

空間メモリ：知識活用を支援する空間知能化

新妻 実保子*・橋本 洋志**・橋本 秀紀*

Spatial Memory: an Aid System for Utilizing Knowledge in Intelligent Space

Mihoko NIITSUMA*, Hiroshi HASHIMOTO** and Hideki HASHIMOTO*

This paper proposes the spatial memory which aids human activity in a working environment. The spatial memory regards three-dimensional space as mass storage of computers, i.e. three-dimensional point is treated as an address of stored digital data such as various documents, images and commands for machines. Consequently, we can access stored digital data by indicating a point using our own arms, which we named "Human Indicator". In this paper, we implement a prototype of the spatial memory system which is supposed to utilize digital data regarded as externalized knowledge. The implemented system is evaluated through two types of experiments. The tendency to forget and the efficiency of task performance are investigated. By applying the t-test under the level of significance 5%, experimental results of the performance efficiency show significant statistical difference between the results with the spatial memory and without it.

Key Words: spatialmemory, Spatial-Knowledge-Tag (SKT), bodily-kinaesthetic access, intelligent space

1. はじめに

著者らは、空間内で活動する人間や移動ロボットが環境からの情報支援や物理的支援を受けることにより、活動をより高度化する空間の知能化について研究を進めている^{1)~4)}。現在までに、iSpace (Intelligent Space:知能化空間)の基本的な機能として位置づけられる空間内の人間やロボットの位置認識^{6)~8)}、および、移動ロボットと人間の共存環境の実現^{9)~11)}に関して研究を行なった。このような空間知能化に関する研究は近年盛んに行なわれている^{12)~14)}。

これらの研究において、人間の活動に役立つものは移動ロボットだけでなく、空間から提供される情報(テキスト, 映像, 音など)でもあることが実験を通してわかってきた。また、知能化された空間における人間の知的活動の高度化はiSpaceに関する構想当時から重要な支援対象として位置づけられていた。

さまざまな知的活動において、その要となるものは人間の経験や記憶からなる知識である。特に、文書や画像, Webページなど外在化された知識は関連する知識を想起し、客観的な観察を通して考察を行なうことは新たな発想や問題解

決につながる。したがって、知的活動の本質的な作業を妨げることなく知識の蓄積と閲覧を行なえることは知的活動支援につながるものと考えられる。これより本論文では、人間の高度な知的活動に不可欠な文書や画像, Webページなどを外在化された知識と位置づけ、人間の身体を用いてこの知識の蓄積と閲覧を瞬時にかつ直感的に処理する空間メモリを提案し、その有効性について論じる。

知識の蓄積と閲覧をストレスなく、かつスムーズに行なうためには、必要な知識をどれだけ早く見つけられるかという想起のしやすさと想起した知識をどれだけ早く取り出せるかというアクセスのしやすさが要求される。

はじめに、想起しやすい知識の蓄積について考える。「整理の第一原則は、ものの【おき場所】をきめる」ことであるといわれているように¹⁵⁾、想起しやすく知識を蓄積するためにはその配置法を使用者自身が決めることが重要である。また、想起しやすさと蓄積した知識の所在をいかに忘却せずに維持できるかという点も重要であり、おき場所を決めることは忘却性を低減する意味でも有効であると考えられる。記憶の配置法に関する研究として、外在化された記憶を持続的に発展可能な形で構築する仕組みである時空間記憶システム(知球)がある¹⁶⁾。知球では、外在化された記憶を1枚の仮想的なカードとして表現し、そのカードを三次元仮想球面上に配置することによって、空間的な手がかりを利用した使用者のポリシーに基づく記憶の整理を実現している。しかしながら、知球システムで実現されている空間的な手がかりは三次元仮想球面上のカードの位置関係や大きさであることから、記憶の想起のためにはコンピュータディ

* 東京大学生産技術研究所 東京都目黒区駒場 4-6-1

** 東京工科大学 八王子市片倉町 1404-1

* Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Komaba 4-6-1 Meguro-ku Tokyo

** Tokyo University of Technology, Katakura 1404-1 Hachioji

(Received August 24, 2005)

(Revised December 22, 2005)

スプレイを詳細に見て知球を操作する必要がある。これは、記憶そのものを使用者が利用しやすい形に構築する際に有効であるが、ほかの主たる知的活動を同時に行ないながら扱うことは困難であると考えられる。

つぎに、想起しやすさとアクセスのしやすさについて考える。知識の在りかを人がわかる形で表現するものを「タグ」と称すると、現在のコンピュータシステムで用いられるタグはデータのパスやそれをコンピュータグラフィックス（アイコン）で表わすものが主な手法である。パスによるタグは時間の経過に伴って記憶が劣化する問題点があり、アイコンによるタグは知識の所在を表現しにくいという問題点がある。忘却により所在を想起できない場合は検索機能を利用したり、GUIを用いて画面を順に辿ったり詳細に見たりして想起することになり、知識へアクセスするためのわずらわしい手順によってストレスが発生する。マウスやキーボードを用いたアクセス法は迅速に操作するための訓練が必要であり、このこともストレスの要因であると考えられる。

以上より、直感的かつ瞬時的な知識の蓄積と閲覧を実現するためには、

- 想起しやすい配置ができる
- 忘却しにくいタグ付けができる
- 本来の作業を妨げることなく瞬時にかつ直感的に知識へアクセスできる

この三つの要件を同時に満足することが必須であると考えられる。

そこで、本論文は上記の知識の蓄積と閲覧に関する問題を解決するものとして空間メモリを提案する。この空間メモリは人間が知識を活用するためつぎの機能を有する。

空間メモリアドレス 想起しやすい知識の配置により知識へのアクセス性を高めるため、空間内に三次元位置座標をメモリアドレスとして埋め込むことにより実環境の物理的な位置への知識の蓄積を可能にする。これにより、活動環境そのものを利用して知識を分類して配置することができる。この三次元メモリアドレスを空間メモリアドレスと名づける。

