本 大介^{1,2} 神田 崇行² 小野 哲雄^{1,2}
今井 倫太^{2,3} 鎌島 正幸^{2,3} 石黒 浩^{2,4}

¹ 公立はこだて未来大学, ² ATR 知能ロボティクス研究所, ³ 慶応大学, ⁴ 大阪大学

概要: 人型ロボットに関する研究はコミュニケーションにおける様々な身体の重要性を見出した。特に人のような協調的な身体動作をするロボットが引き起こす、人-ロボット間の関係について注目されている。我々は、モーションキャプチャシステムを用いて人の身体動作をセンシングし、半自律的に人と協調的な身体動作を行い、人と自然に対話することのできるロボットシステムを開発した。本稿では、開発した人-ロボット対話システムについて報告し、道案内における聞き手（ロボット）の身体動作が、話し手（人）の印象におよぼす効果を心理学的な実験を通して検証する。

Cooperative embodied behaviors for interactive humanoid robots

Daisuke Sakamoto^{1,2}, Takayuki Kanda², Tetsuo Ono^{1,2},
Michita Imai^{2,3}, Masayuki Kamashima^{2,3}, and Hiroshi Ishiguro^{2,4}

¹Future University-HAKODATE, ²ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories,
³Keio University and ⁴Osaka University

Abstract: Research on humanoid robots has discovered various usage of their body property in communication. In particular, mutual relationships of body movements between a robot and human are considered to be important for smooth and natural communication like humans'. We developed a semi-autonomous humanoid robot system that is capable of cooperative body movements with humans using an environment-based sensor. Using this robot system, we verified the importance of cooperative behaviors in a route-guide situation where a human gives direction to the robot. We believe this result allows us to develop interactive humanoid robots that sociably communicate with humans.

1 はじめに

近年、様々なヒューマノイドロボットが開発される中で、人とコンピュータとの間のインタフェースとしてのロボットの役割が注目されてきている。例えば、ロボットの身体を活用したコミュニケーションにより、コンピュータを使うのが苦手な人も容易に情報ネットワークにアクセスする事ができる。我々は、ロボットが人と同様の身体を持つことの意味は特にコミュニケーションにあると考える。つまり、このような人型のロボットは将来的に人の物理的なサポートをするのみでなくコミュニケーションの側面のサポートも行うことができる。

人はコミュニケーションの際に音声のみでなく視線を交え、身振り手振りをかわす。これまでも人同士の身体を用いたコミュニケーションについては、ゼスチャと発話を統合的に分析するなど [1], 多くの研究が行われてきている。このような研究のなかから、単にシンボルを身体で表すサインランゲッジ以上に、会話の際の双方の身体の動きの関わり合い(*mutual relationship*)の重要性が徐々に明らかになってきている。

たとえば、遠くのを指し示すとき、人は視線と指さしの双方を使い相手の注意を引きつける。結果として、聞き手の視線も無意識のうちに話し手と同じ対象に向けられる。このようなメカニズ

ムは共同注意機構として主に発達心理学の分野で研究が進められ[2], 近年は共同注意を行うロボットの研究も進んでいる[3].

また, 対話の際の互いの身体動作の同期に関して, 古くは Condon の乳幼児研究に始まり[4], 近年は人型ロボットを用いた研究が行われている. 小野らは道案内をするロボットに適切なゼスチャを行わせると聞き手が無意識に引き込まれて, 同調的な身体動作を行い, さらに言語情報の理解も促進されることを見いだした[5]. このように無意識に生じる身体動作の引き込み現象はエントレインメント(entrainment)と呼ばれる.

このエントレインメントをロボットへ応用するアプローチは2つある. 一つ目は, ヒューマンインタフェースへの利用である. 渡辺らの開発したロボットはうなずきなどの身体動作の同期によって, エントレインメントを引き起こし, 遠隔地間の人同士のコミュニケーションを支援する[6]. これに対して, 2つ目のアプローチとして自律ロボットへの応用も試みられている. 我々の開発しているロボット Robovie は後者に該当し, 人に似た体を活用することで, まるで人同士が対話しているように, ロボットと対話する人が自然で円滑な対話を行えるようにすることを目指している. このような研究アプローチの中で, 神田らは自律型の人型インタラクティブロボットと人との相互作用の中で視線や腕の動きの同調が主観的な評価と相関関係にあることを見いだした[7]. これらの従来研究から見いだされるように, 我々は互いの身体動作の関わり合いの中に, 身体性コミュニケーション(embodied communication)の本質があると考え.

