

# An Experimental Study of the Emergence of Human Communication Systems

Bruno Galantucci

Cognitive Science 29 (2005), 737-764

## 1. Introduction

- ⊕ 人間のコミュニケーションシステム：世代を超えた複雑なプロセスを経て発現
- ⊕ 発現と進化のプロセス (emerge and evolve) を確認するのは難しい
  - ✓ コンピューターシミュレーションによって発現と進化の検討  
しかしながら、人工的なエージェントと実際の人間とでは差が大きい
  - ✓ 実験的検討
    1. 自然言語を用いた研究
    2. 実験者によって作られた人工的な言語  
言語獲得、言語運用、言語の通時的な変容に関して多くの知見
- ⊕ 話し(Speaking)や書く(Writing)という行為を取り除いて検討すれば、コミュニケーションシステムの発現に関するより直接的 (direct) な検討ができる  
本研究ではこれらの点を踏まえて実験をデザインし、以上の点を検討する
- ⊕ 論文の構成
  1. 研究の方法、Game1 の説明
  2. 研究 1 A と研究 1 B  
研究 1A : Game1 を用いてコミュニケーションシステムの発現を検討  
研究 1B : Game1 の改良版 (Game 2&3) を用いて進化過程を検討

## 2. Method

### 2.1. General idea

#### 実験状況の概要

- ⊕ 二人であるビデオゲームを行い、ゲームの中のエージェントを操作
- ⊕ 被験者は別々の部屋に配置
- ⊕ お互いに協力しあいながらコミュニケーションを図る
- ⊕ 話し合いやジェスチャーなどの身体的動作は制限
- ⊕ グラフィカルなシンボルによるやりとり (文字や数字は制限)

被験者は、以上の条件の下でコミュニケーションシステムを発現させねばならない

#### 着眼点

1. 被験者がエージェントを操作する中で、コミュニケーションシステムの発現の様子を見ることができる
2. 新しい環境の中で、同じコミュニケーションシステムを用いて/応用していればその進化の様子を見ることができる

## 2.2. An implementation of the idea: Game 1

### 2.2.1. Game setup

- ⊕ プレーヤーA,B が二次元的な仮想環境の中でゲームを行う ( Fig.1A )
- ⊕ キーボードを用いて4つの部屋の中で動き回る ( Fig.1B )
- ⊕ 各被験者のディスプレイには現在の部屋の画像しか表示されない ( Fig.1C &1D )
- ⊕ 初めは別々の部屋から移動を開始し、同じ部屋に移動すればエージェントは同じ画像を見ることができる ( Fig2 )

### 2.2.2. Game logic

- ⊕ 初期状態：エージェントは異なる部屋に配置されるようにランダムイズ
- ⊕ ゴール：各エージェントを同一の部屋に移動させる ( チャンスレベルは 50% )
- ⊕ ゴールを満たせば 1 ラウンド終了
  - 100 ポイントを取得すればゲームの終了
  - 初期状態で二人は 50 ポイント持っており、1 ラウンドでゴールの条件を満たせば 2 ポイント取得でき、できなければ 4 ポイントの減点となる ( 尚、1 分毎に 1 ポイント減る )

### 2.2.3. Communication medium

- ⊕ デジタルパッドを用いてコミュニケーションを行う ( Fig3 )
- ⊕ パッドに文字をトレースする
- ⊕ パッドの constraints
  - 書き込むと次第にフェードアウトする
  - 水平方向にしか移動しない stylus の原理を用いる ( Fig3 B )
  - 垂直方向の移動を制御 ( 早く動かすと波線ができる )

## 3. Study

### 3.1. Study1A: The emergence of communication systems

#### 3.1. Procedure

- ⊕ 教示 ( Appendix A )
  - パートナーと一緒に同一のゲームを異なる場所から行う
  - 相手にも同一の教示を行っている
  - 数分間の練習課題を実施してから本課題に移行する
  - 本課題に移行してからは実験者とのコミュニケーションは最小限にすること
  - 得点はゲームを動作しているプログラムによって 100 点になるまで記録されている
  - 100 点に到達すると、Test Phase に移る

#### 3.1.4.1. Test session.

- ⊕ コミュニケーションの利得を算出

1. コミュニケーションなし/ありで5分間ずつプレイする
2. 利得を算出方法
  - NCS(no-communication score) : コミュニケーションしなかった時の得点
  - CS(communication score) : コミュニケーションした時の得点  
(CS)-(NCS)
3. どのようにコミュニケーションをしかのか、ゲームを攻略する上でそのような方法を用いるとよいのかを説明させる (Appendix B)

### 3.1.2. Results : Communication systems emerge

#### ⊕ 結果の概要 (Fig 4)

- 9ペアが3時間以内にゴールに達した (pairs1-4 & pairs6-10)  
比較的确实でかつ、迅速にコミュニケーションシステムを構築できた

#### ⊕

- コミュニケーションの合致はそう簡単ではない (trivial )
- コミュニケーションの成功を得点によって検討

#### 3.1.2.1. Convergence is not trivial.

##### ⊕ Pair5 の考察

- Fig5 に示されるように Pair5 は 160 分経過してもゴールに達することができず、途中で放棄しはじめた
- ペア 5 における一人の被験者は一貫性のないコミュニケーション方略を取っていた (自分のいる場所や動こうとしている場所に関するサインを交互に示していた)

##### ⊕ Pair 6 の考察

- 152 分経過時にゴールに到達したが、実験者からのコメントを受けすぎていた
- 協力することでゴールに到達できるということを理解しておらず、コミュニケーションパッドも 1 時間経過しても使わなかった
- 協同相手がサクラだと思っていた

#### 3.1.2.2. The score accuracy captures the presence or absence of communication

##### ⊕ Fig5 に示される成功の典型的パターンについて

- a. ゲーム初期段階では 0 まで落ち込む (pairs1,3-6 & 10)
- b. 0 のあたりでしばらく停滞する 不完全なコミュニケーション
- c. ゴールする直前に急に上昇する コミュニケーションシステムの発現  
落ち込みがなかったペア (pairs2, 7-9) は初期からコミュニケーションシステムが発現していた

##### ⊕ テストの得点について

- CS と NCS の違いは統計的に有意だった  $F(1,7) = 58.9, p < .001, n$

### 3.1.3. Results : How communication systems emerge

- ⊕ パターンを 2 種類のタイプに分類する

#### 3.1.3.1. Learning by using

- ⊕ 6 ペア ( pairs1,3-6, and 10 )
  - ある被験者の作り出す特定のサインと行動との関係をいくつかの試行を繰り返す中で他方の被験者が学習していく
- ⊕ このようにして発現した被験者は Garrod の提唱する談話における input-output の調整機能と類似している

