

# 空間メモリを利用した 生産現場における作業支援システムの提案

## Work Support System on Production Site based on Spatial Memory

精密工学専攻 30号 白石歩  
Ayumu Shiraiishi

### 1. はじめに

近年、生産性や品質を向上するために生産現場では作業の自動化が進められている。しかし、今でも技術的、もしくは経済的に自動化が困難な作業では人の手による作業が多くある。人が行う作業の懸念点として、人為的なミスが起きることが挙げられる。ヒューマンエラーは作業者の理解不足や作業の複雑化など様々な要因から発生する。企業では、不良品や事故につながり、信頼の低下や大きな損害につながる可能性があるため、それを事前に防ぐことが求められる。

ヒューマンエラーを防止する例として、バーコードやスイッチを用いて作業者自ら確認をとる、または作業観測者を用いて、ヒューマンエラーが発生した際にそれを作業者に提示するなどの、その場で修正するという方法が挙げられる。しかし、これらの手法にはそれぞれ作業者の作業中の負担が増える、あるいは人件費がかかるという問題点がある。このような背景より、生産性やコストを考慮するとセンサを用いたヒューマンエラーの検出を自動化したシステムが求められており、近年さまざまな人の作業を観測する研究が行われている<sup>(1)-(7)</sup>。しかし、これらの研究では作業内容や作業環境が限定されており、作業の変化については考慮されていない。従来研究で提案された方法において観測内容、作業順番を変更するときには観測システムの内部設定そのものを変更しなければならぬと考えられる。

一方、実際の生産現場では異なる作業環境が多くある、あるいは作業現場に限られているが時間帯に応じて作業内容が変化する、それに合わせて作業環境が変化することが考えられ、観測システムはそれらの変化に対応する必要がある。作業観測および作業内容に依存したセンサ配置が求められるシステムや、あらかじめ検出すべき動作がシステム内で限定されている場合、それらの変化に対応するためには、システムおよびセンサに関する知識を有するエンジニアによって観測システムを内部設定から変更することが求められる。さらに、このような方法ではシステムの変更のたびに事前準備に時間がかかり、ミスが起こりやすいと考えられる、実際の生産現場に対応することは難しいといえる。そこで、観測、評価に関わる項目をセンサやシステムに関する知識がない人でも容易に設定、および編集ができるシステム構成が求められる。作業者自身が変更できるようになれば、変更に関する時間的、経済的負担、ミスの発生を減らすことができると考える。

以上より本研究では、作業内容の変化や作業環境の変化を考慮した作業支援システムを提案する。作業支援とはセンサを用いて作業を観測する「作業観測」、作業観測の結果を正しいかどうかを判断する「作業評価」、正しくない場合にそれを人に伝えるフィードバック」を指す。

### 2. 作業内容や環境の変化を考慮した作業支援システムの提案

#### 2.1 作業観測

本節では、人の作業の観測手法について述べる。MTM(Methods Of Time Measurement)法では Table 1 のように人の動作を分類している<sup>(3)</sup>。目の動作を除くと、分類された動作は、ある地点に手を伸ばす、もしくはある地点に体を移

Table 1 MTM's basic action.

Reach	Position
Move	Release
Turn	Disengage
Apply Pressure	Eye Motion
Grasp	Body Motion

動することから始まるとみなすことができることに着目する。すなわち、手を伸ばしている位置や体の位置の計測が重要とわかる。したかつて、手を伸ばすべき位置、体を移動させるべき位置をユーザが簡便に指定することができれば、作業内容の変化に対応できる作業観測システムを構築することができると思える。

そこで、本研究では空間メモリシステムに着目する。空間メモリとは、人が能動的に知能化空間内<sup>(8)</sup>の機器を操作するためのヒューマンインタフェースである<sup>(9)</sup>。具体的な操作対象としては、ロボット、動画などの表示機器、音楽の再生機器などが挙げられる。ユーザ自身の活動は空間に関連があると考え、空間とコンテンツを結び付けて整理すればストレスなく利用できると考えたシステムである。空間メモリシステムの概念図を Fig. 1 に示す。

空間の物理的な位置(三次元位置座標)と蓄積される情報を関連付けるものを SKT(Spatial-Knowledge-Tag)と呼ぶ。SKT の位置を指し示すことでコンテンツを取り出すことができ、それをアクセスするという。ただし、人が空間の三次元位置座標を正確に指し示すのはとても困難であるため、SKT にアクセス可能領域(Accessible region)を設けて、アクセス可能領域内を人が指示したときにアクセスが行われる。アクセス結果はログとして記録される<sup>(10)</sup>。