本稿では, モーションキャプチャシステムと人型ロボットを用いて, このような身体性コミュニケーションにおける互いの身体動作の関わり合いの影響について検証する. この結果は同時に, 身体性コミュニケーションを行うロボットの開発に役立つ知見を得ることにつながる. 具体的な方法としては, ロボットは多数の協調的な身体動作(たとえば, アイコンタクト)を実現するソフトウェアモジュールを WOZ(Wizard of O'z)法により逐次切り替えながら実行する. 特に, 実験のタスクが話を聞く, ということから, ロボットからはサインランゲッジのようなシンボルを表すゼスチャは行わず, むしろ話し手の人の身体動作にたいして,

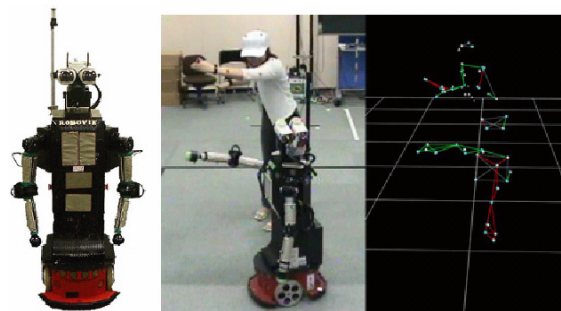


図 1: モーションキャプチャシステムを用いて協調的な身体動作をするロボット

センサ情報のみに基づいてリアクティブに自らの身体を動かす.

2 協調的な身体動作をするロボット

本章では, 人とアイコンタクトや同調的な腕の動きといった協調的な身体動作をすることのできるロボットのシステム構成について述べる. 本システムはモーションキャプチャシステムを用い, 人の身体動作を実時間で取得し, そのデータを基にロボットが人と同じ身体動作を実現する. これにより, 完全なセンサ情報に基づき人と協調的な身体動作を行うロボットができる. 本システムの目標は人と自然に対話することができるロボットを実現することである.

2.1 コミュニケーションロボット Robovie

本システムで用いるロボット Robovie[8]のハードウェア構成について簡潔に述べる.

図 1 左に, Robovie の外観を示す. 本ロボットは, 人とコミュニケーションするために人に類似した上半身を持つヒューマノイドロボットである. 3 自由度の首, 片側 4 自由度の腕と, 人が視覚・触覚・聴覚をもつようにカメラ, マイク, 接触センサなどの様々なセンサを持つ. このような人に類似した身体とセンサを用いて, Robovie は人とのコミュニケーションに必要な様々な音声とゼスチャを交えた人と同様の対話的行動を生成することができる. また, 本体上部に搭載された無線 LAN により, 他のコンピュータやインターネット等にアクセスすることができる. 本来 Robovie は自律的に行動することが可能であるが, 本システムでは無線 LAN により外部からコントロールされる.

表 1: 実装した Communicative unit

頭部	腕 (右, 左)	体の向き (台車の移動)	発話
アイコンタクト 指先方向を見る (右, 左) うなずき 首をかしげる	腕の同調 (右, 左) 胸像の腕の同調 (右, 左) 動きなし 腕を下ろす	正面を向く 並ぶ位置関係	道を教えてね うん, うんうん, はい ごめん, もう一回 ゆっくりお願い ありがとう, わかったよ

2.2 モーションキャプチャシステムを用いた協調動作の実現

我々はモーションキャプチャシステムを環境型センサとして利用することで, 人型ロボットにアイコンタクトや腕の動きの同調といった協調的動作をさせるロボットシステムを実現した(図 1 右). このような環境センサに基づくロボットシステムのソフトウェア構成を図 2 に示す. 本ソフトウェアは以下の 3 コンポーネントから構成される.