#### 3.1.3.2. Naming procedures

- ⊕ 4 ペア ( pairs2 and 7-9 )
  - ゲームで成功した直後にパッドにサインを書き込む。その時にいる部屋に生成されたサインの意味を付与する

### 3.1.4. Results : The sign systems

- ⊕ 各部屋に付けられた 3 種類の代表的な表記方法
  - a. 命数法による方法
  - b. 部屋に記号 ( アイコン ) をつける方法
  - c. ゲームの地図を描く方法

#### 3.1.4.1. Numeration based.

- ⊕ 3 ペア ( pairs1 & 6-7 )
  - Pair1,2 は、横棒 pair6 は縦棒によって表記

#### 3.1.4.2. Icon based.

- ⊕ 4 ペア ( pairs2 and 8-10 )
  - 部屋にあるアイコンの頂点の数を棒や点で表記する

#### 3.1.4.3. Map based.

- ⊕ 2 ペア ( pairs3 and 4 )
  - パッドの中にゲーム全体の地図を直線的な線 ( パッドを長押し ) の位置を変えて表記
  - この方略を用いたペアが相対的に成功する傾向にあった

### 3.1.5. Results : Communication systems integrate information from different sources

- ⊕ 一度サインを作り上げ、それを用いて位置情報を特定できるようになると、サインを用いたネゴシエーションは少なくなり、エージェントの行動そのものがサインとなった ( 暗黙的な動きが出来上がる )
- ⊕ 時間による行動の決定
  - 例えば、あるサインの直後に、別のサインを出したとすると、はじめの

サインは自分のいる位置に関するものを表し、次に出したサインはこれから自分が移動しようとしている場所を表す

- ⊕ Double-move のときでも交互にサインと動きを出し合い、コミュニケーションを図った (Box 2)

### 3.1.6. Discussion

1. 実験室の中でもコミュニケーションシステムは比較的确实かつ迅速に発現する
2. ゲームを達成するのにサインシステムを用いるようになる

#### 3.1.6.1. Communication systems emerge relatively quickly and reliably

- ⊕ コミュニケーションシステムの発現
- ⊕ Healy の先行研究と一致
  - 大人でも自然言語や数字等を用いずに早くコミュニケーションをとることができる
  - 1. 先行研究で用いられていた課題より open-ended
  - 2. だった。二人の被験者に 2 種類の音楽をターゲット刺激として聞かせた後、テスト刺激を提示し言語を用いずに弁別を行う課題
  - 3. 本研究で考案したパッドの制約があった分、既に知っているシンボルを用いてやりとりするのを防いでいる

#### 3.1.6.2. Sign systems can originate from very different mappings.

- ⊕ コミュニケーションシステムを作り上げるのに重要な二つの要素: What to code and How to code
  - What to code : Section 3.1.4 で示されたように、どのような表記方法がコミュニケーションシステムにとって適切かを判断する
  - How to code : 状況に対してどのような最適な表記のマッピングを行うのかを検討 (Table 2)
- ⊕ 同一のゲーム環境でもまったく異なった方法で表記することがわかった
  - Pairs 3 and 4 : 表記の位置とエージェントの位置
  - Pairs 1 and 6 : 表記されている数字と部屋の位置
  - Pair 2 : 表記されている数字とアイコンの形状の数

### 3.2. Study 1B: The development of communication systems

- ⊕ Game 1 で発現したコミュニケーションシステムに基づいて、新たなゲームに取り組んだ場合にどのようなコミュニケーションシステムが進化するのかを観察することができるのかできる
- ⊕ Game 2 と 3 を実施する

#### 3.2.1. Games 2 and 3

##### 3.2.1.1. Game 2.

- ⊕ 基本的には Game1 と同じだがゴールと部屋のサイズが違う (Fig 6 A)
  - 4 つ部屋でなくて9 つの部屋でプレイする
  - ゴール：獲物を捕獲すること (4 ポイント)
  - 捕獲の為の必要条件：二人のエージェントが獲物と同じ部屋にいないなければならない
  - 捕獲すると餌食は部屋から消え違う場所に移動する (エージェントはそのまま)
  - 獲物がない部屋で出会ってしまうと原点 (2 ポイント)
  - 100 点でまで到達すると終了

### 3.2.1.2. Game 3.

- ⊕ ゲーム 2 の改変版 (Fig 6 B)
  - 16 部屋でプレイ
  - 2 つの敵が存在する。
    - ◇ 敵 A エージェント A を攻撃 (エージェント B は攻撃しない)
    - ◇ 敵 B エージェント B を攻撃 (エージェント A は攻撃しない)
  - 自分のエージェントにとって有効な敵であれば、敵は追ってくる。(毎分 3 ポイント減)
  - 二人のエージェントがどこかの部屋で出会えば敵は追いかけてこない

### 3.2.1.3. How Games 2 and 3 increased the need for communication.

- ⊕ 以下の 3 つの意味においてコミュニケーションを複雑にする必要があった
  1. 部屋の数が増え、新しい部屋の表記を作る必要性があった
  2. 以下の二つのイベントが加えられている 獲物がいる 敵がいる
  3. ペナルティの回避

### 3.2.2. Procedure

1. ゲーム 1 が終了するとゲーム 2 に移り、ゲーム 2 が終了すると 3 へと移る
2. 教示は Appendix B に従う

### 3.2.3. Results : Communication systems develop

- ⊕ 結果の概要 (Fig 7)
  - 8 ペアが 1 時間でゲームを解いた
  - 初期の得点 (50) から下がることはなかった
  - Game2,3 は Game 1 に比べて比較的少ない時間でできた (フレームの効果)
  - Game3 は Game2 に比べて難易度が高かった (2 組はできなかった)
  - Sutdy1B の概観として、Game1 で構築したコミュニケーションシステムを新しいゲームに適応したといえる

#### 3.2.3.1. Overt communication helps, but it is not always crucial.

- ⊕ 明示的なコミュニケーションは有効であるが決定的な要因ではない

(Table3)

➤ Game2&3

- ✓ Game2:CS と NCS の差は統計的に有意であった  $F(1,7)=10.89, p=.013$
- ✓ Game3: $F(1,7)=18.98, p=.003$
- ◇ Game2,3 の (CS - NCS) 得点は、Game1 の (CS-NCS) 得点よりも相対的に低い

