

第5章

視点共有型実画像通信支援システム: SharedView の試作

5.1 緒言

前章までの結果から、実画像通信を支援するためのシステムに必要な機能は以下の通りである。

1. 対話者同士が可能なかぎり同一の角度から同一の画像を見る、すなわち視点を共有させることで、実画像を厳密に共有できること。
2. 現場での利用を考え、人間の意志に基づいた視点の位置的な可変性が高いこと。
3. 被指示者の視点、作業を確認可能であること。
4. あいまい性の少ない、相互に共有されるシンボル化された視覚的な表現を実画像と同時に利用可能であること。また、この表現される共有空間の位置的な可変性が高いこと。

本章では、これらの機能を実現するために試作した装置、SharedCamera と HMD の構造、及びその基本的な性能に関して述べる。特に SharedCamera は、人間が対象物を見る時の、頭部と眼球の動作の特性に注目して、カメラの方向制御をおこなうものであり、コミュニケーションの人間側の特性に留意して開発したものである。

5.2 視点共有機構: SharedCamera

本論文におけるコミュニケーションでは、主として被指示者側のサイトに作業対象が存在する。従って、実画像を共有するということは、被指示者の見ている実画像を、指示者が共有するということである。対話者双方が被指示者の実画像を厳密に共有するためには、カメラが撮影する方向が、被指示者の視点にほぼ一致する必要がある。すなわち、被指示者の眼球に近い位置から、注視点に向かうベクトルにほぼ重なるような位置・方向にカメラを設置する必要がある。同時に、カメラの位置的な可変性を高くすることをも考慮すると、これを実現する最も簡単な方法は、被指示者の頭部にカメラを搭載し、装着者の眼球の位置とほぼ同じ位置から撮影するという方法である。このようにして、装着者の認識する対象物画像と同様の映像を遠隔地に送り、対象物に対してほぼ同一の視覚的認知を対話者同士に持たせることを目的としたツールが SharedCamera である。これは従来コンピュータ画面に対して実現されていた WYSIWIS (What You See Is What I See) を、実画像に対して実現しようとするものである。このカメラの効果として、可確認性も期待することができる。すなわち、対話者は、カメラの装着者が見ている場所や対象物、そしてその作業状況を実画像によって確認することが可能となる。

表 5.1: Panasonic WV-CD1 の定格

項目	WV-CD1
画素数	約 25 万画素 510(H)×490(V)
解像度	水平:330TV 本以上
外型寸法	
カメラヘッド部	直径 17mm×48mm
カメラ制御部	138(幅)×44(高さ)×169(奥行)mm
重量	
カメラヘッド部	約 20g
カメラ制御部	約 950g

頭部に搭載するカメラは、位置的な可変性を考慮して、小さく軽い物である必要があったため、親指大の小型カメラを選択した。小型カメラは Panasonic 製、固体カラー・テレビ・カメラ: WV-CD1 を使用した。定格を表 5.1 に示す。なお、使用したレンズ: WV-CD1U の視野角は、中心線から水平方向に 24 度、垂直方向に 18 度であった。

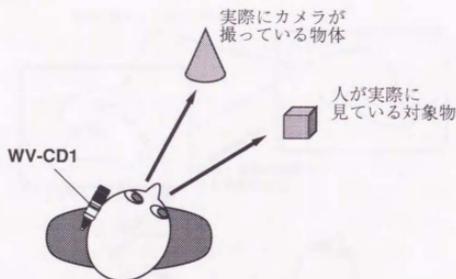


図 5.1: 頭部の向きと視線の向きとの違い

小型カメラ頭部に搭載するとき、単に頭部に固定して装着した場合、人間が実際に見ている対象物を撮影することが困難であることがわかった。なぜならば、人間が身体の前側の軸に対して斜めの方向にある対象物を見ようとする時、頭部のみならず、眼球をも回転させるからである。すなわち、カメラは対象物の存在する方向へ完全に向くことができないこととなる(図 5.1)。カメラを頭部に固定したままで対象物を撮影するためには、人間が意識的頭部の回転角度を調整して、カメラを対象物の方向へ向けなければならない。つまり、通常ある対象物を見る場合よりも、さらに頭部を対象物の方向へ回転させなければならない、人間にとって不自然な動作をおこなわなければならないことになる。この問題を解決する方法として、人間の眼球の動きを直接測定し、カメラが視線の方向を向くようにコントロールすることが考えられる。人間の視線を検出する方法としては、すでに数種類存在するが [Hiw88]、これらの装置は一般的に高価であることから、入手は容易ではない。精度の点から考えると、眼球が止まっている時間は通常 0.3 秒程度であることが知られており、その動きに忠実に対応してカメラをコントロールした場合、その画像は細かく振動し、かえって非常に見づらいものとなることが予想される。また、そのような制御をするためのモータ、センサ等を考慮すると、ある程度複雑な機構が必要となり、可搬性の高さを損なうことになる。すなわち、それほどの測定精度は不必要であり、視点の変動がカメラの視野に入る範囲内である場合には、カメラはコントロールされない方が良いと考えられる。

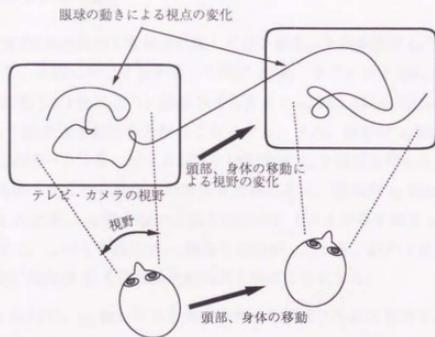


図 5.2: 視野移動と眼球、頭部、身体移動

人間は大きな視野の移動には頭部、あるいは身体自身をその方向に移動させ、ある程度の視野内での視点の移動には眼球運動を利用すると考えられるため(図 5.2)、細かい眼球運動による視線の移動に対してはカメラの向きは補正せず、カメラの視野の広さで補い、より大きな視野の移動に対して、カメラの向きを補正することが適当であろうと考えられる。以上の考察より、視線の検出、及びカメラの駆動機構に望まれる条件は、以下の通りである。

- 軽量である。
- 安価である。
- カメラを視線の変動に敏感に反応させず、視野の移動に追従する程度とする。

本節では、この問題点を解決するための機構を備えた頭部搭載型カメラ: SharedCamera に関して記述する。

5.2.1 注視方向と眼球の動き

まず、水平方向にのみ見回した場合に関して化んがる。人間が直立した時、背骨に沿った軸を z_b 軸とし、正面に対して水平右手方向に x_b 軸、水平正面方向に y_b 軸をとる。頭部を z_b 軸回りに図 5.3 上図のように回転させたとき、 y_b 軸と顔の正面方向のベクトルとがなす角度 α_h を頭部水平回転角と呼ぶこととする。また、眼球が z_b 軸回りに回転したとき顔の正面方向のベクトルに対する眼球の回転角度 β_h を眼球水平回転角と呼ぶこととする。次に、垂直方向にのみ見回した場合も同様に考え、頭部が x_b 軸回りに図 5.3 下図のように回転したとき、 y_b 軸と顔の正面方向のベクトルとがなす角度 α_v を頭部垂直回転角と呼ぶ。また、このとき眼球が x_b 軸回りに回転したとき、顔の正面方向のベクトルに対する眼球の回転角度 β_v を眼球垂直回転角と呼ぶこととする。

人間が x_b - y_b 面内で、 y_b 軸からある角度を持った位置にある対象物を見ようとする場合、見るべき方向へ完全に頭部を回転させず、無意識に眼球も回転させることによって、対象を見ることとなる。すなわち、図 5.3 において、 $\alpha_h + \beta_h$ の方向を見る場合、頭部は α_h しか回転せず、眼球がさらに β_h だけ回転することによって目的の方向を見る事が可能になる。ここで、 $\gamma_h = \alpha_h + \beta_h$ を水平目標角と呼ぶこととする。

同様のことが上下方向の視野移動に関しても確認された。すなわち、 y_b - z_b 平面内で $\alpha_v + \beta_v$ の方向を見る場合、頭部は α_v しか回転せず、眼球がさらに β_v だけ回転することによって目的の方向を見る事が可能になる。ここで、 $\gamma_v = \alpha_v + \beta_v$ を垂直目標角と呼ぶこととする。

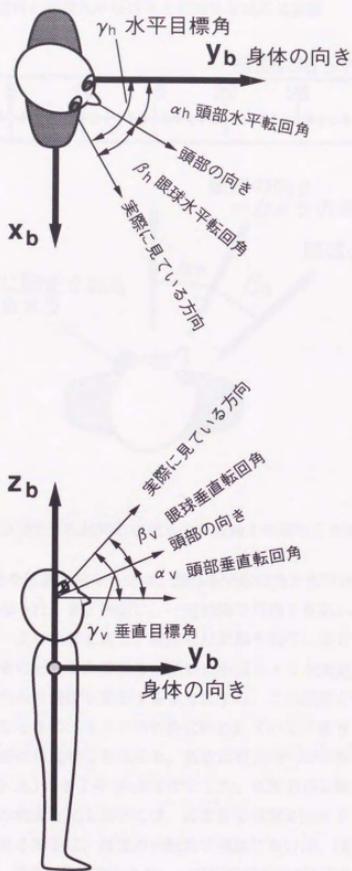


図 5.3: 頭部転回角と眼球転回角

5.2.2 頭部水平転回角と眼球水平転回角との関係を求める実験

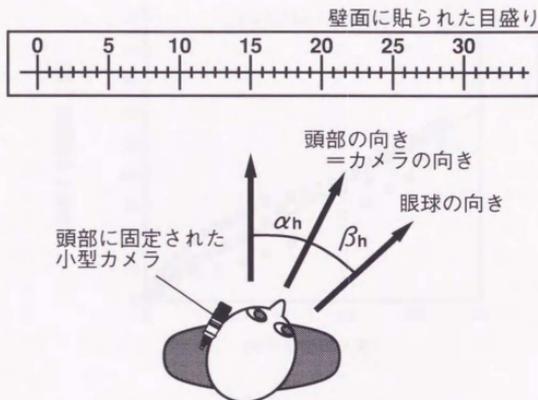


図 5.4: 頭部水平転回角と眼球水平転回角との関係を求める実験

x_h - y_h 平面内で適当な位置を見る場合の、頭部水平転回角と水平目標角との関係を求めるための実験をおこなった。まず壁面に、一定間隔で目盛りを刻んだ紙を水平方向に貼り、被験者は壁から一定の距離に座る。被験者は実験中椅子に座り、身体的位置、及び方向を変化させないものとする。被験者は頭部に小型カメラを固定し、カメラが被験者の頭部の向いている方向の映像を撮影するようにする。この状態で被験者にある目盛りを見るように指示したときに、カメラの中央に映されている目盛りを読み取ることにより、眼球の角度と頭部の角度の差を求める。測定は右方向への回転のみをおこなった。水平目標角 $\gamma_h (= \alpha_h + \beta_h)$ はおよそ 90 度までとした。体を自由に動かすことが可能であるときに、これ以上の角度を見る場合には、通常身体自信を回転させることが多いと考えられる。目盛りを見る順番は、頭部の回転角が増加する方向、減少する方向、あるいはランダムに指定し、目盛りを視認した後、一秒程度制止する(図 5.4)。被験者ごとにこれらのデータの平均値を求め、最小自乗法によって水平目標角: γ_h と頭部水平転回角: α_h の関係を求めた測定の結果を図 5.5 に示す。これより、水平方向の頭部の角度 α_h と γ_h の

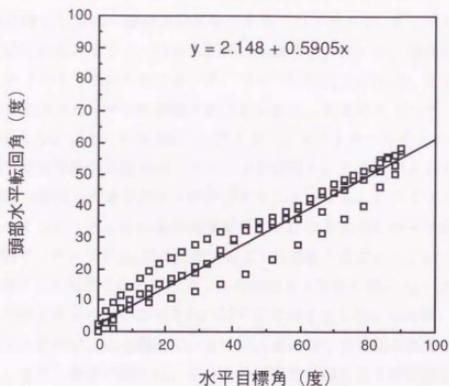


図 5.5: 水平目標角と頭部水平転回角の関係

関係は、ほぼ $\alpha_h = 0.59\gamma_h$ であった。

5.2.3 水平方向視点共有機構: SharedCamera H

SharedCamera は頭部に親指大の小型カメラを搭載することによって、装着者の見ている画像をそのまま遠隔地へ送ることを目的とした装置である。ところが前述の理由により、カメラを頭部に固定したのでは、実際に装着者が見ている方向を撮影することが困難となる。そこで、頭部水平転回角を検出して、頭部に搭載した小型カメラを、頭部に対してさらに β_h だけ回転させることによって、水平方向の視線方向とカメラが撮影する方向との角度差を減少させるための機構を考案し、これを SharedCamera H (Horizontal) とした。図 5.6 に SharedCamera H の機構の概観図を示す。ここで、 α_h と、カメラが回転する角度の比が 2 対 1 となるように、歯車 1 と歯車 2 のギア比を 2 対 1 とした。

図 5.7 に示されたスイッチ部は、スイッチ・アーム部にワイヤの一方が固定されており、もう一方が身体胸部に固定されている。SharedCamera H 本体は頭部に固定されているため、ガイド・シャフト、スイッチ・ベース部は頭部と同一の方向へ回転することとな

る。スイッチ・アームはガイド・シャフトには固定されていないため、スイッチ・アームは体の向きに対して常に一定の方向に保たれる。スイッチ1、スイッチ2はガイド・シャフトに固定されたスイッチ・ベースと共に回転する。従って、頭部が身体に対して回転すると、スイッチ・アームとスイッチ・ベースに回転差が生じ、スイッチ・アームがスイッチ1またはスイッチ2に接触することとなる。例えばスイッチ1に接触してスイッチが入れると、モータが回転し、ガイド・シャフトを、スイッチ1がスイッチ・アームから遠ざかる方向へ回転させ、スイッチが切れる。スイッチ2に接触した場合はモータが逆方向へ回転しやはりスイッチが切れることになる。このようにして、スイッチ・アームとスイッチ・ベースの相対角度が常に0になるようにモータが回転する。この回転をギア部で、カメラが β_h だけ回転するように調整することによって、カメラを γ_h の方向へ向けることが可能となる。ただし、今回はカメラを正確に γ_h へ向けることに重点はおかず、おおよそそちらの方向を向けば十分であるとした。これは、 α_h と γ_h の関係に個人差があるために、この機構では全ての人間に対して正確に角度を補正することは不可能であり、また、多少の誤差は、カメラの視野角で補うことが可能であると考えたからである。

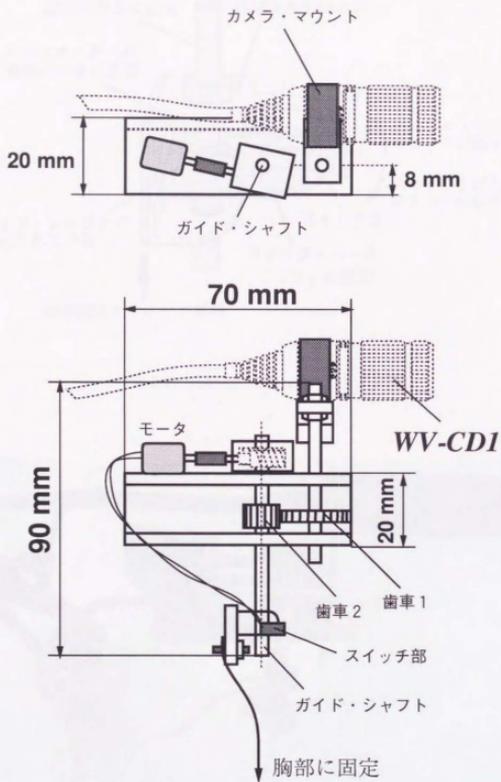


図 5.6: SharedCamera H の機構概観

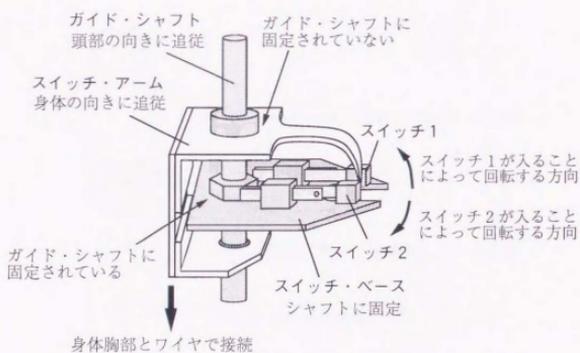


図 5.7: SharedCamera H スイッチ部

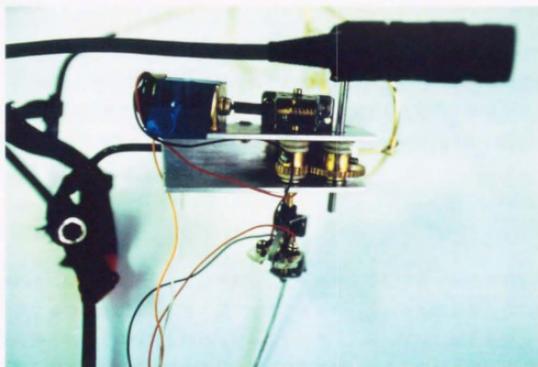


図 5.8: SharedCamera H

5.2.4 SharedCamera H の性能

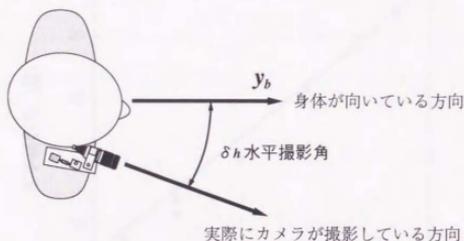


図 5.9: 水平撮影角度

SharedCamera H の静的な性能と動的な性能を調べるための実験をおこなった。ここで x_b - y_b 平面において、SharedCamera H が実際に撮影している画像の中央方向の軸が、 y_b 軸となす角度 δ_h を水平撮影角度と呼ぶこととする。

静的な追従性

前述の頭部水平転回角と眼球水平転回角との関係を求めた実験と同様の方法で、実際に見ている方向 (水平目標角) とカメラの撮影している方向 (水平撮影角) との関係を求めた。結果を図 5.10 に示す。この実験結果から、視野を変更してから 1 秒程度以上その視野を保持するような静的な見直し動作に対して、SharedCamera は十分に眼球の角度に追従することがわかった。

動的な追従性

人間が高速に視点を変更する必要がある場合、頭部水平転回角と眼球水平転回角との関係は静的な場合の特性から大きく変化する。すなわち、ある比較的離れた二対象を、交互に短時間に切替えて見なければならぬとき、人間は頭部の動きを少なくし、眼球の動きのみで両方の対象を見ようとする。たとえば、車を運転する際、バックミラーを見るときにほとんど頭部を動かさないことに気がつく。すなわち高周期で視点を変化させる場合には頭部水平転回角 α_h が減少し、眼球水平転回角 β_h が増加すると考えられ

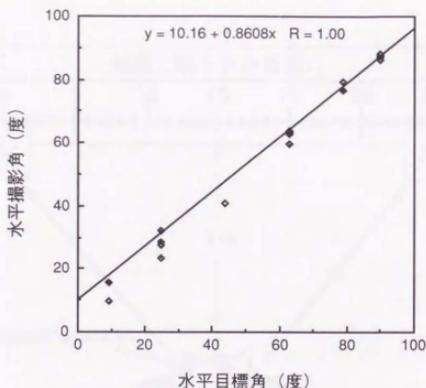


図 5.10: SharedCamera H の静的追従性

る。このような場合、SharedCamera H の効果は減少する。そこで、SharedCamera H の動的な追従性を検証する実験をおこなった。

被験者が見るべき対象として、壁面に「右」、「左」という二つの文字を、床から 120cm の高さに、水平方向に 3m の間隔を開けて貼り付けた。この視覚対象の間には等間隔の目盛をふる。被験者は視覚対象の中央、壁面から 1.2m、床から 1.2m の位置に目が来るように、椅子に腰かける。被験者は SharedCamera H を装着し、SharedCamera H の画像はビデオに記録される。実験の開始直前に被験者に視覚対象の中央の位置を見させ、その位置が SharedCamera H の撮影画像の中央の位置に来るように SharedCamera H の角度を調整しておく。被験者はメトロノームの音に従い、「右」と「左」を交互に一定周期で見る(図 5.11)。この時、モニター画面の中央に映っている目盛を読みとり、その時に SharedCamera H が向いている方向を算出する。このような実験方法において、視点変化の周期を変えたときの SharedCamera H の振幅を測定した。また、カメラを頭部に固定して同様の実験をおこなうことによって、視点変化の周期と頭部水平転回角との関係を求めた。実験値は、各周期毎に 10 回の振幅値を測定し、その平均から算出した。2 人の被験者の実験結果、及び標準偏差を図 5.12 に示す。この実験結果から、およそ一

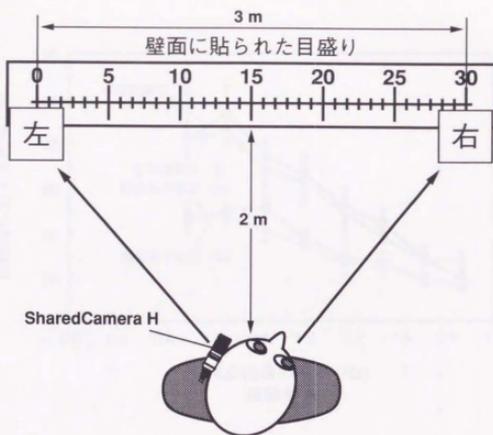


図 5.11: SharedCamera H の動的追従性実験

秒に一回以上の往復周期では極端に頭部水平転回角が減少し、従って SharedCamera H の追従性が劣化することがわかった。しかしながら、過度に速い眼球的運動にカメラが追従することは、かえって画像の見にくさを生じさせると考えられるため、あえて追従性を向上させることをおこなわない。眼球のみの運動による視点移動は、むしろ、撮影の視野角を広げることによって対応する方が良いと考えられる。

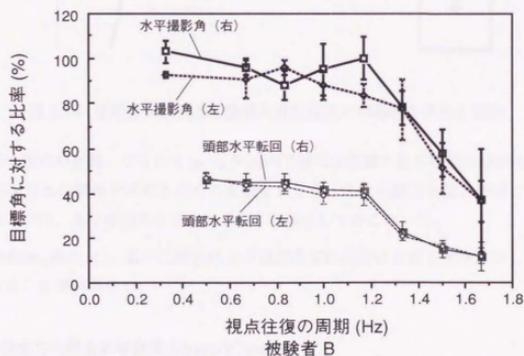
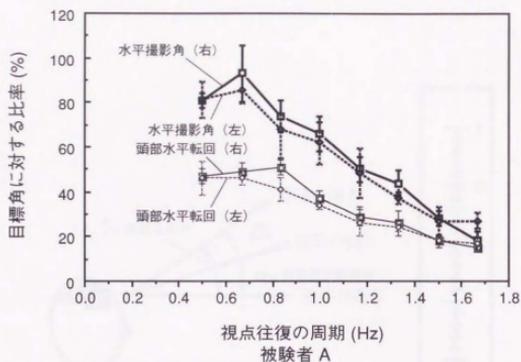


図 5.12: SharedCamera H の動的追従性

5.2.5 頭部垂直転回角と眼球垂直転回角との関係を求める実験

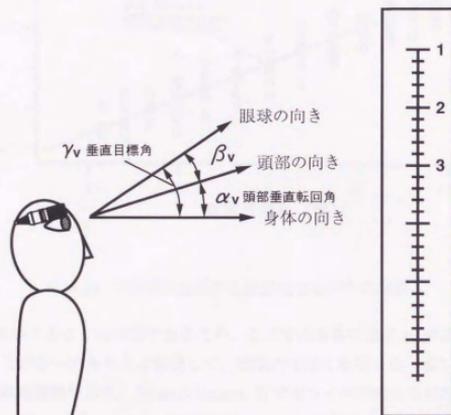


図 5.13: 頭部垂直転回角と眼球垂直転回角との関係を求める実験

縦方向の視点の移動、すなわち y_0-z_0 平面内で適当な位置を見る場合の頭部垂直転回角と垂直目標角との関係を求めるための実験をおこなった。実験方法は、壁面に縦方向の目盛を貼りつけ、水平転回角を求めた場合と同様にしておこなった。

実験の結果 (図 5.14)、最小二乗法により頭部垂直転回角は垂直目標角に対して約 0.44 倍回転することがわかった。

5.2.6 垂直方向視点共有機構: SharedCamera V

垂直面内における視線方向とカメラが撮影する方向との角度差を減少するための機構を考案し、SharedCamera V (Vertical) と名付けた。SharedCamera H と同様の機構に

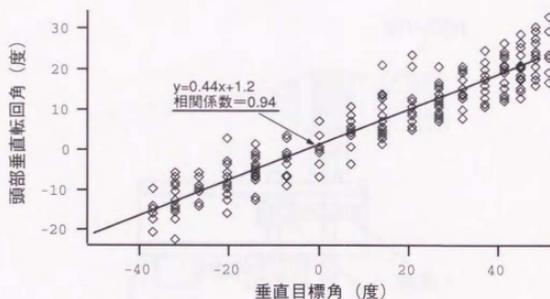


図 5.14: 頭部垂直転回角と眼球垂直転回角の関係

よって α_e を検出することは困難であるため、ここでは身体の向き y_b がほぼ水平方向を向いていることが多いであろうと仮定して、機構の簡素化を図った。図 5.15 に Shared-Camera V の概略機構を示す。SharedCamera H ではワイヤの振れを利用してスイッチを操作したが、SharedCamera V では振り子によって水平方向に対する頭部転回角 α_e を検出する。つまり、頭部が前後に傾くのに対して、振り子は常に鉛直方向を向こうとするため、スイッチが入られることになる (図 5.16)。SharedCamera V は、機構を簡素化したために高い性能を望むことはできない。また、カメラに利用されているコードにが硬いために、カメラを駆動するためにはある程度のトルクが必要であるが、モータの性能が十分ではないため、このトルクを得るためには歯車 1 と歯車 2 のギア比が制限される。そこで、機構の簡素化、及び軽量化も考慮し、歯車 1 と歯車 2 のギア比は Shared-Camera H と同様、2 対 1 のままとした。

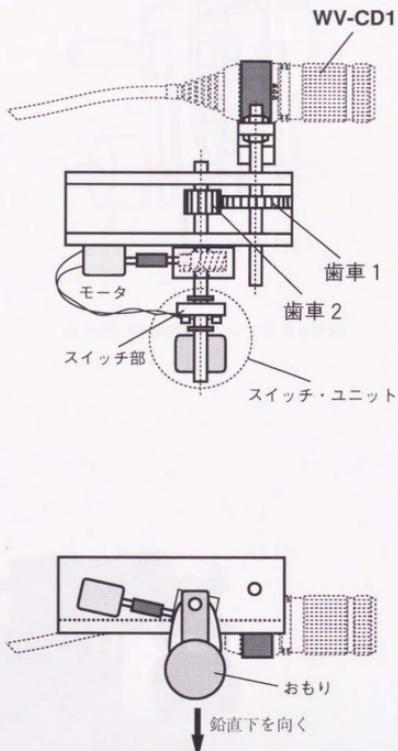


図 5.15: SharedCamera V の機構概観

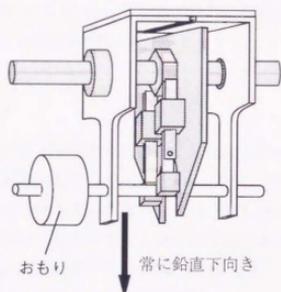


図 5.16: SharedCamera V スイッチ部

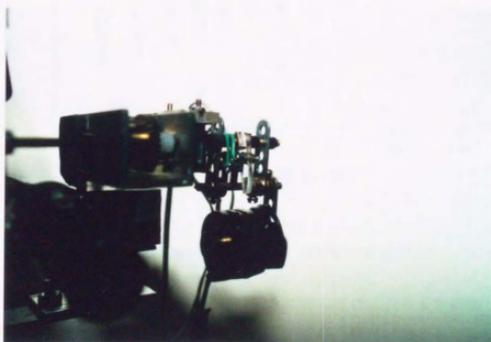


図 5.17: SharedCamera V

5.2.7 SharedCamera V の性能

ここでは、SharedCamera V が y_b-z_b 平面内で実際に撮影している画像の中央方向の軸が、 y_b 軸となす角度 δ_v を垂直撮影角と呼ぶこととする。