(a) Position calculator

Position calculator はモーションキャプチャシステムを利用して人とロボットの身体位置を計測する. このために Vicon Motion Systems 社製モーションキャプチャシステムを使用した. 本システムは赤外線照射機能つき赤外線カメラ 12 台と赤外線を反射するマーカーから構成される. 本システムは, 時間分解能 120 ヘルツ, 空間分解能約 1mm (本実験環境における値) で計測可能である. ここでは上半身のみの身体動作を行うため, 人とロボットの上半身にそれぞれ 23 点のマーカーを取り付けた.

Position calculator はこのモーションキャプチャシステムを利用し, 3 次元の座標データとマーカーの名前とを同時に実時間で取得する. また, 取得した 3 次元座標データを TCP/IP 通信を用いて他の計算機へ渡すことができる. そのため, 人の身体動作に実時間で反応するロボットが実現可能である.

(b) Communicative unit

Communicative unit は頭部, 右腕, 左腕, 体の向きそれぞれに関して, 人との対話的な身体動作を実現するモジュールである. 各 Communicative unit では Position calculator から送られる身体位置に基づき, アイコンタクトや腕の同調といった人の身体動作に協調した動きをロボットの各部位で実現する. つまり, これらのモジュールが人と協調的な身体動作を実現する. 人と対話する際には, 単純な同調動作のみでなくあいづちのような動作も

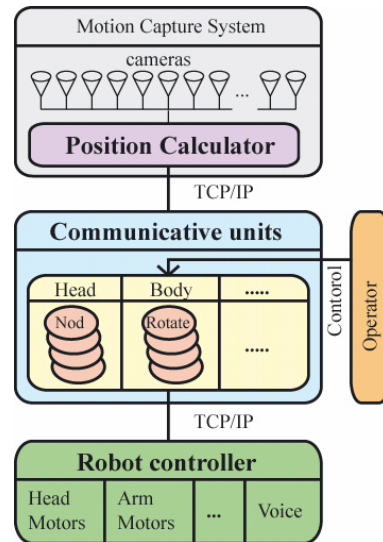


図 2: ソフトウェア構成

重要であるため, うなずきや, 首をふるといった動作も実装した. 表 1 に実装した全ての Communicative unit を示す. また, 以下におもな Communicative unit の内容を示す.

アイコンタクト 相手の顔位置(具体的には前頭部のマーカーと両肩のマーカーから計算される)のほうにロボットの頭部を向ける.

腕の同調 相手の両肩, ひじ, 手先のマーカーから腕の角度を計算し, ロボットで再現する. 左右逆の腕を再現する振る舞いも存在する.

並ぶ位置関係 相手とロボットの肩のマーカー位置から, 相手との体の向きを計算し, 相手に対して体を真横に向ける.

また, Communicative unit によりロボットの発話内容も同時に制御する. 発話内容は, 「うん」「うんうん」「えっと」「それで」といったあいづち的なもの及び, 次章で述べる実験に用いる「わかったよ」である.

(c) Robot controller

Robot controller は Communicative unit からのモータ制御命令を受取り, それを基に実際のハードウェアを制御する. また, 現在の関節角といったロ

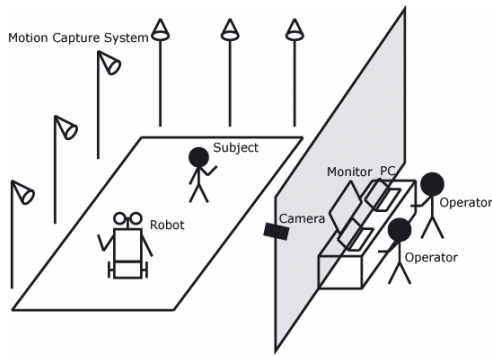


図 3: WOZ 法による実験環境の概要

ロボットの内部情報を Communicative unit に送る。

2.3 WOZ 法による Communicative unit 切替え

図 3 に WOZ 法を用いた本ソフトウェアの動作の様子を示す。現在のところ、ロボットは半自律的に動作する。ロボットの身体は、Communicative unit が環境センサの情報に基づき自律的に人の動作に応じた協調的な動き(たとえば、アイコンタクト)を行う。そして、オペレータは Communicative unit の切替えのみを行う。また、将来的にこの切替え操作を自動化するために、オペレータの操作ログを記録している。