被験者は Silent behavior-coordinating procedures を構築したから(実験者の観察により)

3.2.4. Results : How sign systems develop

⊕ ほとんどのペアでは Study 1 A で見られたとき同様の表記を構築していた

- Pairs1 to 4:Learning by using
- Pairs 8 and 9 :ネーミング表記
- Pair7 and 10:Learning by using だが、時折ネーミング表記を用いる

3.2.5. Results : Developing sign systems

⊕ Game2&3 における表記システムの進化

- a. もともと持っている表記システムを変化させて進化する
- b. 新しいマッピングを古いマッピングを用いて統合して進化する

3.2.5.1. Sign systems easily diverge during development.

⊕ ゲームの初期段階では比較的簡単に進化する

⊕ Pair1

- Numeration による表記を追加して全体を表現

⊕ Pair7

- 古い部屋のものはそのまま、新しくできた部屋に関しては古い部屋のものに追加的な要素を付け加えた
- Game 2 Game 3 にかけても同様の進化プロセスがみられた

古い表記から新しい表記への進化には古い表記が重要な役割を果たしていて、それが進化を早める

3.2.5.2. Sign systems can integrate new mappings with old ones.

⊕ 表記システムは古い表記を用いるか、状況に応じて新しい表記と古い表記を組み合わせて用いる

⊕ Pairs 3 & 4

- 棒線(以前から用いていた方略)を用いて新たな緯度を表す表記を作りだした

⊕ Pair 2

- アイコンの頂点の数を点線で表記していたペアは、新しいシステムに変わり従来の方法では通用しなくなってしまった(傘、冠、鳥といったア

アイコンの出現)

- Game 1でも通用したアイコンはそのまま同様の表記をし、お互いに異なった独自の表記方法を用いたり icon base で表記したりした

### 3.2.6. Results : Efficient communication systems rely on silent behavior-coordinating procedures as well as on signs

⊕ 3.1.5でも述べたように表記によるコミュニケーションだけが成功の手段ではない

#### ➤ Pair8 と Pair 9

- ✓ 表記を用いた数 : Game2 (Pair8=7/9, Pair9=4/9) Game3(Pair8=14/16, Pair9=7/16)
- ✓ パフォーマンス : pair9>pair8
- ✓ 時間 : Game2 ( Pair8 45 分 Pair9 14 分 ) Game3 ( Pair8 150 分 Pair9 62 分 )

#### ➤ なぜこのようなことが起こるのか？

原因は behavior-coordinating procedures である

Box 3 に描かれているような Split search strategy を用いている

⊕ 他の規範的な行動による表記以外のコミュニケーション方略を用いる

### 3.2.7. Discussion

⊕ 以下では以下の二点に関して考察を行う

- 表記システムは儉約的な方法で発現する傾向にある
- 被験者が用いた表記が、知覚的に明確で単調にそれを用いていたことにある

#### 3.2.7.1. Sign systems develop parsimoniously.

⊕ 儉約的な表記システム

- 一度新しい表記が発現したら再度それを作りなおすことはない

#### 3.2.7.2. Some remarks on the forms of signs.

⊕ ほとんどの表記が線や点で構成されている

- a. 用いられた表記は、知覚的に区別しやすいもので、単調なものであった
- b. 用いられた表記は、一貫性があり豊富なバリエーションだった



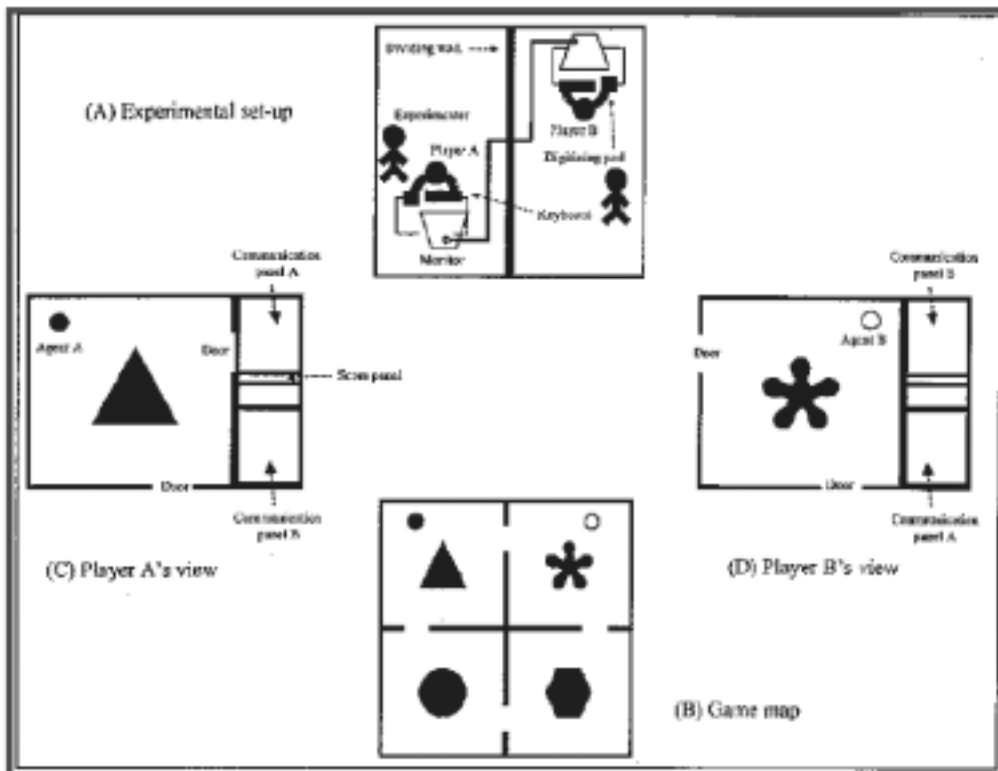


Fig. 1. Overview of the basics of the game. (A) Experimental setup. (B) Game 1 map. (C) Player A's view of the map. (D) Player B's view of the map.

