

コンピューターグラフィックスによる建設現場の視覚化

Visualization of Construction Site by Computer Graphics

東京大学 大学院修士課程 岡野 高之*

労働省産業安全研究所 花安 繁郎**

東京大学 國島 正彦*

By Takayuki OKANO, Shigeo HANAYASU and Masahiko KUNISHIMA

最近の約 10 年間、年 1000 人の死亡者が出続けている事実から、建設作業は危険であり、建設現場の安全性は依然として大きな問題であると言える。この傾向を打破するためには、これまでの安全対策の限界を認識し、新たな安全対策が必要であり、労働者が自らの安全を守るため、一人一人が危険作業を認識し、安全意識を高め、安全対策を自らの問題として認識することが重要であると考えられる。本研究は、人的な課題と設備の課題との融合を見据えて、ある設備環境における労働者の作業行動水準の相違を検知できると共に、安全行動の教育訓練にも役立つことを目的として、コンピューターグラフィックスによる建設現場の視覚化ソフト（作業員の現場疑似体験ソフト）を試作した。キーボード操作によって、仮想の足場内を自由に歩行し、衝突などの状況を疑似体験できるまでになった。衝突した場合には、体の部分に対応した色の霧を画面に表示する手法としている。さらに実際の現場の状況を詳細に調査研究し、本視覚化ソフトの有効性を高めると共に、実際の労働災害のデータを用いて災害の動態状況を視覚再現できる研究を進めている。

【キーワード】安全対策、CG、視覚化ソフト、建設足場、安全教育

1. はじめに

現在、全産業就業人口の約 1 割が建設業に従事しているが、建設業における労働災害死傷者数は全産業の約 3 割を占めており、死亡者数にいたっては 4 割以上を占めている。さらに、死亡確率に関して製造業や全産業は 10^{-5} オーダであるのに対して、建設業は 10^{-4} のオーダである。このような現状から建設業は危険であると言わざるを得ない。さらに死亡者数はここ 10 年間、年 1,000 人程度のまま横這いであり、現在、建設現場の安全性は依然として大きな問題であるといえる。

この傾向を打破するためには、労働者が自らの安全を守るため、一人一人が危険作業を認識し、安全意識を高め、安全対策を自らの問題として認識する

ことが重要であり、安全に関わる努力に対してプラス評価を与える等、安全に対する労働者の自律性を向上させる方策が必要であると考えられる。建設工事の安全対策は、如何なる対策を講じるとしても、根本のところではそれらの対策を実行する「人」に依存しており、その意味において、建設現場での施工の流れを管理・監督する技術者、さらには実際に作業を担当する労働者の役割は、安全確保を図る上で非常に重要なウェイトを占めていると言えよう。

本研究には、建設マネジメントの研究を通じて「Made by Okano」と言える『もの』を作りたいという夢があった。そこで安全に対する労働者の自律性を向上させなければならないという人的課題に注目し、労働者の安全意識を高めるべく、建設現場をコンピューターグラフィックス（CG）によりヴィジ

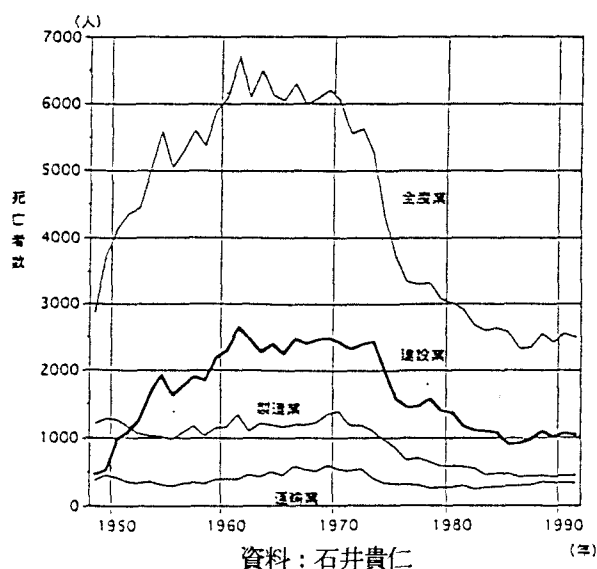
* 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 03-3812-2111