3 評価実験

開発した協調的身体動作を行うロボットを評価するために実験を行った。

3.1 実験方法

本実験では、順路案内の場面における人とロボットの協調動作の重要性について調べる。具体的なタスクとしては、話し手(被験者)が聞き手(ロボット、あるいは人)に目的地までの順路を教える。ロボットは WOZ 法のもとで協調的身体動作を行う。この際の聞き手(特に、開発したロボット)の身体動作の話し手への影響を評価した。

実験条件

聞き手に関して以下の 3 条件を設けた。話し手はいずれの場合も被験者である。

- H: 他の人 (被験者)
- Rr (reactive movement): 協調動作をするロボット
- Rn (no movement): 動作しないロボット

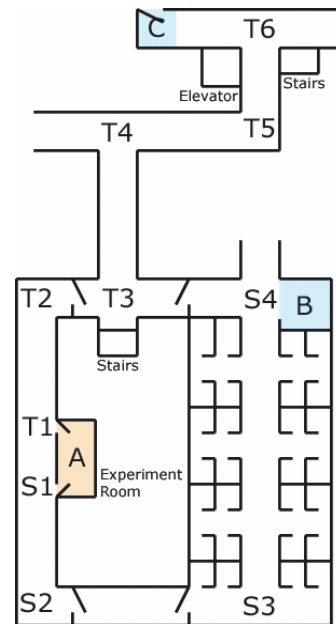


図 4: 実験環境

被験者

男女の大学生 50 名が実験に参加した(男性 23 名, 女性 27 名)。各被験者は H 条件と R 条件(Rr 条件または Rn 条件)に 1 回ずつ参加した。H 条件では、被験者は話し手または聞き手のどちらかを担当した。実験順に関してはカウンターバランスをとった(つまり、実験は H 条件-R 条件の順、あるいは R 条件-H 条件の順のいずれかで行われた)。被験者は、実験環境を訪れたことがなく、部屋の配置、順路についてはまったく知らない。また、被験者の各条件への配分はランダムに行った。

実験環境

図 4 に実験環境の概要を示す。本実験は、ATR 知能ロボティクス研究所内の実験室、廊下、ロビー、休憩所において行われた。実験を行うのは位置 A である。実験には B と C の順路を用意し、B の順路は S1 から S4 のキーポイントがあり、S3, S4 に関しては大きな部屋の中のデスクに囲まれている。また、C の順路は T1 から T6 まですべて廊下であり、いくつかの T 字路や十字路がある。

実験手順

順路を教える被験者を A とし、順路を教わる被験者を B とする。

- (1) A は人とロボットに教える順路を実験者から教示を受ける。
- (2) A が B、またはロボットがいる部屋に案内される。

表 2: 質問項目

Question #	質問項目(略称)
1	あなたは、順路を思い出すのに時間がかかりましたか？(Recall ability)
2	あなたは、相手に順路を教えやすかったですか？(Easiness)
3	相手の方は話を聞いていたように感じますか？(Hearing)
4	相手の方は順路を理解したと思いますか？(Understanding)
5	順路を教えているときに、相手の方と情報を共有しているように感じましたか？(Shared ness)
6	順路を教えているときに、相手の方の気持ちがわかった気がしたか？(Sympathy)

- (3) B が「道を教えてください.」, ロボットが「道を教えてね.」と発話すると A が道を教え始める.
- (4) なんにも身体動作をしないロボットの場合, 最初に発話を行ってからは, A が最後まで説明し終えるまで何も発話も身体動作も行わない. 協調的な身体動作を行うロボットの場合, A が話しやすいと思うような場所まで移動し, 相手と同じような身振りをしながら, 「うん」「うんうん」とあいづちを打ち, 説明が分かりにくい場合には「もう一度お願い」と発話し, より人らしく振舞うようにする.
- (5) B が「わかりました.」, ロボットが「わかったよ.」と発話すると実験を終了し, B が実験室から退出する.