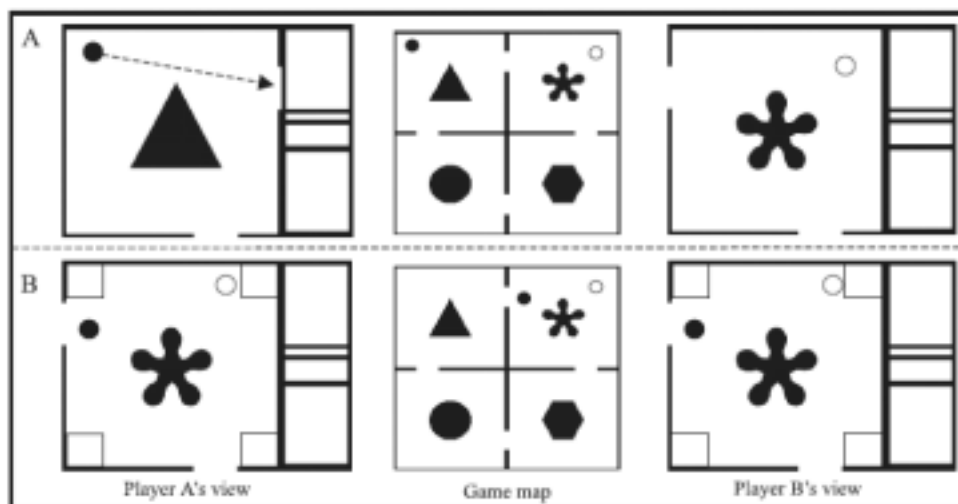
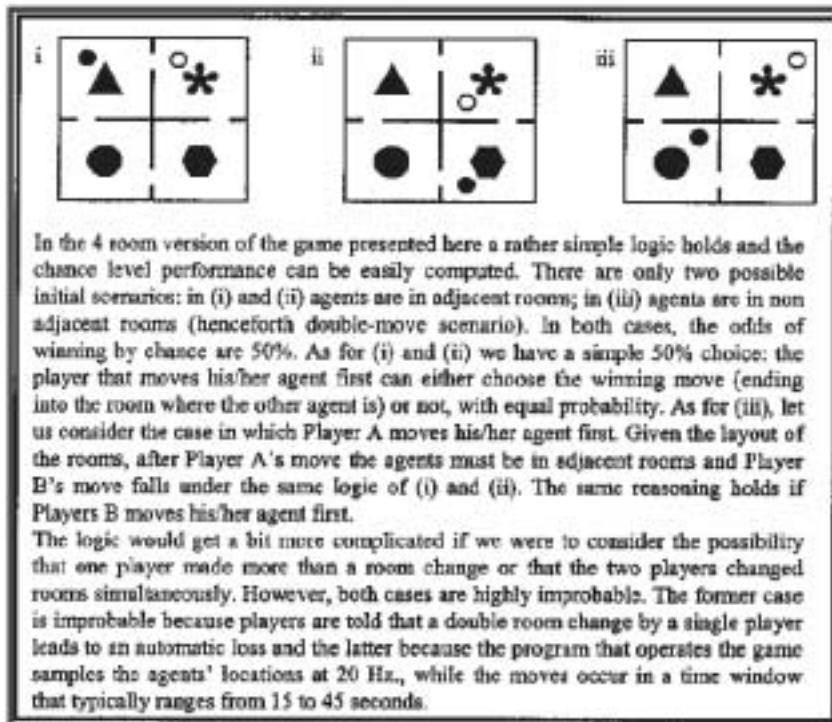


Fig. 2. A move in the game. (A) Agents are in different rooms. Player A's agent (black dot) moves rightward from the triangle room. (B) Player A's agent has passed through the doorway and found Player B's agent (white dot) in the adjacent room. Notice that, when in the same room, players see the same display.



Box 1. Chance-level performance in Game 1.

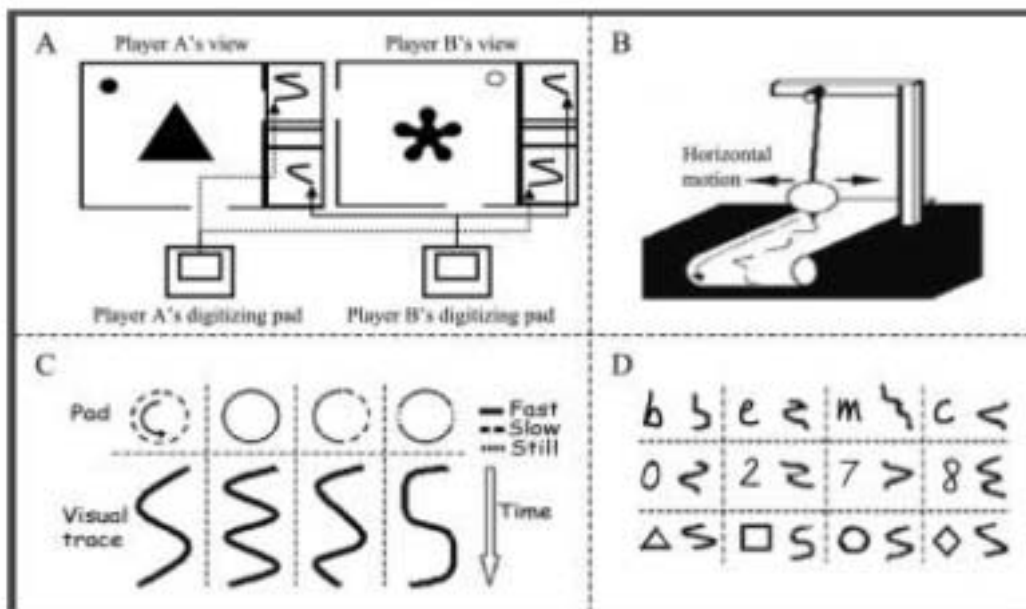


Fig. 3. The communication medium. (A) The signal generated by players' digitizing pads is relayed to both players' communication panels. (B) The signal has the properties of a quickly fading intermittent time series such as the signal generated by a seismograph that allows discontinuities. (C) The visual outcome of the same geometric shape depends on the velocity profile of the drawing movement. (D) How the drawings of familiar letters, numerals, and shapes appear on the communication panel.