** 建設安全研究部 境界領域研究グループ 0424-91-4512

ュアル化（視覚化）し、現場の安全性向上に寄与できる視覚化ソフトを作成することを目指した。文字や言葉よりも視覚でものを訴えることは人間の脳裏にとどまりやすいことを考えると、作業員の安全意識を高めるには建設現場の視覚化は非常に効果があると考えたからである。

2. 建設労働災害の変遷

産業別労働災害死亡者数の推移は図 2-1 に示す通りである。建設労働災害死亡者数は 1961 年まで急激に増加し続け、その後、労働安全衛生法が 1972 年に施行されたが、1973 年まで年 2500 人程度の高い水準を保ったままであった。1973 年からは、2 年の間に大幅に減少(約 40%)した。これは、労働安全衛生法により労働災害防止のための危害防止基準の確立、責任体系の明確化、自主的活動の促進の措置等労働災害の防止に関する総合的計画的な対策を推進したことによるものと考えられる。さらに 1980 年代前半に緩やかに減少し、1980 年には建設業関連で 1500 人程度であった死亡者数が 1980 年代半ばには約 1/3 の 1000 人程度となった。これは、労働安全衛生法がより浸透してきたことと共に、災害を引き起こした業者に対する監督官庁の指名停止等の行政処分が厳しく行われてきたことによると考えられる。その後、今日に至るまで年 1000 人程度の水準のまま推移している。

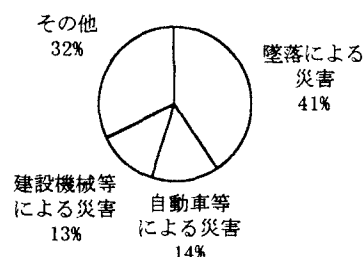


「建設現場の労働災害に関する基礎的研究」

図 2-1 産業別労働災害死亡者数の推移

全産業の死亡者数の推移は建設業のものと似たような傾向である。製造業は労働安全衛生法の施行前は 1000 人程度、施行後は 500 人程度の水準で推移している。また、運輸業は 400 人程度の水準で推移しており建設業ほど変動していない。

また、建設業における原因別の死亡災害は図 2-2 に示す通りである。死亡災害の一番の原因は墜落であり、続いて順に自動車等、建設機械等となっている。



資料：建設業労働災害防止協会
「建設業安全衛生年間」平成 4 年

図 2-2 建設業における原因別死亡災害

3. 建設工事の安全対策の動向

発注行政側においては、技術的水準の確保、建設生産システムの合理化へ向けての指導、労働災害に関する情報の交換、労働者の苦渋・危険作業からの解放に資する技術開発、積算方式の改正、安全施工に関する啓蒙運動などが行われている。

企業・現場・業界全体においては、安全基本方針・安全規則などの安全基準・年度毎の安全計画の作成、安全大会の定期的実施、安全パトロールを通じた安全指導、安全講習会・R.S.T（労働省方式安全衛生トレーナー）講座の開催、安全ミーティングや危険予知活動、安全対策に関する情報交換などが行われている。

4. 建設現場の視覚化ソフトの作成

建設産業における総合的な安全確保に関する研究会により報告された『建設産業における総合的な安

全確保に関する中間報告書』に、「労働者が自らの安全を守るためには、一人一人が危険作業を認識し、安全意識を高め、安全対策を自らの問題として認識することが重要であり、安全に関わる努力に対してプラス評価を与える等、安全に対する労働者の自律性を向上させる方策が必要である。」と述べている。よって著者は、この人的課題に注目し、労働者の安全意識を高めるべく、現場の安全性向上のための技術開発を行いたいと考えた。

本研究は、まずコンピューターグラフィックス(CG)による建設現場の視覚化を行い、視覚化ソフトを作成することを試みた。この研究は、作業員に現場の視覚的イメージをあらかじめ持つてもらうことで危険予知を促し現場の安全性を高めることと、作業員の行動水準の相違を検知することを目的としている