静的な追従性

SharedCamera H の場合と同様の方法によって、SharedCamera V の静的な性能を調べる実験をおこなった。実験方法は、SharedCamera H において静的な追従性を求めた場合と同様である。実験は下向きのみをおこなった。図 5.18 に、実験によって求められた垂直目標角と垂直撮影角との関係を示す。最小二乗法により、 $\delta_v = 0.76\gamma_v - 3.2$ となった。小型カメラの垂直方向の視野角は 18 度であるため、グラフより、垂直目標角 - 70 度程度までは撮影画像内に捕えられる可能性が高い。

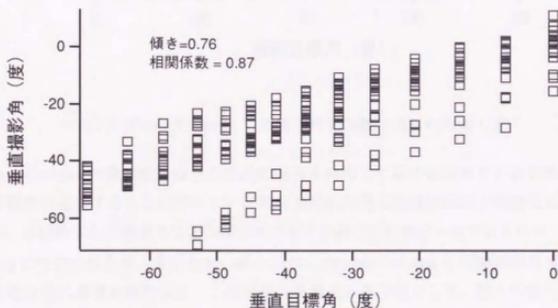


図 5.18: SharedCamera V の静的な追従性

SharedView V はその機構上、頭部の速い動きに対しては、振り子が振動してしまうために、動的な視点移動に対しては追従性が非常に悪く、測定はおこなわなかった。しかしながら、本論文における利用においては、上下方向にそれほど高周期で視点を移動することがなく、振動は問題になるほど発生しなかった。

5.2.8 SharedCamera の性能に関する考察

個人差

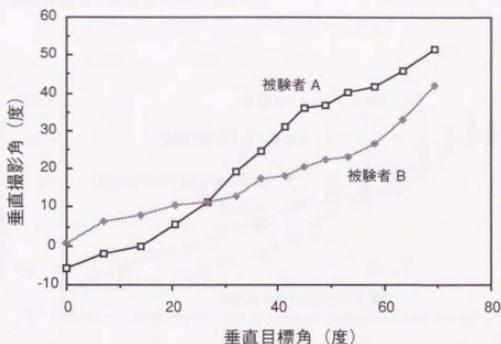


図 5.19: SharedCamera V の静的性能実験に見られた個人差

SharedCameraの角度補正は単に頭部転回角を利用しておこなわれているために、正確に目標角に追従することはできない。特に頭部転回角と眼球転回角との関係は個人差があり、今回作成した機構では頭部転回角に対する補正の比率が一定であるため、SharedCameraの有効性にも個人差がある。図5.19に、SharedCamera Vの静的性能実験で見られた個人差の顕著な例を示す。この問題を解決する方法として、個人の特性に合わせたギア比を選択する方法、アイ・トラッキングによって正確に眼球の動きを捉えることが考えられるが、最も簡単な解決方法はカメラの視野角を広げることである。

見方による特性

同一の人間であっても頭部転回角と眼球転回角との関係は必ずしも一定ではない。頭部垂直転回角と眼球垂直転回角の関係を求めるための実験では、垂直目標角を徐々に増加させた場合、減少させた場合、ランダムに指定した場合の三通りで垂直目標角を指定した。図5.20に、それぞれの方法による実験結果の相違の例を示す。図からわかるよう

に、目標角が増加する場合と減少する場合とではヒステリシスが存在する上、ランダムに目標角を指定した場合にはまた異なる特性を示しており、同一の目標角に対して頭部垂直転回角に15度も差を生じる場合もあった。この問題の簡単な解決法としては、やはりカメラの視野角度を広げることが考えられる。

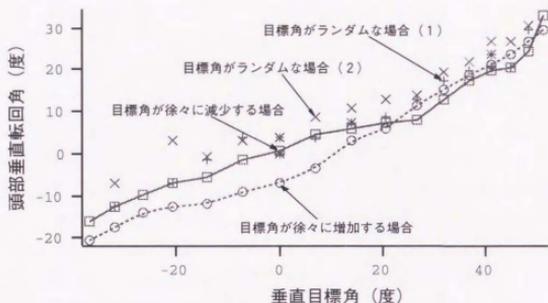


図 5.20: 垂直転回角測定実験に見られた、見方による特性例

SharedCamera で撮影された画像の見やすさ

SharedCamera で撮影された画像は、人間の頭部の動きに応じて変動するため、人間が頭部を頻繁に動かす場合には、画像が振動して見づらいのではないかとという疑問が生じる。しかしながら、人間が見回す動作をおこなう場合、動的な追従性実験からもわかるように、高周期の振動に対しては眼球が優先的に動くようになるため、頭部はそれほど高周期で振動することは少ない。事実、SharedCamera を利用して撮影された画像を見て、振動が多いために不快に感じることは多くない。

SharedCamera のその他の実現方法

SharedCamera の原理は頭部転回角のみから眼球転回角を推定するというものである。従って、VPL 社の Polhemus Sensor を利用して、頭部転回角を測定することも可能で

あり、この場合、より正確な制御が可能となる。また、駆動系をコンピュータ制御にすることによって、個人差などに柔軟に対応することが可能である。しかしながら、このような機構は、複雑化し、重量が重くなり、コストが高くなるという欠点がある。従って、本研究では、安価で軽量の機構を採用し、不正確さはカメラの視野で補うという考え方をとった。この他にも直接眼球の方向を測定して、カメラをコントロールすることも考えられるが、やはりコスト、重量の点で問題が残る。

5.3 頭部搭載型ディスプレイ

手振り、あるいは動作指示カーソルのように、コンピュータによって作られるシンボル表現を実画像にスーパーインポーズして表示し、これを指示画像とすることが有効であることは、前章までの実験及び考察により明らかである。ところで SharedCamera は、装着者が見ている実画像をそのまま遠隔地へ送るための装置である。従って、例えば Shared-Camera を装着した被指示者が遠隔地からの指示画像を見るために、ある位置に設置されているディスプレイを見ると、遠隔地に送られる実画像はそのディスプレイ自身となってしまう。すなわち、その時点で遠隔地に作業対象の実画像を送ることができなくなる。手振りは作業対象物画像に重ねて利用される必要があるため、指示を受けている間は常に対象物の画像が撮影されていることが必要である。また、作業場所が大きく変化する場合には、位置的にディスプレイを見ることができなくなる可能性もある。これらの理由により、固定して設置されたディスプレイを使用した場合、共有作業空間を維持することが困難となる。そこで、対象物を見つつ、視線の移動のみで作業指示画面を見ることができるよう、頭部搭載型ディスプレイ (HMD) を採用し、SharedCamera と併用することとした。図 5.21 上部に HMD の概観を示す。また、HMD の諸元を表 5.2 に示す。画像の表示部には SONY 製の 8mm ビデオカメラ (CCD V8) のビューファインダを利用している。このビューファインダに表示された映像はフレネルレンズを通り、鏡に反射することによって、目から 400mm の位置に 8inch 程度の大きさで結像することになる。HMD を SharedCamera と組み合わせて利用した場合のセットアップ例を図 5.21 下部に示す。このような組み合わせでは、被指示者が手振りによる指示を見る場合には、視線を上部に移動してビューファインダの画像を見、実際に作業をおこなう場合にはより鮮明な画像、及び距離間隔を必要とするために、視線を下部に移動して肉眼で対象物を見ることとなる。ここで、この HMD と SharedCamera を組み合わせたシステムを Shared-View と呼ぶこととする。組み合わせた場合の重量は、約 1.15Kg である。

表 5.2: 頭部搭載型ディスプレイの諸元

ビューファインダの水平解像度	300 本程度
フレネルレンズ焦点距離	61 mm
仮想画面サイズ	8 inch
結像距離	400 mm

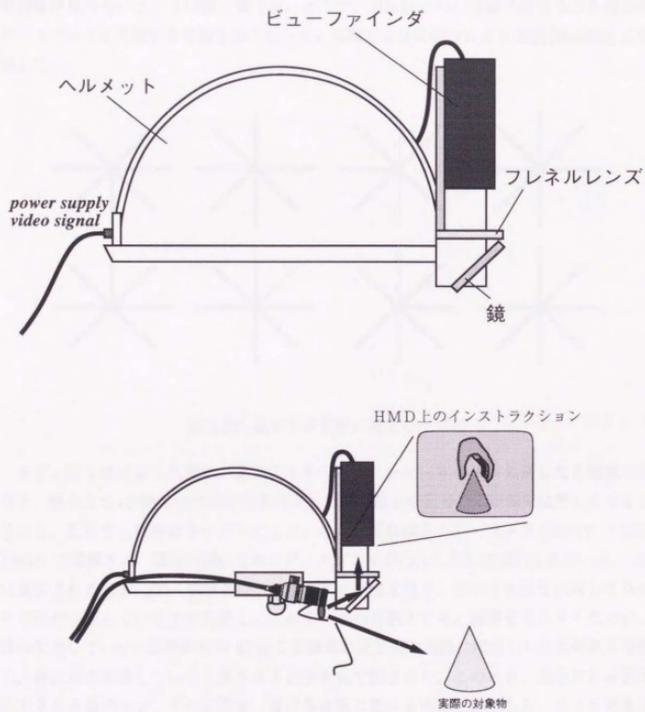


図 5.21: 頭部搭載型ディスプレイ (HMD) の概観図

5.3.1 頭部搭載型ディスプレイの見やすさの評価

フレネルレンズを通した画像は通常のレンズを通した場合よりもぼやけるため、本HMDの画像は見づらいという印象を受ける。そこで、HMD上の実画像の見づらさを通常のディスプレイと比較する実験をおこなった。実験方法は馬場らによる方法 [Bab90a] に準拠した。

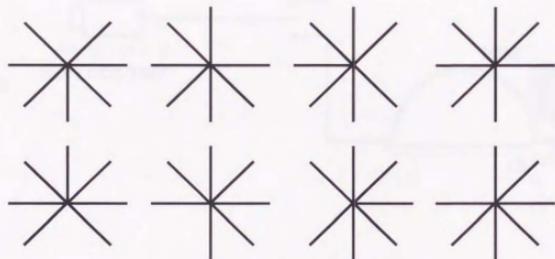


図 5.22: 見やすさ実験に利用した記号

まず、図 5.22 に示した様に、星型の 8 本のいずれかの一本の棒が欠落した 8 種類の記号を、紙の上に 42 個描いた記号表を作成した。8 種類の記号の出現頻度は等しくなるようにし、配列する順番はランダムにした。この記号表はテレビ・カメラ (SONY, CCD-TR55) で撮影され、通常の固定されたディスプレイ (SONY, KX-20HF2) あるいは、HMD に表示される (図 5.23)。被験者は、表示された画像を見て、すべての記号に対して各々の棒が欠落しているかを回答し、これを一回の実験とする。回答を記入するために、棒の欠落していない星型の記号 48 個を実験用の記号表と同様に配置した回答用紙を用意し、各記号の欠落していると思われる部分を丸で囲ませた。このとき、表示される記号の大きさを変化させ、その誤答率、及び各実験に要する時間を測定した。カメラの水平解像度は 250 本程度、KX-20HF2 の水平解像度は 350 本程度、HMD のビューファインダの水平解像度が 300 本程度であることから、表示装置での解像度は、主にカメラの水平解像度によって支配されていることになる。従って、ここでは HMD の画像をフレネルレンズ、鏡を通すことによる見やすさの劣化の程度を測定できていると思われる。

図 5.24 に、記号の大きさの比 (カメラのズーム比) と、KX-20HF2 あるいは HMD を利

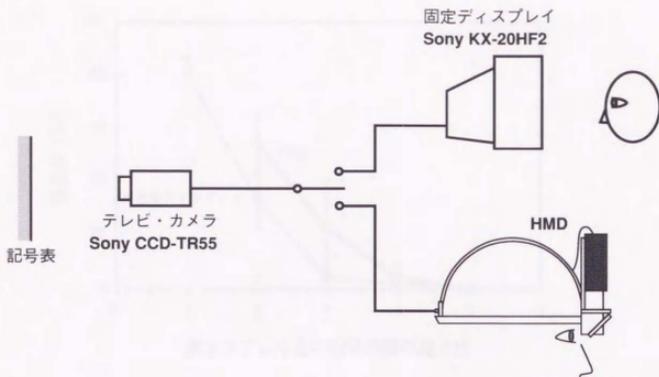


図 5.23: 見やすさ実験の装置

用した場合の誤答率との関係を示す。NTSCの走査線数が525本であるため、誤答率10%程度のときの記号の大きさはKX-20HF2上で走査線約9本分、HMD上で走査線約13本分である。この結果から、ディスプレイ上で認識が困難になるような小さい記号が表示された場合、同様の認識率を得るためには、HMDを利用した場合は、KX-20HF2を利用した場合と比較して、面積の比にして約2倍の大きさに撮影しなければならないことがわかった。また、一回の実験に要した時間を比較すると、1記号の占める走査線数が同じである場合、HMDの方が1.3倍程度の時間がかかることがわかった。ただし、同様の認識率が得られる場合の認識時間はほぼ等しい。

より理解しやすい指標として、SharedViewによる実画像の見やすさを、人間の視力と比較してみた。被験者はSharedCameraを装着し、視力検査表を見る。視力検査表は、承認番号 東葉 第639号 DR. LANDOLT'S INTERNATIONAL RING TEST-TYPE CHART FOR 3 METERを使用した。このときのSharedCameraの画像をHMDで見た場合と、固定されたディスプレイで見た場合とで、どの程度記号が読みとれるかを測定し、人間相当の視力とした。実験の結果、HMDで0.15、固定ディスプレイで0.2であった。

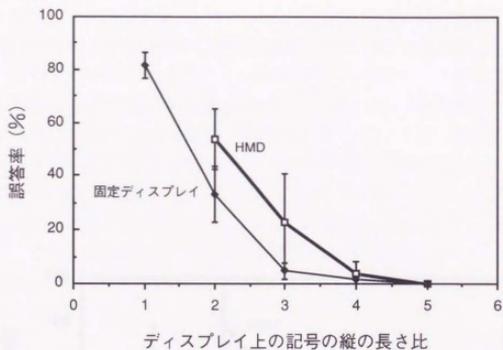


図 5.24: 記号の大きさと誤答率の関係

以上の結果より、HMD 上の画像の方が、通常の固定式のディスプレイ上の画像と比較して見づらいことがわかった。ただし、十分に記号が大きい場合、あるいは小さい場合には誤答率、認識時間ともほぼ同様の値となることが予想される。

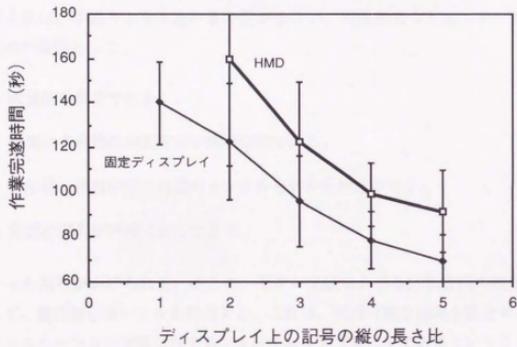


図 5.25: 記号の大きさと回答時間との関係

5.4 動作指示カーソル

モデル作業実験での対象物の回転指示において、手振りを実画像にスーパーインポーズさせて作業指示をおこなう方式では、手振り表現のあいまい性から、その認識が困難となる場合があることは前述した。指示される回転方向は6種類のみであるため、本来非常に少ない情報量で回転方向を伝達可能なはずである。また、位置指定表現に関しても、ディスプレイ上でおこなう指さしは対象物の特定が困難であるため、より明確にボイティングがおこなえることが望ましい。表4.1に見られるように、手振りによっておこなわれる表現は、モデル作業においては33%が回転方向の表現、67%が位置の表現であり、この2種類の表現の支援が特に重要である。従って、モデル作業の支援に限って考えれば、手振りよりもあいまい性が少ない、視覚的なコミュニケーションを支援するための条件として、

- 視覚的な符号である。
- 明確に6種類の回転方向が識別可能である。
- 指示者、被指示者に共通のメンタルモデルを生起させる。
- 位置の表現が明確におこなえる。

といった項目があげられる。そこで、モデル実験における回転方向の視覚的な表現手段として、動作指示カーソルを採用する。これは、利用可能な表現を限定するものであり、コミュニケーション支援に対するフォーマルなアプローチであるといえることができる。

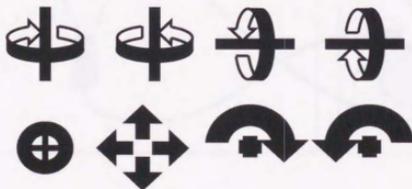


図 5.26: 動作指示カーソル

5.5 SharedView の予備的な評価

本小節では本章において紹介した SharedView の性能の予備的な評価をおこなう。

5.5.1 視野の広さと位置指定の容易性

現在 SharedCamera に使用されているレンズは視野角が比較的狭い上、被験者が対象物に手の届く範囲まで接近した状態で作業をおこなう場合が多いことから、作業空間全体を写すことができなくなり、画像内に表示されていない対象物の位置指定がおこないづらくなる。ある広がりを持った作業空間に対して、視野角の大きさが位置指定のためのコミュニケーションに与える影響を調べるための実験をおこなった。

実験方法

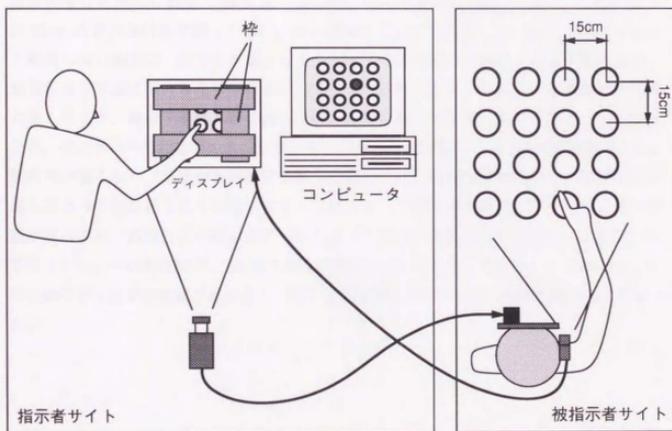


図 5.27: 視野角の広さと位置指定の容易さを調べる実験

図 5.27 のように、被指示者は SharedView を装着する。SharedCamera の画像は指示

者のいるサイトのディスプレイに表示される。そのディスプレイを再びテレビカメラによって撮影し、その画像を被指示者のHMDに表示する方式によって[TM90]、指示者がディスプレイ上で手振りを利用すると、それがSharedCameraの画像にスーパーインポーズされ、HMD上に表示されることになる。被指示者のサイトには平面上に半球を15cm間隔で4行4列、計16個を作業空間に配置し、この作業面が垂直になるように立てられる。コンピュータによって16個の半球の内1個がランダムに選択され、指示者に示される。この指示は指示者がコンピュータのキーボードのキーを押す毎に一箇所与えられる。指示者はその半球の位置を、手振り、言語を自由に利用して被指示者に伝えることが許されている。被指示者は伝達された半球の位置を理解したことを、その半球に触れることによって指示者に伝える。指示者は、被指示者のこの動作を見ることによって情報伝達の成功を確認する。このとき、指示者側のディスプレイ画面を枠で覆い、徐々に画面の大きさを小さくすることによって、視野角の減少を模擬する。指示者側のディスプレイ(SONY, KX-20HF2)の画面の大きさは20インチであった。視野角は:(条件1)枠を利用しなかった場合、(条件2)一辺30cmの正方形の枠で覆った場合、(条件3)一辺15cmの正方形の枠で覆った場合、の3種類の大きさを利用した。被指示者は枠を全く利用しない場合に、全ての半球がちょうどカメラの視野内に撮影される位置に座る。被指示者が半球に触れるたびに身体が作業空間に近付くため、撮影される範囲が一時的に狭くなるが、被指示者は半球に触れた後、直ちにもとの位置に頭部を戻すこととしたため、それぞれの位置表現の直前には、常にほぼ一定の距離から作業空間が撮影される。視野角が狭くなり、半球が全部撮影されない場合には、実験の開始時のみ、被指示者が最も左上の半球を見るように指示する。これによって指示者側のディスプレイにその半球が表示され、初期位置が指示者にわかるようにした。被験者は工学部の4年生以上の学生とした。一回の実験で、10個の半球の指示をおこなった。さらに、一人あたり、一つの条件で3回ずつ実験をおこない、計9回の実験をおこなった。被験者数は5人であった。

実験結果

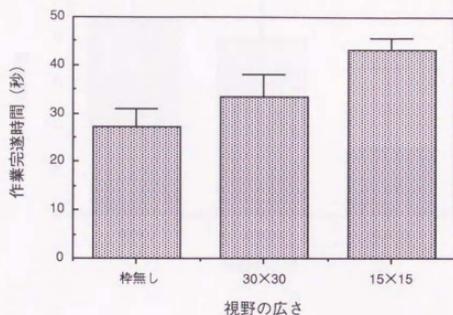


図 5.28: 視野の広さと位置指定時間

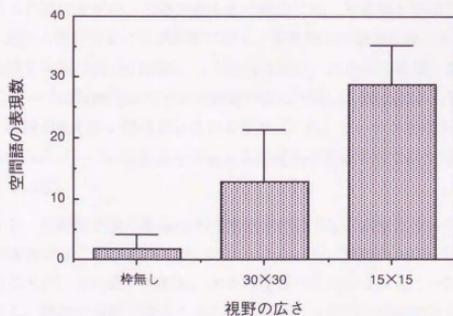


図 5.29: 視野の広さと空間語の使用数

1 回の実験に要した時間、利用された言語表現数、及び手振り表現の回数を測定した。図 5.28 に、視野の広さと作業時間との関係を示す。視野が狭いほど位置指定に要する時

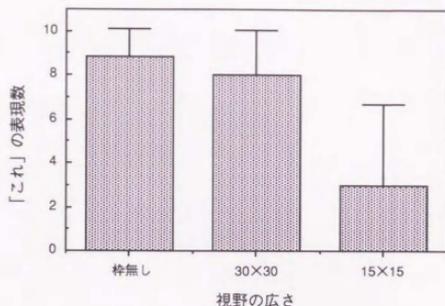


図 5.30: 視野の広さと「これ」の使用数

間が増加することがわかる。図 5.29 に、視野の広さと、半球の位置を表現するために利用された空間語の数の関係を示す。また、図 5.31 に、視野の広さと、指示者が指さしを利用した回数との関係を示す。視野が最も広い場合には、対象物を直接指さしながら、言葉では「これ」と指示することが非常に多く、位置指定対象物の数に対して約 90% の確率でこの表現を利用した (図 5.30)。「上から 3 列目、右から 2 番目」といった表現は非常に少なく、一つの対象物あたりの空間語の数は平均 1.8 個程度にすぎなかった。しかしながら、視野が最も狭い場合にはこのような「これ」という単語の利用は約 30% に減少し、その代わりに一つの対象物を指定する空間語の数は平均で約 28.67 個と、10 倍以上に増加している。

この結果から、視野角が狭くなるほど作業効率が低下し、必要となる空間語の数や、手振りの数が増加することがわかった。これらの点から、視野角が広いほど位置の指定が容易であることが示された。ただし、ある程度以上広角になると、一対象物あたりの画素数が減少し、認識が困難となるため、例えばスイッチの目盛が読みとれないなどの弊害が生じると考えられ、これは既におこなった、HMD の見易さの評価結果からも明らかである。従って、視野角を決定する場合には、見るべき対象の大きさと、対象物の空間的な広がりとから、視野角と解像度とのトレードオフを考慮する必要がある。

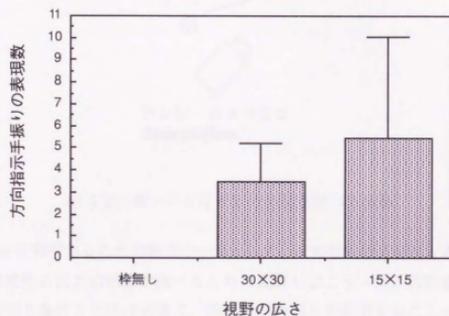


図 5.31: 視野の広さと方向指示の手振りの使用数

5.5.2 作業空間の広さに対する SharedView の位置的変異性の効果

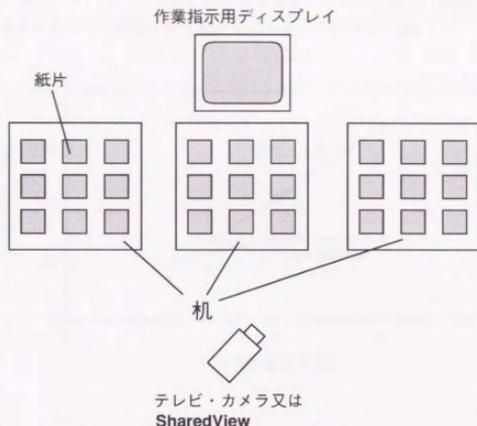


図 5.32: ポータビリティの効果を調べる実験

SharedView を利用することの利点の一つとして、その位置的変異性があげられる。そこで位置的変異性の高さの効果を調べるための実験をおこなった。通信条件は、モデル作業実験における条件3とはほぼ同様で、指示者が手振りを利用することができる。本実験における作業は以下の通りである。まず、適当な数字を片面に記入した紙片を、机の上に三行三列に並べ、全ての紙片をあらかじめ裏返して、数字が見えないように置いておく。指示者は遠隔地から、ある紙片の位置を被指示者に対して伝達し、被指示者は指定された紙片を裏返す。この紙片の位置はあらかじめ定められている。指示者は被指示者によって裏返された紙片上の数字を、ディスプレイ上で読みとる。一回の実験で、この作業をある定められた回数おこなう。このとき、紙片がおかれる机が1つの場合から3つの場合まで変化させた。各机の上にはそれぞれ三行三列の紙片が置かれることになる。机が2つ以上ある場合には、一回の実験で、裏返す紙片が適当に各机に分散するようにした。通信の条件として、SharedView を利用した場合と、三脚にテレビ・カメラを固定し、三脚上でカメラの向きを変えることを許した場合とで実験をおこなった。固

定式のカメラを利用した場合には、被指示者用のディスプレイは作業領域全体の中央付近の机の上に置かれる。また、指示者に数字を読みとらせるために、被指示者がカメラを操作することによって、画像の拡大縮小をおこなうことを許した。

