

# 複数の移動型ロボットによる天井マップ共有システム における伝送データ量の削減

## Reduction of Transmission Data Amount in Ceiling Map Sharing System among Some Crawler Robots

福谷泰明† 高橋知将† 松本拓也† 岩橋政宏† 木村哲也††

長岡技術科学大学 †電気系 ††システム安全系

Yasuaki FUKUTANI† Tomoyuki TAKAHASHI† Takuya MATSUMOTO†

Masahiro IWAHASHI† Tetsuya KIMURA††

† Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology

†† Department of System Safety, Nagaoka University of Technology

### 概要

本システムでは、屋内を移動するロボット（先行機）に設置された、天井方向のカメラから得られる動画像から、一枚の天井マップ静止画像が生成される。次に、この先行機に追従して移動するロボット（追従機）の自己位置が、その天井マップ上に表示される。この際、膨大な量の動画像データが通信される。従って、追従機数の増加に伴い、ネットワーク容量の不足が生じる。これまでに、画像間の移動ベクトルを推定するのに必要最小な情報のみを伝送することで、伝送に要するデータ伝送量を削減できる機能的階層符号化が報告されている。ここでは、天井方向のカメラに加えて、前方向のカメラから得られる動き情報を用いることで、不整地走行時の自己位置推定の精度を向上させている。本報告では、前方向と天井方向のカメラ映像間の冗長性の排除と、追従機の伝送成分の機能特化を行うことによって、データ伝送量を削減させる。これにより、ネットワークの限られた伝送容量のもとで、より多くの追従機の参加が可能となる。

### 1 はじめに

近年、全方位カメラやステレオビジョンによる距離深度や障害物検出など、ロボットビジョンに関する様々な研究・開発が行われている[1, 2, 3]。

とくに、移動型のロボットについては、その自己位置をリアルタイムに正確に把握することが、遠隔操作においては重要となる。その際、カーナ

ビに代表されるような GPS を用いたシステムが活用できる[4]。しかし、トンネル内や屋内では電波が届かず利用できない。

その場合は、磁気センサや加速度センサ等を用いることで、自己位置推定が可能となる。また、不整地を走行する場合は、ジャイロセンサを用いることで推定精度を向上できる[5]。しかし、例えばレスキュー現場などでは、障害物との衝突や路面の崩壊などで、各種センサの検知範囲を超える外乱が生じることがある。このため、センサのマルチモーダル化による信頼度の向上が必要となる。

その一つとして、映像を用いた自己位置推定が考えられ、オプティカルフローなどを用いた SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) が報告されている[6, 7, 8]。この処理を移動ロボット内で実行し、推定結果のみを伝送することも考えられる。しかし、その中に大きな誤差が含まれる場合は、人が映像を見て現場の状況を総合的に判断することになる。

そのため、映像の圧縮伝送処理は移動ロボット内で実行する必要がある。一方、自己位置推定処理は移動ロボット外でも実行できる。従って、映像の圧縮伝送処理はロボット内に組み込み、送信された映像に基づく自己位置推定処理はリモートサーバが実施することで、移動ロボットの小型省電力化が可能となる。

映像による自己位置推定としては、天井マップ共有システムが報告されている[9]。このような

システムでは、まず、移動ロボット（先行機）に天井に向けて設置されたカメラの映像から、パノラマ生成法[10]により、一枚の天井マップが生成される。次に、この先行機に追従する移動ロボット（追従機）が撮影した天井映像がリモートサーバに送られ、追従機の自己位置が天井マップ上に推定される。この際、膨大な量の動画データが通信される。従って、追従機の台数の増加に伴い、ネットワーク容量の不足が生じる問題がある。

これまで、デジタルシネマの国際標準として採用されている JPEG2000 の技術[11, 12]を用いて映像符号化を行い、画像から移動ベクトルを推定するために必要最小な情報のみを伝送することで、ロボット通信に要するデータ伝送量を削減できる機能的階層符号化を報告した[13]。しかし、先行機と追従機が同じ画像処理を搭載しており、追従機数の増加に伴いデータ伝送量が膨大になってしまう。ただし、これは整地走行時に限定されている。このため、不整地走行時には、自己位置推定に誤差が生じてしまう。

これに対し、天井方向のカメラに加えて、前方方向のカメラから得られる情報を用いて、移動ロボットの姿勢推定を行い、不整地走行時においても自己位置を正しく推定する方法が提案されている[14]。