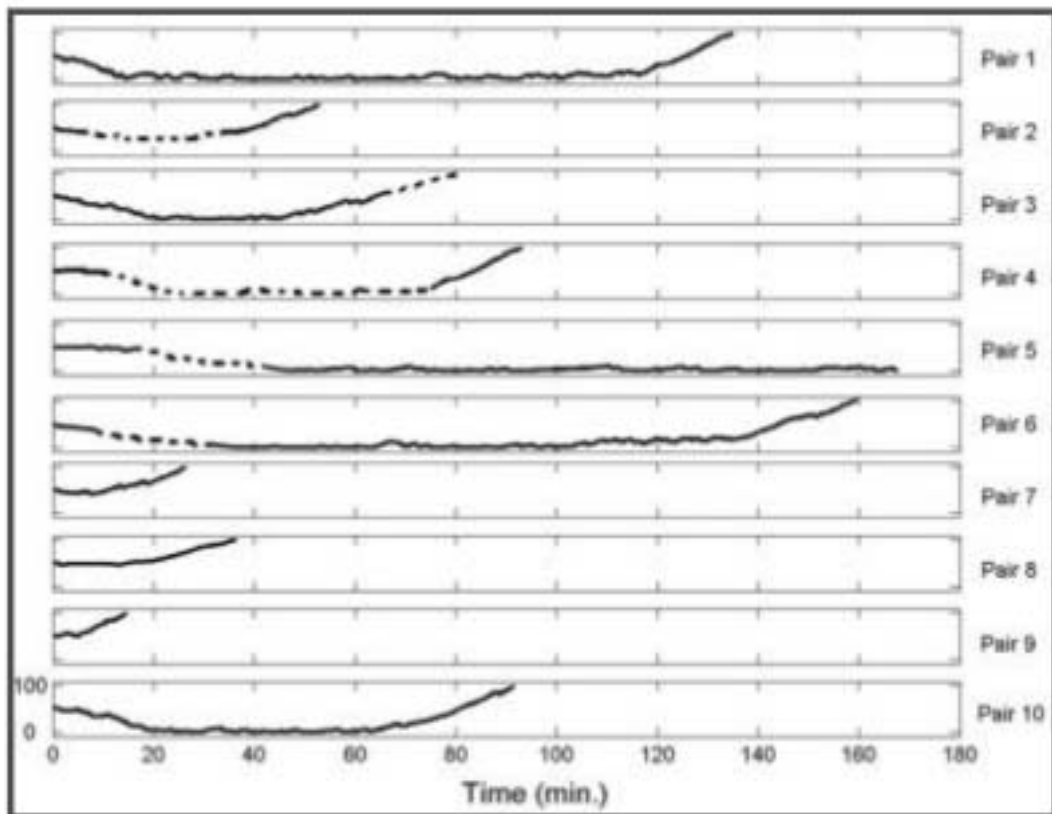


Fig. 4. Score plots for Study 1A. The ticks on the axes for Pairs 1 to 9 have the same values as the ticks on the axes for Pair 10, namely 0 to 100 points on the ordinate and 0 to 180 min on the abscissa. (The dashed portions of the lines for Pairs 2-6 signal that the lines are not plotted on the basis of the history files the computer generated for the game, but have been reconstructed on the basis of the experimenters' notes. The reconstruction became necessary because of computer failures.)

Table 1  
Solution times, minimum scores, and test session scores for the pairs in Game 1

Pair	Time to Solution	Minimum Score	CS	NCS	CS-NCS
1	135	0	21	-25	46
2	48	41	15	-39	54
3	80	0	22	1	21
4	90	0	19	-19	38
5	No solution	0	na	na	na
6	160	0	na	na	na
7	27	34	27	-7	34
8	37	42	21	-25	46
9	15	49	26	9	17
10	92	0	29	-27	56
Average	76	20.75	22.5	-16.5	39
SD	46.47	21.09	4.3	15.06	13.44

Note. CS = communication score; NCS = no-communication score; na = not available.

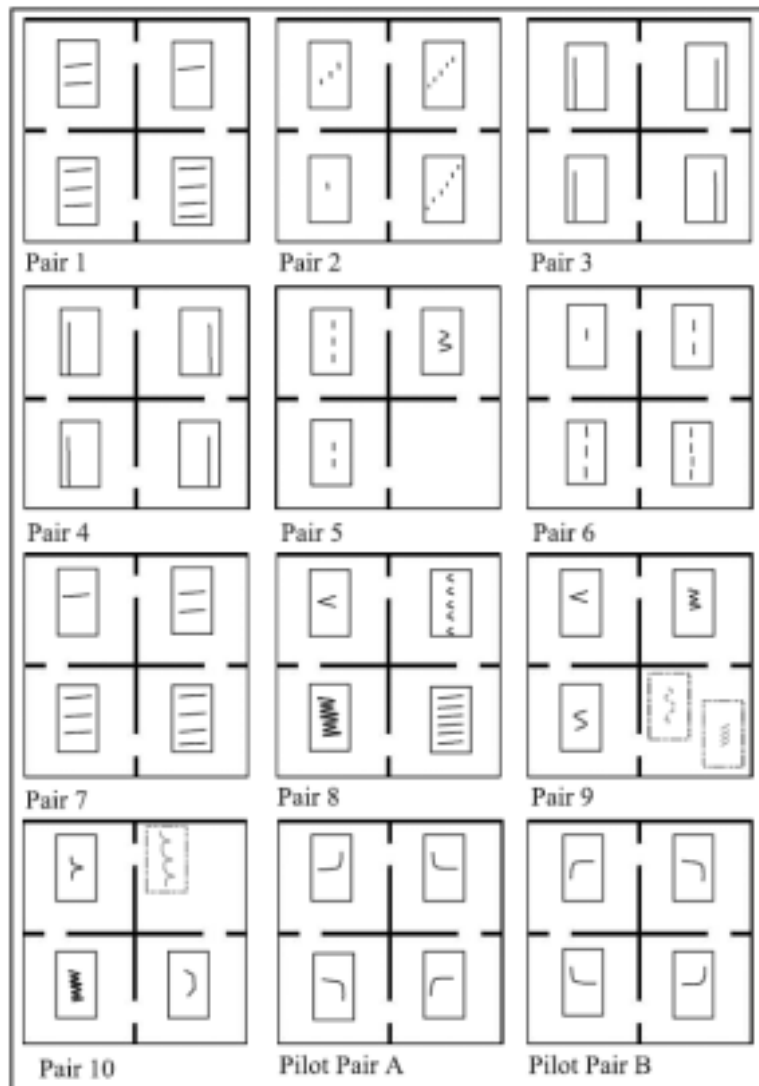
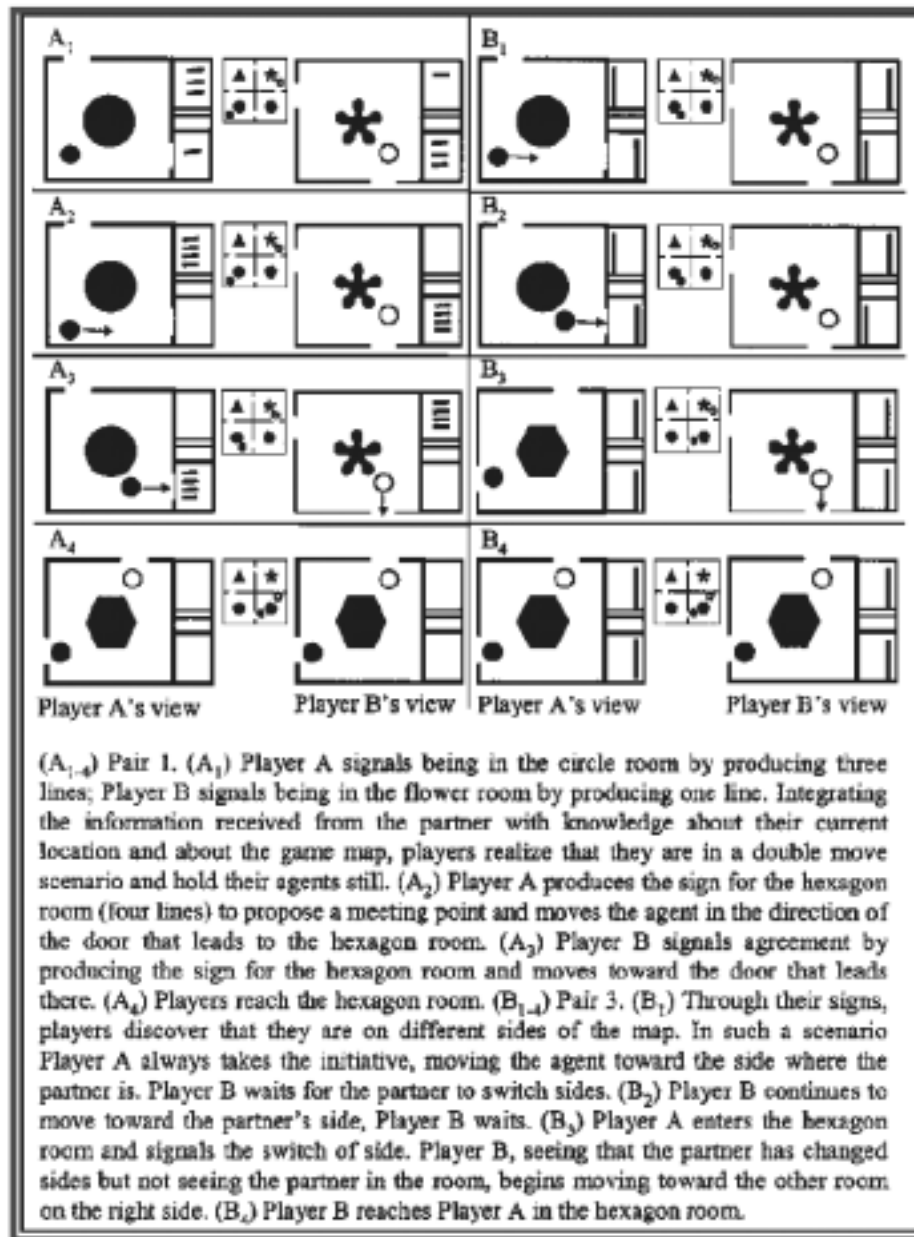