この空間メモリシステムを応用して、ある領域に手を伸ばしたかどうかを計測できるのでないかと考える。例えば、ある部品が入っているラックに手を伸ばしたかどうかを観測したい場合を想定する。SKT は任意の位置に作成することができ、アクセス可能領域の大きさも任意に決めることができ

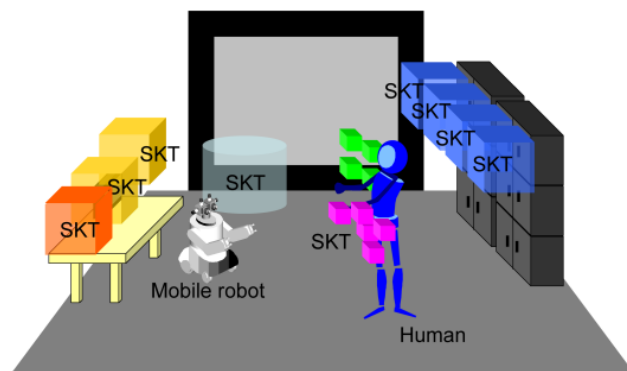


Fig. 1 Spatial memory system<sup>(11)</sup>.

るため、ラックが置いてある位置に合わせて作成することができる。そして、この SKT には手や体の位置を用いてアクセスすることができるので、ラックの位置に手を伸ばすと SKT へ受動的にアクセスしたと見なすことができる。これより、観測したい場所に合わせて使用者自身が適切に SKT を配置することで手を伸ばしている任意の座標を計測できるため、作業観測に空間メモリシステムを応用する手法を採用する。

## 2.2 動作検出精度の向上

空間メモリシステムを用いて作業者が手を伸ばしたかどうかを計測するには、手を伸ばしたときに SKT にアクセスしたと判定されることが重要となる。しかし、従来の空間メモリは能動的にある座標に手を伸ばすことを前提に設計され、さらに意図しないアクセスを防止するために人の手が確実に止まったときのみアクセスできるという仕様になっている。しかし、作業中の手の動作は確実に止まるとは限らず、また作業中の手の速度は作業者の熟練度などによって異なる。そのため、手を伸ばしても SKT にアクセスしたと判定されない場合があることが確認された<sup>(11)</sup>。そこで作業観測に適したアクセス判定が必要となる。人が手を伸ばして物体を取るときの動作に着目し、その動作を検出する際に考慮すべき点を以下のように考える。

- 手の速度は人によって異なる
- 物体を把持するために時間がかかることがある
- 物体を掴み損ない、再び手を伸ばすことがある

一つ目と二つ目の考慮点より、アクセス条件に手の速度の大きさを用いるのは適切ではないといえる。そこで、手を伸ばしているときと手を戻しているときの動作の方向が変化することに着目する。それを検出するために、二つの動作の速度の符号を利用する。二つの動作の速度の符号を比べると正負が逆になると考え、 $x, y, z$  方向の速度の符号が反転したときをアクセス動作とみなすアクセス判定方法を提案する。また、つかみ損なった場合はすぐに手を引き返してまた物を掴もうとする。これに対応するため、アクセス可能領域から手が一度出ない限り連続で同じ SKT にアクセスできないという条件を併用する。したがって、精度よくアクセス動作を計測するためにはアクセス可能領域の形状と大きさを適切に設定することが重要となる。

従来の空間メモリで使用されるアクセス可能領域の形状は球体のみである。しかし、実際の生産現場で用いられるラックの形状は直方体の形状が一般的である。直方体のラックに手を伸ばしたかどうかを計測するために球体の SKT を用いると、ラックに内接するよう設置した場合、ラックに手を伸ばしてもアクセス可能領域内に手が入らないということが起こりうる。これを防ぐため、外接するように大きなアクセス可能領域を設定した場合、アクセス領域が重複する領域が発生し、意図せぬ SKT にアクセスしたと判定されることが予想される。これに対応するため、新たに直方体型のアクセス可能領域を用意した。これを用いて、ラックの大きさに合わせたアクセス可能領域を設定することができる。