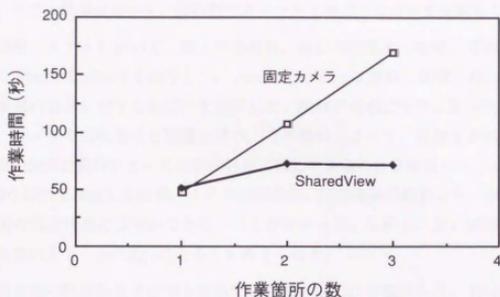


図 5.33: 作業箇所数と作業完了時間との関係

実験結果 (図 5.33) から、三脚にテレビ・カメラを固定した場合には、SharedView を利用した場合と比較して、作業箇所が増加するに従って、作業完了時間が大きく増加していくことがわかる。従って、作業空間が広がるほど、位置的可変性の作業効率に対する効果が大きくなると考えられる。

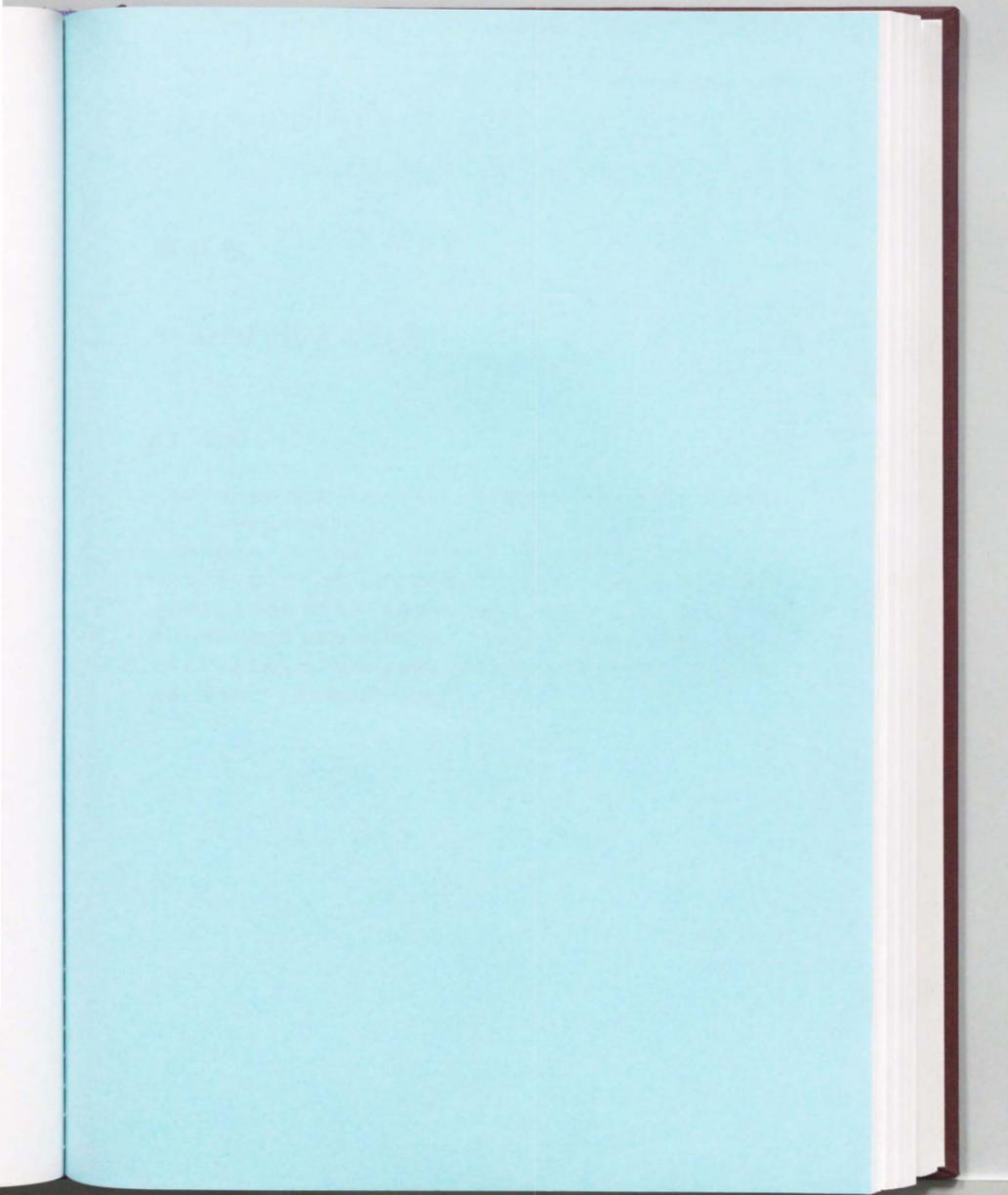
5.6 本章のまとめ

空間型共同作業におけるコミュニケーションを支援する実画像通信システムとして、SharedCameraを考案し、これとHMDを組み合わせたシステムをSharedViewと名付けた。また、モデル作業において、動作指示カーソルを利用することを提案した。

実画像通信システムにおいて、視点の共有性、視点の位置的変異性、可確認性を実現するためにSharedCameraを製作した。SharedCameraは頭部に搭載された小型カメラであり、頭部の身体に対する転回角を利用して、眼球の頭部に対する転回角に相当する角度だけ、カメラを回転させる機構を持つ。この機構によって、装着者が見ている対象物を、人間の自然な動作によって比較的容易に撮影できることを確認した。SharedCameraの動的な特性を測定した結果、人間の頭部運動、眼球運動の特性から、現在の機構では高い周期の視点移動には対応できないことがわかった。しかし、高い周期に対応させることは画像の見づらさの原因になるとも考えられる。

共有作業空間の位置的な変異性を実現するためにHMDを製作した。HMDは解像度の点では据え置き型のディスプレイよりも劣ることがわかった。SharedCameraと組み合わせたシステムであるSharedViewは、現システムでは視野角が限られているため、ある程度以上広い作業空間での作業を扱う場合には、位置指定表現の伝達の点でコミュニケーションの効率が悪くなる可能性があることがわかった。ただし、SharedViewは位置的変異性の点で、固定的なシステムと比較して、作業効率に対して有効だった。

手振りのあいまい性を補うために、モデル作業実験に対して、動作指示カーソルを利用することを提案した。



第 6 章

SharedView の利用

6.1 諸言

本章では、前章で記述した SharedView、及び動作指示カーソルを空間型共同作業に利用し、その有効性の評価をおこなう。第 1 節においては、モデル作業に対し、SharedView、及び動作指示カーソルを利用する。第 2 節では、MC の遠隔操作指示に SharedView を利用し、テレビカメラ、ディスプレイが固定されている場合と比較して、視点の共有性、可変性の面で有効性であることを確認する。最後に、第 3 節において、研究室内に設置された機器の設定を遠隔地から指示するという実験に SharedView を利用し、固定されたシステムと比較して、視点の共有性、位置的可変性、共有作業空間の位置的可変性、可確認性の点で、より有効であることを示す。

6.2 モデル作業への利用

6.2.1 動作指示カーソル (MIC)

実験

前章で示した動作指示カーソルは6通りの回転方向を示しており、モデル作業における動作指示、すなわち回転方向の指示の表現に手振りの代替として利用することによって、あいまい性を減少させ、コミュニケーションを円滑にすることができると考えられる。そこで、モデル作業指示に動作指示カーソルを利用した実験をおこなった。通信条件は以下の通りである。

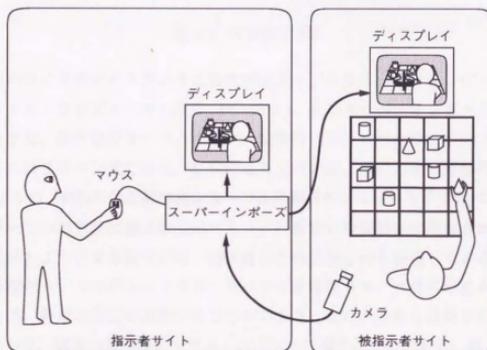


図 6.1: 動作指示カーソルを利用したモデル作業指示の実験装置

条件 5[遠隔・固定・MIC] 基本的にはモデル作業における条件 4 の設定と同じであるが、手振りを利用せず、被指示者側のモデル作業空間を撮影した実画像上に動作指示カーソルをスーパーインポーズし、その画像を再び被指示者サイトに送信する(図 6.1)。以後、この通信条件を「遠隔・固定・MIC」と表現する。

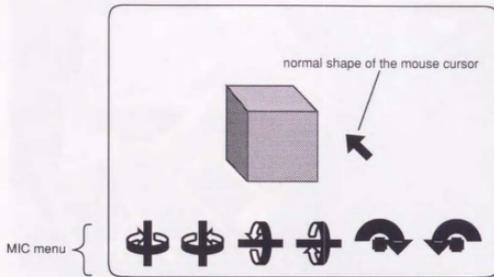


図 6.2: 作業指示画面

指示者側のサイトのディスプレイに動作指示カーソルをスーパーインポーズするため、パーソナル・コンピュータ (NEC, PC-9801)、及びスーパーインポーズ・ボードを利用する。また、動作指示カーソルの選択、位置のコントロールのためにマウスを利用する。マウスは 2 ボタン式であり、左右にならんでいる。指示者側の画面の下方には図 6.2 に示すように、利用可能な動作指示カーソルの形状がメニューとして並べられている。マウスのカーソルの形状は通常は矢印であり、対象物の位置指定に利用される。ある回転方向を指示しようとする場合には、指示者はその回転方向を表現していると思われる形状の動作指示カーソルの上にマウス・カーソルを移動させ、マウスの左ボタンを押すことによって、特定の形状を選択することができる。また、任意の場所で右ボタンを押すことによって、通常の矢印型のマウス・カーソルに戻すことができる。図 6.3 は作業指示画面の写真である。

動作指示カーソルの形状は、モデル作業空間の正方向に向かって、斜め左後方から見た画像に対して適した形状となっていることから、本実験装置ではテレビカメラを固定して設置する方式を採用し、やや左斜め後方より撮影することとする。指示者、被指示者の組み合わせは 9 組であり、いずれも工学部機械工学科の 4 年生以上の学生であった。

実験結果

図 6.4 に、品詞解析の結果の平均値と、標準偏差を示す。グラフの x 軸で、「代」は代



図 6.3: 作業指示画面の写真

名詞、「修」は修飾語をあらわす。さらに、「(動)」は動作・操作表現、「(位)」は位置表現に利用された品詞であることを示す。また、図 6.5 に、機能解析結果の平均値と標準偏差を示す。このグラフの x 軸で、「動作」は、動作・操作表現を示す。この結果から、特に位置指定表現が対面・手振り有り以下にまで減少していることがわかる。これは矢印型のマウス・カーソルの先端が細いために、対象とする位置、立体を明確にさし示すことが可能だったためであると思われる。対面の場合では、指示者が対象物に直接指さしをおこなうことができるにもかかわらず、指さし動作よりも、言語によって記述的に表現する場合が比較的多く観察された。これは、作業空間がある程度の広さを持っているため、指示者が身体を動かしてさし示すよりも、言語を多用する方法を選択する場面があるためであると思われる。また、動作に関する修飾語の表現数も対面・手振り有りと同程度まで減少している。このことから、回転方向の表現に対して、動作指示カーソルが対面で手振りを利用した場合と同程度に有効であったことがわかる。一方、動詞の数はわずかに増加している。これは、手振りが手の動きによって、その動作を同時に表現することができるのに対して、動作指示カーソルが静的な図形であることが原因であるとも予想される。ただし、本実験結果からは明言することはできない。

図 6.13 に各通信条件におけるモデル作業の平均完遂時間を比較する。この結果からは動作指示カーソルによる時間短縮は見られないが、これは主にマウス操作、及び下に並

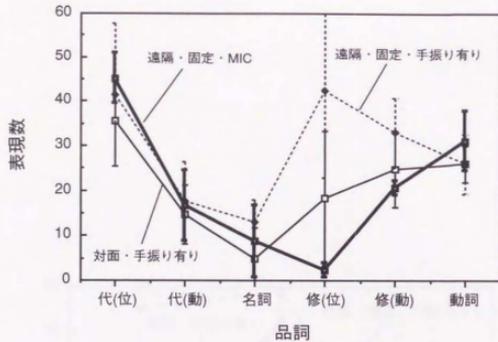


図 6.4: 動作指示カーソル利用時の品詞解析

べられた動作指示カーソルのメニューから適当な図形を選択するために要する時間が大きいと考えられる。作業を記録したビデオから、マウスによって動作指示カーソルを選択するために要した時間のみを測定した結果、一実験あたり平均して50秒程度の時間を要していた。手振りを利用して作業指示をおこなう場合には、手を直接対象物の場所に運ぶ方が簡単であり、また、その場で回転表現をおこなうことが可能であるため、それに相当する時間が動作指示カーソルを利用した場合と比較して短縮されていると考えられる。しかしながら、言語に対する負担の減少は見られるため、マウス操作、メニュー選択に関する問題点が克服されれば、さらに作業時間を短縮することも可能であると考えられる。

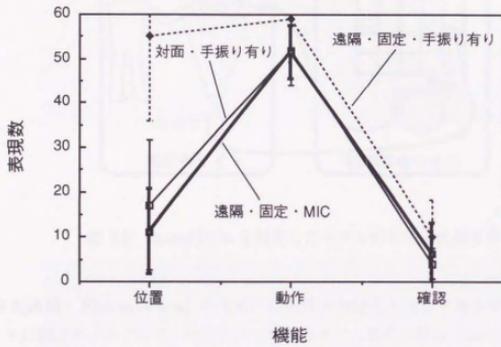


図 6.5: 動作指示カーソル利用時の機能解析

6.2.2 SharedView

実験

SharedView を利用してモデル作業実験をおこなった。通信条件は以下の通りである。

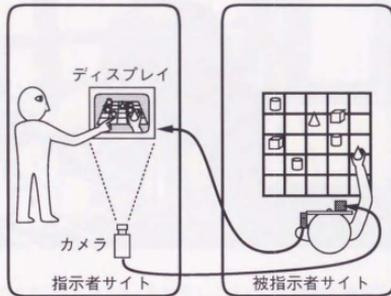


図 6.6: SharedView を利用したモデル作業指示実験装置

条件 6[遠隔・SharedView] 基本的には条件 4 の設定と同じであるが、被指示者サイトの固定ディスプレイ、固定カメラの代わりに、被指示者は SharedView を装着し、これを利用する (図 6.6)。以後この通信条件を「遠隔・SharedView」と表現する。

指示者、被指示者の組み合わせは 8 組であり、いずれも工学部機械工学科の 4 年生以上の学生である。図 6.7 に被指示者の作業風景を、図 6.8 に、HMD に表示される作業指示画像を示す。ただし、実際に HMD 上に表示される画像は白黒映像である。

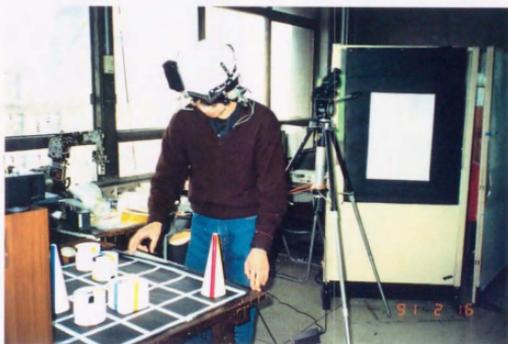


図 6.7: SharedView を利用したモデル作業指示実験風景

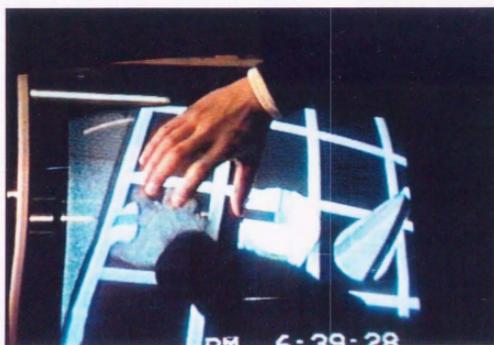


図 6.8: SharedView 利用時の作業指示画面



図 6.16: 遠隔・固定・全体像における作業指示画像

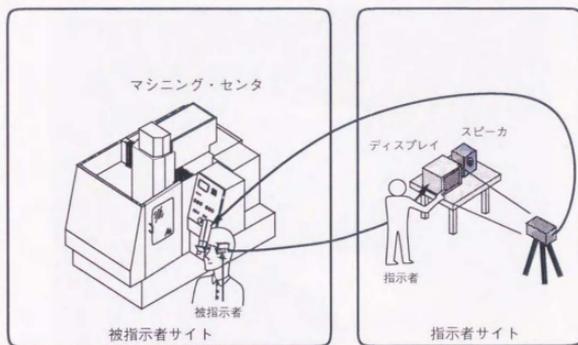


図 6.17: MC 操作指示実験の通信条件 3 (遠隔・SharedView)



図 6.18: 遠隔・SharedView における被指示者サイト



図 6.19: 遠隔・SharedView における指示者サイト

6.3.2 MC 操作説明の概要

作業指示は第三章、3.4.1 節に示した指示書に基づいておこなわれた。今回の実験では、操作説明の中で、MC 電源の投入、原点復帰、座標系説明の部分に関してのみ解析をおこなった。以下に各項目の具体的な説明内容を示す。

電源の投入

実験開始時には MC の電源は切れている状態にあるため、まず、電源を入れるための操作をおこなう。電源投入のためには、まず電源投入ボタンの位置の表現をおこなう必要がある。

座標系説明

MC の工具の移動方向とその座標値を説明する部分である。本実験で利用した MC の座標系を図 6.20 に示す。被切削物は図中のテーブルの上に固定される。x 軸方向の切削は、工具ではなく、このテーブルが動くことによって実現される。図で $-x$ で示された方向が x 軸の負の方向である。y 軸に関しては、図で $-y$ で示された方向が負の方向であり、この方向の切削は工具が移動することで実現される。最後に、z 軸は鉛直方向であり、図で $-z$ で示された方向 (鉛直下向き) が負の方向である。z 軸方向の切削もやはり工具が移動することで実現される。x、y、z 軸いずれの方向も、原点復帰直後の値は 0 であり、最大値である。すなわち、ドリルの先端は常に負の値しかとらないことになる。従って、MC のモニタ画面に表示される座標値は常に負の値を表示する。この座標軸の説明を受ける場合、被指示者は通常、y 軸の負の方向の延長上に存在する。従って、被指示者にとって、x 軸の負の方向は向かって左側、y 軸の負の方向は工具が被指示者に向かう方向、そして z 軸の負の方向が鉛直下向きとなる。指示者はこのような、工具の座標系、動作を被指示者に対して、言語や手振りを利用して説明することになる。

原点復帰

工具を、MC の持つ座標系の原点に移動させるための操作である。原点への復帰は x、y、z 各軸毎におこなわれる。まず、モード選択スイッチによって原点復帰モードを選択し、次に、軸選択スイッチを、原点復帰をおこないたい軸名の書いてある場所に合わせ、

方向選択スイッチをマイナス方向へひねったまま保持する。原点復帰が終了すると、原点復帰と記述されているランプのうち、原点復帰をおこなっている座標軸名が記述されている部分のランプが点灯するため、その時点で、方向選択スイッチを解放する。

MC 操作説明時の被指示者の視点移動

大きな視点の変化としては、MC の操作・パネルを見る場合と、工具、テーブル部の方向を見る場合とで、約 90 度の角度変化が必要となる。固定されたテレビ・カメラを利用する場合には、この角度変化がコミュニケーションの円滑さを阻害する要因となることが予想される。より細かい視点の変化としては、操作パネルの左斜め上方の電源スイッチ、その下方にある原点復帰のためのつまみ、その上に存在する原点復帰完了を示すためのランプ、操作パネル右端のモード選択スイッチ等の間の視点移動が必要となる。以後、このような視点移動が必要がコミュニケーションに対して、実画像通信システムが与える影響に注目しつつ、実験結果の解析を進める。

図 6.19: 遠隔操作

図 6.19 は、遠隔操作の概念を示しています。操作パネルと工具・テーブル部を指す方向が示されています。

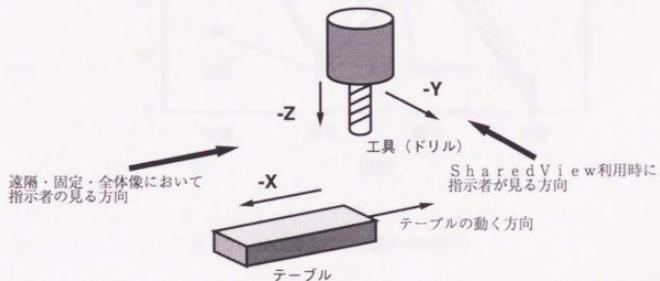
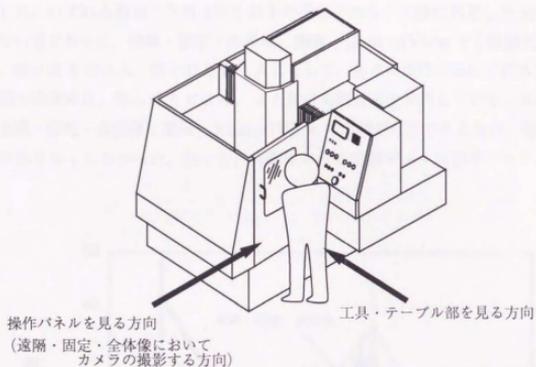


図 6.20: MC の座標系

図 6.20 は、MC の座標系を示しています。-X、-Y、-Z の軸と、指示者の見る方向、工具の向き、テーブルの動く方向が示されています。

6.3.3 実験結果

本実験において、MCの操作に関する知識を十分に持ち、指示者となり得る人間は二名のみであった。したがって、指示者はこの二名(A、B)とし、被指示者は異なる被験者を利用した。いずれも機械工学科4年生以上の学生であり、実験に利用したMCの操作経験のない者であった。遠隔・固定・全体像、遠隔・SharedViewとも被験者数は9人であり、指示者Aは5人、指示者Bは4人に対して、各々の条件において指示をおこなった。対面の被験者は、指示者Aによる、2人分の実験結果を利用している。本実験においては遠隔・固定・全体像と遠隔・SharedViewの比較が目的であるため、対面の実験は被験者数を多くしなかった。従って、対面における実験データは参考データとして扱う。

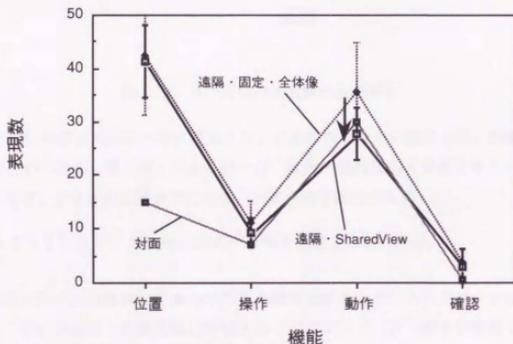


図 6.21: MC 操作指示実験の機能解析

機能解析の結果の平均値と標準偏差を図 6.21 に示す。ただし、対面は被験者が少ないため、標準偏差は示していない。ここでは機能は以下の4種類に分類した。

位置表現 MC 上スイッチ、工具、ワーク等の対象物を見せるための表現。

操作表現 MC 上のスイッチ、ボタンを操作させるための表現。

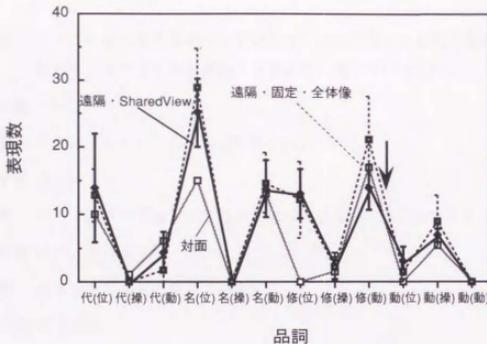


図 6.22: MC 操作指示実験の品詞解析

動作表現 MCの座表系説明の時に利用され、工具やテーブルの動作方向、座標系を伝達するための表現。第三章、3.4.2節では、動作・操作表現に分類されていたが、本解析では、より詳細な解析のために、前述の操作表現と区別した。

確認 「わかりましたか?」等の被指示者の理解を確認するための表現。

また、図 6.22 に品詞解析の結果の平均値と標準偏差を示す。このグラフでは、各品詞をさらに、それが表現した機能毎に分類することによって、より細かい解析をおこなった。このグラフの x 軸で、「代」は代名詞、「名」は名詞、「修」は修飾語、「動」は動詞を表す。また、「(位)」は位置表現、「(操)」は操作表現、「(動)」は動作表現のために、各々の品詞が利用されたことを示す。

機能解析の結果から、位置指定表現は、遠隔・固定・全体像、遠隔・SharedView とも、対面と比較して、大きく表現数が増加していることがわかる。遠隔・固定・全体像では全体像が映る代償として個々の対象物の画像が小さくなりすぎるために、視認性が悪化する上、指示者にとって指さしも困難となる。また、被指示者の身体によって対象物が隠れるといった問題が発生し、言語による記述的な表現が多くなる傾向が見られた。図 6.16 の写真からも、被指示者の身体によって操作パネルが見えなくなっていることが

わかる。以下にその具体的な例を示す。

教示者 えーと、今小池さんが立っていらっしゃってちょっと見えないんですけども、えーとつまみがありますよね、真中にいっぱい。

被教示者 はい。

教示者 その左下くらい、あ、右下くらいに、

被教示者 はい。

教示者 モード選択っちゅうつまみが、黒いつまみが有るのわかりますかね。

被教示者 はい、有ります。

教示者 あります？ 今何になっています？

被教示者 原点復帰。

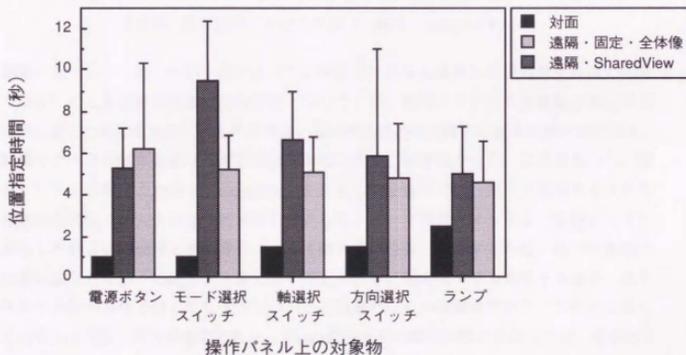


図 6.23: 位置指定に要した時間の例

一方 SharedView では、視野角が狭く、操作パネルの 50% から 60% 程度しか視野内に撮影することができない。従って、視野外の対象物を見せるための指示を言語に頼ることが多いことが観察され、これが表現数を増加させる原因となっている。また、HMD の

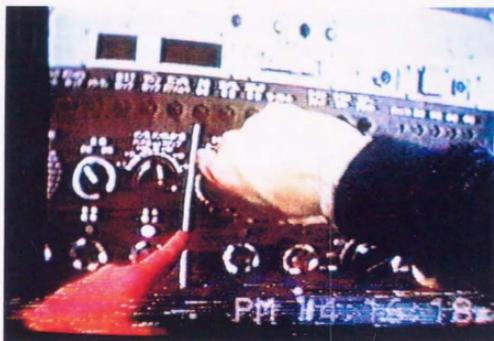


図 6.24: 操作説明における手振り (遠隔・SharedView)