本報告では、前方向と天井方向のカメラ映像間の冗長性の排除と、追従機の伝送成分の機能特化を行う。その結果、追従機の自己位置推定に必要な最小限の信号成分が、従来法に比べてより少なくなる。これにより、ネットワークの限られた伝送容量のもとで、より多くの追従機の天井マップ共有システムへの参加が可能となる。

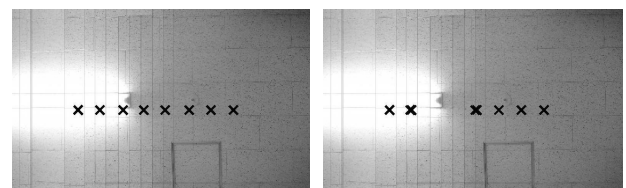
## 2 従来法とその問題点

### 2.1 不整地走行時の自己位置推定誤差の補正

Fig. 1 に天井マップの例を示す。これは移動ロボットに設置された天井方向のカメラ映像から作成されたものである。天井マップは、映像の各フレーム間の移動ベクトルに基づき、生成される[10]。Fig. 1(a)では、移動ロボットが平地を走行した場合の自己位置を示している。移動ロボットが一定速度で移動し、等時間間隔で自己位置推定

を行った場合、×印が等間隔に天井マップに記録される。しかし、移動ロボットが不整地を走行した場合、Fig. 1(b)のように×印が等間隔になっていない。移動ロボットは一定速度で移動し、等時間間隔で自己位置推定を行っているため、Fig. 1(a)のように等間隔に自己位置が記録されるべきである。

この原因は、Fig. 2 に示すように、移動ロボットが、障害物に乗り上げることによって、カメラから得られる天井映像にずれ $\Delta y$ が発生してしまうためである。



(a) 平地の走行

(b) 不整地の走行

Fig. 1 平地と不整地における自己位置推定

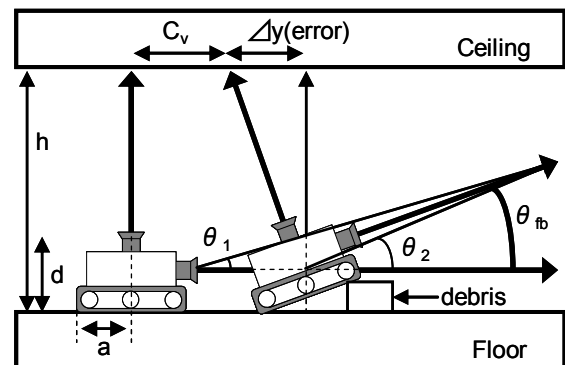


Fig. 2 前後乗り上げのモデル図

そこで、天井方向のカメラに加え、前方方向のカメラから得られる情報を使用することによって、この誤差の低減を行う[14]。不整地を走行した場合のロボットの姿勢の変化を考えると、前後の乗り上げ、左右の乗り上げが考えられる。

前後の乗り上げはFig. 2 のモデルで考えることができ、各パラメータの関係は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 & d - (d + a \tan \theta_{fb}) \cos \theta_{fb} \\
 & + \left\{ \left( h + \frac{C_v}{\tan \theta_{fb}} \right) \tan \theta_{fb} - (d + a \tan \theta_{fb}) \sin \theta_{fb} \right\} \quad (1) \\
 & \times \left\{ \tan \theta_{fb} + \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} (\tan \theta_{fb} - \tan \theta_1) \right\} = 0
 \end{aligned}$$

以上の式(1)から、移動ロボットの前後の乗り上げの角度  $\theta_{fb}$  を決定することができる。また、左右の乗り上げ角度  $\theta_{rl}$  は、前方向の映像の回転角度から決定することができる。

以上の計算で求められた探査ロボットの姿勢の変化より、式(2)を用いることで自己位置推定の進行方向と、横方向の補正移動量である  $\Delta y$ 、 $\Delta x$  が求められる。

$$\begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \cdot \tan \theta_{fb} - a \cdot \sin \theta_{fb} \tan \theta_{fb} \\ h \cdot \tan \theta_{rl} - a \cdot \sin \theta_{rl} \tan \theta_{rl} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Table1 に乗り上げによって起こる、天井映像と前方映像の動きを示す。

以上のように、不整地走行時の自己位置推定誤差の補正を行うには前方向と天井方向にカメラが2台必要となり、従来のままの伝送方法を用いた場合、伝送量が2倍になってしまう。そこで設置された2台のカメラ間の冗長性の排除を行うことによって、データ伝送量の削減を行う。