(6) 実験終了後, A は質問票に答える.

ロボットの操作

(a) Communicative unit の切替え規則

オペレータが Communicative unit の切替え操作を行う上での各ユニットを選択する規則を示す.

オペレータはまず初めにアイコンタクト・ユニットを選択する. 次に, 体の位置合わせユニットを選択し, 体の向きを合わせる. 被験者が腕をあげ, 道を指し示すと, ロボットの腕を被験者の腕に合わせる腕の同調, または鏡像の腕の同調・ユニットを選択する. つまり, 本システムでは, オペレータがロボットの腕を操作するのではなく, 人と同じ動作をするユニットが準備されていることを示す. また, 適宜, 被験者の説明に合わせてうなずき・ユニットを選択し, また, 被験者が道を指し示した指の先を見る指先方向を見る・ユニットを選択する.

実験が終了すると, 腕を下ろし, 被験者と正面で向き合う. このときアイコンタクト・ユニットは選択されたままとする.

(b) Communicative unit の発話規則

オペレータが Communicative unit の発話操作を行う上での各発話ユニットを選択する規則を示す.

実験が始まる時に「道を教えてね」と発話し, その後, 被験者の道順説明に合わせて選択される首のうなずき・ユニットに合わせて「うん」または「うんうん」と発話する. 被験者が「わかる?」などと確認を求めてきた場合, 「はい」と発話する. また, 道の説明がわかりにくかったり, 説明が早すぎたりした場合「もう一回」「ゆっくりお願い」と発話し, 再度説明を求める. このとき, 話のわかりにくさはオペレータ (実験者) が判断することとする.

被験者の説明が終わると「わかったよ」と発話する.

3.2 評価方法

評価は, 被験者の質問票への回答の結果により行う. 質問票での質問項目を表 2 に示す. 質問番号(以下 Question または Q)1,2,4 が情報伝達に関する質問項目であり, Question3,5,6 が感情的な側面に関する質問項目である. 被験者はこれらの質問に 7 段階尺度で回答する. 最も低い評価を 1, 最も高い評価を 7 とする.

3.3 実験の仮説と予測

本実験では, 以下の仮説に基づき予測の検証を行う.

仮説

聞き手(開発したロボット)の協調的な動作によっ

表 3: 主観評価の結果

Condition	Question: 1	Question: 2	Question: 3	Question: 4	Question: 5	Question: 6
質問項目 (略称)	Recall ability	Easiness	Hearing	Understanding	Shared ness	Sympathy
H	3.84(1.6657)	4.28(1.6129)	5.96(0.9156)	4.68(1.2238)	5.16(1.2225)	4.80(1.0954)
Rr	3.41(1.7231)	4.05(1.6645)	5.45(1.4687)	4.41(1.6695)	4.77(1.4750)	4.09(1.5048)
Rn	2.65(1.7110)	3.30(1.5199)	4.10(1.5133)	3.70(1.6763)	3.25(1.4098)	3.20(1.4000)
分散分析の結果 (F(2, 64))	F=2.63 p=.080 (+)	F=2.09 p=.132 (n.s.)	F=11.20 p<.001 (***)	F=2.29 p=.109 (n.s.)	F=11.19 p<.001 (***)	F=7.65 p=.001 (***)
多重比較の結果	(H > Rn)		H,Rr > Rn		H,Rr > Rn	H,Rr > Rn

て、話し手はより自然で円滑に道を教えることができる。

予測

被験者が全く動作しないロボット(Rn 条件)より協調的動作をするロボット(Rr 条件)に順路を教える場合の方が、被験者の主観評価が高い。

4 実験結果

本章では実験結果に基づき、3.3 節で立てた仮説と予測を検証する。

本実験では、道を教えた被験者の聞き手に対する主観評価を測定するために実験終了後、質問票による回答を求めた。表 3 に質問票の 6 評定項目の条件ごとの平均、標準偏差、および分散分析の結果を示す。また、図 5 に各条件の主観評価の平均値のグラフを示す。実験器具の障害により実験ができなかった被験者のデータは分析から除いた。そのため、各実験項目の有効な被験者数は H 条件が 25 名, Rr 条件が 22 名, Rn 条件が 20 名である (H 条件は、本実験のタスクである道を教える側のみを対象としているため、3 章の実験条件で示した H 条件のみを対象としており、道を教わる側は除いてある)。