画像が見づらいため、被指示者にとって、手振りによる位置表現の認識がそれほど容易ではないことも言語表現数増加の原因となっている。操作パネル上の対象物を指示するために要した時間を測定し、その平均値、及び標準偏差を比較した結果を図 6.23 に示す。対面のデータの標準偏差は、被験者数が少ないため、示さなかった。この結果から、固定カメラを利用した場合と SharedView を利用した場合とでは、モード選択スイッチの位置表現以外では大きな差は認められなかった。モード選択スイッチは、固定カメラを利用した場合には被指示者の身体によって隠れ易い位置に存在するため、他の対象物の位置表現よりも多くの表現数を要したと考えられる。固定カメラを利用する場合、見るべき対象物を身体で隠してしまうということは避けにくい問題点であり、この点に関しては SharedView の方が優位である。SharedView の視野角の狭さに関しては、今回利用可能であったレンズの性能によるところが大きく、対象物が小さくなりすぎない程度に広角なレンズを利用することによって、より有効性が増すと考えられる。図 6.24 に、遠隔・SharedView において、操作説明をおこなっているときの指示画面を示す。この写真からも、対象物が被指示者の身体に隠されることなく、比較的大きく、明瞭に撮影されていることがわかる。

機能解析にみられる、遠隔・固定・全体像の場合の操作表現の増加は、品詞解析の結

果から、主に動詞の増加に起因していることがわかる。この点に関しては、記録されたビデオの観察から、念を押すために同様の動詞を繰り返し発話することが観察された。コミュニケーションの困難さが、このような動詞の増加の原因となったとも、考えられるが、本実験における測定では、操作表現数自身が少なく、また、被験者数も限られているため、明確な議論はおこなえない。

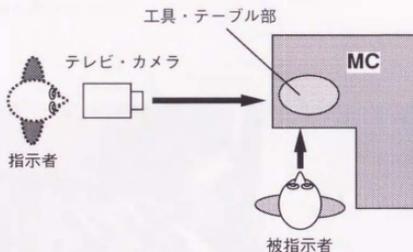


図 6.25: 遠隔・固定時の視線方向の違い

動作表現に関しては、**遠隔・SharedView**は対面とほぼ同様の表現数になっているのに対し、**遠隔・固定・全体像**では、より多くの表現数を必要としている。品詞解析の結果から、この表現数の差は座標系を説明するための修飾語の表現数の差が大きく影響していることがわかる。座標系説明の際にはMCの工具・テーブル部を見る必要があるが、**遠隔・固定・全体像**におけるカメラのセッティングでは、指示者と被指示者はほぼ90度異なる方向から見ることになり(図6.25)、両者の視覚的な認知も大きく異なる。指示者は座標系説明の際に被指示者の向いている方向に注意をはらっており、「君から見て」等の表現を利用することが多い。また、同一の表現を繰り返すことも多く、わかりにくさを意識するために表現数が多くなると考えられる。以下に、視点の相違が原因となつて、コミュニケーションにおける表現の誤認識が発生した例を示す。

教示者 これで、えー、中垣さんが左っかわを向いた状態ですぞね、

被教示者 はい。

教示者 左右、こちらの方向ですぞね。(被教示者に対して左右方向を示している。)

被指示者 こうですね、こ、こうですか？（被指示者に対して前後方向を示している。）

指示者 ええと、逆です。右左です。

被指示者 右左？

指示者 ええ。

被指示者 左を向いたときの？



図 6.26: 座標系説明における手振り (遠隔・SharedView)

SharedView を利用した場合には、説明の内容に応じて、操作パネルの方向と工具・テーブル部の方向とを円滑に変化させることが可能であり、また、視点を共有しているために前述の例のような誤認識も発生しにくい。図 6.26 に、遠隔・SharedView において、座標系説明をおこなっている時の画像を示す。この写真のように、SharedView を利用した場合には、指示者と被指示者が指先の方向を一致させることによって、動作方向の伝達を円滑におこなうことができる。座標系説明のみに要した時間の平均値、及び標準偏差を図 6.27 に示す。このグラフから、遠隔・SharedView は遠隔・固定・全体像と比較して少ない時間で説明が完了していることがわかる。本実験では、被験者数が不十分であるために、統計的な有意性を論ずることは困難であるが、会話解析、時間の評価等

の結果を総合的に判断し、SharedViewにおける視点の共有の有効性、及び位置的な可変性による有効性が示されたと考える。

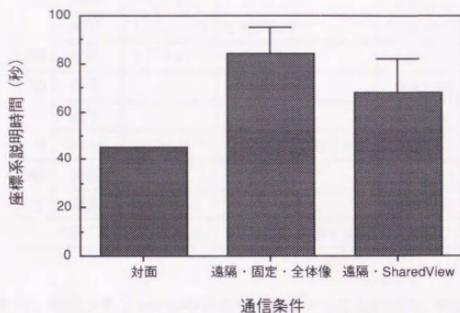


図 6.27: 座標系説明に要した時間

表 6.2: 対面での MC 操作説明に利用された表現数の平均。()内は%

		指さし型	開放型	つまみ型	合計
位	領域	0.5(2.0)	1.5(6.0)		2.0(8.0)
	局所	11.5(46.0)	1.5(2.0)		12.0(48.0)
置	相対		3.5(14.0)		3.5(14.0)
	操作	0.5(2.0)			0.5(2.0)
作	押す				0.0(0.0)
	回す				0.0(0.0)
動	ひねる			2.5(10.0)	2.5(10.0)
	回転				0.0(0.0)
作	直進	4.5(18.0)			4.5(18.0)
	合計	17.0(68.0)	5.5(22.0)	2.5(10.0)	25.0(100)

各々の通信条件における、手振りの解析結果の平均値を表 6.2、6.3、6.4に示す。各々

表 6.3: 遠隔・固定・全体像での MC 操作説明に利用された表現数の平均。()内は%

		指さし型	開放型	つまみ型	合計
位	領域	0.8(2.7)			0.8(2.7)
	局所	19.6(66.7)	0.4(1.5)		20.0(68.2)
置	相対	1.0(3.4)	0.3(1.1)		1.3(4.5)
	押す				0.0(0.0)
操	回す				0.0(0.0)
	ひねる	0.1(0.4)		0.6(1.9)	0.7(2.3)
動	回転				0.0(0.0)
	直進	6.6(22.4)			6.6(22.4)
合計		28.0(95.5)	0.8(2.7)	0.6(1.9)	29.3(100)

の結果において、利用される手の形状に関して比較すると(図 6.29)、対面の場合には指さし型以外の手振りが比較的多くなる傾向にある。遠隔・SharedViewは遠隔・固定・全体像との中間的な傾向を示している。また、手振り表現の機能についても同様に、遠隔・固定・全体像では位置指定表現の比率が多いが、SharedView、対面となるに従って、他の表現の比率が多くなる。これは画像の大きさに起因すると思われる。指示者にとって、画面上の対象物画像が小さい場合には、指先を利用する以外ではその対象物の位置を明確にさし示すことが困難である。一方、対面の場合には、切削部にあるテーブルのように、大きな対象に対しては開放型の形状を利用することが多くなる。また、操作表現時には、手の形状は対象物を掴むための予備動作的な形状を示すが、画面上の対象物が小さい場合には小さい物体をつかむことが困難であるため、対象物が小さく表示されてしまう遠隔・固定・全体像では、操作表現が比較的少なくなっていると考えられる。ただし、操作表現に関しては、利用数が少ない上、明確な差は表れていないため、明確に論ずることはできない。以上のように手振り表現に対しても通信条件によって、その利用方法に差が生じるが、例えば遠隔・固定・全体像では、被指示者が作業指示画面を見ていないにもかかわらず指示者が手振りを利用することが多く、手振りは条件反射的に利用され得るコミュニケーション・チャンネルであると考えられる。これは、電話を利用して人間が、お互いに見ることができないにもかかわらず、身振りを利用することからも伺える。

表 6.4: 遠隔・SharedViewでのMC操作説明に利用された表現数の平均。()内は%

		指さし型	開放型	つまみ型	合計
位	領域	0.7(2.5)	0.4(1.6)		1.1(4.1)
	局所	14.9(55.1)	2.1(7.8)		17(63.0)
置	相対	0.3(1.2)	0.6(2.1)		0.9(3.3)
	押す	0.2(0.8)			0.2(0.8)
操	回す				0.0(0.0)
	ひねる	0.1(0.4)		1.0(3.7)	1.1(4.1)
動	回転				0.0(0.0)
作	直進	6.7(24.7)			6.7(24.7)
	合計	22.9(84.8)	3.1(11.5)	1.0(3.7)	27.0(100)

SharedViewを利用したコミュニケーションに対して、実画像通信システムでは、機械の全体像を撮影する方がコミュニケーションには好ましいのではないかという意見が多く存在する。確かに位置指定時の対象物の発見、及び指差しを容易におこなうためには広い視野角が好ましいことは、第五章、5.5.1節での実験より明らかであるが、MCの操作説明実験の結果から、画面上で対象物が小さくなり、視認性が悪化すること、被指示者の身体で指示対象物が隠れること、ディスプレイが固定しておいてあるために、被指示者がある方向を向いている場合にはディスプレイを見ることができないこと等から、位置表現に関して、必ずしもSharedViewよりも有効であるとは限らなかった。また、可変性が小さいために視点の共有が困難であるといった理由から、方向表現に関してはSharedViewの方が有効であることは明らかである。ただし、指示者の感想からも、例えば操作パネル上での操作によって工具が動作する場合、被指示者の操作状況と工具の動作状況の双方が確認可能であることが望ましく、この点に関して、例えば全体像画像とSharedCameraの画像とを併用するなどの手法をとることも考える必要がある。

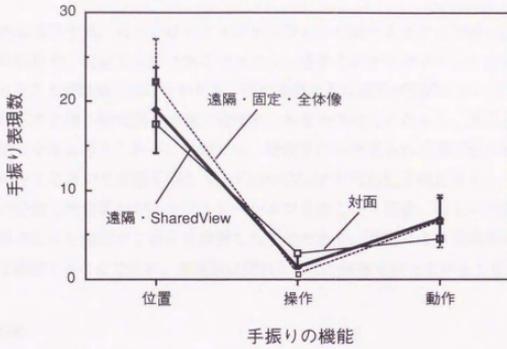


図 6.28: 手振りの機能解析

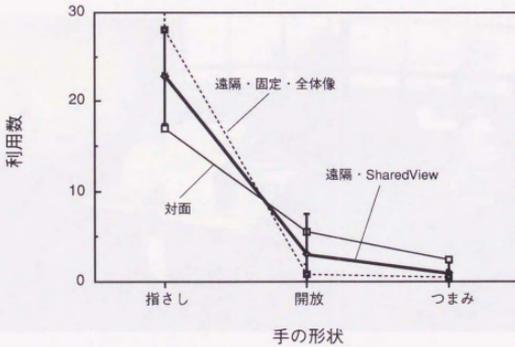


図 6.29: 手振りの形状別利用数

6.4 研究室内の機器設定実験

研究室内は共同作業、あるいはコミュニケーションの場であることが多い。例えば、実験機器の設計や、設定を共同でおこなったり、見学者にデモンストレーションをおこなうといったことが頻繁におこなわれる。仮に遠隔地との通信が円滑におこなわれれば、遠隔地に存在する他の研究室との共同研究や、わざわざ赴くことなく、見学をおこなうことが可能となると考えられる。本節では、研究室内に設置された機器類の設定を遠隔地から指示をするという実験を通して、SharedViewの有効性を検証する。これは、室内の各所に分散した装置のデモンストレーションをおこなう場合、あるいは電話等で遠隔地の機器の設定を指示する場合を模擬したものである。電話による遠隔地の機器設定はしばしば体験することであり、本実験は題材として一般性を持っていると考える。

6.4.1 実験

著者の所属する研究室内にその時点で設置されている機器を利用し、それらへのケーブルの接続やスイッチの操作の指示を、遠隔地に存在する指示者が、室内に存在する被指示者に対しておこなう。機器の配置はその時点で配置されている通りとする(図 6.30)。



図 6.30: 研究室内の機器の配置

接続が指示されるケーブルは、その時点でその機器を利用するために接続されている物

を、実験前に外しておく。このとき、作業を多少困難にするために、指示の対象となる物の付近にある、それ以外のケーブルも外しておいた。従って、「はずれているケーブルを空いている場所に差して下さい」といった指示はおこなえない。指示者はあらかじめ用意された指示書に基づいて作業の指示をおこなう。作業は二種類用意した(task1, task2)。各々の作業の指示書を図 6.32-6.34、及び図 6.35-6.37 に示す。指示者はこの指示書に基づいて指示をおこなう。この図では、1 ページに二つのタスクが左右に並べられている。縦に二枚写真がある場合は、その二枚一組で一つのタスクを表しており、上の写真が、作業が指示される場所の全体像、下の写真が、実際に作業が指示される部分の拡大写真であり、作業指示が書き込まれている。指示者は指示書に示されている部分以外にどのケーブルが余計に外されているかは知らされていない。指示者はいずれも当研究室に所属する4年生以上の学生であり、指示書を見た時にそれらの機器が室内のどの位置に配置されているかをすぐに判断することができた。また、被指示者はコンピュータのソフトウェア、ハードウェアを扱っている機械工学科内の研究室の4年生、及び修士の学生であった。従って、研究室内の機器について、一般的な知識を持っていた。

通信の条件は以下の通りである。ただし、いずれの条件においても手振りはスーパーインポーズされており、指示者は手振り表現を利用することが可能である。

条件 1 [固定] テレビ・カメラは室内のある位置に三脚に取り付けられて置いてある。被指示者は三脚の上でカメラの向きを変えることは許されているが、三脚自身を動かすことは許されていない。被指示者自身は自由に室内を移動することができる。

条件 2 [SharedView] SharedView を利用し、被指示者は自由に室内を移動することが許されている。

条件 3 [SharedCamera & LCD] SharedView の特殊な構成として、HMD の代わりに小型のカラー液晶ディスプレイを利用した。被指示者は液晶ディスプレイを手に持って歩く。

条件 1 においてカメラを三脚上に固定したのは、現時点での CSCW における実画像通信システムがいずれも固定的であるためである。ただし、これらのシステムも通常カメラの向きのみは変化させることが可能であるため、これはおこなっても良いこととした。図 6.31 に作業対象物の設置場所、及び固定におけるディスプレイとテレビ・カメラの配置を示す。被験者は task1, task2 の順番で作業をおこなう。ただし、task1 を条件 1 で、task2 を条件 2 でおこなうグループと、task1 を条件 2 で、task2 を条件 1 でおこなうグ

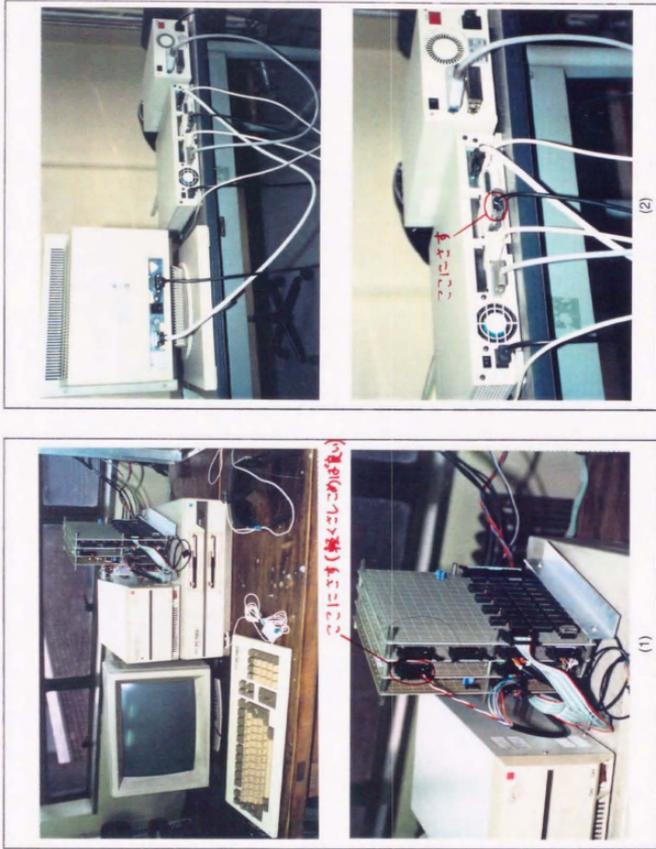


図 6.32: 指示書-タスク 1、(1) (2)-

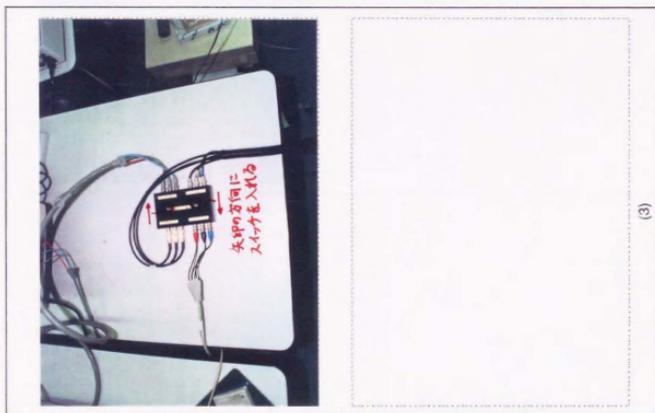


図 6.33: 指示書-タスク 1、(3) (4)-



図 6.34: 指示書-タスク 1、(5)-

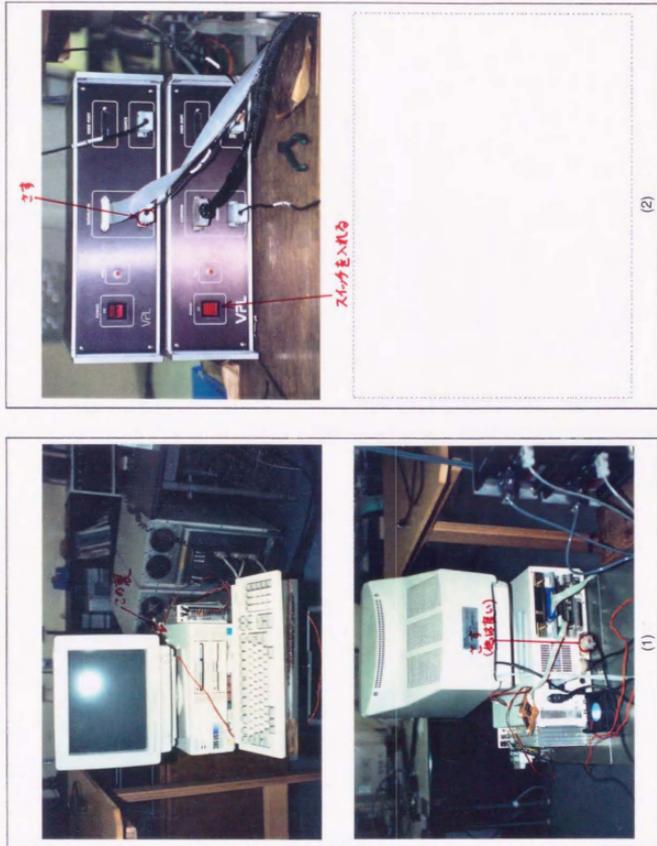


図 6.35: 指示書 - タスク 2、(1) (2)-

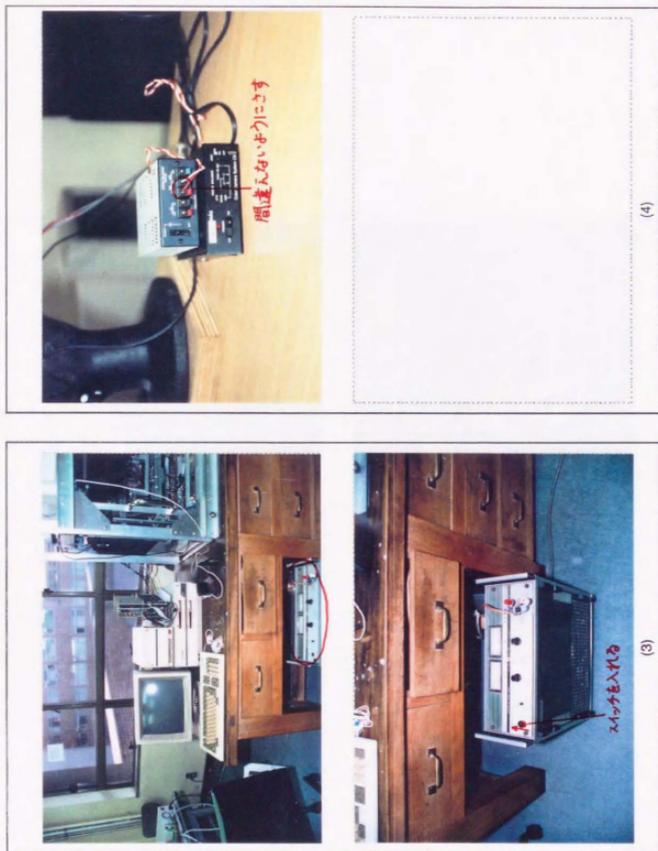


図 6.36: 指示書-タスク 2、(3) (4)-

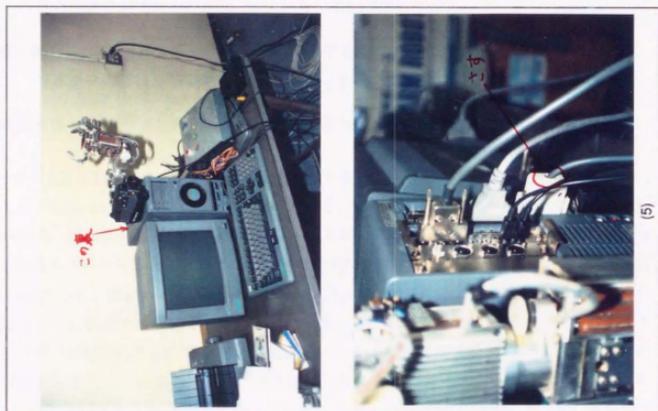


図 6.37: 指示書-タスク 2、(5)-

6.4.2 実験結果

いずれのグループも被験者は3組であった。表現解析のために表現の機能を以下の様に分類した。

移動表現 被指示者を作業対象の存在する場所へ行かせるために利用される表現。室内を大きく移動させるための表現であるということもできる。

位置表現 作業対象の存在する場所において、さらにスイッチ、コネクタなどの細かい部品の位置を示すための表現。

操作表現 対象物の操作を示す表現。本実験では主にスイッチを入れる向きを示したり、コネクタの接続を表現するために利用された。

確認表現 「わかりましたか」等の、被指示者の理解を確認するための表現。

図 6.38, 6.39に個人ごとの品詞解析の結果を示す。いずれの被験者も、代名詞以外のほとんどの品詞において、SharedView を利用している方が表現数が減少していることがわかる。被験者 D はこの傾向が逆転しているが、これは、SharedView 利用時に手振りを利用することをほとんど忘れてしまったためである。言語表現の機能解析の平均値(図 6.40)からも、SharedView 及び SharedCamera & LCD の場合に、いずれの機能に関しても表現数が減少していることがわかる。ただし、被験者数が少ないため、このグラフでは標準偏差を示していない。図 6.41に、記述的な言語表現(名詞と修飾語の和)の平均値を比較した結果を示す。この結果からも、SharedView、SharedCamera & LCD における表現数が少なく、可搬型であることの有効性が示されている。図 6.42に代名詞の表現数の平均値の比較を示す。この結果から、特に液晶テレビを利用した場合には「あれ」、「これ」といった言葉が利用し易くなっていることがわかる。

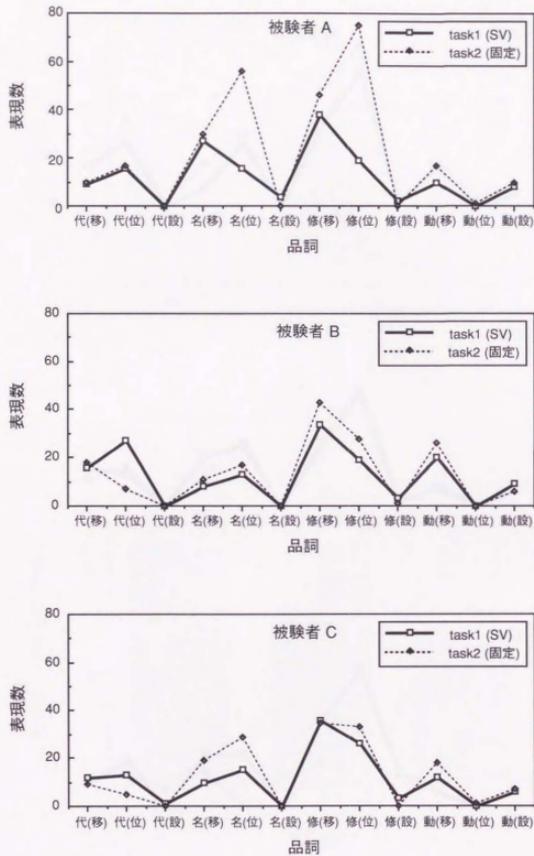


図 6.38: 個人ごとの品詞解析 (task1:SharedView, task2: 固定)

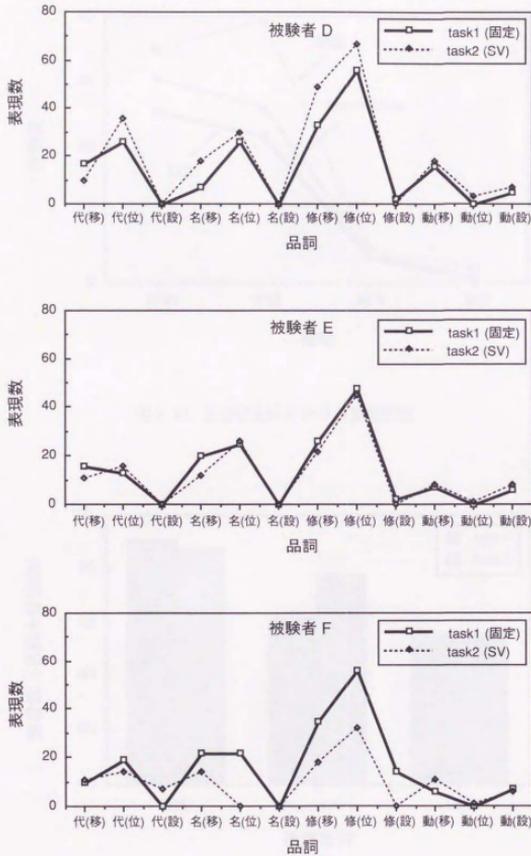


図 6.39: 個人ごとの品詞解析 (task1: 固定, task2: SharedView)