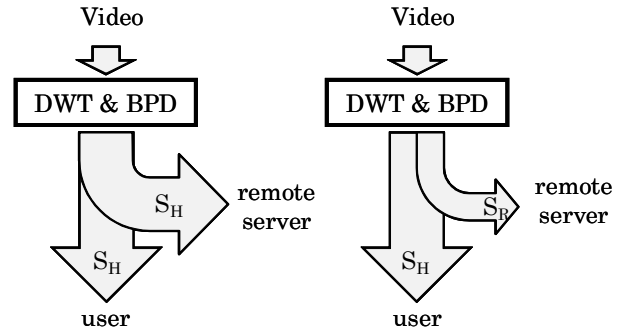
## 2.2 機能的階層符号化によるデータ伝送量の低減

移動ロボットの位置推定を行うために、リモートサーバに映像を伝送する必要がある。

Fig. 3(a)は、同じデータをユーザとリモートサーバに伝送している。リモートサーバは映像を見るユーザとは違い、移動量推定のためだけに映像を用いるため、受信する映像には不要な情報が含まれる。Fig. 3(b) は従来の機能的階層符号化(FLC)を示している[13]。

入力されたカメラの映像は、離散ウェーブレット変換(DWT)とビットプレーン分解(BPD)により複数の帯域とビットプレーン成分に分解される。ここで移動量推定のための必要最小成分は  $S_R$  に含まれ、リモートサーバへ伝送される。

これまで、以上の技術を用いて、データ伝送量の削減を行ってきた。しかし、天井マップを作成する先行機と、自己位置を推定する追従機の役割をそれぞれ考えた成分の選択ではなく、主に天井マップを作成するための成分を選択し、伝送を行っていた。そのため、天井映像を人が見ることを考慮し、伝送される成分には必ず低域成分が含まれていた。



(a) JP2K (b) 機能的階層符号化  
Fig. 3 リモートサーバとの通信のための FLC

## 3 提案法

提案法では、移動ロボットに設置された前方向と天井方向のカメラ映像間の冗長性の排除と、追従機の伝送成分の機能特化を考える。これによって、先行機と複数台の追従機が存在する場合の全体のデータ伝送量の削減を行う。

### 3.1 カメラ映像間の冗長性の排除

提案する方法では、前方向の映像から得られる情報から、天井方向の映像の動きベクトルを補うことができるということに注目する。従来は、天井方向の映像から、平行移動量と回転角度のベクトルの検出を行っていた。

ロボットの動作に対する、前方映像と天井映像の動きを Table1 に示す。

Table1 ロボットの動作とカメラ映像の動き

ロボットの動作	前進	旋回	前後乗り上げ	左右乗り上げ
天井映像の動き	前後	回転	前後	左右
前方映像の動き	拡大	左右	上下	回転

Table1 より、移動ロボットが旋回したとき、前方映像が左右方向に動き、天井映像が回転する。これを、式で示すと以下ようになる。

$$\theta = \alpha / N \times mv \quad (3)$$

$\theta$ : 天井映像の回転角度,  $N$ : 前方映像の横方向 pixel 数  
 $\alpha$ : 前方映像の横方向画角,  $mv$ : 前方映像の横方向移動量

式(3)より、前方映像の情報から天井映像の回転を補うことができる。その結果、天井映像から取得するベクトルは、平行移動のみでよくなる。

これにより、天井映像からのベクトルを検出する手法は、従来使用していた平行移動、回転運動が検出できる、RI-POC (Rotation Invariant Phase Only Correlation) [15]から、平行移動のみが検出ができる POC (Phase Only Correlation) とすることができる。RI-POC では、平行移動量、回転角度を推定するために、POC の処理を 2 回行っていた。この RI-POC を POC にすることによって、POC の回数が 1 回になり、使用する成分が少なくなると考えられ、データ伝送量の削減が可能になる。前方映像は従来と同じ RI-POC を用いる。

### 3.2 追従機の伝送成分の機能特化

従来法では、先行機と追従機が同じ映像を伝送している。また、その映像を人間が観察するということから、伝送する映像に使用される帯域には必ず低域成分が含まれていた。

提案法では、先行機と追従機の役割を考える。追従機は通常、伝送される映像を見ることはなく、自己位置推定を行うためだけに用いるため、必ずしも低域成分を含まなくても良いということになる。そのため、従来法では送ることができなかった、高域成分のみの組み合わせでも映像を伝送することができるようになった。このように、エネルギーの大きい低域成分を必ずしも伝送しなくていいということで、データ伝送量の削減が可能となる。先行機天井映像は従来と同じ要求があるため、変化しない。