Spatial-Knowledge-Tag (SKT) 忘却性を低減するためには知識の在りかを知らせるタグが直感的にわかることが重要である。そのため、空間内に配置された機器や生活用品そのものをタグとし、これを Spatial-Knowledge-Tag (SKT) と名づける。

Human Indicator 直感的にかつだれにでも簡便に知識へアクセスできるようにするため、知識を蓄積した三次元位置へ手を伸ばす直接的なアクセス法を採用する。このアクセス法における手先の位置を Human Indicator と名づける。

続く第二章では、空間メモリが満足すべき仕様とその実現システムの概要について述べる。第三章では空間メモリを用いた際のアクセス性と蓄積位置の忘却性について検証する。具体的には、事前に配置された複数の知識の配置を覚え、す

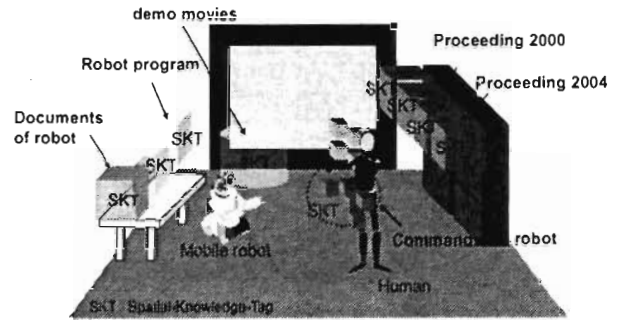


Fig. 1 An arrangement of a spatial memory

べての知識へのアクセスに要する時間の経時変化を調べる。第四章では空間メモリを用いた場合と用いない場合とで具体的な作業課題を行ない、その作業効率の観点から空間メモリの有効性を検証する。第五章では、空間メモリの機能と使用方法について空間メモリの特徴や応用事例を踏まえて考察する。最後に、第六章においてまとめと今後の課題を述べる。

2. 空間メモリ

Fig. 1 に空間メモリの概念図を示す。図中の立方体や円柱がそれぞれ空間メモリを表わしており、人間やロボットが活動する空間に知識が仮想的に配置されているようすを表わしている。本論文では文書や画像、機器およびロボットへのコマンドなどの電子データを空間メモリへ蓄積される外在化された知識と位置づける。

2.1 Spatial-Knowledge-Tag (SKT)

第一章で述べたように、本論文では活動環境内の機器や生活用品そのものをタグとすることを考える。機器や生活用品にはそれぞれの役割があり、人は見ただけでそれを認識することができる。人のこの能力を活かして実物体をタグとすることができれば、タグが蓄積した知識を想起するきっかけとなり、忘却性を低減できると考えられる。また、機器や生活用品は人間の活動に密着して配置されていることから、それらの空間的な位置を想起しやすい知識の配置に活用できる。

タグ付けに関する先行研究として、環境内の実物体にRFIDを取り付ける方法¹⁷⁾や2Dバーコードを貼付してオブジェクトの特定を行なう方法¹⁸⁾がある。これらの方法では、人がRFIDリーダーや小型カメラを装備してオブジェクトに貼付されたRFIDタグや2Dバーコードのデータを取得することにより物体を特定し、物理的な位置に電子データを配置する。人にとっては「物をもつ」や「物を見る」という自然な動作であるが、物理的な接触が必須であるこれらの手法は人の本来の知的活動を妨げることも考えられる。

そのため、本論文では人の知的活動のしやすさを考えて、空間内の人間の位置や物体の位置を計測するためのセンサを環境側に配置し、任意の点を原点とする三次元座標を埋め込む。これにより空間内に配置された機器や生活用品の位置を示す三次元座標を取得し、それをタグとする方法を採用す

Table 1 Data structure of SKT

SKT
ID number
spatial data
spatial memory address (x, y, z)
time stamp

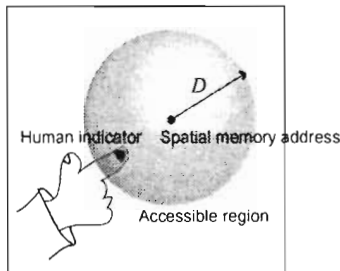


Fig. 2 Illustration of an accessible region to access SKT

る。実空間の物理的な位置と蓄積される知識を関連付ける役割を果たすものが Spatial-Knowledge-Tag(SKT) と呼ばれる仮想的なタグである。Table 1 に SKT のデータ構造を示す。ここで、実空間における SKT の位置が空間メモリアドレスであり、SKT に蓄積される知識を空間データと名づける。

2.2 Human Indicator

三次元位置でメモリアドレスが表現される空間メモリにおいては、新たなメモリアクセス手法が必要となる。人間にとって直感的かつ瞬時的なアクセスを実現するため、空間メモリでは人間の身体位置をインディケータ (Human Indicator と名づける) として採用する。本論文では Fig. 2 に示す手先の任意の点を Human Indicator として用いる。これにより、人間は空間の三次元位置を指し示すことによって直接 SKT へアクセスすることが可能になる。

しかし、人が SKT の空間メモリアドレスを正確に指し示すことは不可能であるため、Fig. 2 に示すような SKT へのアクセス領域を設ける必要がある。アクセス領域は人が容易に SKT へアクセスするためだけでなく、SKT を区別し複数配置するための役割を果たすことから、その大きさは人間のアクセス特性に基づいて決定されるのが望ましい。そのため、SKT の空間メモリアドレスと Human Indicator の距離をアクセス誤差と定義して、人がどれだけの精度で空間位置を指し示すことができるかという検討を行なった^{19), 20)}。空間メモリ使用者の作業状況を SKT へのアクセスのみに限定した場合、および、ほかの作業を行ないながら SKT へアクセスする場合において行なったアクセス誤差の検討から、ほかの作業を行ないながら SKT へアクセスする場合のアクセス精度はアクセス作業のみの場合に比べて低下する結果が得られた。円滑なアクセスと複数 SKT の区別の両方を満足するためには、アクセス作業のみの場合は SKT を原点とする半径 20cm の球をアクセス領域とし、ほかの作業を行ないながら空間メモリへアクセスする場合は半径 40cm の球を