4.1 プログラミングツール

本研究における視覚化ソフトの作成には、OpenGL (GLは“Graphics Library”の略)を使用している。その理由は以下の通りである。

(1) Windows 版 CAD の時代が始まる。

- ①ハードウェアの値下がり
- ②操作性の向上
- ③高解像度化が容易
- ④動的かつ複雑なアプリケーション間の連携が可能

(2) プログラム言語を使用している。

4.2 Open GL の特徴

OpenGL とは、米国のシリコングラフィックス社が開発した、Microsoft Windows NT Workstation 3.5 に実装された OS に依存しないグラフィックス関数ライブラリである。これを利用して三次元動画オブジェクトのカラー画像を作成する、

また、OpenGL にはデモンストレーションが入っており、そのプログラムを解読することにより、基本的な OpenGL プログラミングが理解できる。プロ

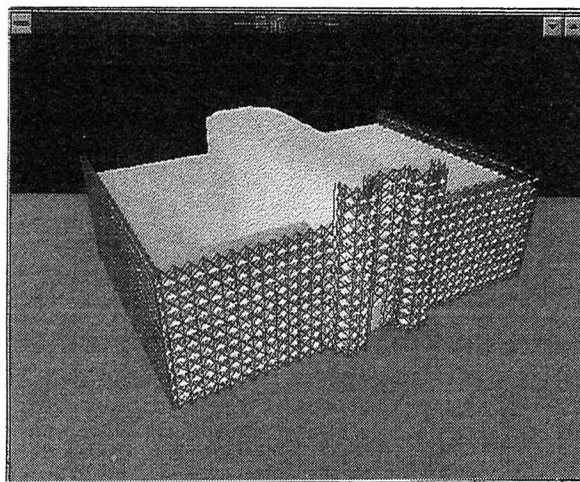
グラム言語はC++であり、OpenGL を利用するには、Microsoft Windows NT Workstation 3.5 と、それが起動するハードウェア、さらに Microsoft Visual C++が必要である。

4.3 視覚化

(1)第一段階

(東京大学工学部一号館改修工事現場の視覚化)

1995 年 9 月中旬、改修工事の為、東京大学工学部一号館の周囲に足場が組まれていたので、まず第一段階として、一号館改修工事の現場を視覚化する事にした。視点は一号館から遠距離に存在し(もちろん、近距離にする事も可能だが)、一号館とその周囲に存在する足場の全貌がわかるように、視点が一号館を周回する画面を出すことを目的とした。実行画面は以下のようである。



画面 4-1 東京大学工学部 1 号館の実行画面

a) 問題点と改善案

①足場にリアリティーがない。

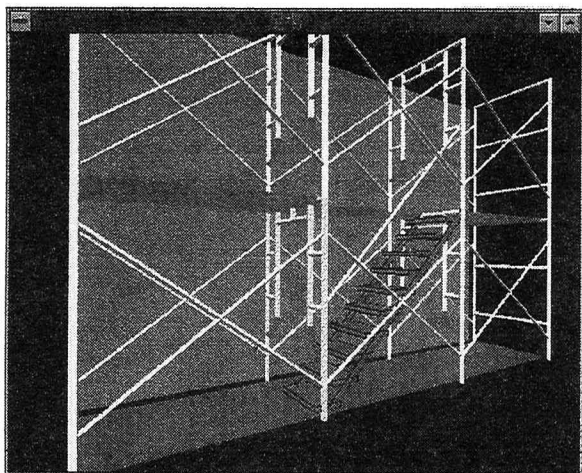
実際の足場は、鳥居型建枠や梯子型建枠、人が墜落しない為の仕切や階段など、様々なものが存在する。今回(1)で作成した足場は非常に単純化されたものである、より複雑なものが要求される。改善案としては、足場の詳細な施工図面に基づいた、視覚化を行うことが考えられる。