従来法と、提案法をまとめると、Table2 のようになる。

Table2 従来法と提案法の比較

		先行機		追従機	
		天井	前方	天井	前方
従来法	移動量推定法	RI-POC	RI-POC	RI-POC	RI-POC
	伝送成分	低域含む			
提案法	移動量推定法	POC	RI-POC	POC	RI-POC
	伝送成分	低域含む	なし		

## 4 実験結果

### 4.1 データ伝送量の削減

データ伝送量の削減効果を確認するため、映像から 256×256[pixel]の画像をランダムで 2 枚切り出し、Table2 に示した移動量推定法と伝送成分の組み合わせにおける実験を 100 回行った。RI-POC では、2 枚の画像間の最大移動量を縦方向、横方向それぞれ 30[pixel]とし、最大回転角度を 10[°]として実験を行った。POC では、2 枚の画像間の最大移動量を 30[pixel]とした。また、DWT は 2stage までとして実験を行った。

求められた実験結果から、式(4)を用いて誤差  $\Delta d$  を計算する。 $x, y$  を平行移動量誤差、 $\theta$  を回転角度誤差、 $M, N$  を画像のサイズとする。

$$\Delta d = \sqrt{x^2 + y^2 + \frac{\sqrt{2(1 - \cos \theta)}}{M \cdot N} \sum_{i=-M/2}^{M/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} \sqrt{i^2 + j^2}} \quad (4)$$

この時、伝送に用いる成分は発生する誤差  $\Delta d$  が  $\varepsilon$  未満で、データ伝送量  $DS$  が最小となる成分として、以下の式(5)のように定義する。

$$S_R = \arg \min DS[f_r \times b_p] \text{ subject to } \Delta d < \varepsilon \quad (5)$$

以上の式(5)で求めたデータ伝送量の小さい順にデータを示す。なお、今回は許容誤差  $\varepsilon$  を 1[pixel]としたときの上位の結果を示す。

従来法の結果を Table3 に示す。提案法の結果を Table3、Table4、Table5 に示す。

Table3 従来法における実験結果

順位	使用帯域	使用 BP 枚数	誤差 $\Delta d$ [pixel]	伝送量 [kB]
1	1LL	8	0.443	45.14
2	1LL	9	0.551	65.61
3	all	8	0.395	172.10
4	all	9	0.296	253.34

Table4 提案法における実験結果

(先行機・追従機、前方)

順位	使用帯域	使用 BP 枚数	誤差 $\Delta d$ [pixel]	伝送量 [kB]
1	2LL,2LH	9	0.880	24.10
2	2LL,2LH,2HH	8	0.551	32.81
3	2LL,2LH,1LH	7	0.856	34.37
4	2LL,2LH,2HH,1HL	7	0.682	34.46
5	2LL,2HL,2LH,1LH	7	0.514	36.17
	all	9	0.356	253.94

Table5 提案法における実験結果 (先行機、天井)

順位	使用帯域	使用BP枚数	誤差 $\Delta d$ [pixel]	伝送量 [kB]
1	all	5	0.000	6.29
2	all	6	0.000	36.16
3	all	7	0.000	101.84
4	all	8	0.000	184.61
5	all	9	0.000	265.85

Table6 提案法における実験結果 (追従機、天井)

順位	使用帯域	使用BP枚数	誤差 $\Delta d$ [pixel]	伝送量 [kB]
1	2HL,1HL	5	0.283	1.52
2	2HH,1HL	5	0.245	1.55
3	2LH,1HL	5	0.224	1.66
4	2HL,2HH,1HL	5	0.224	1.76
5	2HL,2LH,1HL	5	0.173	1.87
	all	9	0.000	265.17

以上の結果より、許容誤差 $\varepsilon$ が1[pixel]の場合、従来法では、使用帯域 $\times$ 使用ビットプレーン枚数が1LL $\times$ 8bpとなり、1台のカメラからのデータ伝送量は45.14[kB]となる。一方、提案法の前方映像では、2LL+2LH $\times$ 8bpで24.10[kB]となる。天井映像では、先行機が、all $\times$ 5bpで6.29[kB]となり、追従機が、2HL+2LH $\times$ 5bpとなりデータ伝送量が1.52[kB]となる。