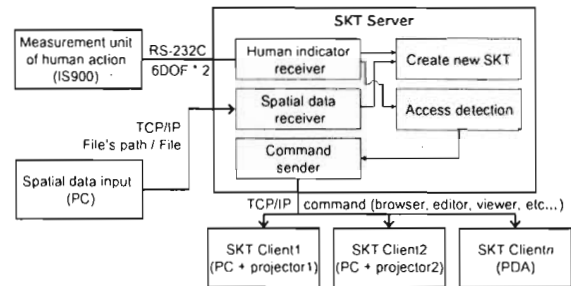


Fig. 3 System configuration

アクセス領域とすることとした。

2.3 空間メモリアドレス

空間メモリのアドレッシング手法として Human Indicator を中心に考え、Human Indicator の指し示した位置を空間メモリアドレスとして採用することとする。これにより、アクセスする場合と同様に蓄積したい位置を指し示す直感的な動作で空間メモリへの知識の蓄積を実行できる。

本論文では人間が作業する机上の任意の一点を空間メモリアドレスを定義する座標系の原点とし、人間の手の届く位置にある物体や離れた位置にある物体を指差した位置に SKT を作成する。この場合、SKT へアクセスするためには座標系の原点と人間の作業位置に制約が生じるが、数 cm のずれであれば Fig. 2 に示す SKT へのアクセス領域によって吸収されるため使用者が制約を意識する必要はない。

2.4 空間メモリの実装

空間に人の活動に必要な知識を蓄え、それらを利用しながらデスクワークを遂行することを想定した空間メモリを実装する。Fig. 3 に示すように空間メモリシステムは人間動作計測装置、空間データ入力部、SKT サーバと SKT クライアントから構成される。

・人間動作計測部

人間の位置、動作計測には Fig. 4 に示す InterSense 社製 IS900²¹⁾ を用いる。IS900 は超音波とジャイロを用いた三次元位置・姿勢計測装置であり、位置 x, y, z と姿勢 $roll, pitch, yaw$ を計測できる。位置分解能 1.5mm RMS、姿勢分解能 0.05deg RMS の性能を有する。空間メモリ座標系の原点とする任意の点に図中右上のセンサを取り付け、SKT へアクセスするための Human Indicator として図中ボタン付きセンサを用いる。センサに取り付けてあるボタンを用いて蓄積動作とアクセス動作を区別し、それぞれのボタンが押されたときに Human Indicator の位置座標が SKT サーバへ送信される。

・空間データ入力部

空間データ入力部で使用者は空間メモリへ蓄積したい空間データを作成または選択する。空間データ入力画面を Fig. 5 に示す。空間データ入力は空間メモリシステムと使用者との間のフロントエンドの一つであることから、システムの状態を認識できるようにするため、接続状態と蓄積済み SKT

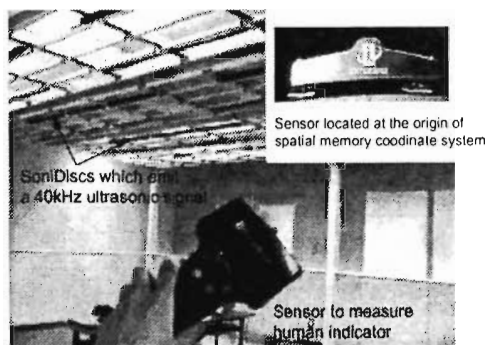


Fig. 4 InterSense IS-900 Precision Motion Tracker as the measurement unit

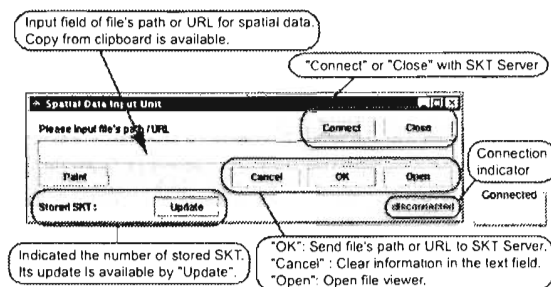


Fig. 5 Spatial data input unit

の個数表示を設けた。画面上の OK ボタンにより空間データが決定されたとき、空間データが SKT サーバへ送信される。本システムで使用可能なファイル形式は、テキストファイル、画像ファイル、Web ページ (URL) である。

・SKT サーバ

SKT サーバは空間メモリのコントローラの役割を果たすものである。SKT サーバの機能は、人間動作計測装置から Human Indicator を受け取り、アクセス動作か蓄積動作かを区別し、アクセスである場合はアクセス判定を行なう。アクセスされた場合には該当する SKT を SKT クライアントへ送信する。Human Indicator が蓄積動作であり、かつ、空間データを受信している場合には新しい SKT を生成する。

・SKT クライアント

SKT クライアントはアクセスされた SKT から取り出される空間データの出力機器である。どのような出力機器が必要であるかは人間の活動内容に依存する。今回のシステムでは PC を用いたデスクワークに空間メモリを使用することを考えて、出力情報を見ながら作業が行なえるよう出力機器は PC ディスプレイとした。

3. 空間メモリを用いた知識へのアクセス性と忘却性の検証

空間メモリを用いた知識へのアクセス性と蓄積された知識の忘却性を検証する。空間メモリを使用するためには、SKT の空間的配置とその内容を覚える必要がある。この学習が進めば特定の SKT へ迷うことやまちがえることなくアクセス