Fig. 5. Pairs' sign systems for Game 1. The signs are presented in the room they stand for. The rectangles around the signs represent the communication panels within which the signs were drawn (Fig. 1). Dotted rectangles in gray indicate signs used only by one player in the pair. Two signs in the same room indicate that players did not use the same signs for that room. Pilot Pairs A and B participated in a pilot study conducted with Game 1 (Galantucci, Fowler, & Richardson, 2003).



Box 2. Procedures used by Pairs 1 and 3 to handle the double-move scenario.

Table 2  
Pairs' choices for the How to Code dimension

Pair	How to Code?
1 (Numeration-based system)	An abstract numbering scheme of rooms on the map is related to the numbers of units in the sign.
2 (Icon-based system)	The number of convexities on the icon in the rooms is related to the number of units in the sign.
3 (Map-based system)	The location of the sign on the panel is related to the location of the agent in the environment.
4 (Map-based system)	Same as above.
5 (Mixed system)	Visual features of the icons in the rooms are related to visual features of the sign "+". The number of convexities on the icons in the rooms is related to the number of units in the sign "+". Arbitrary mapping.
6 (Numeration-based system)	An abstract numbering scheme of the rooms on the map is related to the numbers of units in the sign.
7 (Numeration-based system)	Same as above.
8 (Icon-based system)	Visual features of the icons in the rooms are related to visual features of the sign "+". The number of convexities on the icons in the rooms is related to the number of units in the sign.
9 (Icon-based system)	Visual features of the icons in the rooms are related to visual features of the sign.
10 (Icon-based system)	Same as above.
Pilot A (Map-based system)	The orientation of the sign on the communication panel is related to the orientation of the room on the environment's map.
Pilot B (Map-based system)	Same as above.

location on the game map. In particular, as illustrated in Fig. 5, the 2 pairs used L-shaped signs whose rotation mapped onto the rooms' layout.

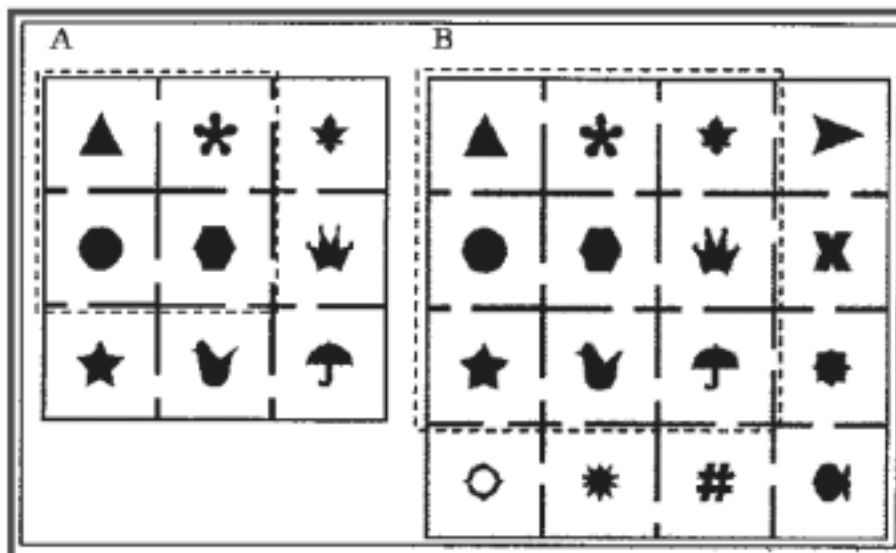


Fig. 6. Game maps for (A) Game 2 and (B) Game 3.

