

海中ロボットやダイバー間の視覚による通信

A Visual Communication System among Underwater Robots and Divers

千葉 裕之*・浦

環**・藤井 輝夫**

Hiroyuki CHIBA, Tamaki URA and Teruo FUJII

1. はじめに

海中におけるエージェント、すなわち自律型潜水艇 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) と呼ばれる海中ロボットやダイバーなどの知的行動体が協調作業をする場合、互いの意志疎通のための通信手段が必要となる。海中で用いられる一般的な通信手段として超音波による通信¹⁾があるが、エージェントとしてダイバーを含む場合には、むしろダイバー同士が手信号で会話するのと同様の方法で単純な通信ができる方式が望ましい。そのような方式として視覚を用いた通信が考えられるが、その特徴として、1) 至近距離での通信に適する、2) 短いコマンド単位の通信には充分対応しうる、3) 信号が可視化されるのでダイバーの心理的負担を軽減する、4) 相手が理解するまで継続的な信号送信が可能である、などが挙げられる。これらをふまえて本報では、視覚による通信を行うための具体的なシステムを考え、エージェント間の意志のやりとりを実現するために必要となる要素技術について検討する。

2. 通信システムの構成

視覚による通信システムの一例として、本報では Fig. 1 に示すような EL パネルを用いたシステムを考える。

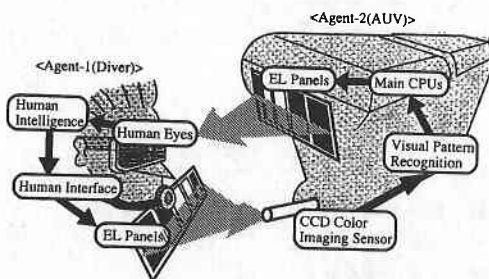


Fig. 1 Concept of the System

* JR 東日本

** 東京大学生産技術研究所 第 2 部

EL パネルは、電圧をかけると面的に発光するパネルであり、これを数枚用いることによってそのエージェントの意志に相当する一連のビットパターンを表示する。以後これをコマンドパターンと呼ぶ。コマンドパターンはビデオカメラおよび人間の目でとらえられ、コンピュータでパターン認識などの処理ののち符号として理解される。

簡単な協調行動において必要となる前進、後退などのロボットの動作はたかだか10種類程度であるので、以下ではコマンドを表示するのに4ビットを考え、合計5枚の正方形の EL パネルを横一並に並べてコマンドパターンを表示し、そのうち左端のパネルをステータスとして常時点灯させるものとする。

3. 画像処理

本システムは暗い海中で用いられるため、発光体の認識は比較的容易である。コマンドパターンを認識するには、1) 画像中からパネルの位置を推定し、2) 各パネル内部の輝度を調べ、3) オンオフを判断して符号化する、という一連の処理が必要となる。以下では、カメラから取り込

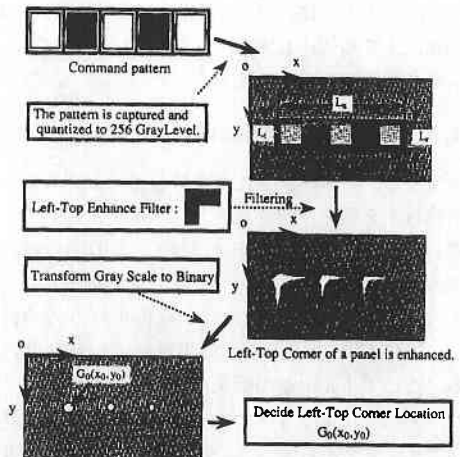


Fig. 2 Pick up of EL Panels

研 究 速 報

まれた画像の画面上の座標系を Fig. 2 のように定義し、座標 (x, y) における画素の階調値を $f(x, y)$ と表す。

3.1 フィルタによる特徴抽出

EL パネルは、1) 正方形である (角が直角である.)、2) 周囲に比べて輝度レベルが高い、という特徴を有しているため、これらの特徴を抽出しうるようなフィルタを用いれば、取り込んだ画像内からパネルを抽出できる。

処理領域を $n \times m$ とすれば、処理後の階調値 $g(x, y)$ は、

$$g(x, y) = K \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} k_{ij} f(x+i, y+j) \quad (1)$$