Fig. 6 Configuration of the spatial memory used for the experiment

でき、結果的に短時間で SKT へのアクセスが可能になる。したがって、複数の SKT を配置し、それらすべてにアクセス可能になるまでの時間を計測する課題を設定する。これを適当な時間を空けて複数回行ない、得られた一組の SKT へのアクセス時間の経時変化からアクセス性と忘却性を検証する。なお、本実験では人間の作業は SKT へのアクセスのみであることから SKT を原点とする半径 20cm の球をアクセス領域とする。

3.1 課題の設定

本実験で実行する課題の手順を以下に示す。

- (1) 画像データを空間データとする SKT を配置する。
- (2) 被験者は Access Indicator (後述) を見ながら、配置された SKT へアクセスし、位置と画像内容を覚える。アクセスできると画像データが表示される。(SKT の学習)
- (3) 被験者の自己申告により SKT の学習を終了する。
- (4) 実験者は被験者にアクセスして欲しい SKT の画像内容をランダムに一つ指定する。(例: バイク)
- (5) 被験者は指定された SKT へアクセスする。
- (6) すべての SKT がアクセスされるまで (4) (5) を繰り返す。

すべての SKT にアクセスできることを課題の達成と定義し、(2) の学習開始から (6) の課題の達成までの時間を計測する。

ここで、Access Indicator とは Human Indicator と SKT との距離にしたがって色を変えるものであり、距離が 30cm 以上の場合赤、20cm 以上 30cm 未満の場合黄色、20cm 未満の場合緑になるものである。被験者は Access Indicator を見ながら手を動かすことにより SKT を発見し、アクセスすることが可能となる。学習時のみ Access Indicator を参照し、ランダムに指示された SKT へアクセスする課題遂行時には参照しないものとする。

課題の設定について補足する。(1) は初回のみ行ない、一人の被験者が Access Indicator を見ながら各 SKT が 30cm 以上離れるように配置した。今回の実験では 7 つの SKT を配置し、それを Fig. 6 に示す。

実験は被験者 6 人 (21~26 才の理工系学生) に対して行な

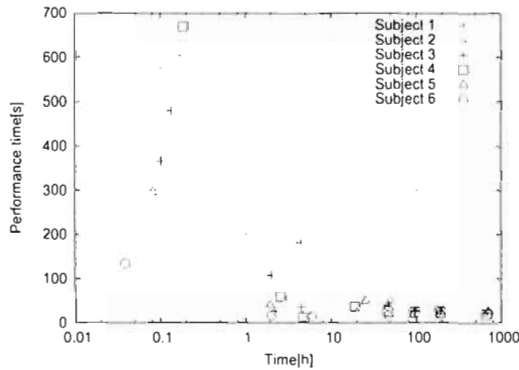


Fig. 7 Time variation of the performance time of each subject

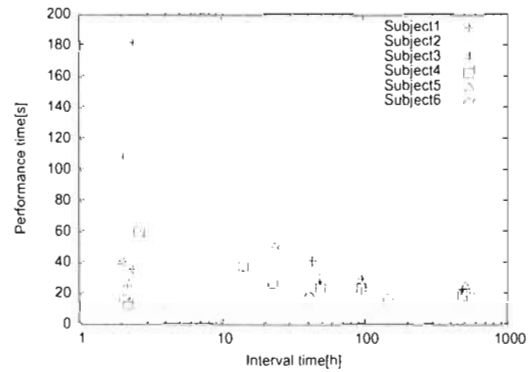


Fig. 8 Performance time focused on the task interval

う。被験者は全員、本実験開始前までに30分程度空間メモリを利用しており、SKTへのアクセスの仕方は既知である。

3.2 実験結果

Fig. 7に各被験者 (Subject1-6) の課題達成時間を示す。横軸は実験開始時刻からの経過時間 [h] の対数表示、縦軸は課題の達成に要した時間 [s] である。初回の実験では7つのSKTの位置と内容を覚える学習を行なっているため、すべての被験者が実験を通して一番時間を要している。Subject6は実験前にSKTの配置を行なったため、SKTを作成した際の記憶がありほかの被験者に比べて学習時間が短い。Subject3以外の被験者は2回目以降の課題遂行において Access Indicator を用いた学習を必要とせず、初回実験終了後から約4週間経過後も2回目の課題達成時間と同等かそれ以下の時間で課題を達成する結果が得られた。Subject3は3度目の課題遂行の際に学習しなおしているが、その際の課題達成時間は1回目の50%弱であることから学習負荷は半減しており、学習後にはほかの被験者と変わらない速度で課題を達成している。

3.3 アクセス性に関する考察

Access Indicator を用いてSKTを見つけることができれば2回目以降の課題遂行時にはほとんど学習を必要としないことから、空間位置を身体的に覚えて知識へアクセスすることの容易さが示された。また、初回の課題遂行時における学習時間に個人差が見られるが、試行回数が増すことに課題達成時間のばらつきは減少し、最終課題遂行時の達成時間は18~24秒とアクセス性が向上することが確認された。

3.4 課題の試行間隔に基づく考察

忘却性について検証するため、Fig. 7を課題の試行間隔に着目して課題の達成時間をグラフ化したものを Fig. 8に示す。横軸は課題の試行間隔 [h] を対数表示したものであり、縦軸は課題の達成に要した時間 [s] である。初回の試行は試行間隔0時間になるためグラフ上に表示されない。したがって、Fig. 8には二度目の試行結果から表示されている。三度目の試行から試行間隔は各被験者により異なる場合があるが、すべての被験者において試行回数が増えるほど試行間