## 2.3 作業評価

本節では作業評価の手法について述べる。作業を評価するには、どのような行動を誤った行動とするかについて明確にする必要がある。Reason<sup>(12)</sup>は基本的なヒューマンエラーを Mistake, Slip, Lapse の三つに分けられると示した。Mistake は意図した行為自体が間違っていること、Slip は思い違いや確認ミスのことと順序を間違えること、あるいはタイミングを誤ることなどが挙げられ、Lapse は作業途中でやらなければならない作業を忘れること意味する。これより本研究では、作業順序と経過時間を計測すればヒューマンエラーを指摘することができる。作業を評価するために以下の機能が必要となる。

- 作業の手順が正しいかどうかを判断することができる
- 作業に遅れがないかどうかを計測することができる

一つ目の機能は、作業の手順を SKT へのアクセス順序とみなし、アクセスした SKT の ID をチェックすることにより対応することができる。二つ目の機能を実現するために、それぞれの SKT に一つ前のアクセスしたときから遅くともこの時間内にアクセスしなければならぬというアクセス時間可能時間を設ける。そして、一つ前の SKT とのアクセス時間差を計測し、時間内にアクセスできたかどうかを計測することで対応する。

手順と作業に要する時間を明示するために、本研究では作業工程情報 (work process) を定義する。作業工程情報の内容を Table 2 に示す。ここで、繰り返し行われるある一連の動作を「作業」と呼ぶ。作業には ID を振り、それを「作業 ID」と呼ぶ。作業 ID は実際に作業を行う人に割り振られる ID を示す。作業を構成する各段階を「工程」と呼び、一工程にかかる時間を「一工程時間」、一作業にかかる時間を「一サイクル時間」と呼ぶ。工程を実行する順に並べたものを「工程順序」と呼ぶ。

一工程時間内に作業を終わらせることができなかった場合、もしくは本来行うべき工程とは別の工程をした場合をミスが発生したと判断する。そして、ミスの発生を検出した際のシステムの対応を「ミス発生時の対応」と呼ぶ。ミス発生時の対応として、Table 3 に示す三つの対応を考える。現在行っている工程をもう一度繰り返す (Repeat) という対応、飛ばして次の工程に移行する (Next) という対応、または、致命的なミスをした場合にシステムを終了させる (Exit) という対応を用意する。

以上より、作業中に人の体の一部が通過する位置に SKT を配置すれば、SKT への一アクセスを一工程とみなすことができる。そして SKT にアクセスする順番を工程順序として扱うことができる。連続した二つの SKT へのアクセス時間間隔が一工程時間となる。最初のアクセスから最後のアクセスまでの時間が一サイクル時間となる。時間内に SKT にアクセスすることができなかった場合、もしくは、アクセスすべき SKT とは違う SKT に誤ってアクセスした場合をミス発生時と判定する。

## 2.4 フィードバック

作業時間の短縮やミスの減少を促すために、作業者に作業評価の結果をフィードバックする。作業者に提示する作業評価の結果としては、ミスが発生したこと、そのミスの内容などが挙げられる。

## 2.5 SKT 作成支援ツール

2.1 節で述べた SKT の配置および 2.2 節で述べた作業工程

Table 2 Data structure of work process.

Work process	Meaning
Work ID	Work's ID
User ID	User's ID
Process Sequence	Sequence of processes
Process time	Time to finish the process
Cycle time	Time to finish thea work
Error handling	A strategy that is executed when a process can't be over in time or a wrong process has done

Table 3 Error handling

Error handling	Meaning
Repeat	Retry the current again
Next	Skip the current process
Exit	Terminate the work

情報をセンサやシステムに関する知識のない人でも設定することができなければならない。そこで、それらを簡便に設定するためのユーザインタフェースを提案する。このユーザインタフェースには以下の要件が求められる。

- 特別な知識のない一般ユーザでも操作できる
- 簡便に SKT を作成することができる
- 作業工程情報を設定することができる

一つ目の要件を満たすために、一般的に普及しているマウスとキーボードを用いて操作する GUI(Graphical User Interface)を設計する。二つ目の要件を満たすために、作業空間を表した二次元地図を描き、それを利用して SKT を配置、編集するという手法を提案する。利用する作業空間を表した二次元地図を描画するための機能と、地図と実環境での座標間のキャリブレーション機能を用意する。三つ目の要件を満たすために、画面上にテキストフィールドを表示し、そこに作業工程情報の各項目を入力して設定できるようにする、