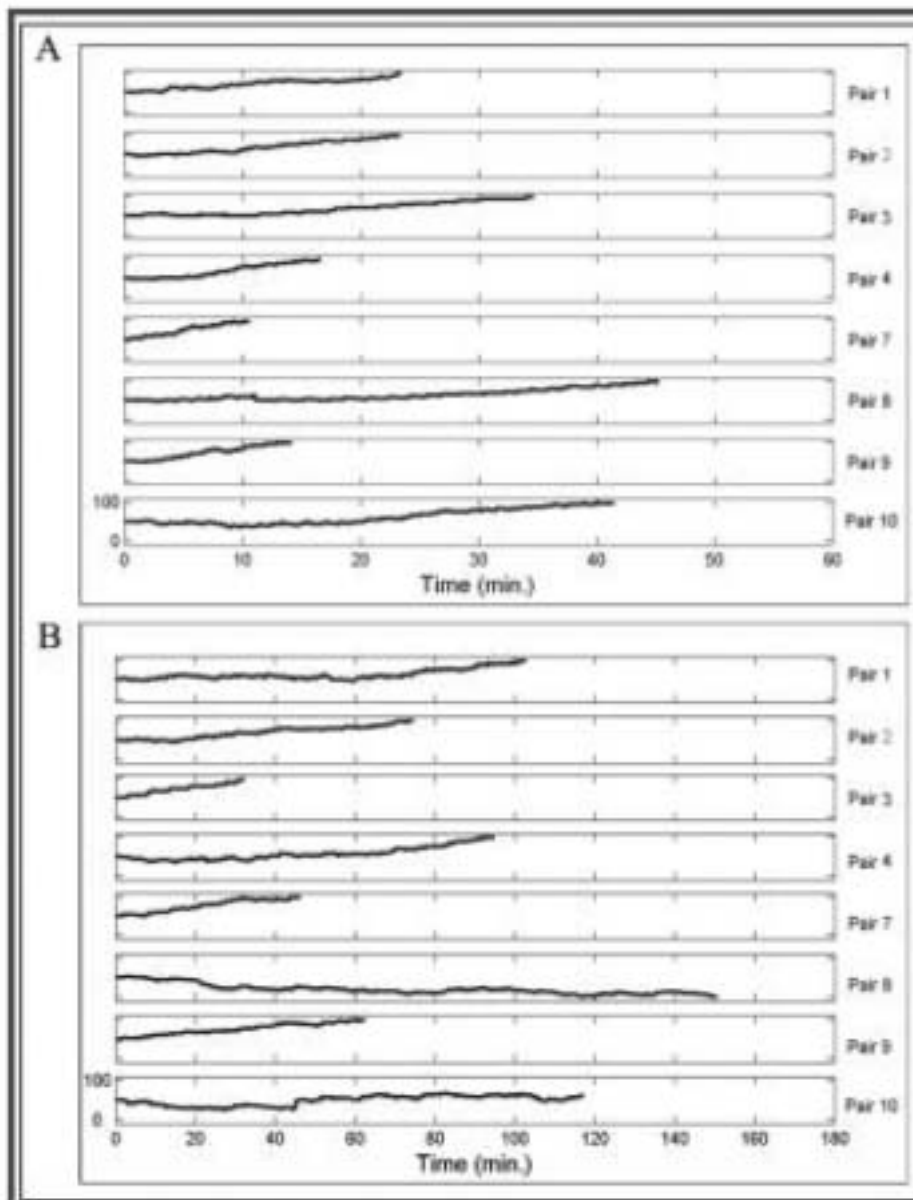


Fig. 7. Score plots for (A) Game 2 and (B) Game 3 (note that the two graphs have different time scales).

Table 3  
Solution times, minimum scores and test session scores for the pairs in Games 2 and 3

Pair	Game 2					Game 3				
	Time to solution	Minimum score	CS	NCS	CS-NCS	Time to solution	Minimum score	CS	NCS	CS-NCS
1	24	49	13	-5	18	102	44	19	-7	26
2	24	45	31	-5*	36	74	43	13	-5*	18
3	35	50	11	13	-2	32	50	5	-3	8
4	17	46	25	11	14	95	36	1	-4	5
7	11	50	23	5	18	45	48	17	-1	18
8	45	47	17	13	4	150+	0	-1	-3	2
9	14	46	23	19	4	62	47	15	1	14
10	42	35	23	3	20	118+	0	11	3	8
Average	26.5	46	20.75	6.75	14	68.33	33.5	10	-2.38	12.38
SD	12.01	4.52	6.2	8.21	11.22	25.1	19.74	7	3.04	7.52

Note. CS = communication score; NCS = no-communication score.

\*The pair decided not to play the game and ended the test with the 5 points of penalty for the 5 min that had passed.