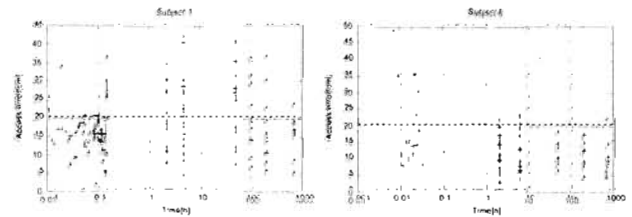


Fig. 9 Examples of the access error in the cases of Subject1 and Subject6

隔が長くなるように実験を行なった。すなわち、試行間隔約494時間の試行がすべての被験者の最終試行である。

試行間隔20時間未満の実験前半では達成時間が変動している被験者も見られるが、試行回数が増えるほど変動が減少し、達成時間も短縮されている。これは空間メモリを使用しない間隔が長くなった場合にもアクセス性が向上していることを示しており、蓄積されたSKTの所在を忘却せずに想起できた結果である。また、最大約494時間(約20日)の空き時間があつた場合にも、各被験者ともに試行間隔のより短い課題遂行時と比較して同等かそれ以下の時間で課題を達成している。これより、身体動作の感覚や作業環境周辺の機器配置を参考にして知識へアクセスすることにより、時間が経過した際にも蓄積された知識を忘却せずに利用可能であることが確認された。

3.5 アクセス誤差に基づく考察

つぎに、被験者の Human Indicator のアクセス誤差を比較することにより、直感的にアクセスしているようすを示す。アクセス誤差の特徴的な例として、Subject1と Subject6のアクセス誤差の時系列データを Fig. 9に示す。横軸が初回実験開始時刻からの経過時間 [h] の対数表示、縦軸がアクセス誤差 [cm] である。本実験ではSKTを原点とする半径20cmの球をアクセス領域としていることから、アクセス誤差が20cmを超える場合SKTへアクセスできないことになる。Subject1の場合は、試行回数が増えた場合にもアクセス誤差が発生しており、アクセス精度は良くない例といえる。一方 Subject6は試行回数を重ねるごとにアクセス誤差が減少し、SKTの位置を感覚的に身につけたと考えられる

例である。このように空間認識能力には個人差があり、アクセス精度の良し悪しが見られる。

しかしながら、Fig.9左のSubject1の最終課題遂行時のアクセス誤差を見ると、それ以前の課題遂行時よりもSKTへアクセスできない回数が減少している。これより、Subject1は感覚的にはSKTの位置を覚えており、それが約20日間空間メモリを使用しなかった際にも維持されていたことがわかる。またFig.7から、Subject1の課題達成時間はSubject6やほかの被験者と同等であり、課題遂行結果が悪いようすは見られない。この理由として、空間メモリシステムは正確な位置を思い出すことができない場合やアクセス精度が良くない使用者であっても直感に基づいて何度でも即座にアクセス動作を実行できる仕組みであり、その際の動作が学習効果となり、結果として時間が経過した際のアクセス性の向上や忘却性の低減を実現していると考えられる。

4. 作業課題における空間メモリの定量的評価

空間メモリを用いたスムーズな知識活用が作業に与える影響を具体的な課題に空間メモリを使用することにより検証する。いくつかの知識を利用して課題を遂行する作業を空間メモリを用いた場合と用いない場合とで行ない、その作業効率について比較する。本実験での人間の活動はSKTへのアクセス以外の作業を伴うことから、SKTを原点とする半径40cmの球をアクセス領域に設定する。

4.1 課題の設定

4.1.1 課題内容と知識の配置

課題をTable 2に示す。実験者は被験者が課題で使用する資料を用意し、その資料から特定の項目を指定する。被験者は指定された項目を見つけ出し、テキストファイルへ入力するという内容である。空間メモリの使用の有無に関係なく資料を閲覧する必要性を維持するために、空間メモリを使用する場合と使用しない場合とでそれぞれ異なる項目を指定した。被験者を空間メモリを用いた実験から行なうグループと空間メモリを用いない実験から行なうグループの二グループに分けて実験を行なった。

このとき課題に用意される外在化された知識は、カレンダー(Web)、IPアドレス一覧表(テキストファイル)、大学住所一覧(テキストファイル)、エディタである。

本実験における知識の配置について説明する。

・空間メモリを用いる場合の知識の配置と提示方法

Fig. 10に示すように作業環境の物体に関連付けてSKTを配置した。ただし、実際のSKTの空間メモリアドレス

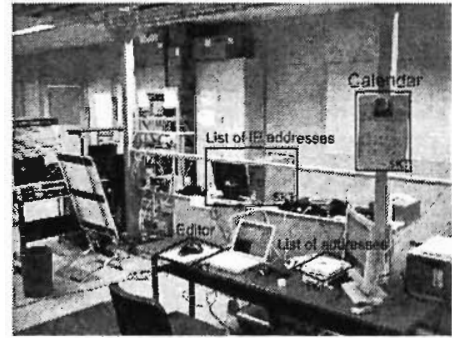


Fig. 10 Configuration of the spatial memory used for the experiment

は図中の物理的なカレンダーやPCの位置ではなく、SKT作成者がそれぞれに向かって手を伸ばした位置である。被験者への知識の配置位置の提示はFig. 10のみを用いて行ない、具体的な三次元位置の教示は行なわない。課題に用いるSKTは事前の実験者が作成し、被験者は同一のものを使用する。

・空間メモリを用いない場合の知識の配置と提示方法

各データはハードディスクやWWW上に保存され、それぞれへのアクセス方法を被験者に提示する。具体的には、あるWebページからカレンダーページへのアクセス方法、テキストファイルの絶対パス、エディタの開き方を記した。

つぎに、被験者の構成について説明する。被験者は5人ずつの2グループで構成され、合計10人について実験を行なう。被験者は20~26才の理工系学生で構成され、PC使用歴は最大8年、最小2年、平均4.6年であることから、テキストファイルの作成という課題内容は全員が容易に行なえるものである。