となるので、フィルタは定数 k_{ij} を成分とするマトリクスで表現でき、EL パネルのセットが画面内においてはほぼ水平であるときには、

$$k_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -3 & -2 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & -3 & -2 & -2 & -1 \\ -3 & -3 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ -2 & -2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ -2 & -2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}, \quad K = \frac{1}{32} \quad (2)$$

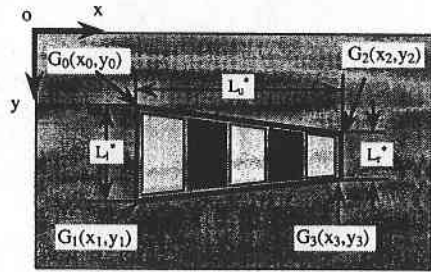
なる 6×6 のフィルタを用いて各パネルの左上の頂点の座標を求めることができる。すなわち(2)式のフィルタを原画像に対して操作すると Fig. 2 のように鍵状の部分が強調された画像が得られる。この画像に対してしきい値処理を行うと左端のパネルの左上の頂点部分が抽出されるのでこれをパネル左上端の座標 $G_0(x_0, y_0)$ とする。他の3頂点 $G_1 \sim G_3$ についても同様にして求められる。

3.2 パネル位置の推定

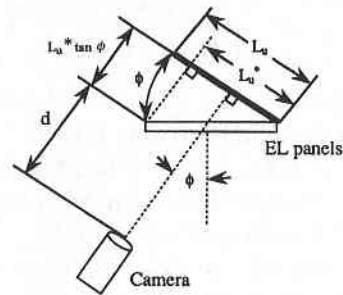
左端のパネルはステイタスとして常時点灯しているので、各パネル位置の決定には点灯しているパネルのうち最も右に位置しているパネルが何枚目かがわかればよい。これは Fig. 2 のように、パネルとカメラが正対しているときの画面上での辺の長さ $L_1 = G_0G_1$ 、 $L_u = G_0G_2$ を用いて定義されるアスペクト比

$$r = L_u/L_1 \quad (3)$$

で判断できる。アスペクト比は点灯している右端のパネルが何枚目かを示すが、カメラとパネルが正対していない場合には誤差が生じる (Fig. 3 (a))。この場合は、パネル面の法線ベクトルとカメラとパネルを結ぶ方向ベクトルがなす角度 ϕ を求め、画像から得られる辺の長さ L_1^* 、 L_r^* 、 L_u^* を以下のように正対している状態に換算する。ここでチルト量の効果は小さいとして無視する。 L_u 、 L_u^* の関係は Fig. 3 (b) のようになるので、辺 L_1^* 、 L_r^* の比とカメラから両辺への距離の比との関係より ϕ は次式で求められ、



(a) EL panels and Camera are not located normally.



(b) Alignment of EL panels and Camera

Fig. 3 Geometric Relation between Alignment of EL panels and Camera and Aspect Ratio

$$(L_r^*/L_1^*) = d / (d + L_u^* \tan \phi) \quad (4)$$

これより L_u は、

$$L_u = L_u^* / \cos \phi \quad (5)$$

により算出できる。 L_1 は次式で近似的に与えられ、これらより(3)式のアスペクト比 r が得られる。

$$L_1 = (1/2) (L_1^* + L_r^*) \quad (6)$$

3.3 階調値によるパネルのオンオフ判定

コマンドパタンの認識には各パネルのオンオフを知る必要がある。オンオフの判定は階調値で行うので、まず前節により求められる各パネルの領域内において次のように階調値を積分する。

$$S_i = \iint f(x, y) dx dy \quad (7)$$

常時点灯しているステイタスビットのパネルの領域内の階調値の総和を基準として、しきい値 S^* を決定し、 S^* と各ビットにおける値 S_i とを比較してパネルのオンオフを判定する。すなわち、

$$(\text{Panel})_i = \begin{cases} \text{ON} (S_i \geq S^*) \\ \text{OFF} (S_i < S^*) \end{cases} \quad (8)$$