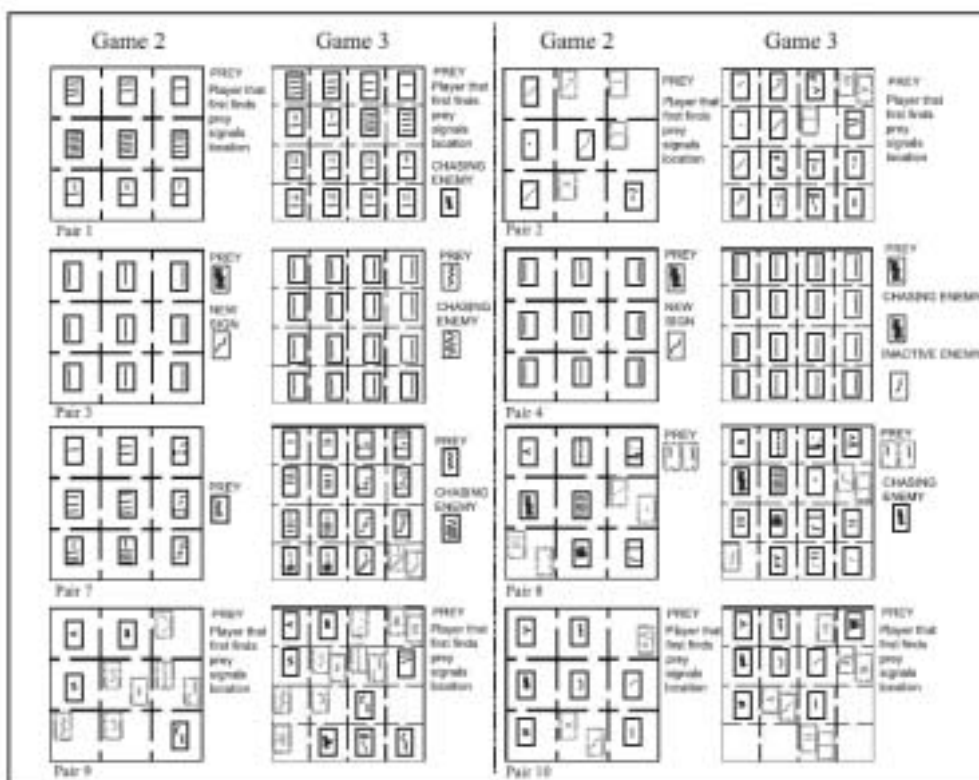
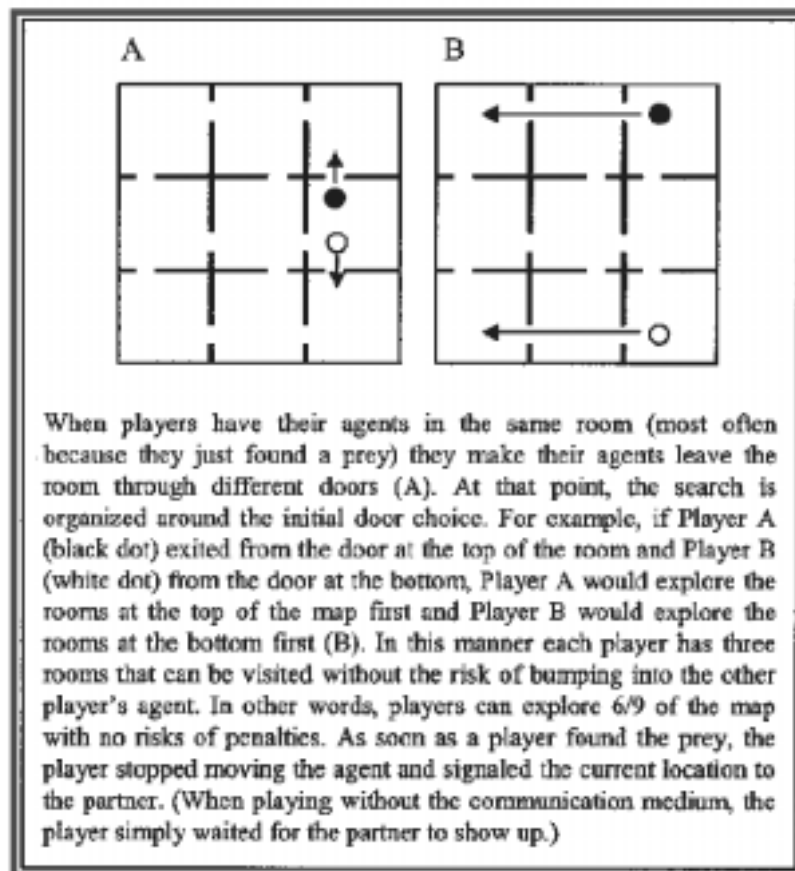


Fig. 8. Pairs' sign systems for Games 2 and 3.





Box 3. The split-search strategy.

## Appendix A

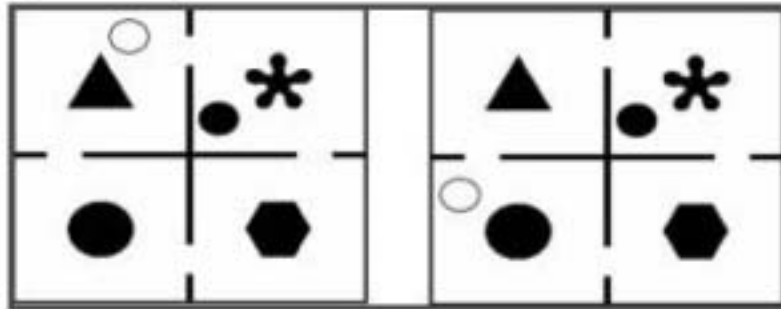
### Game 1

- In this experiment you will be playing a video game with a partner. Here is how the game works:
- You control the movements of an agent on the screen with the four arrow keys (the experimenter reads the instructions while the game is on and makes demonstration moves).
- To change room, cross one of the doors of the room, and you will get into the adjacent room; if you cross the door back, you come back in the room you were in before.
- The layout of your environment does not change.
- Your partner plays in the same environment and moves like you.
- You always begin the game in different rooms at random, and your goal is to find each other without doing more than one room change per player.
- If you do two moves, it is an automatic loss.
- When the two moves are made you either win or lose: If you see four yellow squares at the corners of the room that means that the game is over and the score has been updated.
- At that point to start a new game both you and your partner have to be in a yellow square either in the same room or in different rooms.
- You and your partner can use the same yellow square.

## Appendix B

### Game 1

- Suppose that you are not able to participate in the next session of the game and decide to have a friend of yours take your place in the game. Please describe in detail all that your friend will need to know to play the game as you would play it yourself.
- Please describe how you (black circle) and your partner (white circle) would go about solving the following two scenarios:



- Please describe the meaning of each of the signs you and your partner use and how that particular meaning has been established:

### Game 2

- Suppose that you are not able to participate in the next session of the game and decide to have a friend of yours take your place in the game. Please describe in detail all that your friend will need to know to play the game as you would play it yourself.
- Please describe
  - how you and your partner manage to not bump into each other
  - how you manage to get your partner in the room where you have found the prey
  - how your partner manages to get you in the same room where he or she has found the prey
- Please describe the meaning of each of the signs you and your partner use and how that particular meaning has been established.

### Game 3

- Suppose that you are not able to participate in the next session of the game and decide to have a friend of yours take your place in the game. Please describe in detail all that your friend will need to know to play the game as you would play it yourself.
- Please describe
  - how you and your partner manage to not bump into each other
  - how you manage to get your partner in the room where you have found the prey
  - how your partner manages to get you in the same room where he or she has found the prey
  - how you handle an enemy attack on you
  - how you handle an enemy attack on your partner
- Please describe the meaning of each of the signs you and your partner use and how that particular meaning has been established (focus on the changes between the communication procedures you had in Game 1 and Game 2 and the communication procedure you have now).