②壁にそって視点を動かさない。

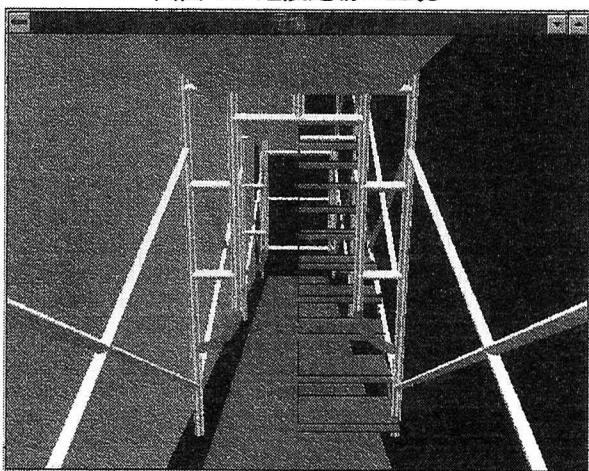
今回 (1) における視覚化は、回転する一号館を外から見ることを目的としているので、視点は極座標表示されている。実際現場で働いている人達は足場の中を歩いているのだから、壁や足場にそって視点を動かす必要がある。改善案としては、視点を三次元直交座標表示にすることが考えられる。

(2)第二段階 (リアリティーのある足場の視覚化)

先だって行った東京大学工学部一号館の視覚化の問題点を改善すべく、よりリアリティーのある足場の視覚化を行うことにした。この視覚化の目的は、リアリティーのある足場を、作業員が歩く時の視点で再現するものとする。実行画面は以下のようなものである。



画面 4-2 建設足場の全貌



画面 4-3 視覚化 (2) の実行画面

a)問題点と改善案

①足場を自由に歩けない。

現実の作業員は足場の中で様々な動きをしている。よって、足場内を自由に動き回れるソフトが必要である。しかし、視点の動きはプログラム内で決められているので、例えば、階段の途中で足元を見たりすることはできない。改善案としては、作業員の視点の動きをマウス入力、またはキーボード入力でサポートすることが考えられる。

(3)第三段階 (キーボード入力)

作業員の動きを、前進、後退、左右の横動き、上下左右を見る為の回転、階段の昇降と考えると、マウスではサポートしきれない。よって、視点の動きをキーボード入力することにした。

a)問題点と改善案

①階段の昇降に専用のキーが必要。

再現された画面は、絵であり実体がない。階段に向かって前進すると衝突せずに突き抜けてしまう為、階段昇降キーが特別に必要である。改善案としては、階段の昇降の際に特別な処理を施し、階段の昇降が前進後退キーでうまく行われるようにすることが考えられる。それと同時に衝突判定もされることが望ましいであろう。

②衝突判定が為されない。

この視覚化ソフトは、予め作業員に視覚化された現場を見てもらうことで、危険予知を促すことを目的としている。実体の無い空間では衝突や墜落等の十分な危険予知が為されない為、衝突判定は不可欠であると思われる。

(4)第四段階 (衝突判定)

頭、肩、手などの点座標と円柱である足場部材との衝突判定の場合、もし肘と足場部材とが衝突した時に衝突していないと判定してしまう。この状態が起こらないようにするには、体中に判定すべき膨大

な点座標が必要となる。この理由から、胴体、両腕、両足を円柱、頭を球とみなし、衝突判定を行うことにした。

まず、作業員の体を図4-1のように細分化し、円柱と球で近似した。頭は直径30cmの球、胴体は直径30cm、長さ60cmの円柱、腕は直径10cm、長さ70cmの円柱、足は直径15cm、長さ70cmの円柱とした。頭の部分は、ヘルメットと生身の部分を細分化したが、本研究の足場では生身の部分が衝突するところがあった為、ヘルメットのみとした。衝突の際に画面にかかる霧の色は図4-1の通り適当な色を使用した。頭の衝突が最も危険であると考え、赤色にした。