4. ビジュアルトラッキング

正確なコマンドパタンの認識を行うには、パネルセット全体を常時カメラの画角内に適当な大きさでとらえる必要がある。本システムでは、Fig. 4 に示すように全画面の30%を占めるトラッキングエリア内にパネルセット全体が含まれるように、パネルセットの重心Gと画角の中心点との偏差 dx, dy に対応してカメラのパンおよびチルト角を修正する。また、画角内でのパネルセットの大きさに関しては、 L_1 が15~25画素の範囲におさまるようにカメラとパネルセットとの距離を調整する。これらの調整を常時行うことによりカメラとパネルセットとの相対的な位置関係の変化に追従してパネルセットのトラッキングが可能となる。

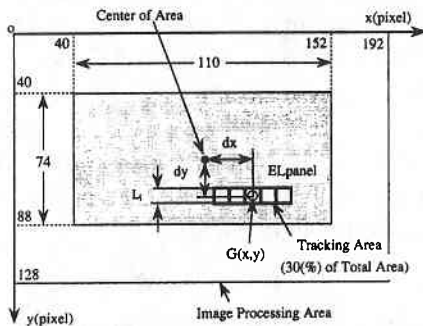


Fig. 4 Visual Tracking

5. 通信プロトコル

本システムでは通信の信頼性を確保すると同時に複数のコマンドパタンを逐次的に送信可能とするために、プロトコルを以下のように定める。

- (1) 回線制御：通信前は互いに対等な立場で、送信要求を早く出した方が通信の制御権を得る。
- (2) パケット構成：Table 1 のような制御コマンドを用いて、Fig. 5 のように“SOT”から“EOT”までを1パケットとする内容を送信する。パケット長は可変であり、送信側では制御コマンド“SOT”と送信すべきコマンドパタンのペアの一つのユニットとし、ユニットの後に“EOT”を付けることによりパケットの終わりを表す。送信側は、送信したコマンドパタンを受信側に反復させることにより送信成功の是非を確認する。したがって受信側では“SOT”に対応した肯定応答の制御コマンド“ACK”と受信したコマンドパタンのペアが1つのユニットとなる。
- (3) エラーハンドリング：エラーハンドリングは通信エ

Table 1 Codes, Control Commands and EL Panel Patterns

Command	Symbol	Code	EL Panel Pattern
Start of Transmission	SOT	11H	[1 1]
Acknowledgement	ACK	11H	[1 1]
Negative Acknowledgement	NAK	1BH	[1 0 1 1]
End of Transmission	EOT	1FH	[1 1 1 1]

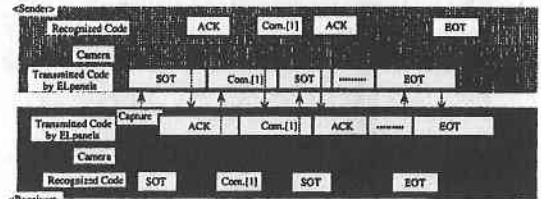


Fig. 5 Sequence of Successful Communication

ラーのケースに応じて、次の3通りの方法を考える。

- (a) 相手から応答がない場合：コマンドパタン“Com. [i]”を送信してから“Com. [i+1]”を送信するまでの時間 T_s (s) で時間切れ制御を行う。すなわち、 $T_s > T_{max}$ のときタイムアウトとなり通信は強制的に終了する。
- (b) 受信側から否定応答 (NAK) がある場合：送信側は受信側が正確に受信するまで同一コマンドパタンを送信し続ける。
- (c) 送信側からの否定応答 (NAK) がある場合：コマンドパタンが誤認あるいは誤送信された場合、送信側は否定応答“NAK”を送信することにより、これを訂正できる。受信側はこれに対して肯定応答の制御コマンド“ACK”を返信し、送信側はこれを受けて正しいコマンドパタンを送信する。

なお、(b), (c) のケースについても最悪の場合、時間切れ制御によって通信は強制的に終了する。

6. 海中ロボットを用いた水中での実験

統合されたシステムとしての動作を検証するために本システムを海中ロボット“Twin-Burger^{3),4)} (Fig. 6)”に搭載し、東京大学生産技術研究所内の水槽においてダイバーとロボットとの水中での通信を想定した実験を行った。ダイバーに対応するものとして、ELパネル、CCDカメラおよびトランスポンダで構成される据置型水中セット (Fig. 7) を製作し、陸上のオペレータが CCDカメラでとらえた映像を見ながらコンピュータを介してELパネルの操作を行うものとした。