### 3. 作業内容や環境の変化を考慮した作業支援システムの実装

#### 3.1 システム概要

アクセス判定を行う空間メモリ処理部を中心に、手が指し示した三次元位置を取得する位置計測装置、SKT の配置や作業工程情報設定を行うユーザインタフェース、フィードバックを行うためアプリケーションから成り立つ。システムの構成図を Fig. 2 に示す。各アプリケーションについての詳細は 3.2 節以降で説明する。

#### 3.2 空間メモリ処理部

人の身体動作を位置計測装置で計測し、その結果をもとに、空間メモリ処理部が作業観測と作業評価を行う。作業中に何かしらのミスが検出された場合は、設定されたミス発生時の処理を実行した後にフィードバックアプリケーションにフィードバックデータを送信する。空間メモリ処理部は SKT 作成支援ツールに現在配置されている SKT の座標情報を送信し、空間メモリ作成支援ツールから作業工程情報を受信する。

#### 3.3 位置計測装置

本システムでは人の手の三次元位置を計測するセンサとして、ZPS(Zone Positioning System)(古河機械金属株式会社製)、または Kinect(Microsoft)を利用する。ZPS とは超音波を用いたセンサである。タグより発信した超音波を天井に配置したレーザで受信して、超音波の受信するまでにかかった時間の差を利用してタグの三次元位置を計測する。作業者は手にタグを着けて作業を行う。タグにはそれぞれ ID が付けられており、ID をもとに作業者を判別することができる。

#### 3.4 SKT 作成支援ツール

SKT 作成支援ツールの表示画面を Fig. 3 に示す。画援ツ

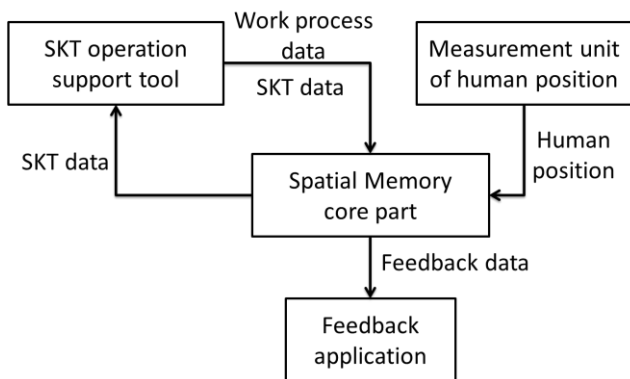


Fig. 2 System configuration

ルで行う処理は全てアイコンで表示されており、それを選択すれば処理を実行することができる。SKT 作成支援ツール画面上部にアイコンが配置されている。SKT 作成支援ツール画面下部には作業環境を表す地図と空間メモリ処理部より受信した SKT の位置、SKT のアクセス可能領域が表示され、SKT がどこに配置されているかを視覚的に確認することができる。その他、環境地図を作成する機能、および地図と実環境での座標間をキャリブレーションする機能も用意されており、画面上のタブを選択することにより機能を切り替えて使用することができる。

作業工程情報を設定するための操作画面を Fig. 4 に示す。画面内のテキストフィールドに作業名、作業者 ID、工程順序、一工程時間、ミス発生時の対応を入力する。作業名は行う作業に名前を付けて入力する。作業者 ID には ZPS のタグの ID を入力する。工程順序はアクセスする SKT の ID を用いて指定する。アクセスする順番に SKT の ID をテキストフィールドに入力する。各工程の一工程時間は工程順序を入力したテキストフィールドの隣の欄に秒数を入力する。ミス発生時の対応はラジオボタンをクリックして Repeat, Next, Exit から選択する。作業 ID は自動的に割り振られ、一サイクル時間も入力した一工程時間より自動的に計算される。作業を繰り返す回数をテキストフィールドに入力する。この画面には入力した工程順序と一工程時間を視覚的に確認することができ、設定の人為的ミスを防止することができる。