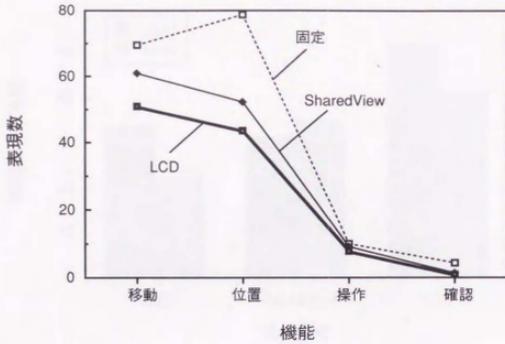


図 6.40: 各通信条件における機能解析

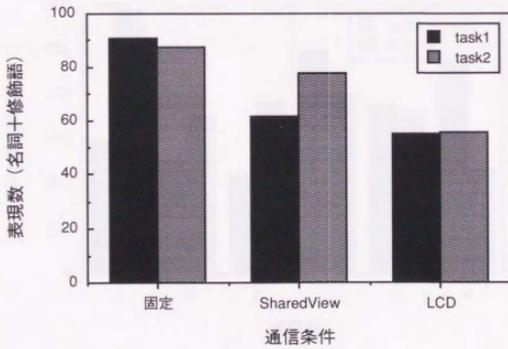


図 6.41: 名詞と修飾語の表現数の平均値の比較

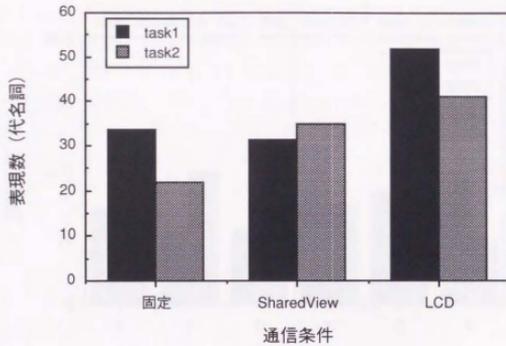


図 6.42: 代名詞の表現数の平均値の比較

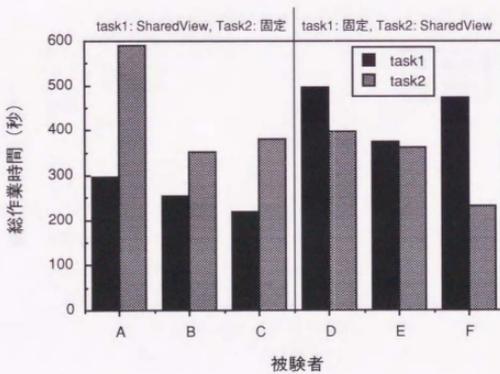


図 6.43: 作業時間の比較

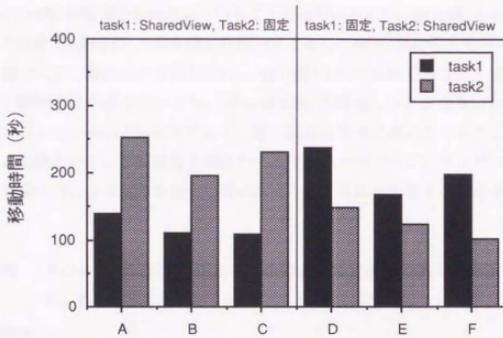


図 6.44: 移動時間の比較

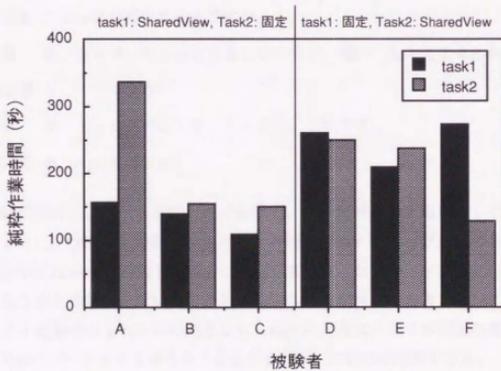


図 6.45: 純粋作業時間の比較

図6.43に全作業時間の比較結果を被験者別に示す。この結果からSharedViewを利用した場合の方が作業時間が短縮されていることが明らかである。図6.44, 6.45に室内の移動に要した時間(移動時間)と移動後の作業のみに要した時間(純粋作業時間)を分離した場合の比較を示す。移動時間に関しては、SharedViewが有利であることは明らかである。また、純粋作業時間においても、SharedViewを利用した方が少ないか、あまり時間差があらわれないかのどちらかであり、総合的には有利に働いていることがわかる。固定による実験において、移動時間を増加させる原因の一つとして、テレビ・カメラを正確に作業対象に向けさせるのを怠った例があったが、このとき以下の様な会話が観察された。

指示者 そのテーブルの前の所に一つ装置が立てておいてあると思うんですが、わかりますか？

被指示者 はい。

指示者 その装置の左下の所にスイッチが一つあります。

被指示者 左下の方にスイッチが？

指示者 そのスイッチを入れて下さい。

被指示者 ちょっとわかんないんですが、

指示者 あ、カメラ、ちょっとうまく合わせて、向けてもらえませんか。

被指示者 と、こうですか？

指示者 あ、もっと下の方です。もっと左。これです。

被指示者 あ、そっちですか？

すなわち被指示者は、指示者が示した対象物を、異なる対象物と勘違いしていたのである。このように、空間内を移動させるためにも画像が見えることが重要であることがわかる。SharedCameraを利用した場合には指示者がどこに向かって歩いているか、どの対象物を見ながら会話をしているのかを確認することが可能であるため、このような間違いはほとんどおこらない。この例からも、視点の共有によって対話者の視点を確認しながらコミュニケーションをおこなうことの必要性、有効性が理解できる。

図6.46に手振り表現の機能別の平均値を、通信条件別に比較したグラフを示す。このグラフより、固定と比較して、SharedView、SharedCamera & LCDの方が手振りの利用が増える傾向にあることがわかる。従って、従来のテレビ会議システムのよう

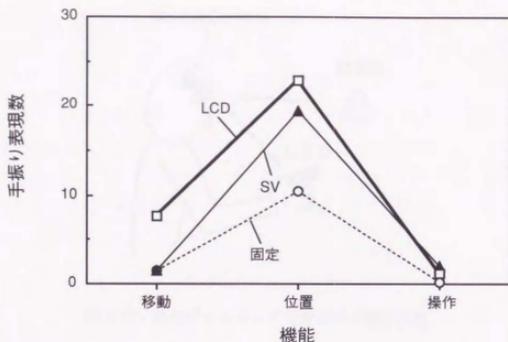


図 6.46: 手振りの平均値の比較

に、テレビ・カメラを固定して設置するだけでは手振りを有効に利用することはできず、対象物を任意の位置から撮影する機能が、指示者が手振りを利用しようとするためには必要であることがわかる。

本実験においては、被指示者として機器に関する一般的な知識を持つ者を利用したために、比較的単純な説明で作業を完了できた場合が多く、従って、比較的大きな差があらわれないという結果となった。仮に機器に関する知識の非常に少ない者を被指示者として利用すれば、より大きな差が表れると思われる。しかしながら、本実験からも、システムの位置的可変性が高いこと、作業対象画像を共有することが空間型共同作業における効率の向上、コミュニケーションの円滑さの向上に対して有効であることが示されたと考える。

液晶ディスプレイは指示画像の明瞭さにおいてはるかにHMDよりも優れているが、液晶ディスプレイを見るために下を向くことが多く、従ってSharedCameraが対象物を撮影することができない場合があり(図6.47)、このときは、指示者が「もう少し上を見て下さい」と、指示をおこなう必要があった。また、コネクタやコードの接続など、両手で作業をおこなう必要がある場合には、その度に液晶ディスプレイを適当な場所に置くか、あるいは多少無理をして片手で作業を済ませる必要があった。従って、このよう



図 6.47: 液晶ディスプレイを持ち歩く時の視線

な作業に利用するためには、両手を利用可能であることが望ましい。

作業対象物は様々な高さに存在することが多く、従って、頭部、眼球を上下に移動することが多かった。カメラが完全に固定されていても、人間がそれに適応すれば、常に対象物を撮影することは可能であると考えられるが、それは人間にとって不自然な動きである。本実験中に SharedCamera がうまく作動しない場合があり、そのときはカメラはほぼ頭部に対して水平に固定されていた。このとき作業対象物が画像内に入りにくくなったため、液晶ディスプレイを利用した実験において以下のような会話が観察された。

指示者 はい、はい、はい。この黒いスイッチ。もうちょっと下映してくれるかな？

被指示者 どこを、、、

指示者 この、今映っていない。これ、これ、これ、これ。

被指示者 はい。

これらの観察、考察からも SharedCamera の機構が必要であることが確かめられた。

本実験においては移動指示に多くの時間と表現を要したが、対面においては指示者がまず対象物の方向に移動すれば良く、また、被指示者は広い視野によって、その方向を素早く把握することが可能である。視野の狭さは位置表現にも影響を与えた。例えば、コネクタを接続する部分から多少離れた場所にコネクタ自身が存在する場合には、画像

の中にその対象物が映っていないために、指示者は接続部分を表現した後にあらためてコネクタの位置を表現する必要があった。対面ではやはり指示者がまずそのコネクタを指でさし示すことによって被指示者に知らせることが可能である。これもカメラの視野角が広い場合にはある程度解決可能であると考えられる。

液晶ディスプレイを利用している場合において、ディスプレイ上で示された対象物と実際の対象物との対応をとることが多少困難であることが観察された。これを解決するためにはHMDにシースルー・タイプのもの [Hir90] を利用し、実物の上を手振りを重ねることが有効であると考えられる。しかし、カメラのパスとHMD上のパスとを一致させる技術が必要である。

6.5 本章のまとめ

本章ではSharedViewおよび動作指示カーソルの有効性をモデル実験、MCの操作説明実験、及び研究室内の機器設定実験に応用することによって示した。この実験から得られた結論を列挙する。

- 情報伝達段階におけるフォーマルなアプローチとして、指示者、被指示者双方の共有するシンボル表現である動作指示カーソルを利用することによって、ディスプレイ画面上にスーパーインポーズされる手振りの実画像よりもあいまい性の少ないコミュニケーションが実現され、その結果として、修飾語の動作表現数が減少した。また、矢印型カーソルによる位置表現の明確さから、位置表現数も手振りを利用した場合と比較して減少した。作業時間は短縮されなかったが、これは、マウスを利用してメニューを選択するという、セットアップ段階を軽視したことに大きく起因し、改善が望まれる。
- SharedViewをモデル作業に利用することによって、固定的な作業空間に対して、固定したカメラを利用した場合と同程度の作業効率、及びコミュニケーションの円滑さを持つことを確認した。
- SharedViewを利用した場合、MCの座標系説明において、方向表現の数を**遠隔・固定・全体像**と比較して減少させることができた。これは、視点の変換性、視点の共有性を支援したことによって、情報伝達段階が円滑となった例である。
- 操作対象物の全体像を撮影した方が作業指示に有効ではないかという考え方があっても、固定カメラを利用した場合には被指示者の身体で対象物を隠してしまうこと、ボタン、スイッチ等の小さな作業対象が画面上で見づらくなり、位置指定に対して時間的にも有効性が少ないこと、視点の変換性がそこなれることなどによって、情報伝達段階に支障が生じる。また、視点の共有が実現しづらく、コミュニケーションに対して障害となる。
- 研究室内の機器設定実験により、システムの可搬性(視点、及び共有作業空間の位置的可変性)が室内の対象物への移動時間の減少、及び言語的負担の減少に有効であることが確認された。また、対象物画像が見えることが対象物指示自身にも有効であることが確認された。すなわち、セットアップ段階の支援が有効であったことが確認された。

- 研究室内の機器設定実験により、対象物の作業指示において、その対象物自身が見えることによって、その位置指定表現が容易になり、また作業時間が短縮されることが示され、対象物の位置にカメラを運ぶことができるという、セットアップ段階の支援が情報伝達段階の支援に対して有効であることが示された。
- 被指示者の視点を共有することによって、見ている対象物、作業を確認することが必要であることが示された。
- 作業指示画面はある程度以上の見易さが必要であり、それが作業指示の円滑化につながるということが確認された。
- これらの実験を通して、空間型共同作業においては、セットアップ段階を支援することによって、コミュニケーションが円滑となり、また、作業時間効率の向上につながるということが確認された。
- また、空間型作業において、セットアップ段階としての位置表現、情報伝達段階としての動作・操作表現を考え、それぞれに対して支援をおこなうことが必要であることが確認された。



第7章

考察、展望、及び結論

7.1 考察及び展望

7.1.1 コミュニケーション支援システムの設計とコミュニケーションの二段階

新たなコミュニケーション支援システムを製作する場合には、そのシステムが好んで利用されるかどうか重要な問題であり、その原因に対して考察をおこなった Grudin の論文 [Gru88] は、CSCW 研究に広く影響を与えている。本論文においては、コミュニケーションをセットアップ段階と情報伝達段階に分けて考えたが、本節ではこの考え方を利用して、システムがユーザに利用されるための要因について考察をおこなう。

新たなシステムが与えられた場合、ユーザがそのシステムを利用するか、あるいは異なる手段を選択するかどうかは、金銭的成本、精神的な負担、肉体的な負担、時間的なコスト等の要因に左右され、これらの面を考慮した上で、他の手段よりも有利であると判断された場合にそのシステムが利用されると考えられる。このときこれらの要因の中で時間的な要因に注目し、セットアップ段階と情報伝達段階を考える。例えばある情報を送る場合に、システムのセットアップ時間と実際に送信するのに要する時間とを考えると、セットアップにかかる時間を T_S 、情報量を I 、情報伝達速度を R とすると、情報を伝達しようと考えるから情報を伝達し終るまでにかかる時間 T は、 $T = T_S + I/R$ で表される。経験的に考えると、人間は T が最小になるような手段を選択するであろうと予想される。従って、多量の情報を伝達する必要がある場合 (I が大きい場合) には、たとえセットアップ時間が長くとも、伝達速度の速いシステムを利用すると考えられる。同様の考え方をすれば、伝達すべき情報量が少ない場合には、たとえ情報伝達速

度が遅くても、セットアップ時間の短いシステムを利用するであろうと考えることができる。従来の通信システムは、伝達速度の向上に重点が置かれる傾向にあったが、人間に利用されるシステム設計を考えると、ある場合には情報伝達時間を犠牲にしてもセットアップ時間を短縮するように設計する方が良いといえることができる。

同様のことは時間のみならず、その他の要因に関しても言うことができる。このとき、システム利用の簡便さと、システムの機能の高度さにトレードオフが生じることは良く経験されることであり(例えば機器の操作を簡単にする目的でボタンやつまみの数を減らしたがために、厳密なコントロールが不可能となる)、システム設計の際にはそのどちらかを優先させなければならないことが多い。既に様々な製品に関してはこのような考慮がなされているが、CSCW 研究においては、それが多人数に同時に利用されることを目的として設計されるべきであるにもかかわらず、セットアップ段階での簡便さに注目している研究は少ない。特に時間的な要因は測定が容易であり、今後の研究における重要な要因として注目されるべきであると考えられる。

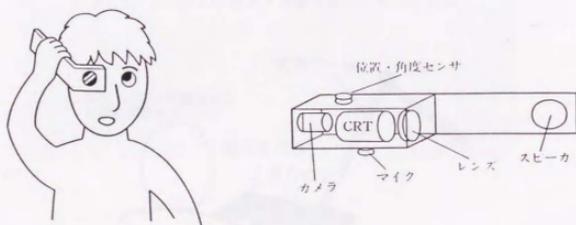


図 7.1: HandScope の構成

NTT では、視覚的なコミュニケーションにおける、「見たい情報、見せたい情報を伝える」という概念に基づき、簡易型の実画像通信装置: HandScope を製作した [Suz91]。これは電話の延長として作成されたものであり、電話の遍在性と、その場での位置的な可変性の高さを持った、非常に実用的なシステムである(図 7.1)。また、頭部へ装着する必要がないため、SharedView の場合はヘルメットを被るための時間(1~2分)と労力を必要とするのに比較して、電話同様に数秒で利用を開始することが可能であり、この

点におけるセットアップ段階を大幅に短縮している。ただし、実際に機械等を対象とした作業に利用することを考えると、片手が塞がってしまうこと、片目を完全に覆うために、実際の対象物を単眼視することとなり、立体感が把握しづらいこと、その応用面として机上の狭い範囲での作業のみを考えている点などの問題点は存在する。

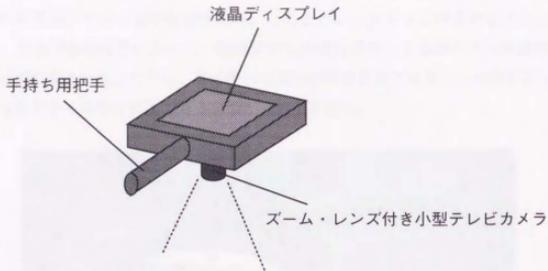


図 7.2: LCD と小型カメラを一体としたシステム



図 7.3: LCD と小型カメラを一体としたシステムの利用例

本論文では第6章において手持ちの液晶ディスプレイを利用したが、この液晶ディスプレイと小型カメラを一体とすることによって(図7.2)、セットアップ段階における簡便

さを保ちつつ、目を覆うという煩わしさは回避できると考えられる。液晶ディスプレイを利用した被験者の感想では、実際の自分の手ではなく、画面内に映っている自分の手を見ながら作業をおこなおうとしてしまうという感想があった。従って、画面の画質、大きさが十分であれば、画面内の手画像のみを利用して作業をおこなうことも可能であると考えられる。また、画像を拡大することによって、拡大鏡を必要とするような細かい部分の作業指示へも利用が可能である。このようなシステムを利用することにより、手術や、機器の修理作業において、熟練者が未熟練者に対して遠隔地から作業指示を与えることが可能となる。ただし、この時には両手が利用可能であることが望ましいため、適宜、支持用アーム等に装着できる必要がある(図7.3)。



図 7.4: PrivateEye の装着例

頭部装着型としては現在 PrivateEye という小型の HMD が市販されており(図 7.4)、今後さらなる小型化やカラー化が計画されている。テレビ・カメラの小型化も進んでおり、これらを組み合わせることによって、装着の労力、時間を減少させることも可能であると考えられる。

7.1.2 主観的な表現の相互変換を減少させる臨場感通信システム

対面でのコミュニケーションでは、個人個人に与えられる五官情報を共有することは不可能であるが、人工現実感システムや臨場感通信システムでは、人間に与える感覚を

人工的につくり出すことが可能であるため、本論文における視覚的な情報の共有以外の感覚においても共有を実現することができる。視覚における WYSIWIS は What You See Is What I See の略であるが、臨場感通信システムにおいては What You Sense Is What I Sense という意味での WISIWIS を考えるべきである。この WYSIWIS を実現することによって主観的な表現の相違が減少することが考えられ、従って、臨場感通信システム内のコミュニケーションが対面以上に円滑になることが期待される。現在の臨場感通信システム研究の多くは現実におこる現象を忠実に再現することに重点をおいているものが多く [Kob91]、当然これは重要な技術であるが、コミュニケーションの円滑化を考えた場合、感覚の共有機能に関する研究も注目されるべきであると考えられる。

7.1.3 視点の非共有性

SharedView は常に視点を共有することを実現しているが、図 3.30 において指摘した通り、対面では指示者が位置表現をおこなう場合、まず、被指示者とは独立して先に対象物を発見し、続いてその方向へ指さしをおこない、その後被指示者がその指先を見るところという過程を経ているために、円滑な視点誘導がおこなわれていると考えられる。SharedView においても、画像内に既に対象物が映っている場合にはこれが可能であり、またそうでない場合にも位置的な可変性が高いために、従来の固定的なシステムと比較して、より円滑に位置指定が可能であるが、対面と比較するといまだ不十分である。簡単には、カメラの視野角を広げることによってある程度解決可能であるが、より対面に近い視点活動を実現するためには、被指示者とは独立した視点を支援する技術を研究する必要がある。

これを解決する方法の一つとして、SharedView とは別に、指示者の意思に応じて動作するカメラを被指示者の頭部に装着することが考えられる。また、これは広い視野角を有することが望ましい。これが実現されれば、まず指示者は対象物を発見し、その部分を手振り等で示すことになる。被指示者に対しては HMD 上に、頭を回転させるべき方向を示す矢印等を表示するか、HMD の表示装置を広視野角なものにし、その位置に直接指示者の指などを提示する方法が考えられる。この時、HMD 上に表示される周辺視野の画像は中央部分と比較して低解像度で良いと考えられる。

もう一つの方法として、筆者の所属する研究室において進められている Virtual Dome の利用が考えられる。Virtual Dome は、遠隔地の環境を撮影した実画像を仮想的な半球状のドームにテクスチャ・マッピング技術を利用して貼り付け、HMD 等を利用して

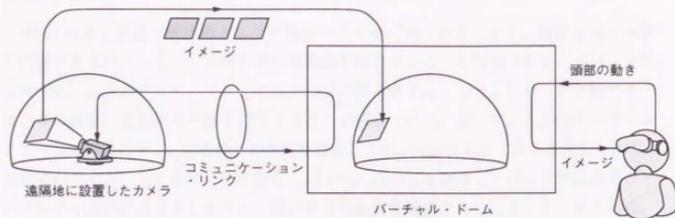


図 7.5: Virtual Dome の概念図

見回すことを可能としたシステムであり [HHK+91]、この技術を応用すれば、指示者が被指示者の視点とは独立に、自由に対象物を見回すことが可能となると考えられる。

7.1.4 SharedView システムのその他の利用方法

本論文では SharedView は主に被指示者が装着したが、実際にはこの他に、指示者が装着する場合、指示者と被指示者の双方が装着する場合が考えられる。

指示者が利用した場合

指示者が SharedView を装着して、NC 及び MC の動作を説明するという実験をおこなった。この場合には被指示者が実際に機械を操作することはおこなわなかったが、指示者が自分主体の視点活動で、自由に情報伝達をおこなうことが可能であるため、視点誘導のための位置表現の必要が少なく、時間的にも効率的であったという感想を持った。また、情報伝達段階においても、指示者にとって、説明のおこないやすい撮影角度を選択し、対象物への距離を調節することによって適当な画像の大きさ選択することが可能であるため、指示がおこないやすい。仮に手を利用した作業を伴わず、片手が常に空いているような状況であればカメラを手を持って指示をおこなうことも可能であるが、空間型の作業においては両手を利用することも多いため、この点に関しては頭部搭載型の方が有利である。手振りに関しては、指示者自身のそれに対象物とともに容易に撮影することが可能である。また、固定カメラを利用した場合のように、身体が対象物を隠す

ことがない。

HMDは送信画像の確認用として利用することが可能である。また、被指示者の理解を確認するために、ここに被指示者の顔画像を表示することも可能である。HMDを利用せずに、固定式のディスプレイに被指示者の顔画像を表示しておこなった実験では、指示者は頻繁に被指示者の顔を確認することが観察された。従って、人間同士のコミュニケーションにとって、顔画像は心理的な要因も含め、必要なものであると考えられる。固定式のディスプレイを利用する場合、SharedCameraを装着した指示者が頭部をディスプレイの方向に向けてしまうと、指示する対象物を撮影できなくなってしまうため、これを避けるためにもHMDは有効であると考えられる。

双方が利用する場合

SharedViewを対話者双方が装着するという実験は、装置の都合上おこなっていないが、状況としては、片方の作業空間にのみ共同作業空間が存在する場合と、テレビ会議などのように双方に作業空間が存在する場合とが考えられる。片方に作業空間が存在する場合には、作業者双方がそれぞれのHMD上に作業空間を表示し、これを共有することになる。作業空間に存在する者はそのSharedCameraで作業空間を撮影し、手振りは自然に撮影されることになる。作業空間と異なる遠隔地に存在する対話者は、現在提案されている何らかの手法で手振りを合成することが考えられる。NTTのScopeHandはこのようなシステムの構成を採った優れた例である。

双方にそれぞれ作業空間が存在する場合には、お互いに対話者の作業空間をHMD上に表示するモードと、一方の作業空間を表示するモードとを用意し、それらのモードを必要に応じて柔軟に切替える手法を開発する必要がある。ディスプレイを二つ以上利用することも考えられるが、装備の大きさ、見易さの点で、検討を要すると考えられる。

7.1.5 手振りの合成手法

従来、手振りを合成する手法として、

- データグローブ等を利用して手の形状データを取得し、コンピュータ・グラフィクスによる仮想的な手の画像を表示する方法、
- VIDEOPLACEでおこなわれたように、手の影(silhouette)をコンピュータ処理によって合成する方法 [Kru90]、

- 画像処理技術等を利用して、手の実画像を合成する方法 [Ish90a, Suz91, TM90]、

などが利用されている。ここで、手の実画像そのものを合成することに関して再考すると、本論文において紹介した様に、その形状が定型的なものである場合には、必ずしも手振りそのものを合成することが最も有効な手段ではないと考えられる。特に位置表現に対しては、手振りよりも矢印型のカーソルの方が相当に明確に表現が可能である。しかしながら、コミュニケーションのインフォーマル性の支援のためには、手振りの実画像による、柔軟な表現伝達が必要な場合も多いと考えられる。動作指示カーソルなどのコンピュータ・グラフィクスと、手の実画像による表現の双方の利点を考えた場合、なんらかのコンピュータ処理によって、仮想的な手画像を合成し、必要に応じて手の形状を変化させる機能が必要である。また、三次元的な方向を表現するためには、手の三次元的な方向を検出する必要がある。従って、このような場合にはデータグループの利用、あるいはその他の画像処理技術によって、手の三次元的な形状、位置、方向を計測し、コンピュータ・グラフィクスによって再現することが有効であると考えられる。

7.1.6 コミュニケーションの冗長性、間接情報

本研究ではコミュニケーションの二つの段階をその基本概念として考えた。ここでセットアップ段階を単にシステム自身のセットアップ段階と考えずに、ある情報伝達をおこなう以前におこなわれた、様々な活動を含めて考えてみる。我々がある情報を得たい場合には、いかにすればその情報を得ることが可能であるかといった、「情報を得るための情報」が必要となる。実際に得たい情報を直接情報と呼ぶのに対して、このような「情報を得るための情報」を間接情報と呼ぶことができる。間接情報には、例えば、「誰がその情報を知っているか」、「その人間に対してどの通信手段が利用できるか」、「その人間はいつ、どこに存在するのか」といった情報がある。こういった間接情報は、通常人間同士のコミュニケーションの経験から、そのパターンを把握することによって徐々に得られるものである。しかし、電子メール、ファックス、電話等、機械を通じたコミュニケーションでは、対話者のパターンをコンピュータに記憶し、その人間と初めてコミュニケーションをおこなおうとする人間に提供し、いつ、いかなる手段でコミュニケーションをおこなうべきかを支援することも可能である。山上らは電子メールの読まれる時間をコンピュータによって自動的に把握し、ある時刻にある人物に電子メールを出した場合に、どのくらいの時間が経過した後にメールが読まれるかという期待値を計算し、これをオフィス通信距離と呼んだ [YH89]。このような間接情報を積極的に人間に提

供することにより、セットアップ段階を短縮することが可能である。コミュニケーションには冗長性が必要であると言われるが、冗長なコミュニケーションにはこのような間接情報が多く含まれているという点で重要な役割を果たしていると考えられる。

7.1.7 仮想共同作業空間

人工現実感や臨場感通信技術の研究が盛んになるにつれて、これらの技術を共同作業支援に応用しようという考え方も増えつつある(例えば[SY190])。米国のルーカス・フィルムは、コンピュータ・ネットワーク内に、複数の人間が同時にアクセスすることのできる、もう一つの世界を作り上げることを目標として、HABITATという実験的なシステムを構築し、運用している[Log89]。この世界の中では、人の良く集まる場所が発生するなど、現実の世界が持つ、コミュニケーションの特徴が見られる。

筆者は、このような仮想的な共有世界を共同作業に利用するためには、共同作業に必要な間接情報がその仮想世界の中で得られる必要があると考える。ネットワークに接続されたワークステーションの世界では、“who”, “w”, “finger”といったコマンドによって、誰が、いつ、どこで、何をしているかといった情報を得ることができる。これらは有効な間接情報であり、これらの情報によって相手の存在を確認した後、“talk”コマンドによって会話を開始するということはよくおこなわれる。HABITATにおいていわゆる「たまり場」ができるのは、いつ頃の場所に行けば、他の人間に会えるかと言う情報を得ることのできるような環境が(意図したものではないとしても)与えられているからである。RootらはCRUISERによって、仮想世界の中での偶然の出会いを提案したが[Roo88]、筆者はさらに積極的に、前述したような間接情報をも、提供するべきであると考え。必要とされる間接情報は、おこなわれる共同作業の種類によって異なることが予想され、提供されるべき間接情報の種類、量などは今後の研究課題である。