4.1.2 作業効率の定量化

本課題における作業内容は二つに大別することができる。すなわち、指定された項目を見つけテキストファイルを作成する作業(テキストファイルへの入力)とそれ以外の作業(ファイルへのアクセス、指定された項目の検索、エディタの起動、保存のための手続き)である。空間メモリを使用する場合と使用しない場合の差が現れると予想されるものは入力以外の作業時間(ファイルへのアクセス、エディタの起動、保存のための手続き)である。一方、ファイルを作成する場合のキーボード操作の速度や必要な情報を見つける速度は個人の能力に依存し、空間メモリ使用の有無に無関係であり、この作業速度は双方の実験において等しいと考えられる。また、作業時のビデオ録画から作業状態が明確に区別でき計測可能である時間はエディタ起動後のキーボードを使用している時間であり、この作業は課題を達成するための主要な作業と考えられる。したがって、ファイル作成のためにキーボード入力している時間 t_i とそれ以外の時間 t_o とを区別し、課題達成時間 $t_i(t_i = t_i + t_o)$ を占める入力時間 t_i の割合を入力作業効率 $\rho(\rho = t_i/t_i)$ と定義し、課題遂行

Table 2 Specified task for the experiment

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. カレンダーから○○○○を調べてテキストファイルにまとめてください 2. ハイテクリサーチセンター内のPCである○○のIPアドレスを調べてすぐ取り出せる形で保存してください 3. 大学の住所録から○○、□□の住所を調べて、テキストファイルにまとめてください |
|--|

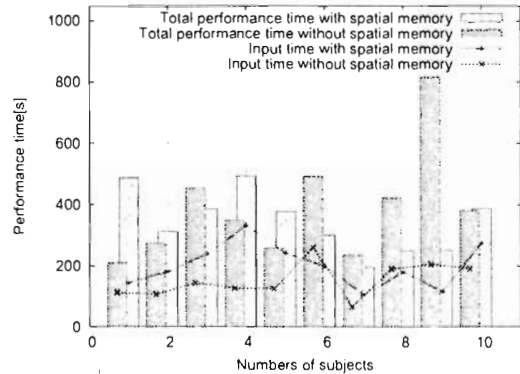


Fig. 11 Performance time of each subject

の効率を示す指標とする。すなわち、入力速度と情報検索速度が双方の実験において同速度であると仮定すれば、 ρ が大きいほど入力以外の時間が短くデータ入力に多くの時間が割かれているということから、作業効率は良いと判断する。

各被験者の作業状況をビデオカメラで撮影し、実験終了後に目視により被験者 m の空間メモリを用いた場合の作業における入力時間 t_{is}^m とそれ以外の時間 t_{os}^m 、空間メモリを用いない場合の作業における入力時間 t_{in}^m とそれ以外の時間 t_{on}^m を計測し、それぞれの作業効率 ρ_s^m, ρ_n^m を算出する。

4.2 実験結果

被験者にとって知識への新しいアクセス法である空間メモリを使用した課題の遂行では、被験者の全員がすべてのSKTを利用し、課題を達成した。SKTの正確な位置は知らない状況であっても全員が円滑にSKTへアクセスし必要な情報を取得して課題を遂行したことは、空間メモリが直感的に扱えるシステムであることを示している。

Fig. 11に課題達成時間と入力時間を示す。横軸は被験者番号 (Subject1-10)、縦軸は時間 [s] である。図中の棒グラフが課題達成時間を示し、折れ線が入力時間を示す。Subject1-5の被験者は空間メモリを用いた課題を初めに行かない、Subject6-10の被験者は空間メモリを用いない課題を初めに行なった。その結果ほとんどの被験者において、二度目に行なった実験のほうが課題内容の理解度が向上しているため作業時間も早いという結果が得られた。入力時間を比べると、10人中7人の被験者が空間メモリを使用した場合の入力時間のほうが空間メモリを使用しない場合よりも大きいことがわかる。

4.3 課題内容に関する考察

課題達成時間、入力時間、入力以外の時間のそれぞれの平均値を Table 3 に示す。課題達成時間は空間メモリを用いた場合のほうが約46秒短い、入力時間は空間メモリを用いた場合のほうが約48秒長い。これは空間メモリを用いる課題のほうが入力する量が多かったにもかかわらず課題達成時間は空間メモリを用いた場合のほうが短いことを示している。すなわち、被験者のキーボード入力速度が両実験を通して一定と考えれば、入力量の多かった空間メモリを用いた

Table 3 Average values of the performance time

Performance time with spatial memory	
Input time \bar{t}_{is} [s]	202
Non-input time \bar{t}_{os} [s]	142.1
Total performance time \bar{t}_{ts} [s]	344.1
Performance time without spatial memory	
Input time \bar{t}_{in} [s]	153.7
Non-input time \bar{t}_{on} [s]	236.6
Total performance time \bar{t}_{tn} [s]	390.3

Table 4 Time ratio of the input time which represents the efficiency of the input performance

	ρ_s^m	ρ_n^m
Subject 1	0.2984	0.5355
Subject 2	0.5815	0.3913
Subject 3	0.6202	0.3194
Subject 4	0.6755	0.3647
Subject 5	0.6412	0.4884
Subject 6	0.6611	0.5283
Subject 7	0.5408	0.2827
Subject 8	0.7229	0.4526
Subject 9	0.4640	0.2518
Subject 10	0.7132	0.5026
Average $\bar{\rho}_s, \bar{\rho}_n$	0.5919	0.4117
Sample variation	0.0152	0.0098

課題達成時間は空間メモリを用いない場合よりも長くなるはずである。しかしながら空間メモリを用いた場合の課題達成時間のほうが短いということは、空間メモリを用いた場合の入力以外の時間 t_{os}^m が用いない場合に比べて短縮された結果であると考えられる。この作業時間の差は空間メモリを用いた場合のほうが効率がよいことを示しているかどうかを入力作業効率 ρ_s, ρ_n から検証する。