### 4. 実験

#### 4.1 実験内容

本システムを用いて人の作業を評価することができるか、および SKT 作成支援ツールを用いて SKT 作成、作業工程情報を設定することができるかを検証する。

実験環境を Fig. 5 に示す。本実験では被験者はレゴを組み立てるという作業を行う。手順は以下のとおりとする。

- I. 五色のレゴを一定の順番に手に取り、組み立てる

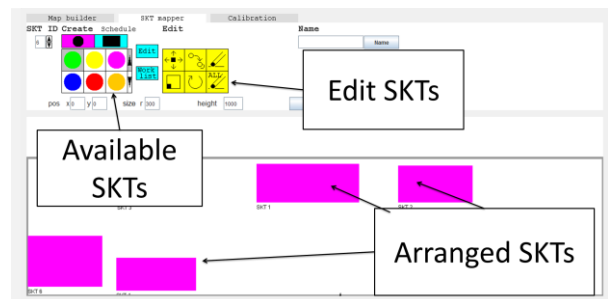


Fig. 3 Illustration of GUI for SKT operation support tool

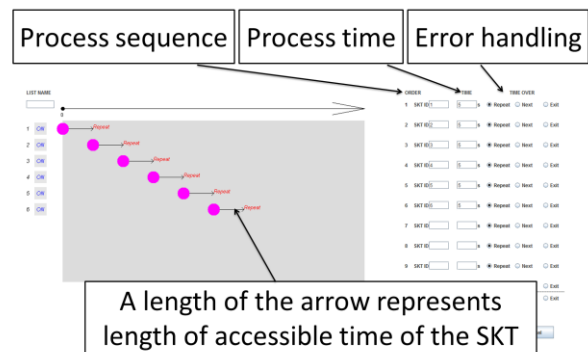


Fig. 4 Illustration of GUI for defining a user's work

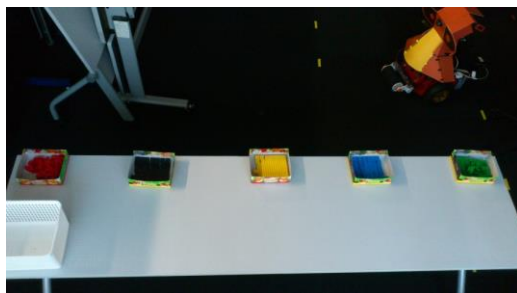
- II. 組み立てたレゴは Fig. 5 内の白ボックスの中に入れる
- III. 手順 1, 2 を繰り返し, 五十組組み立てたら作業環境を変更する.
- IV. 合計百組のレゴを組み立てたら終了する

実験にはアクセス可能領域の形状が直方体型の SKT を用いる. 被験者の両手の位置は Kinect を用いて計測する. 被験者人数は三人である. SKT を適切に配置することができたかどうかを判断するために作業前半は実験者, 作業後半は被験者が SKT を配置する. 評価には動作席効率  $P_{\text{success}}$  を用いる. 作業観測成功率は, 作業観測成功率は動作判定エラーの回数  $N_{\text{miss}}$  と手を伸ばした回数  $N_{\text{reach}}$  を用いて式(1)より求める.

$$P_{\text{success}} = (N_{\text{reach}} - N_{\text{miss}}) / N_{\text{reach}} \times 100 \quad (1)$$

#### 4.2 結果と考察

ある被験者の実験結果を Fig. 6 に示す. 全体の作業観測成功率  $P_{\text{success}}$  は, 99.6% となった. さらに, システムが被験者のミスを見逃すことはなかった. 一工程時間に関して, 目視で観測した結果とシステムによって得た結果の平均二乗誤差は被験者それぞれ 0.62 s, 0.53 s, 0.51 s となった. 動作判定エラーとして, 手を伸ばしてもアクセス判定しない, 一回手を伸ばしただけで二回アクセス判定することがあった. また, 動作判定エラーにより連続で工程順序ミスが発生した. システムが工程順序ミスを見逃すことなく, また目視と同



Environment A



Environment B

Fig. 5 Experiment environments

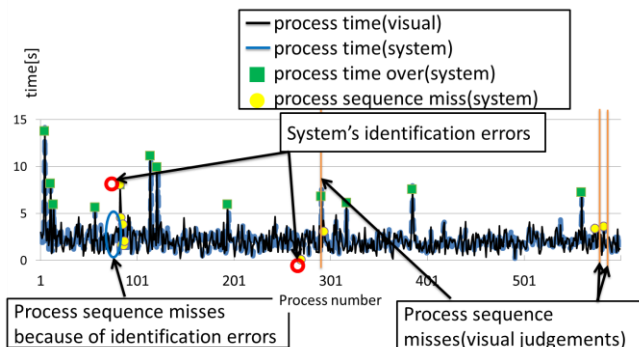


Fig. 6 An example of experiment result

等の精度で一工程時間を計測することができたため, 本システムはヒューマンエラーを検出することにより有用であるといえる. 次に, SKT 作成支援ツールに関して考察する. 作業前半と後半の動作判別成功率を比較した際には変化は見られなかった. したがって, 本ツールを用いて被験者は, SKT の配置, 作業工程情報の設定を行うことができたといえる. よって本システムは作業内容の変化に対応することができるといえる.