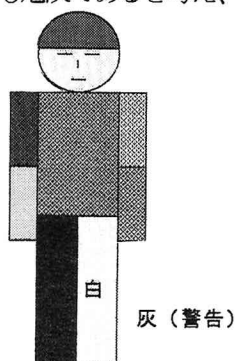


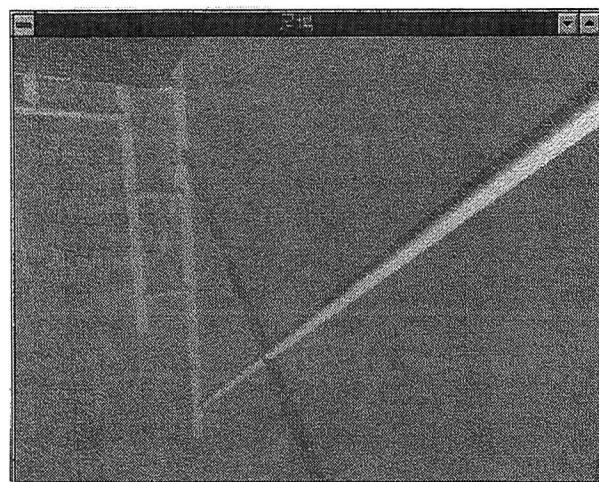
図 4-1 体の細分化

実行画面は以下のようなものである。

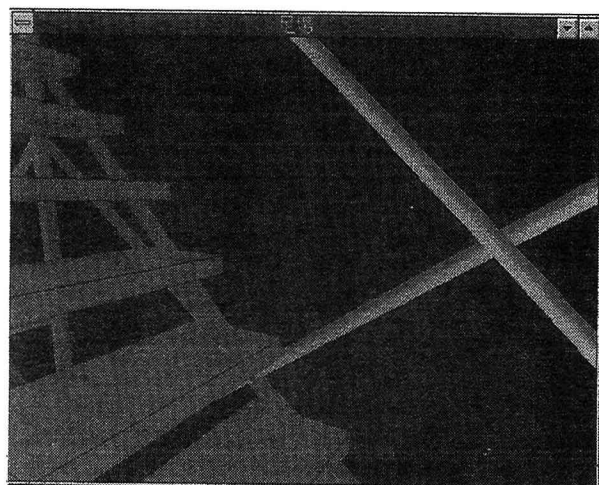


画面 4-4 衝突の瞬間

(ヘルメットと二階の足場板との衝突)



画面 4-5 衝突の瞬間 (右手の衝突)



画面 4-6 衝突の瞬間 (右足の衝突)

a)問題点と改善案

①衝突判定の優先順位が存在する。

E.の視覚化の衝突判定は、胴体、右足、左足、右上腕、右下腕、左上腕、左下腕、警告、頭の順に行っている。よって、もし同時に右手と右足が衝突した場合、画面には右下腕の衝突を表す黄色の霧が描画されることになる。改善案としては、優先順位を的確にするか、衝突が起こる際のプログラミングに工夫をすることが考えられる。しかし後者の場合、霧の色が重複するという問題が生じるので、霧をかけるという衝突の表現を改善、または変更する必要がある。

②回転、横歩きに対して衝突判定が為されない。

もちろん回転、横歩きの衝突判定を行うことは可

能であるが、今の段階で足場部材の組み入った場所では衝突が頻繁に起こり、足場内の移動にかなりの制約がある。実際に建設現場を歩いてみて、この視覚化ソフトの再現性を検討した上で改善案を挙げる必要がある。

5. 視覚化ソフトの再現性の考察

4. で作成した視覚化ソフトの再現性を検討することにした。1月29日に、東京大学工学部六号館の改修工事を施工していた銭高組東京大学工学部六号館改修工事事務所に依頼し、許可を得てから、工学部六号館の周囲に組まれた建設足場を筆者がビデオカメラで撮影しながら歩き、その映像と視覚化ソフトの画面を比較して考察を行った。

①視界の問題

作業員の視界は視覚化ソフトのそれよりかなり広い。人間の視界の広さを的確に表現する必要があると思われる。しかし衝突や墜落が起こる時、作業員の視界が普段と同じであるかは疑問である。作業員が不注意の状態にある時の視界がどのようなかを考慮する必要がある。また、足元や真横等のはっきりと物体を確認できない範囲をぼやとした画面で再現することも考えられる。

②遠近感の問題

視覚化ソフトで建設足場内を歩行する時、頻繁に障害物に腕や胴体が衝突する。また、間隔的に衝突しないように思われる位置でも、衝突する時がたまにある。理由としてはまず、衝突判定にあると考えられる。本視覚化ソフトの衝突判定では、一歩先のヘルメット、胴体、腕、足の座標が障害物に衝突すると判定した場合に一歩先には進まず、衝突する以前の座標で画面は止まるようになっている。すなわち、前進後退の一歩分である20cm手前で止まるのである。次の理由として、視界の狭さと遠近感の欠如