4.4 入力作業効率に基づく検証

Table 4に各被験者の入力作業効率 ρ_s^m, ρ_n^m とその平均値 $\bar{\rho}_s, \bar{\rho}_n$ と標本分散を示す。空間メモリを使用した際の平均入力作業効率は $\bar{\rho}_s = 0.5919$ であり、空間メモリを使用しない際の平均入力作業効率は $\bar{\rho}_n = 0.4117$ である。これを比べると、空間メモリを使用したほうが入力のための時間の割合が大きく、効率的であると考えられる。これを検証するため母平均を M として、帰無仮説 $M = 0.4117$ に対して対立仮説 $M > 0.4117$ を設定して対応のある2群のデータに対する t 検定を行なう。Table 4より統計検定量 $t_0 = 3.6022$ を得る。片側検定有効水準5%における t 値は t 分布表より $t = 3.250$ となり $t_0 > t$ を満たすことから、 t_0 の値は棄却域にあるので有意水準5%で帰無仮説は棄却される。これより、空間メモリを使用した場合の入力作業効率と空間メモリを使用しない場合の入力作業効率には有意な差があることが確認された。したがって、空間メモリを用いた知識への迅速なアクセスと蓄積により入力以外に要する時間を短縮化でき、作業の効率化につながったといえる。

5. 考 察

本論文では、空間メモリの基礎的機能である「瞬時かつ直感的な知識の閲覧と蓄積」を評価するため、評価の行ないやすい作業環境として机上を対象とした。より幅広い状況での空間メモリの使用を考えるため、空間メモリの特徴や応用事例を踏まえて空間メモリの機能と使用法について考察する。

5.1 SKT の配置に関する考察

本論文で実装した空間メモリシステムでは、2.3 節に記述したように人の手先位置である Human Indicator を用いて空間メモリアドレスの定義を行なっている。したがって、実物体そのものの位置と蓄積された知識との紐付けはなされていないため、物体が移動した場合には SKT の位置と物体の位置が異なることとなる。そのため、実物体と知識との紐付けを実現するためには、視覚センサなどを用いた物体の識別および物体の位置計測を行ない、Human Indicator と物体との紐付けを行なう必要がある。

しかしながら、三次元位置座標をメモリアドレスとして用いる空間メモリの特徴は、実空間の任意の点に知識を置くことができ、さらに座標系の定義に従って SKT の可搬性を設定できる点にある。第四章で示した物体への関連付けは、忘却しにくい知識の置き場を決める一手法であると考えられる。すなわち、座標系の原点を人の代表点に取れば身体とともにもち運び可能な空間メモリが構成される。この場合には、人は自分の身体を基準にして情報を分類、蓄積することが可能である。また、座標系を作業環境に固定すれば任意の位置への知識の配置が可能である。人が活動する環境には機器の配置のみならず通路や窓といった地理的位置が意味をもつ場合もあり、ナビゲーションサービスや伝言板として空間メモリを用いる場合には機器そのものの位置だけでなく任意の三次元位置へ情報を蓄積できることがメリットとなる。また、実物体と SKT との紐付けがなされない場合にも、SKT の配置位置から物体の配置履歴を取得でき、環境のレイアウト履歴と作業履歴とを照らし合わせることに使用などの応用事例が考えられる。したがって、座標系の定義の仕方や SKT の紐付けが物理的位置情報のみで十分であるのか、それとも実物体との紐付けが必要であるのかという問題は空間メモリの具体的な応用事例を通して検証され、使用目的に応じた空間メモリの効果的な使用方法として検討される必要がある。

5.2 空間メモリの持続的な使用に関する考察

空間メモリを持続的に使用可能にするためには SKT の整理機能が不可欠である。現在の空間メモリシステムでは個々の SKT を削除することが可能である。しかし、有効な整理を行なうためには、個々の SKT の内容だけでなく作業内容における SKT の役割や SKT 間の関連性から再分類や再統合を行なうことが必須であると考えられる。そのためには、蓄積した SKT の俯瞰的な観察が必要であり、その解決策として空間メモリの可視化が考えられる。個人がある作業内容に合

わせた空間メモリを構成することを前提に考えると、再配置や削除を含む SKT の整理作業自体が作業の段取りや作業経過の把握につながり、作業支援として期待できる。

人を取り巻く環境にさまざまな情報が埋め込まれていたとしてもその資源は有限であること、また人の三次元位置の指差し精度²⁰⁾からも、近年急速な大容量化の進むハードディスクのように空間メモリを用いることはデータ数の観点から困難であり、作業に応じた空間メモリをその都度構成しながら、可視化空間メモリを用いて整理しつづけることが効果的な使用方法であると考えられる。

6. おわりに

本論文では、iSpace における知的活動支援システムとして空間メモリシステムを提案した。外在化された知識の直感的かつ瞬時的な蓄積と閲覧を実現することを目的とした空間メモリシステムを実装し、提案システムを用いた際の知識配置位置の忘却性とアクセス性、作業の効率化への有効性の評価を行なった。

空間メモリの忘却性とアクセス性を検証するため、7つの SKT の位置と内容を覚え、ランダムに指定された SKT を閲覧する課題を、課題の試行間隔を変えて複数回行ない、課題達成時間の経時変化を調べた。その結果、初回の課題遂行の際に SKT の配置を学習すればそれ以後の学習は不要かまたは 50%以下の時間ですべての SKT の閲覧が可能であり、初回実験終了後から約 4 週間経過後も 2 回目の達成時間と同等かまたはそれ以下の時間で課題が達成された。また、課題遂行間隔に着目すると、約 20 日間空間メモリを使用せずに課題を遂行した場合も試行間隔の短い課題遂行時と比較して同等かそれ以下の時間で課題を達成する結果が得られた。このことから配置位置学習後の忘却性は低く、空間メモリは容易に扱えるシステムであることが確認された。