実験は Fig. 8 に示すように、

- (1) ロボットと水中セットを正対させ、ダイバーが送信側

研 究 速 報

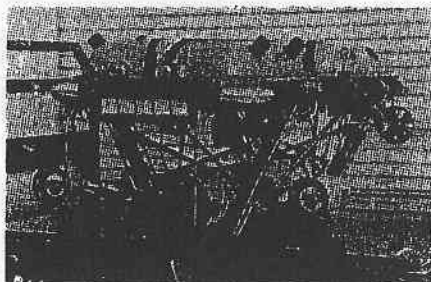


Fig. 6 Underwater Robot "The Twin-Burger"

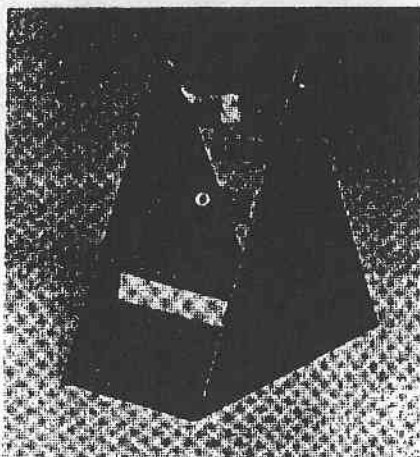


Fig. 7 Underwater System with CCD Camera and Transponder

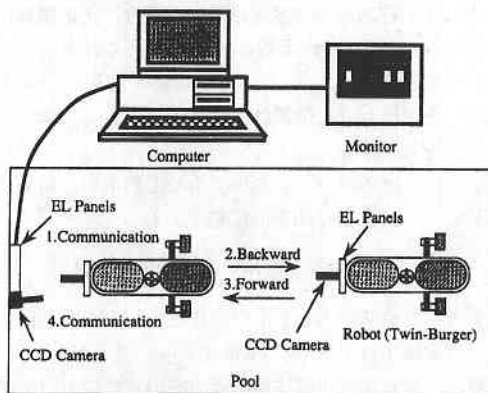


Fig. 8 Sequence of Underwater Experiment

- となって通信を開始し、ロボットに後退を指示する。
- (2)通信終了後、ロボットは後退する。
- (3)後退したロボットはビジュアルトラッキングにより自

Divers																							
Recognized Code	A	C	13	A	C	15	E	O	15	B	O	13	B	O	15	M	A	15	B	O	17	BOT	
Transmitted Code by EL panels	EOT																						
Robot(Twin-Burgers)																							
Recognized Code	B	O	13	A	C	15	E	O	15	A	C	13	A	C	15	A	C	15	A	C	17	BOT	
Tracking Command Value of Tracking Parameter	TH	TL	PH	PL	PWD	PH	PL																
	6.1	3.8	-2.9	0.95	7.7	-8.4	5.9	-4.6															

Fig. 9 Result of Communication with "Twin-Burger"

動的に水中セットのパネルと適正な位置関係となるように前進する。

(4)ロボットが送信側となって通信を行う。という一連のシーケンスを行うことを考え、Fig. 9に示すような通信およびトラッキングの結果が得られた。海中ロボット "Twin-Burger" はビジュアルトラッキングによりパネルをトラッキングしながらコマンドパタンの認識を行い、送信側となった後半ではエラーハンドリングも含めて目的どおりの通信が行われている。なお環境の設定として、水槽内の照度が100 (lux) 以下であればコマンドパタンの認識が可能であったが、これは深度約10(m) 以深での海中の照度に相当する。

7. 結 論

本報では海中におけるエージェント間の意志の伝達手段として視覚による通信を考え、コマンドの表示装置としてELパネルを用いた具体的なシステムを提案し、必要となる要素技術について述べた。さらに、提案したシステムを海中ロボット "Twin-Burger" に搭載して、実際に水中における通信の実験を行ったことにより、本システムの妥当性を立証した。

今後、視認性を決定する濁度や照度などの環境的な要因について検討を加えると同時に、表示装置の規模やプロトコルの改良等によってシステムの拡張を行うことにより、非常に有力な海中ロボットやダイバー間の通信システムに発展しうると考える。(1993年4月2日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本造船学会編：海中技術一般，成山堂(1992)
- 2) 長尾 真：デジタル画像処理，近代科学社(1990)
- 3) Teruo Fujii et al.: Proc. AUV '92 (1992)
- 4) 藤井， 浦：生産研究， Vol. 44, No. 9 (1992)