があげられる。筆者が足場を歩行した時、ビデオカメラで撮影した場合となにも持たなかった場合とでは、衝突の頻度が前者のほうが多かった。OpenGLによるヴァーチャルリアリティーで遠近感が再現できるかは疑問だが、視界を適切にすることで衝突の頻度が高いことは緩和されると考えられる。

③作業員の動きの問題

作業員は4.2.で上述したように、多様で複雑な動きをする。それは、建設足場が非常に狭い空間であり、普段通りに歩行したのでは頻繁に衝突することになると考えられる。すなわち、作業員は障害物との衝突を回避するために、屈んで歩行するといった行動を取るのである。これは、②で上述した、視覚化ソフトで衝突が頻繁に起こる理由の一つであると思われる。作業員の動きを多様化することで、視覚化ソフトがより現実に近いものとなると考えられる。しかし、動作の多様化で視覚化ソフトの操作の複雑化が引き起こされる問題は回避する必要があると考えられる。

④操作性の問題

今回は、マウス操作では動きをサポートしきれないという理由から、キーボード操作で再現したが、実際は操作が難しく初めての人が思ったように自由に歩くのはかなり厳しい。操作性向上をめざし、3DマウスやHMD(Head Mounted Display) (写真5-1 参照)の有効性を今後の検討課題としたい。

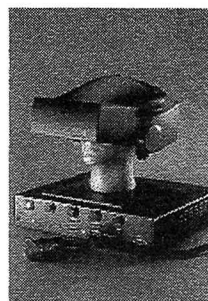


写真 5-1 HMD と 3D マウス

6. 現在進行中の研究

労働者の安全意識を高めるべく、現場の安全性向上に寄与できる視覚化ソフトとするためには、実際に起こった労働災害を再現する必要があると考えられた。建設労働災害の資料を検索し、それをCGで再現することにした。実際に起こった災害をCGで視覚化し、それを作業員に試写することで、作業員の安全意識を向上することを目的としている。今回は、墜落災害を視覚化した。

(1) 墜落災害の視覚化

a) 災害の詳細

地下2階盛替梁撤去用の足場上で、足場の解体作業中、被災者は番線で固定されていたブラケット足場の足場板の番線を切り、その足場上で足場板を撤去する作業をしていたところ、足場板の端部に体重をかけたため安定を失い墜落、約6.9m下の中間ブラケット足場でバウンドし、13.8m下の地下4階フロアに落下、胸部を激しく打って災害発生約1時間後死亡した。