本システムでは、前方向と天井方向に2台のカメラが設置されている。そのため、従来法で必要なデータ伝送量は2倍である90.28[kB]となる。一方、提案法の先行機は、30.39[kB]となり、従来法に比べて33.7%にデータ伝送量を削減、追従機は、25.62[kB]となり、28.4%に削減することができた。

#### 4.2 追従機台数の増加によるデータ伝送量

Table3からTable6の最上位の結果をまとめたものをTable7に示す。ここで、提案法 case1は4.1で示した結果である。提案法 case2は、先行機が作成するマップが全成分を使用した場合とする。このとき、先行機が伝送する成分は、all $\times$ 9bpとなり、天井映像では265.17[kB]のデータ伝送量が必要となる。また、マップが変わるので、追従機が伝送する成分も変化する。これをTable8に示す。

Table7 従来法と提案法の伝送量[kB]の比較

	先行機		追従機	
	天井 $\alpha_{up}$	前方 $\alpha_{for}$	天井 $\beta_{up}$	前方 $\beta_{for}$
従来法	45.14	45.14	45.14	45.14
提案法 case1	6.29	24.10	1.52	24.10
提案法 case2	265.17	24.10	1.16	24.10

Table8 提案法における実験結果

(追従機、天井、case2)

順位	使用帯域	使用BP枚数	誤差 $\Delta d$ [pixel]	伝送量 [kB]
1	2HL,2LH	5	0.300	1.16
2	1HL	5	0.000	1.31
3	2HL,2LH,2HH	5	0.173	1.40
4	2HL,1HL	5	0.141	1.52
5	2LL,2LH	5	0.794	1.53
	all	9	0.000	265.17

ここで、追従機が $n$ 台存在する場合の、データ伝送量 $D$ を式(6)により、求めることができる。

$$D = (\beta_{up} + \beta_{for}) \cdot n + (\alpha_{up} + \alpha_{for}) \quad (6)$$

これより、提案法と従来法の合計のデータ伝送量の変化をFig.4に示す。

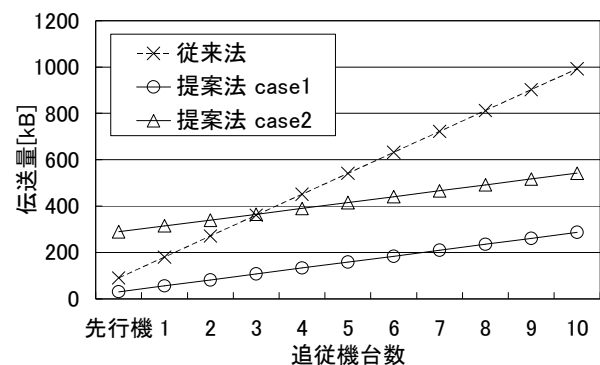


Fig.4 追従機台数による伝送量の変化

Fig.4からわかるように、提案法 case1では、追従機の台数に関係なく、従来法よりもデータ伝送量が少なくなっていることが分かる。提案法 case2は、先行機のデータ伝送量が多いが、追従機からのデータ伝送量が少ないため、追従機が4台以上になった時、従来法よりもデータ伝送量が少なくなることが分かった。

### 4.3 映像の違いによるデータ伝送量の比較

映像が変化したときの提案法 case2 における、上位 3 個の伝送成分とデータ伝送量の比較を Table9 に示す。ここで示しているデータ伝送量は全ての帯域を伝送した場合と比較したものである。

映像が変化した場合、使用される成分が変化するが、天井方向では、高域成分の組み合わせ、前方方向では、2LL+高域成分となることがわかった。また、データ伝送量も変化しているが、映像が変化しても、大きな伝送量の差はないことが確認できた。

Table9 映像の違いによる使用成分の変化

画像	順位	提案法(天井、追従機)			提案法(前方、追従機)		
		使用帯域	B P	伝送量 [%]	使用帯域	B P	伝送量 [%]
A	1	2HL,2LH	5	0.40	2LL,2LH	8	9.50
	2	1HL	5	0.44	2LL,2HL, 2LH	8	12.93
	3	2HL,2LH, 2HH	5	0.45	2LL,2LH	9	13.55
B	1	1LH	4	0.34	2LL,2LH	9	11.55
	2	2LH,1LH	4	0.34	2LL,2HL, 2LH	8	12.93
	3	2HH	4	0.38	2LL,2LH, 2HH	8	13.87
C	1	1HL	5	0.48	2LL,2HL, 2LH	8	11.98
	2	2HL,1HL	5	0.51	2LL,2LH	9	12.44
	3	2HH	5	0.54	2LL,2LH, 2HH	8	13.79