Q:1 から 6 の各項目について分散分析を行った結果、Q:3,5,6 において有意差があり、Q:1 において有意傾向が見られた。さらに、LSD 法による多重比較の結果、Q:3,5,6 において H と Rn, Rr と Rn に有意な差が確認された(Q:3(MSe = 1.7708, $p < .05$), Q:5(MSe = 1.9231, $p < .05$), Q:6(MSe = 1.8316, $p < .05$)). また、Q:1 において H, Rn に有意な差があることが示唆された(MSe = 3.0192, $p < .10$).

これらの結果から、全く動かないロボットに順路を教えた場合より、人や協調的動作をするロ

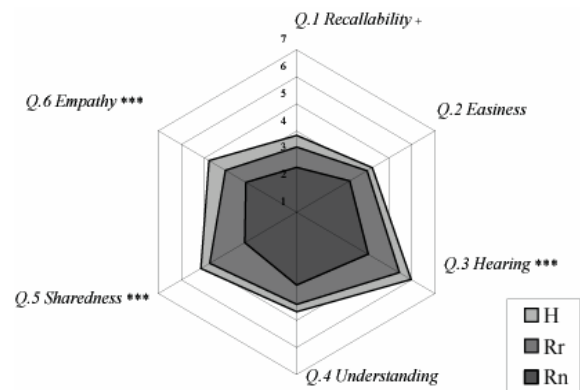


図 5: 主観評価の比較

ットに順路を教える場合のほうが「話を聞いているように思う」「相手と情報を共有しているように感じる」「相手の気持ちが分かった気がする」といった、相手と気持ちが通じているように感じる傾向があることが分かった。これは、身体動作が相手の感情的な評価に関係することを示している。しかし、教えやすさに関して身体動作は大きな影響を与えないという結果を得た。以上の分析により、主観評価に $H > Rn$, $Rr > Rn$ の傾向があることを確認した。つまり、協調的動作をするロボットや人は停止しているロボットよりも有意に良い印象を話し手に与えた。これにより予測は検証された。

さらに、H(人)条件の平均値を 1, Rn(動かないロボット)条件の平均値を 0 と正規化したときの Rr(本稿で開発したロボット)条件の平均値は 0.73 となった。これは半自律制御である本システムのパフォーマンスとオペレータの操作の妥当性を表している。この結果からロボットの振る舞いはかなり人に近い評価が得られたと考える。また、オペレータの操作に関しても妥当であったと考える。

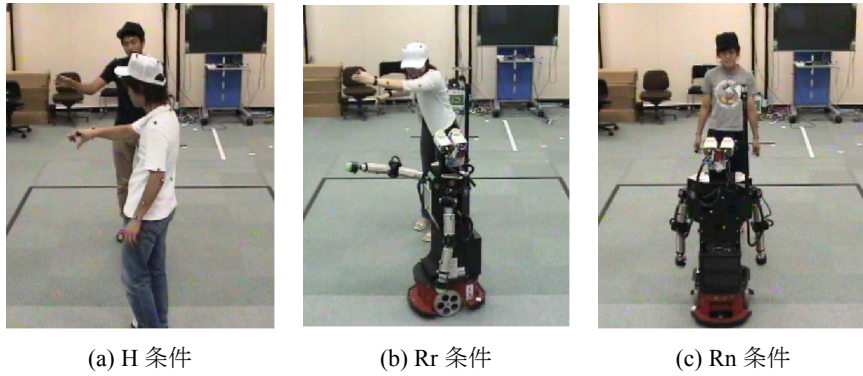


図 6: 実験の様子

5 考察

分析の結果，人がロボットと話をする場合，協調的な身体動作をすることで，より人らしく，人に対して話を聞いているように思わせることができ，また，気持ちが伝わったような感じさせることができるという結果が得られた．これは，静止したロボットよりも協調的な身体動作を行うロボットの方が感情が伝わりやすく，感情が理解できたように感じるということであり，これにより，身体動作が感情的な側面に大きく影響することが示された．一方で，開発したロボットに関する主観的評価は人に比べるとまだ低い可能性が大きい．今後，さらに効果的に協調動作を行うために，より多くの Communicative unit 実装と，切替えの自動化による効率化が必要である．