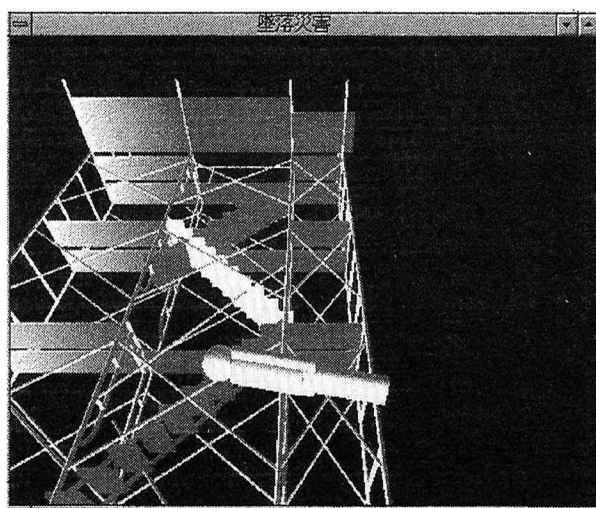
b) 被災者の服装

作業着上下、ゴム長靴、ヘルメット、安全帯

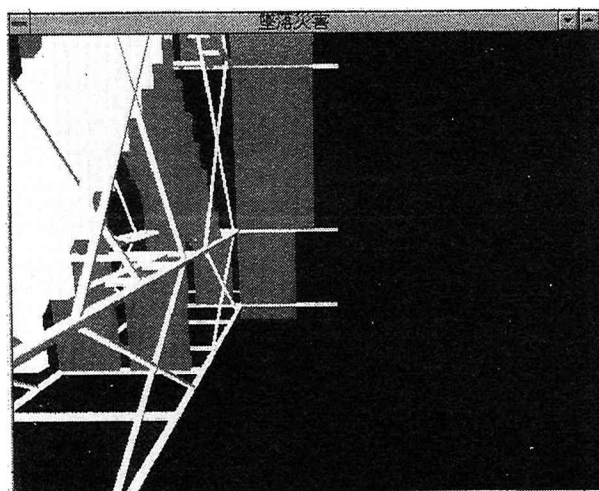
c) 災害発生原因

- ①被災者が安全帯を使用していなかった。安全帯を取り付けるための親綱が張られていなかった。
- ②被災者が作業主任者の指示がないまま、足場の解体作業を行った。
- ③被災者に高所作業の経験が乏しかった。

以上の墜落災害を、監督者の視点、及び被災者の視点で視覚化した。その実行画面は以下のようである。



画面 6-1 監督者の視点から見た災害



画面 6-2 被災者の視点から見た災害

(2) 問題点と改善案

a) 人間の動きの再現性

今回の視覚化において、被災者の再現は著者らの想像の域を脱していない。人間の動きもリアリティーのあるものにしなければならない。人間の落下に対するデータがないので、例えば、精巧な人体のダミー人形を実際に墜落させてみてデータを取ることを考えている。

b) 被災者の視点からの再現についての改善

今回の墜落災害の視覚化は、墜落中のものである。墜落中の被災者の視点からの画面を見るよりは、墜

落前に作業員の視点はどうであったのかを再現したほうが安全対策に有効であると考えられる。「死人に口無し」なので、墜落前の作業員の視点を知るのは難しいが、再現出来るような研究を進めたい。

7. 今後の研究課題

(1) 墜落以外の視覚化

建設労働災害発生の要因には、墜落の他に飛来落下や建設機械・設備による災害などがある。それら墜落以外の災害も視覚化することを試みたい。

(2) 視覚化ソフトの改善

これまでに、建設足場をキーボード操作により自由に歩き、衝突の際には体の部分に対応した色の霧を画面に表示して警告する視覚化ソフトを作成した。しかし、5.で述べたように、まだまだ改善すべき点が数多くある。また、現在進行中の実際の労働災害の視覚化とこれまでの視覚化ソフトを組み合わせ、建設足場を自由に歩きつつ、実際の労働災害発生状況を再現できるようにすることを目指し

ている。

【参考文献】

- [1] 國島正彦、庄子幹雄.『建設マネジメント原論』.山海堂
- [2] 建設業労働災害防止協会.『平成7年版 建設業安全衛生年鑑』.
- [3] 社団法人／土木学会.『土木と労働安全』.土木学会誌「別冊増刊」.1995年4月
- [4] 石井貴仁.『建設現場の労働災害に関する基礎的研究』.東京大学工学部土木工学科1995年修士論文
- [5] 建設省、(財)建設業振興基金.『建設産業における総合的な安全確保に関する中間報告書』.建設産業における総合的な安全確保に関する研究会研究報告.1992年10月
- [6] Jackie Neider, Tom Davis, Mason Woo.『OpenGL Programming Guide (日本語版)』.星雲車
- [7] 柴田望洋.『明解 C 言語入門』.SOFTBANK BOOKS
- [8] 桐山清..『C&&C++入門』.オーム社
- [9] 山下浩、黒羽裕章、黒岩健太郎.『C++プログラミングスタイル』.オーム社

Visualization of Construction Site by Computer Graphics

The dangerous work environment in construction site than in other industries is an important problem to be improved. The limits of existing safety measures should be recognized and new ones should be introduced.

For increasing safety awareness of workers through education, training and monitoring of working standard, a software that visualizes Construction Site activities by using Computer Graphics has been developed. It enables us to walk around a virtual scaffold and to experience accidents like falling and collision. The authors are still doing researches on more realistic visualization by analyzing the data of actual labor accidents