### 5 まとめ

本稿では、複数のカメラの関係と先行機と追従機の役割分担を行うことによって、データ伝送量を、従来法を使用した場合に比べ、先行機では 33.7%、追従機では 28.4%に削減することができた。

また、先行機が作成する天井マップを綺麗にした場合、先行機のデータ伝送量は従来法よりも増えてしまったが、追従機が 4 台以上存在する場合には、従来法よりも全体のデータ伝送量を削減することができた。これにより、限られた伝送容量のもとで、より多くの追従機の参加が可能となった。

謝辞：本研究の一部は、文科省・科研費・基盤(C) 20560351 により実施された。

### 6 参考文献

- [1] G. N. Desouza, A. C. Kak, "Vision for Mobile Robot Navigation: a Survey", IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, vol.24, Issue 2, pp.237-267, Feb. 2002.
- [2] D. Nister, O. Naroditsky, J. Bergen, " Visual Odometry ", Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol. 1, 27, pp. I-652 - I-659, July 2004.
- [3] R. Munguia, A. Grau, "Monocular SLAM for Visual Odometry", IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP), pp.1 - 6, Oct. 2007.
- [4] Hofmann-Wellenhof, B.;Lichtenegger, H.; Collins, J.. Springer, Wien, "Global Positioning System. Theory and practice.", 1993
- [5] David M. Bevlly, "Global Positioning System (GPS): A Low-Cost Velocity Sensor for Correcting Inertial Sensor Errors on Ground Vehicles", J. Dyn. Sys., Meas., Control, Vol. 126, Issue2, pp.255-264, June 2004
- [6] C. A. Wilson, J. A. Theriot, "A Correlation-Based Approach to Calculate Rotation and Translation of Moving Cells", IEEE Trans. Image Processing, Vol.15, Issue 7, pp.1939-1951, July 2006.
- [7] N. P. Papanikolopoulos, P. K. Khosla, T. Kanade, "Visual tracking of a moving target by a camera mounted on a robot: a combination of control and vision", IEEE Trans. Robotics Automation, Vol.9, Issue1, pp.14-35, Feb. 1993.
- [8] K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, T. Higuchi, "A Fingerprint Matching Algorithm Using Phase-Only Correlation", IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E87-A No.3 pp.682-691, March 2004.
- [9] Sebastian Thrun, Maren Bennewitz, Wolfram Burgard, Armin B. Cremers, Frank Dellaert, Dieter Fox, Dirk Hähnel, Charles Rosenberg, Nicholas Roy, Jamieson Schulte, Dirk Schulz, "MINERVA: A Tour-Guide Robot that Learns", Lecture Notes in Computer Science, vol.1701, 696-703, 1999
- [10] Richard Szeliski, Microsoft Corporation, "Video Mosaics for Virtual Environments", IEEE COMPUTER GRAPHICS AND APPLICATIONS, Vol.16, No.2, MARCH 1996, pp. 22-30
- [11] JTCl/ SC29, "Information technology - JPEG 2000 image coding system: Core coding system", ISO/IEC15444-1, 2004.
- [12] A. Descampe, F. O. Devaux, G. Rouvroy, J. D. Legat, J. J. Quisquater, B. Macq, "A Flexible Hardware JPEG 2000 Decoder for Digital Cinema", IEEE Trans. CAS for Video Technology, vol. 16, issue 11, pp.1397 - 1410, Nov. 2006
- [13] S. Udomsiri, H. Taguchi, T. Takahashi, M. Iwahashi, T. Kimura, "Functionally Layered Video Coding Based on JP2K for Robot Vision Network", Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 21, no. 6, pp.758-764, Dec. 2009
- [14] T. Takahashi, Y. Fukutani, M. Iwahashi, "Band Determination of JP2K DWT for Robot to Robot Communication", International Workshop on Advanced Image Technology, Malaysia, January, 2010
- [15] H. Sasaki, K. Kobayashi, T. Aoki, M. Kawamata, T. Higuchi, "Rotation measurements using rotation invariant phase-only correlation" ITE Tech Rep 45: 55-60, 1998