また, 別の作業観測者を用いずに, また作業者の作業中の負担を増やすことなく作業を観測することができた. よって, 現状の生産現場のヒューマンエラー検出の自動化における問題点を解決したといえる. さらに, 全行程を定量的に評価することができたため, 作業の詳細や傾向がわかり, 対策を取る際に本システムは有用であると考えられる.

#### 5. おわりに

本稿では, 空間メモリシステムを利用し, 作業を観測し, 評価を行い, その結果をフィードバックする作業支援システムを提案した. さらに, 動作検出精度を向上させるために作業観測に適したアクセス判定と直方体型のアクセス可能領域を提案した. そして, 提案したシステムの有用性を確かめる実験を行い, 本システムがヒューマンエラーを検出することにより有用であること, また作業者自身で作業内容を設定することができることがわかった.

今後の課題として, 動作判定成功率の向上, フィードバックを用いることによる作業への影響を検証することが挙げられる.

#### 参考文献

- (1) Kazuaki Kondo, Masashi Kanegae, Takahiro Koizumi, Kanado Obata, and Yuichi Nakamura, Memory Ubiquitous:Providing Memories on Anything, Anywhere A case study for cooking support, 2010 IEEE international Symposium on Multimedia(ISM), (2010) pp.260-265.
- (2) Ville Huikari, Heli Koskimäki, Pekka Siirtola, Juha Rönning, User-independent activity recognition for industrial assembly lines feature vs. instance selection, 2010 5<sup>th</sup> International Conference on Pervasive Computing and Applications(ICPCA), (2010) pp.307-312.
- (3) 清水早苗, 平湯秀和, 浅井博次, "カメラを用いたものづくり現場における締め付け作業のボカヨケシステムの開発", 電気学会論文誌 C **129-5** (2009) pp.916-922.
- (4) Sho Murakami, Takuo Suzuki, Akira Tokumasu, Yasudhi Nakauchi, "Cooking Procedure Recognition and Support by Ubiquitous Sensors", Journal of Robotics and Mechatronics, **21-4** (2009) pp.496-506.
- (5) 津吹陽介, 小阪拓也, 亀田能成, 中村裕一, 太田友一, さりげなく作業支援を行うメディア ~物体変化の認識と作業過程の同定~ 電気情報通信学会技術研究報告 PPMU パターン認識・メディア理解 **104-369** (2004) pp.13-18
- (6) 彦田真里, 梅田和昇, 松田忠孝, "熟練工から新人への技能伝達における画像処理の利用-エンジン組み立て作業の自動教育システムの開発-", ロボディクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2002, **21**(2002). Kobaytions, (2011) pp.281-286.
- (7) Yoshinori Isoda, Shoji Kurakake, Hirotaaka Nakano "Ubiquitous Sensors based Human Behavior Modeling and Recognition using a Spatio-Temporal Representation of user States", AINA(1)'04, (2004) pp.31-35
- (8) 橋本秀紀, 渡邊郎子, 空間地農家のデザイナー-建築・ロボティクス・IT の融合, NTT 出版, (2004)
- (9) Mihoko Niitsuma, Hiroshi Hashimoto, Hideki Hashimoto, "Spatial Memory as an Aid System for Human Activity in Intelligent Space", IEEE Trans On Industrial Electronics, **54-2** (2007) pp.1122-1131
- (10)Mihoko Niitsuma, Hideki Hashimoto, "Observation of Human Activities Base on Spatial Memory in Intelligent Space", Journal of Robotics and Mechatronics, **21-4** (2009) pp.512-517
- (11)白石歩, 小林大夢, 新妻実保子, "空間メモリシステムを利用したユーザフレンドリーな作業支援システムの提案", 電気学会次世代産業システム研究会資料, (2012) pp.49-54
- (12)Reason, "Human error", Cambridge University Press, (1990)