7.1.8 柔軟性の高いシステム

本論文における実験結果から、その表現が定型的である場合には必ずしも手振りが最も有効な手段ではなく、むしろ図形的な表現である動作指示カーソルの方が有効であることがわかった。しかしながら、非定型的な表現や、図形によって表しにくい表現が必要となった場合には、やはり手振りをそのまま伝達する方が有効であると考えられる。従って、システムはこの双方の利用を支援し、必要に応じて、柔軟に表現方法を変更可能であることが望ましい。しかしながら、本論文におけるシステムでは、動作指示カー

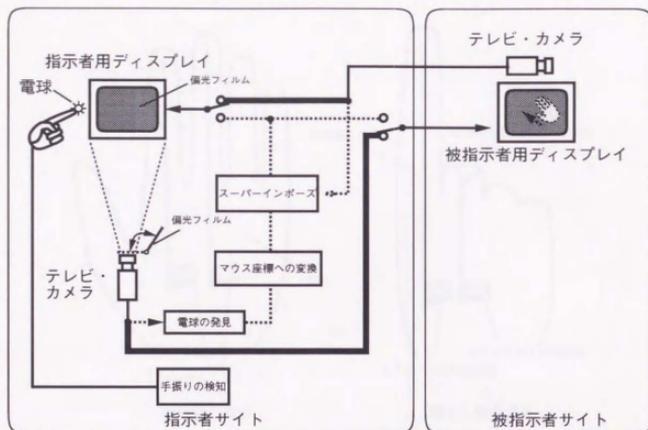


図 7.6: 柔軟性の高い、手振り合成システムの概観図

ソルと手振りを同時に利用することができない。さらに、動作指示カーソルを利用するためのマウス操作に時間を要するという欠点を持っている。手振りは、素早く指さしをおこなうことができるうえに、手が作り得るいかなる形状にも素早く変化させることが可能であるため、表現時間の短さという点で有利である。そこで、手振りから動作指示カーソルへの変更とカーソル操作を素早くし、さらに動作指示カーソル利用時の形状の選択時間を短縮するためのシステムを試作した。

本論文における実験より、遠隔からの操作指示に利用される手振りの多くが指さし型による表現であることがわかる。MCの操作説明においては、この形状によって表現される機能のほとんどが位置表現であり、モデル実験に動作指示カーソルを利用した実験から、このような場合には矢印型のカーソルの方が有効であるという結果が得られている。そこで、本システムにおいては、通常は手振り画像を対象物画像にそのまま合成し、手の形状が指さし型であることを検知した場合のみ、コンピュータ画像を合成することとした。

システムの概観を図 7.6 に示す。手の形状はコンピュータによって判断され、それに応

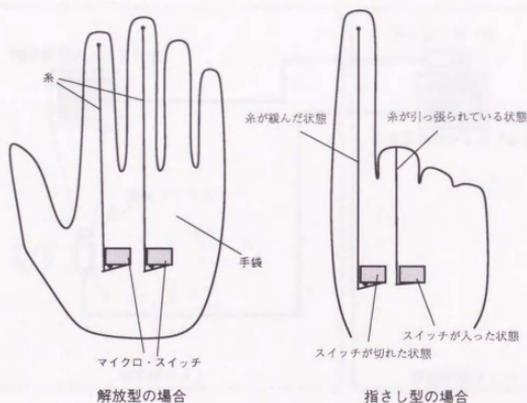


図 7.7: 指さし型検知用の手袋

じてシステムは画像の伝達経路を二通りに切替える。図で太い実線は通常の手振り画像を合成する場合の経路で、点線は指さし型の場合に切替えられる経路である。指示用ディスプレイの表面には偏光フィルムが貼ってある。そのディスプレイを撮影するテレビ・カメラのレンズの前にも、ディスプレイ表面の偏光フィルムと直交するように偏光フィルムが置かれ、指さし型の場合のみレンズを覆い、それ以外の場合にはレンズを覆わないような位置に移動される。

まず手の形状の検出のための手袋を製作した。この手袋にはマイクロ・スイッチが二つ、手の甲にあたる部分に図7.7のように固定されており、それぞれのスイッチのアーム部分が、人さし指と中指の先端と糸で結ばれている。従って指を曲げると糸が引っ張られ、各々の指に対応したスイッチが入ることになる。指さし型の場合には人さし指のみが曲がっている状態であるため、マイクロ・スイッチの片側のみが入っている状態となる。手を開いている場合には両方のスイッチが切れ、手を握っている場合には両方のスイッチが入ることになる。このマイクロ・スイッチの状態はパーソナル・コンピュータによって判断される。手袋の人さし指の部分の先端には電球が取り付けられており、指さし型の場合にのみ電球が点灯される。

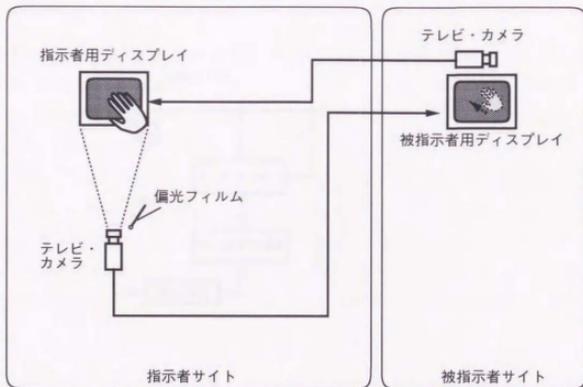


図 7.8: 指さし型以外の手の形状の場合

指さし型以外の形状を利用している場合には、図 7.8 に示したシステムと等価である。この時はテレビ・カメラの前に偏光フィルムが存在しない状態であるため、指示者用ディスプレイ、及びその上で利用される手振りがそのまま被指示者側のディスプレイに表示されることになる。

指さし型の形状を利用している場合には図 7.9 に示したシステムと等価である。この時はテレビ・カメラの前に偏光フィルムが存在するため、これによって指示者用ディスプレイの画像は撮影されず、手振りのみが分離されて撮影されることになる。この時、指先の電球が光るため、コンピュータは画像処理によってこの電球を探しだし、指先の位置であると判断する。この指先の位置を指示者用ディスプレイ上の座標値に変換した後、その位置にマウスカーソルをスーパーインポーズし、表示する。これによって指先の位置に応じてマウス・カーソルを移動させることが可能となる。この状態の時、ディスプレイの下部に動作指示カーソルのメニューが表示されるため、指先を表現したいカーソル形状の上に移動すると、画面中央に大きくその形状が表示される。これによって指さし型のみで位置表現、動作表現が可能となる。本来であれば、動作表現も、指さし型によるメニュー選択ではなく、その自然な手の形状(掴み型等)、動作(回転表現)、及び言

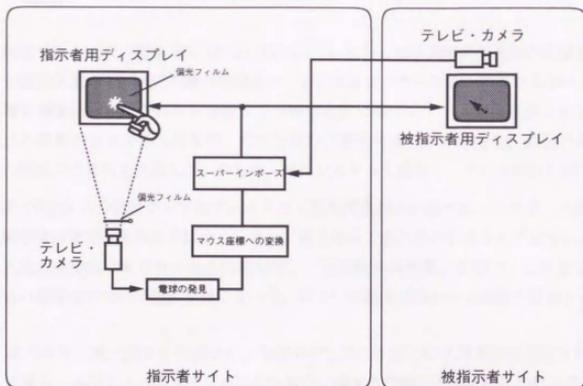


図 7.9: 指さし型の形状を利用した場合

語表現等に基づいてコンピュータによって判断され、自動的に動作指示カーソルの形状へ変化することが望ましいが、現在は困難であり、今後の課題である。

このようなシステム構成によって、手振り表現と動作指示カーソル表現との間を、手の形状を変化させるのみで移行することが可能となり、また指先による自然な位置表現によってカーソルの位置の移動や、動作指示カーソル形状の変更がおこなえるため、マウス操作に用いていた時間を短縮することが可能となる。現在のシステムでは、コンピュータの計算速度の制約によって指先位置の発見速度が遅いことなどから、マウスの移動が十分に円滑におこなえない。また、指さし型による、位置表現、回転表現以外の表現(例えば方向表現)には対応していないことなどから本システムがそのまま有効に利用されるかどうかは疑問であるが、今後の研究の方向性を示していると考えられる。

7.2 結論

本論文では、まず、従来 CSCW では扱われていなかった空間型共同作業の支援をおこなう必要性を述べた。研究の概念的枠組として、コミュニケーションにおけるセットアップ段階と情報伝達段階の存在を考慮し、その考え方に基づいて、人間の意思にもとづいた視点の位置的な可変性と共有性、共有空間の位置的な可変性、可確認性、表現のあいまい性の削減の必要性を主張した。そして、試作システムを構築し、その有効性を示した。

従来 CSCW の分野においてはデスクトップ型の作業のみが扱われていたが、人間同士の共同作業は筆記作業のみではなく、また、机上のみでおこなわれるものではない。従って、三次元空間内でおこなわれる共同作業、「空間型共同作業」を扱い、これを支援するための問題点について議論をおこなった。以下に本論文で得られた結論を要約する。

- 共同作業支援に関する考察から、現在の CSCW 研究における実画像通信を利用した研究、及びコミュニケーションの定型性に関する問題点と本研究におけるアプローチをまとめた。すなわち、
 - フォーマル(定型的)なコミュニケーションとインフォーマル(非定型的)なコミュニケーションは分離されるべきではなく、コミュニケーションはその両面性を持っている。従って、本論文においても、コミュニケーションの定型性に留意しつつ、柔軟にその両面を採り入れる。
 - 実画像を利用した共同作業の具体例が望まれているため、本論文を持ってその一例とする。
- 研究の概念的な枠組として、コミュニケーションはセットアップ段階と情報伝達段階からなると考えた。より具体的にはコミュニケーションにおける視点に注目し、視点の共有性、位置的な可変性が必要であると考えた。
- 対面時のコミュニケーションの分析から、機械操作説明を対象としたコミュニケーションは、視点共有段階と動作・操作等の伝達段階の二段階に大別されることを示し、各々の段階において利用される表現を解析し、支援する必要があることを示した。
- 視点に追従するテレビカメラ、SharedCameraを製作し、装着者の視野への追従性を確認することによって、その有効性を示した。

- SharedView は視点の位置的可変性、共有性の点で有効であり、モデル作業、遠隔地からの MC 操作指示、研究室内の機器設定の遠隔指示などを通して、視点の共有による方向性に関する主観的表現の相違の減少、視点的可変性による作業の効率化、コミュニケーションにおける言語的な負担の減少を確認し、従って本システム、及び研究のアプローチが正当であったことを確認した。
- コミュニケーションのフォーマルなアプローチとして動作指示カーソルを利用することによって、表現のあいまい性を減少させることができた。その結果として、動作表現における言語的な負担を減少させることが確認できた。

この論文によって得られた結論は必ずしも機器操作指示にのみ適用されるものではなく、オフィス・ワークにおいても十分に適用され得るものである。すなわち、オフィスにおいてさえも、共同作業の対象となる物体は机上に広く散在し、また、オフィス内のあらゆる場所にその共同作業空間となり得る対象は存在する可能性がある。より、一般的なコミュニケーションを考えた場合でも、人間が見たり、見せたりする場所は固定的ではなく、空間内を自由に移動することが多い。従って、視点に注目した考え方は、より一般的にコミュニケーションを支援を考えた場合にも必要であると考えられる。本論文においては、空間型の共同作業を扱ったが、これは、従来の、固定的な実画像システムを利用してきた研究に対する問題点を明確に示す目的をも持っている。

以下に各章の結論をまとめる。

第1章

産業界では国際的な地方分散化が進む一方、Computer Supported Cooperative Work (CSCW) という分野が注目を集め始めている。また、臨場感通信システム研究もますます盛んになりつつある。このような流れの中で、臨場感通信システムのように、複数の感覚チャネルを利用して、産業界における現場間のコミュニケーションを支援するためのシステムを研究する必要がある。

第2章

現場間のコミュニケーションを支援するためには、従来 CSCW で扱ってきたデスクトップ型の作業ではなく、空間型の作業を研究するべきであると考えられる。この研究を進める

ために、コミュニケーションをセットアップ段階と情報伝達段階の二つの段階からなる
と考える。従来の CSCW 研究の多くはシステムの通信速度の向上といった、情報伝達段
階に注目した研究が多かったが、ここではそのようなシステムをいかに円滑にセットアッ
プするかという側面にも注目する。

一方、従来のほとんどの CSCW 研究ではフォーマルに作業を支援するか、あるいはイ
ンフォーマルに作業を支援するかのどちらか一方の立場をとっていたが、本論文ではこ
れらは分離されるべきではなく、同時に支援され得るという立場をとり、フォーマル性、
インフォーマル性をいかしたシステム設計を考えるものとした。さらに、従来複数の表
現手段を利用したコミュニケーションの研究は、各種通信チャネルの与える心理的な影
響に着目した研究が多かったが、本論文では、伝えられる表現そのものに注目し、でき
るだけ簡便な表現で情報を伝達するためのシステムを考えることとした。

第3章

本論文では空間型の作業として、機械操作説明をおこなった。予備的な実験から、空
間型の作業に対して、実画像通信が情報伝達効率、そして心理的な面から有効であるこ
とがわかった。また、この作業においては、コミュニケーションは視点の誘導と、操作・
動作の伝達という2段階からなることがわかり、このときインフォーマルな特徴として、
視点の位置的な可変性が重要であることがわかった。

第4章

まず、実験を簡略化するためにモデル作業を考案し、対面での場合と、従来の実画像
通信方式を利用した場合とのコミュニケーションを、利用された言語、手振りによる表
現数によって比較した。その結果、視点の相違が主観的な表現の相違を生じさせ、コミュ
ニケーションの円滑性を損なわせることがわかった。この点から、セットアップ段階に
おいて視点の共有性が必要であること、また簡便に視点共有を実現するためにも視点の
位置的な可変性が必要であり、それによって情報伝達段階が円滑となることが証明され
た。

また、手振りは非常に有効な手段であることがわかり、視点の可変性とともに関有作
業空間の位置的な可変性も必要であることがわかった。一方、手振りの利用方法の問題
点もあり、よりあいまい性の少ない表現が望まれることがわかった。

第5章

視点の位置的可変性と共有性を高くするためのシステムとして、人間の視点に追従して画像をとらえるための装置、SharedCameraを開発し、頭部搭載型ディスプレイ(HMD)と組み合わせたシステム: SharedViewを開発した。また、シンボル化した表現として、動作指示カーソルを利用することとした。

第6章

SharedViewをモデル実験、MCの遠隔操作指示実験、研究室内の機器設定実験に利用した。また、動作指示カーソルをモデル実験に利用し、それぞれ表現数の解析、作業時間の測定、会話内容の検討から、その有効性を確認した。



謝辞

本論文は、筆者が1988年春から1991年冬にかけて、東京大学大学院工学系研究科、情報工学専攻博士課程在学中におこなった研究をまとめたものである。本研究は決して筆者個人ではなし得ず、まさに共同作業の結果である。多くの方々から頂いた御指導、御協力、御支援に心から感謝の意を表したい。

石井威望教授(慶應義塾大学環境情報学部)、廣瀬通孝助教授(東京大学工学部機械情報工学科)には、筆者の大学院在籍中の研究全般に渡って、終始貴重な御意見、御指導を賜わった。

東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻の和田英一教授、井上博允教授、田中英彦教授には、論文をまとめる上で、多くの御助言を頂いた。

三浦宏文教授(東京大学工学部機械情報工学科)には、筆者の学部における卒業論文の御指導以来、研究から私事に至るまで、多くの御助言、御指導、御鞭撻を頂いた。

東京大学工学部産業機械工学科の長尾高明教授、畑村洋太郎教授には、実験用の機械、及び実験室をお貸し頂いた。

中島尚正教授(東京大学工学部産業機械工学科)には、設計における人間の行動に関し御助言を頂いた。

下山勲助教授(東京大学工学部機械情報工学科)には、筆者の大学生活において、公私に渡り、常に御助言、御指導を頂いた。

光石衛助教授(東京大学工学部産業機械工学科)には、論文をまとめるにあたり、度重なる御指導に、お時間をさいて頂いた。

稲葉雅幸助教授(東京大学工学部機械情報工学科)には、論文をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた。

中垣好之技官、田中雅之技官には、実験への御助力、物品の購入など、研究全般に渡っ

て、御協力頂いた。

三浦純氏(現在、大阪大学工学部助手)には、本研究の進行、及び論文のまとめ方に対して多くの御助言を頂いた。

研究室内の先輩、同輩、後輩諸氏には、研究室における生活を通して、広く御協力を頂いた。特に、小池英樹氏、干冬氏には、研究に関して有益な御討論をして頂いた。また、三井博隆君にはCTKのインプリメントに御協力を頂いた。本研究テーマを共同で推進して頂いた後輩諸氏、本研究室に在籍していたその他の諸氏に感謝する。

東京電力の名井健氏、甘利治雄氏には、研究環境の提供を含め、色々と御協力を頂いた。

NTTの石井裕氏には、CSCW研究に関して、御助言を頂いた。

以上の皆さんに深く感謝する。

最後に、研究生活をささえてくれた父、母、そして、由美子に感謝する。



付録 A

言語表現解析によるコミュニケーションの評価

A.1 コミュニケーションの評価手法に関する考察

心理学の分野における mediated communication に対する主たる興味は、メディアがコミュニケーションをおこなう人間の心理状態に与える影響である。従って、コミュニケーションの目的として選ばれる課題は、ある種の交渉、議論、ゲーム、単なる会話等であり、その評価は、交渉結果、ゲームの結果、アンケート結果等であった [Lin88, She89, Wil77]。

Smith らは eye contact の効果に注目して研究をおこなったため [SOO+91]、コミュニケーションの内容による eye contact の回数、時間を測定することによって eye contact を実現する画像通信装置 VideoTunnel の評価をおこなおうと試みた。この実験において与えられた課題は、コンピュータ上の共有環境である SharedARK を利用した問題解決であり、eye contact 自身が課題に直接関係する手段ではないため、SharedARK を利用した意義が薄れ、親和性に対する影響など、心理学的な考察へ向かわざるを得なかった。

Gale は、音声、画像が共同作業に及ぼす影響を測定するために、作業時間の測定、作業成果の検討、そして被験者へのアンケートを試みた [Gal91]。しかしながら、この実験の作業対象は、文書にされている情報の伝達や、スケジュール調整といった、視覚に頼らない情報を扱っているため、実画像の効果は作業時間に顕著にはあらわれなかった。また、作業成果に関しても、共同でスライドを作成するという課題に対しては、画像の有無による作業成果の明確な差を見出すことはできなかった。作業成果による評価をおこなうためには、限られた時間内で、明確に評価値を決定できる作業を選択する必要があると考えられる。

Chapanis は、コミュニケーションの条件として、対面、音声のみ、遠隔筆記装置 (teletograph)、タイプライタの四種類を通信媒体として利用し、これらの通信媒体の、情報伝達作業のためのコミュニケーションに対する影響を調べた [Cha88, Wil77]。被験者は seeker と source の二人であり、seeker は与えられた作業を達成するために必要な情報を source から得なければならぬように問題設定がなされていた。彼らは評価指標として作業完遂時間と、言語的な特徴を測定することを試みた。言語的な特徴を評価するために、9 種類の評価値を選択している。それらは: (1, 2) 被験者によって発せられたメッセージ、センテンスの数。(3, 4) 1 メッセージ、あるいは 1 センテンス中の単語数。(5) 疑問文の比率。(6) 被験者が利用した総単語数。(7) 被験者が利用した異なる単語の種類。(8) 総単語数に対する単語の種類比 (type-token ratio)。(9) 1 分あたりに利用された単語の数 (communication rate) である。この解析から、作業時間に関して、音声の有無が大きく影響し、画像の有無の影響は小さいことを見出した。言語解析の結果から、音声を利用した場合には多数、多種類の単語を利用すること、type-token ratio は筆記によるコミュニケーションの方が大きいことを発見した。すなわち、自由に会話がおこなえる場合には非常に冗長に言語を利用し、そうでない場合にはなるべく無駄のないように言語を利用するということがわかった。

		TALK		
		LIST	DRAW	GESTURE
Action	Function			
	Store information	CONVENTIONAL VIEW		GESTURAL EXPRESSION
	Convey ideas			
	Represent ideas	DEVELOPING IDEAS		
	Engage attention	MEDIATING INTERACTION		

図 A.1: Workspace Activity を解析するための枠組

Tangら [TL88] は、共同作業を理解するためには、実際の共同作業においておこなわれる行動を解析し、理解することが重要であると考え方にに基づき、共同での描画作業の解析をおこなった。彼らは、このような作業がおこなわれる場所での行動を workspace activity と呼び、そのような作業を解析するための枠組として、コミュニケーション行動を、action と function という二つの次元から解析することを提案した。action とは行動

の種類であり、list, draw, gesture の 3 種類を選択した。function とは各 action が情報伝達のために果たす機能であり、store information, express ideas, mediate interaction の 3 種類が選択された。ビデオ・テープに記録された共同描画作業から、action と function の組合せ別にその発生回数を数え、図 A.1 に示す表を満たすことによって、ある項目の発生回数の分布を、コミュニケーション解析のためのデータとした。ただし、その数値の大きさによって単純にコミュニケーションの良否を判断することはできないため、会話内容の解析などと併用し、コミュニケーション行動を理解するための材料としている。この研究の功績は、従来は言葉のみの解析、あるいは、コミュニケーション結果のみの解析が主流であったのに対し、メディア別に、さらに機能別に解析するための手法を提案し、マルチメディア通信において、どのようなメディアにどのような機能を持たせるべきかを判断するための有力なデータを提供する点である。Bly はやはり描画面 (drawing surface) での行動を actions と uses の二つの次元に分類し、actions として draw, write, gesture に、uses として illustration, emphasis, reference, other に分類した。Bly は主として action 別の回数の分布を求め、異なった通信手段を利用した場合の分布の変化を検討することによって、共同描画作業の解析、通信システムの有効性の比較評価に利用した [Bly88]。また、この解析手法を、新たに作成したシステムの有効性を示すデータとしても利用した [BM90]。

A.1.1 本論文における評価法に関する考察

本論文の目的は空間型共同作業を支援する実画像通信システムに必要な機能を明らかにすることであり、複数の通信手法を比較するためにも、評価手法が必要となる。従来の研究成果を考慮すると、アンケート等による親和性の評価、あるいは作業成果による評価は困難であると考えられる。作業完遂時間による評価は、作業が人間の推敲を要するような高度な作業になるほど、その大小による判断が困難となる。従って、時間計測も有効な評価手段であるが、それ以外の手法による解析も併用し、総合的にシステムの評価をおこなうことが強く望まれる。本論文では、作業対象に直接働きかける行動を観察し、評価の参考とした Tang, Bly らによる手法、及び言語表現を解析した Chapanis による手法を参考とする。ここでは特に本論文において利用した言語表現の解析手法に関して解説をおこなう。

A.2 言語表現解析によるコミュニケーションの評価手法

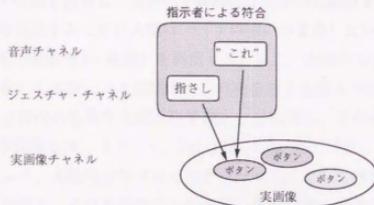
A.2.1 感覚チャネルのスイッチングを利用した評価

本論文では、人間同士のコミュニケーションを次のように考える。人間同士が対面でコミュニケーションをおこなう場合、ある情報を伝達するために、人間は視覚、聴覚、触覚といった各感覚チャネルで情報を分担し、かつこれらを同時に利用すると考えられる。しかしながら、現時点において、臨場感通信システム等を利用したコミュニケーションでは、全ての感覚チャネルを対面時と同様に利用することはできない。むしろ、対面ではあり得ないような利用を積極的に考えることも可能である。すなわちこれは、通信システムにおいて、各情報チャネルを積極的に変形させていく作業である。一方、各種情報チャネルはお互いに情報を分担しながら利用されているため、あるチャネルが変化し、そのチャネルが負担する情報の質や量に変化することは、併用されている他の情報チャネルの負担する情報の質や量に影響を与えることを意味する。例えば視覚チャネルと音声チャネルを併用している時に、視覚チャネルをカラーから白黒に変化させれば、色情報が伝えられなくなる。仮にこの色情報を伝達する必要があるれば、言葉によって「これは赤い色をしています」と表現しなければならず、このようにあるチャネルにおいて欠落した情報は、他のチャネルによって補われざるを得ない。従って、ある感覚チャネルを変化させた場合に、変化せずに定常的に利用される情報チャネルに注目し、分析することによって、与えられた変化の評価をおこなうことができると考えられる。また、この方法の有効性を示す考え方として、人間はその行動手段において選択の余地がある場合には、楽な方法、あるいは消費するエネルギーがより少ない手段を選択するであろうというものがある [HA89]。この考え方からすれば、コミュニケーションの手段として、複数のチャネルを選択する余地がある場合、人間は最も楽に利用できるであろうと判断したチャネルを利用すると考えられる。従って、あるチャネルを変化させたことによって、他のチャネルの負担が増加した場合には、与えた変化の有効性が低いと考えられる。また、Reder は [RS88] コミュニケーションの方策によって、人間が通信媒体を選択 (channel choice)、変更 (channel switching) する行動の存在を、電子メールの例を用いて説明している。

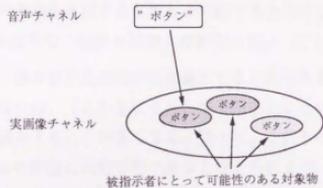
本論文においては、通信システムの評価にこのような感覚チャネルの選択、スイッチングを利用することとし、通信手段の変化を受ける感覚チャネルとして画像情報を、評価を受ける感覚チャネルとして音声 (言語) 情報を扱うこととする。

A.2.2 非言語的コミュニケーションと会話

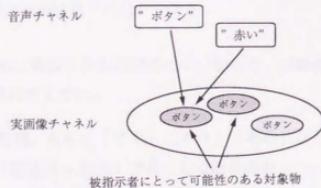
コミュニケーションによってある情報を伝達しようとする場合、あいまいさは必ず生ずる。例えば、「ボタン」という言葉を伝達された人間は、その単語のみでは、洋服のボタンであるのか機械についているボタンであるのか、機械のボタンであっても、どのようなボタンであるのかを判断することはできない。画像を併用している場合にはこのようなあいまいさは減少すると考えられるが、画像はその中に符号化されていない多種類、かつ大量の情報を含んでいるために、依然としてあいまいさが残ることとなる。前述の「ボタン」の例でも、機械の操作盤の画像が送られているときには、洋服のボタンを想像する可能性は低いが、画像内に複数のボタンが存在する場合には、その中のどのボタンを示しているのかは判断できない。このようなあいまいさを解消するために「赤くて丸いボタン」といった名詞句等の表現を併用することとなる。もしコミュニケーション手段として手振り等の非言語的手段を利用できる場合には、このような手段を併用することによって、あいまいさを減少させることが可能であるため、修飾語の利用頻度が減少することとなる。実際の作業において、同じMCの中の同じ対象物に対して、対面の場合には「ここを一回押してください」という表現であったものが、遠隔からディスプレイを見ながら指示する場合には、「さっき押したボタンの一つ右のわりと長いボタン。それ、それを一回押してください」といった表現に変化しており、明らかに修飾語が増加していることがわかる。すなわち、非言語的な手段が適切に利用されている場合には言語的な負担が減少し、言語表現数が減少する傾向があると考えられる。以上の考察より、本論文におけるような実画像通信支援システムにおける非言語的な要因の効果を評価する手段として、言語表現数を解析することは有効であると考えられる。