空間メモリを用いたスムーズな知識活用が作業に与える影響を具体的な課題に空間メモリを使用することにより検証した。情報を集めてテキストファイルを作成する課題を設定し、空間メモリを使用した場合と使用しない場合との作業時間の比較を行ない、作業効率を入力時間の観点から定量的に評価した。各入力作業効率の平均値に対して t 検定を適用した結果、片側検定における有意水準 5% で有意な差が認められた。このことから、空間メモリを使用することで情報へのアクセスや蓄積する作業時間が短縮し、作業が効率化されることが示された。

さらに、空間メモリの特徴や応用事例を踏まえて空間メモリの機能と使用法について考察した。本論文で示した実験は空間メモリの基礎的機能を評価するためのものであり、SKT の個数や作業内容が限定された使用であった。今後の課題として、空間メモリの整理機能を実現することと、5 章に示すような応用事例を通して効果的な空間メモリの使用法について検討していくことが挙げられる。

謝辞 本論文における実験を遂行してくださいました、東京

工科大学4年安部忍氏, 同佐藤秀次氏, 同大学院修士2年常山梯氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) J.-H. Lee and H. Hashimoto: Intelligent Space - concept and contents, *Advanced Robotics*, 16-3, 265/280 (2002)
- 2) H. Hashimoto: Intelligent Space - How to Make Spaces Intelligent by using DIND? -, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (2002)*
- 3) 橋本, 渡邊: 空間知能化のデザイン - 建築・ロボティクス・ITの融合, NTT出版 (2004)
- 4) 橋本秀紀: 空間の知能化とシステムインテグレーション, 計測と制御, 44-8, 568/573 (2005)
- 5) 橋本, 新妻, 佐々木: 空間知能化 - インテリジェント・スペース, 日本ロボット学会, 23-6, 34/37 (2005)
- 6) G. Appenzeller, J.-H. Lee and H. Hashimoto: Building Topological Maps by Looking at People: An Example of Cooperation between Intelligent Space and Robots, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1326/1333 (1997)
- 7) J.-H. Lee, T. Yamaguchi and H. Hashimoto: Human Comprehension in Intelligent Space, *IFAC Conf. on Mechatronic Systems*, 1091/1096 (2000)
- 8) K. Morioka and H. Hashimoto: Appearance Based Object Identification for Distributed Vision Sensors in Intelligent Space, *Proc. of the 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1, 199/204 (2004)
- 9) J.-H. Lee and H. Hashimoto: Controlling Mobile Robots in Distributed Intelligent Sensor Network, *IEEE Tran. on Industrial Electronics*, 50-5, 890/902 (2003)
- 10) K. Morioka, J.-H. Lee and H. Hashimoto: Human-Following Mobile Robot in a Distributed Intelligent Sensor Network, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 51-1, 229/237 Feb (2004)
- 11) P. T. Szemes, T. Sasaki and H. Hashimoto: Mobile Agent in the Intelligent Space which can Learn Human Walking Behavior, *Proc. of 2005 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1227/1232 (2005)
- 12) B. Brumitt, B. Meyers, J. Krumm, A. Kern and S. Shafer: EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments, *Proc. of the Int. Conf. on Handheld and Ubiquitous Computing*, 12/27 (2000)
- 13) S.S. Intille: Designing a House of the Future, *IEEE Pervasive Computing*, April-June, 80/86 (2002)
- 14) B. Johanson, A. Fox and T. Winograd: The Interactive Workspaces Project: Experiences with Ubiquitous Computing Rooms, *IEEE Pervasive Computing Magazine*, 1-2, April-June (2002)
- 15) 梅棹忠夫: 知的生産の技術, 岩波書店 (1969)
- 16) 久保田, 角, 西田: 「知球」: 持続的に発展可能な時空間記憶の構築, *情報処理学会研究報告*, 2004-HI-110, 1/8 (2004)
- 17) Tomohiro Fukuhara, Hideaki Takeda, Yasuyuki Kono and Masatsugu Kidode: Ubiquitous Memories: Wearable Interface for Computational Augmentation of Human Memory based on Real World Object, *Proc. of 4th Int. Conf. on Cognitive Science*, 273/278 (2003)
- 18) Jun Rekimoto, Yuji Ayatsuka and Kazuteru Hayashi: Augment-able Reality: Situated Communication through Physical and Digital Spaces, *Proc. of the Second IEEE Int. Symp. on Wearable Computers*, 68/75 (1998)
- 19) M. Niitsuma, H. Hashimoto, H. Hashimoto and A. Watanabe: An Architecture of Spatial-Knowledge-Tags to Access Memory of Human Activity, *Conf. of Japan Industrial Applications Society*, 2-S6-2 (2004)
- 20) M. Niitsuma, H. Hashimoto, H. Hashimoto and A. Watanabe: Spatial Human Interface in Working Environment -Spatial-knowledge-tags to Access the Memory of Activity-, *Proc. of the 30th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, TC5-5 (2004)
- 21) InterSense: <http://www.isense.com/>

[著者紹介]

新妻 実保子 (学生会員)



2003年東京工科大学工学研究科修士課程修了。2004年東京工科大学工学系研究科電気工学専攻博士課程入学, 現在に至る。移動ロボット, ヒューマンインタフェースの研究に従事。電気学会, 日本ロボット学会, IEEEの学生会員。

橋本 洋志 (正会員)



1988年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程単位取得後退学。同年早稲田大学理工学部助手, 90年東京工科大学専任講師, 95年助教授, 現在に至る。バイオロボット, サイバネティックインタフェース, デジタル空間, 福祉工学に従事。工学博士, IEEE, 電気学会, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会などの会員。

橋本 秀紀 (正会員)



1981年東京工科大学工学部電気工学科卒業。87年同大学院工学系研究科電気工学博士課程修了。工学博士。同年同東京工科大学講師(生産技術研究所)。90年同助教授, 現在に至る。89-90年MIT客員研究員。IEEE, 電気学会等の会員。