一方，身体動作が情報伝達の側面に与える影響については本実験からは有意な影響が見出されなかった．しかし，Q:2,4の「教えやすかったか?」「理解したと思うか?」という質問項目の評価に有意差はなかったものの，有意な傾向が見られた．このことから Q:2($p=.132$), Q:4($p=.109$)の値からは無関係であるとの判断もできない．つまり，意思疎通の側面において協調的な身体動作が関係ある可能性が残されている．先行研究[5]においては，協調的な身体動作が情報伝達に影響することが見出されている．

先行研究では，廊下で出会った聞き手(被験者)が話し手(ロボット)から道案内をされる方法をとった．この実験で，ロボットが効率的な身体動作をした場合に，人とロボットに協調的な身体動作が起こることが確認された．また，この協調的な身体動作によって人とロボット間に関係が構築され

るという，共創対話の中で情報伝達が起こることが示唆された．実験の様子(図 6(b))から Rr 条件において共創対話が実現されていると推察できる．このような共創対話が，聞き手のロボットからの同調的な動作によって実現可能であるか，またそれが情報伝達に影響するか，といった互いの身体動作の影響の検証は，より効果的に協調動作を行うロボットを開発することによって今後検証を行って行きたい．

また，本実験で得られたソフトウェアの操作ログからロボットの操作を自動化する予定である．実験では，特別なケースがない限りほぼ規則通りの操作を行った．そのため，本実験で得られた操作ログの情報を解析することによって，体の振る舞いを自動化することはそれほど難しくはないと予想する．しかし，相手にあいづちを打つ場合，そのタイミングも自動化しなくてはいけないため，相手の発話のタイミングを把握し，答える機能を開発する必要がある．

6 結論

我々は，モーションキャプチャシステムを環境型センサとして利用することで，人型ロボットに精密な協調的動作を行わせるシステムを実現した．本稿では，このロボットを用いて，身体性コミュニケーションにおける互いの身体動作の関わり合いの影響を見いだすことを試みた．その結果，身体動作が話者の感情的側面に大きな影響を与えることが示された．しかし，意思疎通の側面には影響を与えるかについてはいまだ明らかではない．

一方，本稿で得られた知見は次世代インタラクティブ技術の開発につながると考える．つまり，身体動作が相手の感情的側面に訴えかけることがで

きるため、今後のロボットシステム、インタフェースシステムにおいて身体動作を利用することで、ユーザの感情を制御できる可能性がある。

謝辞

本研究は通信・放送機構の研究委託により実施したものです。

参考文献

- [1] D. McNeill: Psycholinguistics: A New Approach, Harper & Row, 1987.
- [2] C. Moore and P. J. Dunham (Eds): Joint Attention: Its Origins and Role in Development, Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
- [3] 小嶋秀樹, 高田明: 社会的相互行為への発達のアプローチ - 社会のなかで発達するロボットの可能性, 人工知能学会誌, Vol.16, No.6, pp.812-818, 2001.
- [4] W. S. Condon and L. W. Sander.: Neonate Movement Is Synchronized with Adult Speech: Interactional Participation and Language Acquisition, Science, 183, 99-101, 1974.
- [5] 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平: 身体表現を用いた人とロボットの共創対話, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6, pp.1348-1358, 2001.
- [6] 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基:"発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム," 日本機械学会論文集(C編), 66巻 648号, pp.251-258, 2000.
- [7] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, and T. Ono.: Body Movement Analysis of Human-Robot Interaction, International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2003.
- [8] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 前田武志, 中津良平: 研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット "Robovie" の開発, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J85-D-I, No.4, pp.380-389, 2002.