複数の情報チャンネルを併用した場合



チャンネルが制限され、メッセージのあいまい性が大きい場合



情報の追加によってあいまいさを減少させた場合

図 A.2: コミュニケーションのあいまいさ

A.2.3 会話の品詞解析

人間は、動詞句で行為を表現し、名詞句で物理的な世界の対象物を表現する [Win77]。すなわち、対象物を表現するために人間は、「下の赤いつまみ」といった「修飾語(連体修飾語、形容詞、形容動詞等)+名詞」を利用する。また、山田らは [YAH⁺90] 三次元空間内の対象物の位置の日本語による表現を、「対象を表す名詞+空間語」という構造に分析し、空間語を空間内の重要な位置表現手段として利用し、その考え方の有効性を示した。ここでいう空間語とは、「上、下、左、右」「内、外」「近く」「真中、裏」といった表現である。従って、人間同士のコミュニケーションにおいて対象物を表現する場合には、対象を表す名詞と、それを修飾する形容詞、形容動詞、空間語が利用されると考えられる。一方、行為を表現する場合には、「赤いボタンを下へ押してください」といったように、「対象の表現+動作の方向や様子の表現+動詞」で表現されると考えられる。ここで、この動作の方向を表現する言葉も空間語であるとする。動作表現のための空間語には、「右へ」のような「名詞+助詞」が存在する。

このようにして、様々な言語表現が実画像とともに利用されるが、手振り等のチャンネルを利用可能な場合には、「これをこう押してください」というように、空間語やその他の修飾語の数が減少することが多くなる。従って、これらの言語表現数を数えることによって、システムの評価に利用可能であると考えられるが、いかなる品詞を数えるべきかは明確ではない。そこで、会話に利用された品詞を名詞、代名詞、修飾語、動詞に分類してその表現数を数え、本論文ではこれを「品詞解析」と呼ぶこととする。ただし、ここでいう品詞とは、国文法に従った品詞ではない。簡単のためにこのような品詞分類名を利用するが、実際の定義は以下の通りである。

名詞 対象物を表すために利用された名詞のこと。従って、空間語となる「上、下、左、右」といった名詞は含まない。

代名詞 国文法上の代名詞。さらに「この」「その」「あの」など、連体詞ではあるが、文語においては「代名詞+助詞」であった単語を含む。

修飾語 形容詞、形容動詞、副詞(状態・程度の副詞)、名詞+格助詞で修飾語となった文節を含む。空間語はこの中に含まれる。

動詞 国文法上の動詞。

実際の解析では、利用された言語表現全てを数えるのではなく、次節に示される機能解析の分類に含まれるもののみを数えた。

A.2.4 機能解析

非言語的なコミュニケーション・チャネルの利用が、どのような内容に対してどの程度有効に機能するかを明らかにするために、Tang[TL88]らによる action/function 解析の手法を応用する。すなわち、各 function 毎にその表現数を数えるというものである。本論文では、action として手振りと言語表現を、function として、おおよその分類としては、位置表現、動作・操作表現、確認表現を挙げる。ただし、この分類は、解析の着目点に応じて、実験毎に異なる。なお、本論文では function を機能と称することとする。各機能は具体的には以下のような表現がある。

位置表現 被指示者に対して機器のある特定の場所を見せるための表現。対象物を表す名詞、およびその修飾語が含まれる。

動作・操作表現 対象物の操作・動作を表現するために利用された動詞、およびその動詞を修飾するために利用された副詞、空間語等の修飾語。

確認表現 対話者の見ている場所、理解の程度を確認するための表現。手振りではこのような表現はなく、対面で対話者の顔を見る以外は会話によっておこなわれる。

言語表現解析に際して、機能への分類が困難であるような単語が多数存在したが、本論文では、主観的な判断に基づいて分類した。ただし、どの条件における実験に対する解析においても、同一の基準に従って数えることとした。

A.2.5 発話数と情報量

言語表現は情報を伝達するための手段である。従って、言語表現の量と情報のあいまいさとの間には何らかの関係があるはずである。そこで、言語表現数と情報量との関係を求めるための実験をおこなった。まず、垂直面上に半球を全く乱雑に、しかしある作業領域内に納まるように配置する。このとき、各半球はその置いてある位置以外は、形状、色とも同一の物を利用する。この半球が配置されている作業領域を、その全体が撮影視野に入るように平面の鉛直線上から撮影し、指示者の存在するサイトへ画像を送信

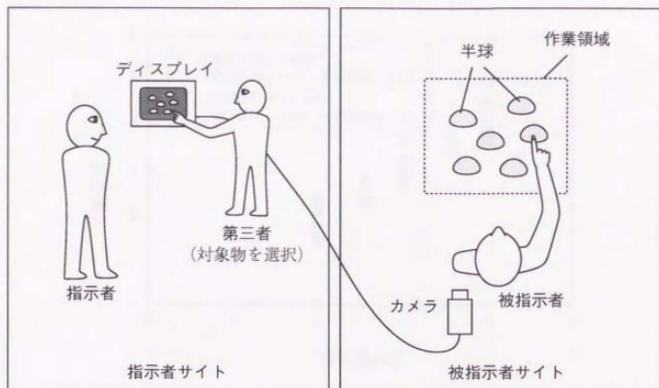


図 A.3: 情報量と言語表現数の関係を調べる実験

し、指示者はディスプレイ上でこの画像を見る。被指示者は作業領域の前に立つ。実験の開始と共に、指示者はある一つの半球の位置を言語のみによって表現し、被指示者はその半球の位置を理解した時点で半球に触れる。作業領域内に置かれる半球は2, 4, 6, 8, 12, 16個であり、毎回、全く乱雑にしかし、作業領域内に適当に分散するように置かれる。各個数ごとに15回から20回の位置伝達をおこなった。表現されるべき半球の位置は、指示者側サイトにいる第三者が適当に、ディスプレイ上のある半球を指さすことで選択した。これによって、指示者が説明しやすい半球を選択してしまうことを避けた(図A.3)。このときの指示者の会話をテーブルコードに録音すると共に、作業に要した時間を測定した。発話数は、位置を指定するために利用された言語表現数をもってその値とした。

被指示者にとって、 n 個の半球の中から一つが選択される確率は $1/n$ である。従って、シャノンの情報理論によれば、半球が n 個の場合、一つを選択するための情報量は $-\log 1/n$ である。このようにして、情報量と、指定する半球一つあたりの表現数との関係を求めた結果を図A.4に示す。この結果から、情報量と表現数には強い正の相関関係があることがわかった。言葉のみによる説明では、前回指定した半球を利用して、「その隣」といった代名詞を利用した表現が使用されることがある。「その」といった代名詞はそれ

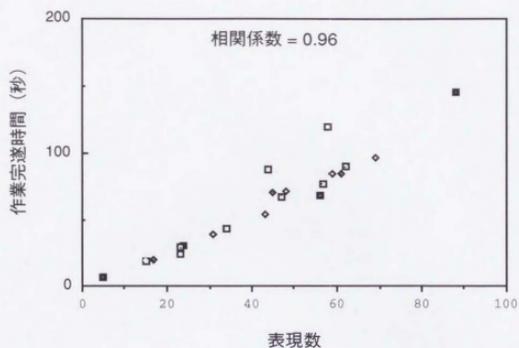


図 A.5: 位置指定のための表現数と作業時間の関係

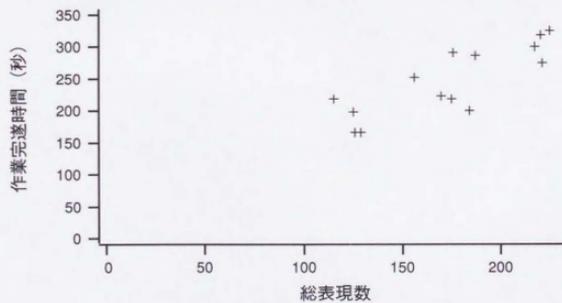


図 A.6: モデル作業における表現数の合計と作業時間の関係



付録 B

プロセス間通信を利用したソフトウェア開発を支援するツール: CTK

B.1 CTK 開発の目的

コンピュータ・ネットワークが整備され、保有するコンピュータの台数が増えるにつれて、プロセス間通信を利用したアプリケーションを必要とする機会が増えつつある。特に Computer Supported Cooperative Work (CSCW) 用のソフトウェア (グループウェア) ではプロセス間通信は必要不可欠の要素である。また、このような限定された目的以外にも、イーサネットや電話回線を利用した通信が一般化した現在、プロセス間通信を利用したアプリケーションを書く必要性は高まっている。しかしながら、多くのユーザ、研究者にとって、プロセス間通信を利用したソフトウェアの記述はそれほど容易ではない。それには以下のような理由があげられる。

- 通信をおこなうコンピュータの種類、言語、通信手段によってプログラミングの方法が異なるため、アプリケーションの利用目的、利用状況などに応じて通信の低レベルからプログラミングを開始する必要がある。
- 2つ以上のプロセス間通信を記述するのは難しい。
- そのため、目的とするアプリケーションの開発に非常に時間がかかる。
- 複数のプロセスが関わるため、デバッグが困難である。
- そして、最も重要な理由として、多くの研究者はソフトウェア開発の熟練者ではない。

そこで、これらの問題点を解決し、プロセス間通信を利用したアプリケーションを簡単、かつ短時間で開発することを支援するためのライブラリ: Colon ToolKit (CTK)、及びツール群を開発した。

B.2 CTK 開発の基本的な概念

B.2.1 BPSS

このツールはプロセス間通信に関する知識が少ない者であっても、簡単に利用可能であり、実際に利用に絶え得るものである必要がある。そのための要因として、以下の概念を提案する。

人間同士のコミュニケーションを達成するためのシステムは、「短時間に高い通信速度に到達することができる」ことが重要であると考えている。このようなシステムの性能に対して、BPSS という概念を提唱する。BPSS とは Bit Per Square Second の略である。BPS(Bit Per Second) は通信速度を表現するために通常良く利用される単位であるが、BPSS は通信の開始を決定してから、いかに速く高い BPS を達成可能かという単位、すなわち通信加速度である。この考え方からいうと、たとえ通信速度は低くてもシステムのセットアップにかかる時間が非常に短ければシステムとしては高く評価されることとなる。システムのセットアップの意味を広くとらえて、システムの開発段階から考えれば、グループウェアなどシステム構築のためのソフトウェア開発を効率化することも重要である。事実、実験的なシステム構築の場合には多少性能が悪くとも素早くシステムを作成し、実験を行なうことが必要となる場合が多い。従ってプロセス間通信を行なうソフトウェアの開発においても、短時間に通信速度の高いプロセス間通信アプリケーションを開発可能なツールが望まれる。

B.2.2 ブラガブル

高BPSSを実現するための概念としてブラガブルという概念に注目した。ここでブラガブルとは、ある実行中のアプリケーション、あるいはそのネットワークに、別のアプリケーションを容易に接続切離することができることをいう(図 B.1)。

たとえば、家において掃除をしたいと思ったとする。そのとき、掃除器を持ってきて掃除したい部屋のコンセントにプラグを差しこむだろう。そして、掃除が終わったらブ

ラグを抜いて掃除器をしまっだろう。その間、家のその他の機能は阻害されない。

人間の行動は一般に Demand Activated であり要求、欲求にしたがって行動を起すことが多い。プラグابلシステムとは要求、欲求にしたがってある機能を使いたい間だけ使うことをユーザに許すシステムである。そのため、環境を全て持ちあるく「統合環境」システムに比べて軽量かつポータブルとなる。これはまた、環境を持たない既存言語へ組み込めば既存のソフトウェア開発システムにプロトタイプ機能をつけくわえることができるということでもある。

そもそもプラグابلという断面で見ると、世の中には多くのプラグابل・システムが存在する。ハードウェアはプラグابلにすることでメンテナンス・フリーになる利点があり先の家電などもその例である。ソフトウェア・システムでも例えば UNIX の Shell (Shell script) では、cat, sort, awk などのコマンドをパイプやリダイレクションを使って組み合わせて使え、これは cat, sort, awk などといったアプリケーションをプラグインして使っているといえる。また、X-Window system では各クライアントが X server にプラグインしている。Macintosh のリソースという概念もプラグابلである。

システムをプラグابلとする利点は、まず BPSS を高くすることができプロトタイプングの武器になること。各アプリケーションをツールとして再利用できること。また、各アプリケーションはモジュールとして完全に独立しているため明確に仕様を記述でき開発コストを下げるができること、などが挙げられる。この概念に基づき、以下に述べるツール、CTK を開発した。

B.3 CTK の概要

B.3.1 Colon, Semi-Colon

CTK では複数のプロセスが互いにメッセージを送り合うことによって作業が進行していく。あるプロセスにメッセージが到着するとそのメッセージに対応した関数が自動的に起動される。この、互いに通信をおこないながらある作業をおこなうプロセスの一群のことを Colon と呼ぶ。また、そこへプラグインされる一つのプロセスを SemiColon と呼ぶ。各 SemiColon は基本的に単独で存在し、動作することが可能であり、自分自身でユーザ・インタフェースを持っていればそれだけでアプリケーションとなり得る。現在のインプリメンテーションでは通信を管理するような特殊なサーバは存在せず、基本的な等価な機能を持った SemiColon のみから構成される。

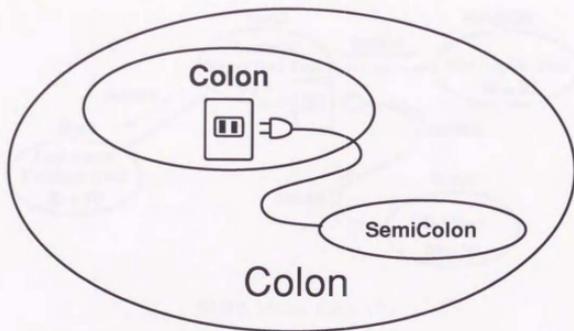


図 B.1: Colon, SemiColon

B.3.2 media

メッセージを交換するための物理的な通信路として、イーサネットのソケット、RS232C、電話回線による login を利用した通信などを利用することができる。CTK ではこれらの通信路を media と呼んでいる。一つのプロセスは複数の media を持つことができ、プログラムはプログラムの中で利用したい media を必要なだけ宣言する。この時以外はメッセージの授受に関して通信路の違いを意識する必要はない。

B.3.3 Colon ID

SemiColon は各々 ID 番号を持っている。また、各 SemiColon は自分の持つメディアの先にどの ID 番号を持った SemiColon が存在するかを知っている。これによって ID 番号を指定するだけでメッセージの送信先を同定することができる。

新たな SemiColon が接続されるとまず自分が接続されたことをブロードキャストし、各々の SemiColon のデータベースに登録させる。次に、接続した相手に対して、他にどの SemiColon が存在するかというデータを送ってもらい、自分のデータベースに、Colon 内に存在する ID を登録する。接続が切れる場合は、メディアの異常を検知した SemiColon

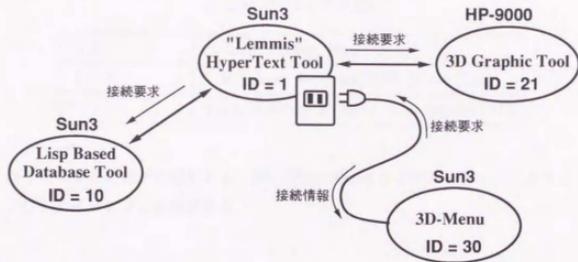


図 B.2: Media, Colon ID

が自分のデータベースからその ID、及び利用されていたメディアを削除し、Colonとしての動作を継続しようとする。

B.3.4 複数言語、インタフェースへの対応

研究室等では複数のコンピュータを利用していることが多く、新たなソフトウェアモジュールを作成する場合、ユーザは目的や、個人的な得手、不得手等に応じて、コンピュータの機種や言語を選択する。例えば、高度な三次元画像の描画はワークステーションでおこない、外づけのハードウェアのコントロールは、ハードウェアの組み込みが楽で安価なパーソナル・コンピュータを利用するといった要求が発生することが多い。これらの需要が発生した場合に、どの機種、言語においても即座にプロセス間通信の利用が可能であることが必要である。従って、CTKは複数の言語、インタフェースに対応している。現在インプリメントされているものの一覧を表 B.1に示す。また、この特徴による利点を箇条書する。

- Lisp の様なインタプリタは CTK によるアプリケーション開発時のデバッグ作業に有効である。
- 各言語、インタフェースに得意な分野のプログラムを記述し、作業を分担することが可能である。例えば、知識処理は Lisp で記述し、その結果を X-Window 上のハイパーテキスト・ツールに反映させたり、HP9000 上に視覚化して 3 次元表示を行

表 B.1: CTK の利用範囲

言語	C, Lisp, Prolog, HyperTalk
インタフェース	X-Window, Starbase(HP), HyperCard
マシン	Sun3, HP9000, PC9801, Macintosh, IRIS

なったりすることが可能である。特に HyperCard などはユーザ・インタフェースのプロトタイピングに有効である。

B.4 CTK を利用したプログラミング

CTK では BPSS を極力高めるために、プログラマができるだけ簡単にプログラムを記述できることを目標としている。

B.4.1 基本的なプログラミング

CTK を利用した C の基本的なプログラム手順と、最も単純なプログラム例を示す。まず、プログラム手順は以下の通りである。

- `ctk.h` をインクルードする。
- 自分の Colon ID を決定する。
- `media` を生成する。
- CTK のイニシャライズを行なう。
- 受け取ることのできるメッセージを登録する。
- メッセージの受信、実行のループに入る関数を記述する。
- メッセージに対応した関数を記述する。
- メッセージを送り出す場合、送る相手の ID、メッセージ名、引数を設定してメッセージを送出する。
- ライブラリをリンクしてコンパイルする。

最も簡単なプログラム例は以下のようになる。

```
#include "ctk.h"          /* 1 */

#define MYID 10           /* 2 */

main()
{
    CtkCreateSock();      /* 3 */
    CtkInitialize(MYID);  /* 4 */

    addMsg("Test", ctkTest); /* 5 */

    CtkMainLoop();       /* 6 */
}

int ctkTest(org, arg)    /* 7 */
    int org;
    unsigned char *arg;
{
    sendMsg(org, "reply", strlen(arg)+1, arg); /* 8 */
}
```

コンパイルは以下のように行なう。

```
cc -c test.c
cc -o test test.o ctk.o ctkSock.o ctkLib.o
```

以下、一部の項目に関して解説する。

- 1: ヘッダファイルのインクルード CTK のプログラムには必ずこのファイルをインクルードする。
- 2: ID 番号の決定 同一の SemiColon を複数起動することもあり得るため、同一の ID 番号が一つの Colon 内に複数存在することが許されている。しかしながら異なる Semi-

- Colon の ID は互いに重複しないことが好ましい。また、ID 番号の 0 番はブロードキャスト用の ID としてあらかじめシステムに予約されている。
- 3: media の生成** Colon に対してどのメディアで接続を行なうかによって、利用する数だけメディア生成用の関数を呼ぶ必要がある。メディア生成関数としては、例えば `CtkCreateSock()`、`CtkCreateTtya()` などが既に準備されており、ソケットを利用するか、RS232C を利用するかなどによって選択する。
 - 4: CTK のイニシャライズ** 関数 `CtkInitialize(int MYID)` によって実行される。この関数で自分の ID の決定、自分の ID のブロードキャスト、他の ID 情報の獲得、全ての `SemiColon` が共通に理解できるデフォルトのメッセージ群の登録が行なわれる。デフォルト・メッセージとは、個々の `SemiColon` が接続時に Colon として振舞うことを可能とするための重要なメッセージである。
 - 5: メッセージの登録** `addMsg(char *msg, int *func)` によって理解可能なメッセージと起動される関数を登録する。msg は送られるべきメッセージ名、func はそのメッセージによって実行されるべき関数である。呼び出される関数は、メッセージを送ってきた相手の ID とメッセージのアーギュメントを引数として渡される。アーギュメントはバイナリ・データをそのまま送るものであるため、どのような型のデータでも授受することができるが、Lisp、Prolog などとの通信を考慮する場合は数値も文字列に変換して送る場合が多い。
 - 6: メッセージ処理ループ** このループではまず自分の持つ全てのメディアを監視し、入力のあったメディアからメッセージを取り出す。自分宛のメッセージであれば対応する関数を実行する。自分宛でなければ適当なメディアへそのメッセージを転送する。
 - 7: CTK 関数の記述** `addMsg()` で登録した関数の実際の手続きを記述する。対応したメッセージが到着すると、`CtkMailLoop()` において自動的に起動される。org にはメッセージ送信元の ID が、arg には引数が代入されて、起動される。
 - 8: メッセージの送出** メッセージは関数 `sendMsg(int dest, char *msg, int arglen, unsigned char *arg)` によって送出する。dest は送り先 ID、msg はメッセージ名、arglen はアーギュメントのデータ長、arg はアーギュメント自身である。上記の例では、"Test" というメッセージを送ってきた相手に対してメッセージを送り返すという動作をおこなう。

- 9: ライブラリのリンク メディア毎にライブラリが用意されており、その時利用するメディアに応じてライブラリを選択し、リンクする。新たなメディアを利用する必要がある場合は、そのメディア用の新たなライブラリを作成するだけでよい。

B.4.2 CTK の高度な利用法

名前によるメッセージ送信

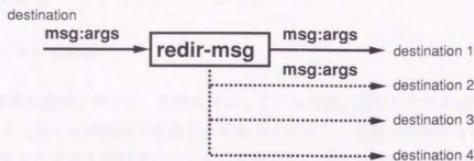
多くのユーザが、ID 番号の意味を理解しづらく、また、あるアプリケーションに対応した番号を記憶しづらいという問題点があったため、sendMsgBN() という関数によって、宛先として名前を利用することも可能とした。このためにはまず、ctk.hosts ファイルの中に ID 番号とそれに対応する名前を登録する必要がある。この名前は UNIX のディレクトリ名のように "/" で区切ることで階層構造を設定することが可能である。例えば "ctk/sc1", "ctk/sc2" という名前を持った二つの SemiColon が存在したとすると、sendMsgBN("ctk", msg, arglen, arg) を実行することで "ctk" という名前を階層を持った両方のプロセスに対してメッセージが送られることになる。このようにして、名前を階層的につけておけば、あるグループに対してメッセージを送ることが可能である。

リダイレクションとフィルタ

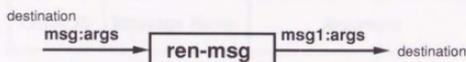
CTK にはメッセージの送り先を実行中に変えられる機能がある。これを利用することで動的なリダイレクションを行なえる。すなわち、センサから得たデータをコントローラ A から、コントローラ B へ切替えることができる。さらに、リダイレクションする相手を複数指定することも可能である。このリダイレクションによってフィルタ・プログラムも作ることができる (図 B.3)。

モニタリング

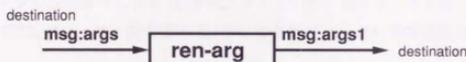
デバッグ時など、Colon 内部の接続状況、メッセージの交換状況のモニタリングが必要な場合がある。モニタリングのメッセージを受けた SemiColon は、メッセージを送出する毎にモニタ・プロセスに対して、送信メッセージ名、送信先などの情報を提供する。従って、モニタはリアルタイムにメッセージの送状状況をモニタリングすることができる。また、SemiColon の接続情報も取得することが可能である。



メッセージ送り先の多重化



メッセージ名の変更



アークギュメントの変更

図 B.3: フィルタ

Help

他のユーザによって記述された SemiColon を利用する場合、その SemiColon が受けとることのできるメッセージを記憶しておくことは困難である。この問題点を緩和するために、CTK は `addMsg()` によって登録されたメッセージのヘルプを表示する機能を持つ。各 CTK アプリケーションはヘルプ・メッセージを受け取ると、ヘルプを処理する CTK ツール (`ctkHelper`) に対して自分の ID と自分の理解できるメッセージを送る。 `ctkHelper` はそれを表示し、ユーザに示す。これによって、CTK ユーザは自分の使いたい CTK アプリケーションのオンライン・ヘルプを見ることができる。

B.5 CTK のインプリメンテーション

B.5.1 メッセージ構造

CTK は複数の通信メディア、言語に対応しているため、通信バケットの形態や、各言語におけるメッセージの処理方法はそれぞれのメディア、言語に依存することになる。しかし、これらの異なる環境でメッセージ交換をおこなうためには共通のメッセージ構造が必要である。このメッセージ構造はプログラマの負担を軽減するために簡単なもの

Colon ID	Message Name	Argument
----------	--------------	----------

図 B.4: CTK のメッセージ構造

とした。図 B.4 にメッセージ構造を示す。メッセージを送信する場合には“Colon ID”はメッセージを送る相手の Colon ID を指定することになる。また、受信する際には自動的にメッセージの発信源の Colon ID が代入されている。従って、メッセージが発信されるときには CTK によって、発信源の ID が付加されてメッセージが送信されなければな

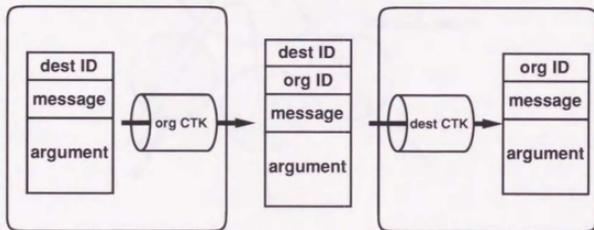


図 B.5: CTK のメッセージの送受信

らない(図 B.5)。メッセージ本体は、メッセージ名(Message Name)と引数(Argument)とからなり、それぞれ、SmallTalk の selector と argument に対応する。この様にして交換されたメッセージをどのように利用するかは個々の CTK に任せられるが、通常はメッ

セージ名に対応した関数を呼びだし、その引数として、CTK メッセージの Argument を利用する。

B.5.2 プログラム構造

CTK ライブラリの役割は、通信のルーティングをおこなうことと、メッセージの送受信、またそれに対応した関数の実行を支援するための関数を提供することである。CTK は複数の言語に対応しているが、ここでは最もインプリメントの充実した C 言語におけるプログラム構造 (図 B.6) を概説する。

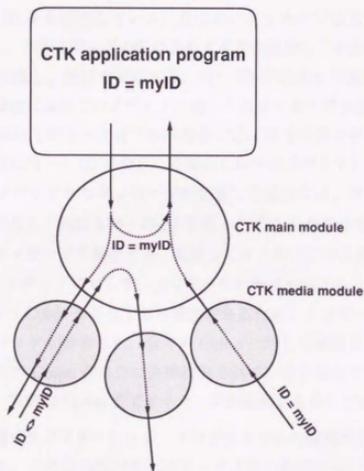


図 B.6: CTK の各モジュール構造と、メッセージの流れ

CTK では複数の通信メディアを扱う必要があり、また、新たな通信メディアの必要性に応じて後から簡単にそのメディアに対応したプログラム・モジュールを追加可能である必要がある。従って、CTK では、ライブラリをメイン・モジュールとメディア・モジュール

ルの2種類に分類しており、メディア・モジュールは必要に応じて、メイン・モジュールに対してプラグ・インされる。

メイン・モジュール

メイン・モジュールはメディア・モジュールとユーザ・アプリケーションとの中間に位置し、CTKの最も中核となるモジュールであり、通信の制御とメッセージの実行制御をおこなう。通信に関しては、メイン・モジュールは自分にプラグ・インされたメディア・モジュール、及びそのメディアの接続先に存在する Colon の ID を管理している。これは、自分のすぐ隣に接続された Colon の ID ばかりではなく、さらにその先に接続されている Colon の ID をも保存している。自分からメッセージを発信する場合にはその送信先の ID を確認し、どのメディアの先に存在するかを検索し、対応したメディア・モジュールにメッセージを引渡し、送信を要請する。同一 ID の Colon が複数存在する場合もあり得るため、その場合には全てのメディアに対してもメッセージを発信することになる。仮にメッセージの送信先が自分自身である場合には、自分自身でそのメッセージを受信するとともに、外部に同一の ID を発見した場合にはそのメディアに対してメッセージを発信する。外部のメディアからメッセージが到着した場合には、自分に対するメッセージであればそれを受信し、他にも同一の ID を持った Colon が存在すれば対応したメディアに対して同一のメッセージを転送する。到着したメッセージが自分以外の ID であれば、その ID の存在するメディアに対して、メッセージの転送をおこなう。前述した通り、同一 ID を持った複数の Colon が存在する可能性があるため、メッセージの送信時には、接続された全てのメディアが検索され、全ての Colon に対して発送される。このような機構によって、発信先の Colon が自分に直接接続されていない場合でも、パケット・リレー的な機構によって、目的の Colon までメッセージが送信されることになる。

メッセージの受信はアプリケーション・プログラムからの関数呼び出し、`getMessage()`によっておこなわれる。この関数呼び出しによって上記の動作が実行されるが、自分に対するメッセージを受信すると、返り値としてメッセージの送信元の ID、メッセージ名、そして引数が返される。メッセージと関数との対応づけはあらかじめ `addMessage()` 関数によっておこなわれ、メイン・モジュール内で管理される。`executeMessage()` はメッセージ名から対応した関数を検索し、発見した場合にはその関数を実行する。

このような構造によって、アプリケーション・プログラムは接続するメディアを決定する時以外は一切通信メディアの低レベルな送受信を気にする必要はない。

メディア・モジュール

メディア・モジュールは通信メディアに依存した方法で実際にメッセージの送受信をおこなうためのモジュールである。従って、メイン・モジュールとメッセージ・データの受渡しをおこなうためのデータ構造、及びそのための関数名は全てのメディア・モジュール間で共通であるが、実際の通信路を利用する方法はそれぞれで異なる。このため、メイン・モジュールからは常に同等のメディアとして見る事が可能である。従って、メイン・モジュールとのメッセージ授受のデータ構造、関数名を守る限りにおいて、自由に新たなメディア・モジュールを構築し、接続していくことが可能である。

B.6 CTK に関する考察

B.6.1 BPSS と BPS

現在 CTK を利用している経験から、BPSS の高さは実感している。しかし通信量の増加、ネットワークの拡大に伴って BPS が減少するのも事実である。筆者らは BPSS と BPS との関係は以下のように考えている。

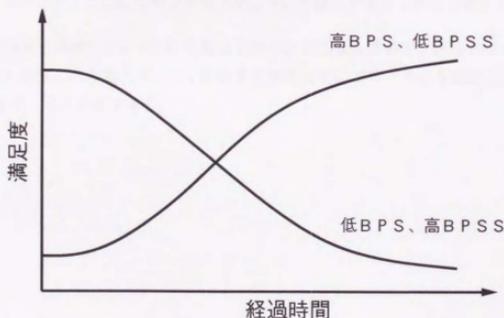


図 B.7: BPSS と BPS

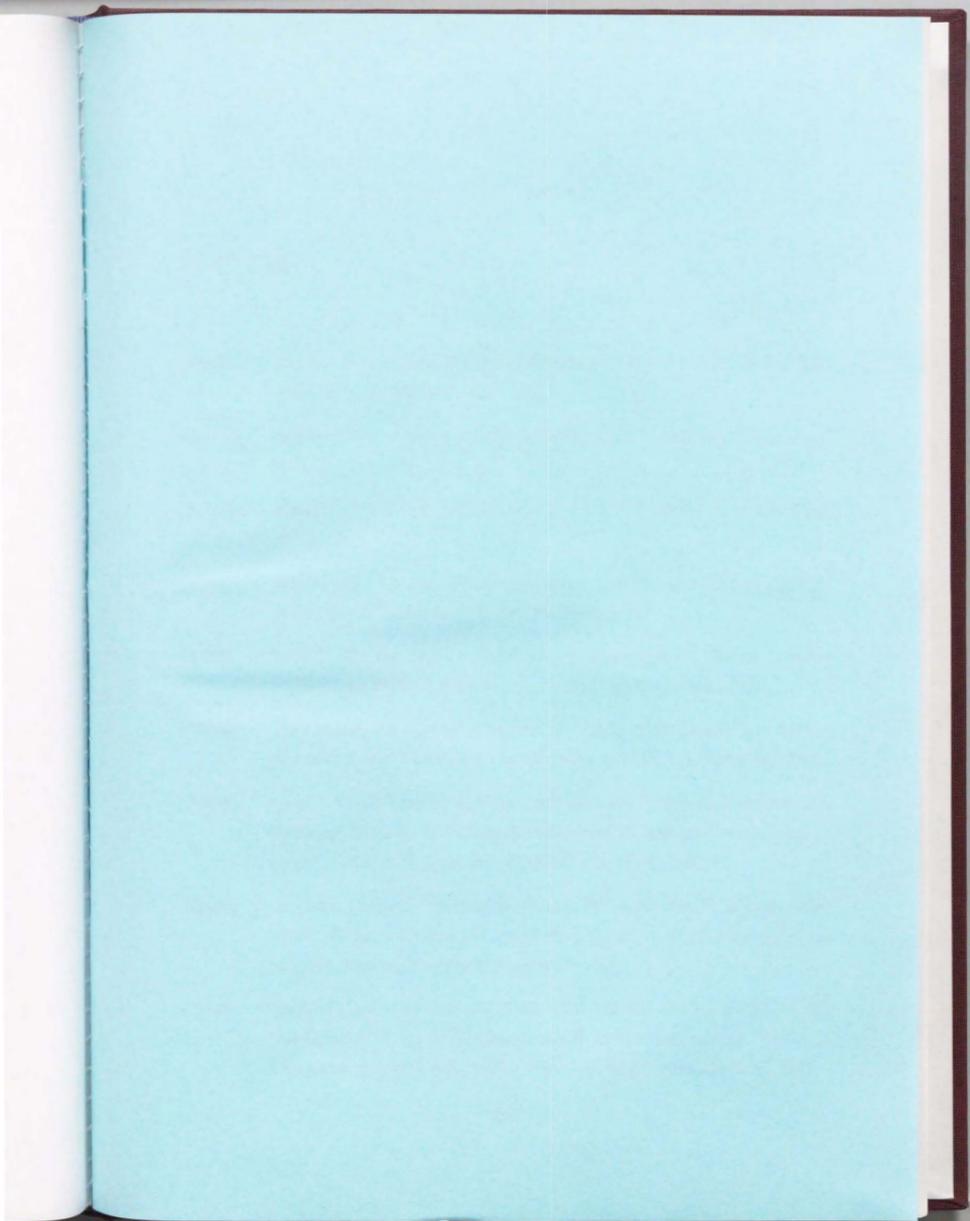
すなわち、BPSS は高いが BPS が低い場合は初期の一次的な利用には満足できるが、

定常的に利用するには時間が経過するに従って満足度が低下する。逆に BPSS は低いが BPS が高い場合は一次的な利用には適さないが、長期にわたって定常的に利用する場合には適する。CTK は前者の特徴を持っていると思われるため、研究開発用のためのプロトタイピングなどに適していると考えている。

B.6.2 CTK システムの特徴

CTK を利用することで以下に挙げる利点を実感することができた。

- システム記述とインターフェース記述が独立して行なえるので、再利用が容易である。
- 言語、機種を選ばないので、各マシン、言語の得意な分野を有効利用できる。これもまた再利用に有効である。
- インプリメントが容易でかつ既存のアプリケーションに CTK を組み込むことも容易であるため、従来の資産を有効活用できる。
- プラガブルであるため、部品の取り替えのイメージで機能強化をおこなえる。今後のグループウェアにはこのプラガブルという概念が重要であると考えられる。
- 既存のソースコードに CTK の組込を簡単におこなえるので、既存のツールを有効利用したり、とりあえず CTK をあまり意識せずにプログラムを記述し、その後に CTK 化することができる。



参考文献

- [Aiz89] 会津泉. グループウェアが米国で関心の的に、グループの共同作業を支援. 日経バイト, pp. 281-285, April 1989.
- [Bab90a] 馬場博幸他. "ハイビジョンの情報伝達能力の評価". *CMN-90-24*, pp. 17-24, 1990.
- [Bab90b] 馬場博幸, 木村博茂他. "産業用ハイビジョンカメラの開発". *CMN-90-5*, pp. 37-46, 1990.
- [Bly88] Sara A. Bly. "A Use of Drawing Surface in Different Collaboration Settings". In *CSCW88*, pp. 250-256, Portland, 1988.
- [BM90] Sara A. Bly and Scott L. Minneman. "Commune: A Shared Drawing Surface". In *SIGOIS Bulletin*, pp. 184-192, Massachusetts, 1990.
- [CB88] Jeff Conklin and Michael L. Begeman. "gIBIS: A Hypertext Tool for Exploratory Policy Discussion". In *CSCW88*, pp. 140-152, Portland, 1988.
- [CDG91] Gray J. Cook, Cheryl L. Dunn, and Severin V. Grabski. "Information Exchange Patterns in a Computer-supported Cooperative Work Environment". *SIGCHI Bulletin*, Vol. 23, No. 2, pp. 57-58, 1991.
- [Cha88] Alphonse Chapanis. "Interactive Human Communication". In Irene Greif, editor, *Computer-Supported Cooperative Work: A Book of Readings*, pp. 127-140. Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [Gal91] Stephen Gale. "ADDING AUDIO AND VIDEO TO AN OFFICE ENVIRONMENT". In J. M. Bowers and S. D. Benford, editors, *Studies in Computer supported Cooperative Work*, pp. 49-62. North-Holland, 1991.

- [GKHK89] Rajit Gadh, Alexander Kott, Donna Herbert, and Charles Kollar. "A Design for Life Cycle View in Concurrent Engineering". In *PROCEEDINGS OF THE MIT-JSME WORKSHOP ON COOPERATIVE PRODUCT DEVELOPMENT*, MIT, 1989.
- [Gru88] Jonathan Grudin. "Why CSCW Applications Fail: Problems in the Design and Evaluation of Organizational Interfaces". In *CSCW88*, pp. 85-93, Portland, 1988.
- [HA89] 藤田博之, 合原一幸. 楽々のすすめ. 第9回 自立分散システム研究会講演論文集, pp. 1-4, 1989.
- [HHK+91] Michitaka Hirose, Kouichi Hirota, Ryugo Kijima, Masaaki Kanno, Kazuhiro Hayakawa, and Kensuke Yokoyama. "a study on synthetic visual sensation through artificial reality". 計測自動制御学会第7回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 675-682, 1991.
- [Hir90] 廣瀬通孝, 木島竜吾, 佐藤洋一, 石井威望. "シースルー型 hmd を用いた仮想空間による実空間の修飾の研究". 計測自動制御学会第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 1-8, 1990.
- [Hiw87] 樋渡けん二編著. 視聴覚情報処理概論. 昭見堂, 1987.
- [Hiw88] 樋渡けん二. ヒトと機械はどう対話するか (ヒューマン・インタフェース入門). 講談社, 1988.
- [HL91] Christian Heath and Paul Luff. "Disembodied Conduct: Communication Through Video in a Multi-media Office Environment". In *CHI91*, pp. 99-103, 1991.
- [Igo91] 井越昌紀. 人工現実感の製造業への応用. 精密工学会誌, Vol. 57, No. 8, pp. 31-34, 1991.
- [IHK88a] 石井威望, 廣瀬通孝, 葛岡英明. "リモート・コラボレーション・システム". 計測自動制御学会第4回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 145-150, 1988.

- [IHK88b] 石井威望, 広瀬通孝, 葛岡英明. "リモート・コラボレーション・システムの開発". 情報処理学会第36回(昭和63年前期)全国大会講演論文集, pp. 699-700, 1988.
- [IHK88c] 石井威望, 広瀬通孝, 葛岡英明. "リモート・コラボレーションにおけるリモート・コントロール・カメラの利用方法について". 情報処理学会第37回(昭和63年後期)全国大会講演論文集, p. 2059, 1988.
- [IHK89] 石井威望, 広瀬通孝, 葛岡英明. "多人数作業における協調". 第9回自立分散システム研究会講演論文集, pp. 5-6, 1989.
- [IHK+90] Takemochi Ishii, Michitaka Hirose, Hideaki Kuzuoka, Tsutomu Takahara, and Takeshi Myoi. "collaboration system for manufacturing system in the 21st century". In *Proceedings on MSET'91*, pp. 295-300, 1990.
- [IM91] Hiroshi Ishii and Naomi Miyake. "Toward an Open Shared Workspace: Computer and Video Fusion Approach of TeamWorkStation". *Communications of the ACM*, Vol. 34, No. 12, pp. 37-50, 1991.
- [Ish88] 石井裕, 大久保雅且. "オフィスプロシジャの知識表現と分散処理環境における実行制御システム". 信学技法オフィスシステム, No. OS88-20, pp. 25-30, 1988.
- [Ish89] 石井裕, 大久保雅且. "グループウェア技術の動向". 信学技法オフィスシステム, No. OS89-19, pp. 13-18, 1989.
- [Ish90a] Hiroshi Ishii. "TeamWorkStation: Towards a Seamless Shared Workspace". Technical report, NTT, 1990.
- [Ish90b] 石井裕. "teamworkstation: リアルタイムワークスペースの設計". 計測自動制御学会第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 1990.
- [Ito85] 伊藤浩二. "心拍変動量を指標としたソフトウェア生産管理". Master's thesis, 東京大学工学部産業機械工学専門過程, 1985.
- [Iwa87] 岩田誠. "脳とコミュニケーション". 朝倉書店, 1987.

- [JHGY89] Jr. James H. Garrett and N. J. Yau. "Issues in Representing Engineering Design Decisions for Support of Concurrent Engineering". In *PROCEEDINGS OF THE MIT-JSME WORKSHOP ON COOPERATIVE PRODUCT DEVELOPMENT*, MIT, 1989.
- [Kat91] 加藤隆. ヒューマンインタフェース その視点と展望. *Bit*, Vol. 23, No. 8, pp. 1133-1143, 1991.
- [KEG88] Robert Kraut, Carmen Egido, and Jolene Galegher. "Patterns of Contact and Communication in Scientific Research Collaboration". In *CSCW88*, pp. 1-12, Portland, 1988.
- [KHI91] 葛岡英明, 広瀬通孝, 石井威望. "遠隔地間における空間型共同作業支援に関する研究". *日本システム工学会誌*, Vol. 16, No. 1, 1991.
- [KMH190] 葛岡英明, 三井博隆, 広瀬通孝, 石井威望. "プラグラブルなネットワーク・アプリケーション・ツールの開発". *情報処理学会ソフトウェア研究会*, No. 73, pp. 147-154, 1990.
- [Kob91] 小林幸雄. 臨場感通信. *テレビジョン学会誌*, Vol. 45, No. 4, pp. 508-514, 1991.
- [Kru90] Myron W. Krueger. "VIDEOPLACE and the Interface of the Future". In Brenda Laurel, editor, *The Art of Human-Computer Interface Design*, pp. 417-422. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1990.
- [Kru91] Myron W. Krueger. "*Artificial Reality II*". Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1991. 邦訳: 下野隆生, 人工現実 - インタラクティブ・メディアの展開 -, 株式会社トッパン, 1991.
- [Kub82] 久保田正人. "第三章 言語・認識の共有". 講座 現代の心理学 認識の形成, pp. 177-256. 小学館, 1982.
- [Kuz87] 葛岡英明. "共同作業に関する研究". Master's thesis, 東京大学工学部情報工学専門過程, 1987.

- [Kuz90] 葛岡英明, 広瀬通孝, 石井威望. "実画像通信でのコミュニケーション支援システム:MultiView". 計測自動制御学会第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 257-262, 1990.
- [Kuz91] 葛岡英明, 広瀬通孝, 石井威望. "空間型共同作業における視点の役割". 計測自動制御学会第7回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 363-366, 1991.
- [Kuz92] Hideaki Kuzuoka. "spatial workspace collaboration: Video support for collaboration out of the office". In *CHI92*, 1992. to appear.
- [KWO+90] 葛岡英明, 割沢伸一, 大村裕子, 光石衛, 広瀬通孝, 石井威望. "加工の臨場感通信の人間工学的考察". 1990年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, 1990.
- [Lak88] Fred Lakin. "A Performing Medium for Working Group Graphics". In Irene Greif, editor, *Computer-Supported Cooperative Work: A Book of Readings*, pp. 367-396. Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [Lin88] Charlotte Linde. "Who's in Charge Here?: Cooperative Work and Authority Negotiation in Police Helicopter Missions". In *CSCW88*, pp. 52-64, Portland, 1988.
- [Log89] Login 編集部. 特集 network で遊ぼう. *Login*, Vol. 8, No. 9,10, pp. 152-165, 1989.
- [MAI+91] 名井健, 甘利治雄, 稲村浩平, 小池英樹, 葛岡英明, 広瀬通孝, 石井威望, 林達郎. "視覚表現を活用した大規模制御システムの一設計法". 電気学会論文誌C、電子・情報・システム部門誌, Vol. 111-C, No. 5, 1991.
- [Man88] Marilyn Mantei. "Capturing the Capture Lab Concepts: A Case Study in the Design of Computer Supported Meeting Environments". In *CSCW88*, pp. 257-270, Portland, 1988.
- [Mat90] 松下温, 横山光男, 岡田謙一. "チームウェアの必要性和その動向". マルチメディア通信と分散処理 研究会報告, No. 90-DPS-44-2, 1990.
- [Mat91] 松下温編著. 図解 グループウェア入門. オーム社, 1991.

- [MHN190] Mamoru Mitsuishi, Yotaro Hatamura, Takaaki Nagao, and Hirochika Inoue. "development of a user friendly manufacturing system". In *MSET21*, pp. 167-172, 1990.
- [Mit91] 光石 衛編集. マルチセンサ融合型マシニングロボットの研究, 1991. 平成2年度科学研究費補助金(一般研究(C))研究成果報告書.
- [Miy85] 三宅なほみ. "理解におけるインターアクションとは何か". 佐伯胖(編), 認知科学選書4 理解とは何か, pp. 69-98. 東京大学出版会, 1985.
- [Miy86] Naomi Miyake. "Constructive Interaction and the Iterative Process of Understanding". *Cognitive Science*, Vol. 10, pp. 151-177, 1986.
- [Mor79] 森本正昭. 情報処理心理学. 誠信書房, 1979.
- [MU85] 宮崎清孝, 上野直樹. "認知科学選書1 視点". 東京大学出版会, 1985.
- [MWHN91] 光石衛, 割沢伸一, 畑村洋太郎, 長尾高明. "臨場感をもつ対地からの加工システムの試み". 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 609-610, 1991.
- [MWK+90] 光石衛, 割沢伸一, 葛岡英明, 畑村洋太郎, 長尾高明. "加工の臨場感通信システムの試み". 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 501-502, 1990.
- [Ogi86] 小木哲朗. "ソフトウェア開発環境におけるユーザ・モデルの利用に関する研究". Master's thesis, 東京大学工学部産業機械工学専門過程, 1986.
- [OKT+90] 大村裕子, 葛岡英明, 高原勉, 広瀬通孝, 石井威望. "生体情報を利用した画像コミュニケーション支援". 情報処理学会ヒューマンインタフェース研究会, 第30巻, pp. 1-9, 1990.
- [Opp88] Susanna Oppen. "A Groupware Toolbox". *BYTE*, pp. 275-282, Dec 1988.
- [Pie61] J. R. Pierce. "*Symbols, Signals and Noise: The Nature and Process of Communication*". Harper and Brothers, 1961. 邦訳: 鎮目恭夫 訳 記号・シグナル・ノイズ, 白揚社, 1988.

- [Rap91] Matthew Rapaport. "Computer Mediated Communications". WILEY, 1991.
- [Roo88] Robert W. Root. "Design of a Multi-Media Vehicle for Social Browsing". In *CSCW88*, pp. 25-38, Portland, 1988.
- [RS88] Stephen Reder and Robert G. Schwab. "The Communicative Economy of the Workgroup: Multi-Channel Genres of Communication". In *CSCW88*, pp. 354-368, Portland, 1988.
- [Rud90] Tom D. Rudebusch. "Requirements and Concepts for a Group Interaction Environment". 計測自動制御学会第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 545-552, 1990.
- [Sai87] 齊藤勇. 対人社会心理学重要研究集-対人コミュニケーションの心理. 誠信書房, 1987.
- [SB89] Mark Stefik and John S. Brown. "Toward Portable Ideas". In Margrethe H. Olson, editor, *Technological Support for Work Group Collaboration*, pp. 147-165. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1989.
- [SFB+88] Mark Stefik, Gregg Foster, Daniel G. Bobrow, Kenneth Kahn, Stan Lanning, and Lucy Suchman. "Beyond the Chalkboard: Computer Support for Collaboration and Problem Solving in Meetings". In Irene Greif, editor, *Computer-Supported Cooperative Work: A Book of Readings*, pp. 335-366. Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [She89] Jim Sheffield. "The Effects of Bargaining Orientation and Communication Medium on Negotiations in the Bilateral Monopoly Task: A Comparison Conferencing Communication Media". In *CHI'89*, pp. 43-48, 1989.
- [Smi87] Randall B. Smith. "Experiences With The Alternate Reality Kit. An Example of the Tension Between Literalism and Magic". In *CHI'87*, pp. 61-67, Toronto, Canada, 1987.
- [SOO+91] Randall B. Smith, Tim O'Shea, Claire O'Malley, Eileen Scanlon, and Josie Taylor. "Preliminary Experiments with a Distributed, Multimedia,

- Problem Solving Environment". In J. M. Bowers and S. D. Benford, editors, *Studies in Computer supported Cooperative Work*, pp. 31-48. North-Holland, 1991.
- [ST86] Lucy A. Suchman and Randall H. Trigg. "A Framework for Studying Research Collaboration". In *CSCW86*, pp. 221-228, Austin, 1986.
- [Stu88] Robert Stults. "Experimental Uses of Video to Support Design Activities". Technical Report SSL89-19, Xerox Palo Alto Research Center, December 1988.
- [Suz91] 鈴木元. "協同作業のための対話形映像通信". 信学技法ヒューマンコミュニケーション, 第91巻, pp. 7-12, 1991.
- [SYI90] 鈴木元, 山森和彦, 石井裕. "協遊空間サービスの提案". 信学技法ヒューマンコミュニケーション, 第90巻, pp. 9-16, 1990.
- [Tak87] 高野陽太郎, [補稿] 松原仁. "傾いた図形の謎". 東京大学出版会, 1987.
- [Tak89] 高橋友一, 伯田晃, 小林幸雄. "2次元世界の位置関係作成とシーンの記述について". 人工知能学会第3回全国大会論文集, pp. 425-428, 1989.
- [Tam87] 田村 博編. "ヒューマン・インタフェース". コロナ社, 1987.
- [TL88] John C. Tang and L. J. Leifer. "A Framework for Understanding the Workspace Activity of Design Teams". In *CSCW88*, pp. 244-249, Portland, 1988.
- [TL89] John C. Tang and Larry J. Leifer. "Observations from an Empirical Study of the Workspace Activity of Design Teams". Technical Report P89-00013, Xerox Palo Alto Research Center, 1989.
- [TM90] John C. Tang and S. L. Minneman. "VIDEO DRAW: A VIDEO INTER-FACE FOR COLLABORATIVE DRAWING". In *CHI'90*, pp. 313-320, Seattle, 1990.
- [Var87] Marjorie F. Vargas. "*LOUDER THAN WORDS-An Introduction to Non-verbal Communication*". Iowa State University Press, 1987. 邦訳: 石丸正「非言語コミュニケーション」, 新潮社, 1988.

- [Wad90] 和田龍児. CIM/MAP 戦略絵とき読本. オーム社, 1990.
- [WB88] Paul Kenneth Wright and David Alan Bourne. "Manufacturing Intelligence". Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1988.
- [Wil77] Ederyn Williams. "Experimental Comparisons of Face-to-Face and Mediated Communication: A Review". *Psychological Bulletin*, Vol. 84, No. 5, pp. 963-976, 1977.
- [Win76] Terry Winograd. "Understanding Natural Language". Academic Press, 1976. 邦訳: 瀧一博, 田村浩一郎, 白井良明 訳 言語理解の構造, 産業図書株式会社, 1976.
- [Win77] Patric Henry Winston. "ARTIFICIAL INTELLIGENCE". Addison-Wesley, 1977. 邦訳: 長尾真, 白井良明 訳 人工知能, 培風館, 1980.
- [Win88a] Terry Winograd. "A Language/Action Perspective on the Design of Cooperative Work". In Irene Greif, editor, *Computer-Supported Cooperative Work: A Book of Readings*, pp. 623-653. Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [Win88b] Terry Winograd. "A Language/Action Perspective on the Design of Cooperative Work". In Irene Greif, editor, *Computer-Supported Cooperative Work: A Book of Readings*, pp. 335-366. Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [WSM+90] Kasuo Watabe, Shiro Sakata, Kazutoshi Maeno, Hideyuki Fukuda, and Toyoko Ohmori. "Distributed Multiparty Desktop Conferencing System: MERMAID". In *CSCW90*, pp. 27-38, Los Angeles, 1990.
- [YAH+90] 山田篤, 網谷勝俊, 星野泰一, 西田豊明, 堂下修司. 自然言語における空間描写の解析と情景の再構成. *情報処理*, Vol. 31, No. 5, pp. 660-672, 1990.
- [Yam87] 山本政人. "乳児における視線の共有と指さしへの反応". *教育心理学研究*, Vol. 35, No. 3, pp. 82-86, 1987.

- [YC90] Burgess Yakemovic and Jeffrey Conklin. "Report on a Development Project Use of an Issue-Based Information System". In *CSCW90*, pp. 105-118, Los Angeles, 1990.
- [YH89] 山上俊彦, 春田勝彦. "オフィス通信距離の提案". 情報処理学会第38回(昭和64年前期)全国大会講演論文集, pp. 1699-1700, 1989.
- [オリ] オリムピック. HT6101 プロットセンター取扱説明書.
- [オリ 85] オリムピック. HT6101 ENC コントローラー リファレンス マニュアル, 第NO.M130-84ENC-JD 版, 8 1985.
- [ポー 81] ポールエックマン. "身振りの三つのタイプ". In Walburga von Raffer-Engel, editor, *Aspects of Nonverbal Communication*, pp. 4-26. TAISHUKAN PUBLISHING COMPANY, 1981. 邦訳: 本名信行, 井出祥子, 谷林真理子 「ことばによらない伝達 ノンバーバル・コミュニケーション」.



