

建設ロボット施工シミュレーションシステムの開発（その1）

——シミュレーションシステム（ORBIC-1）の概要——

浜田 耕史 脇坂 達也 汐川 孝
泉 清之 坂口 秋吉
(本社 電算センター) (本社 電算センター)

Development of a Process Simulation Program for a Building Construction Robotics System (Part 1)

——Abstract of Simulation System (ORBIC-1) ——

Koji Hamada Tatsuya Wakisaka Takashi Shiokawa
Kiyoshi Izumi Akiyoshi Sakaguchi

Abstract

In development of an automated construction system using a fleet of robots, it is important to simulate beforehand the robotics system and the process status because of difficulties in experimenting with a mock-up.

The process simulation system for construction robots, which is called ORBIC-1, consists of ① Building Model Data Generator, ② Robot Construction Process Simulator, ③ Simulation Result Graphic Display, and ④ Simulation Result Analyzer. This system, simulating the building frame work process, is implemented by the Event-Driven Discrete Deterministic simulation method. It has special features as follows:

- ① The results of the simulation process are displayed in 3-D color animation, so that users are able to understand the robot motions visually.
- ② This system is capable of analyzing robot motions in detail, and checking interference of robots.
- ③ Three kinds of outputs such as Time Chart, Cycle Process Chart, and Total Process Chart are produced for checking all robot operations.

概 要

建設自動化システムを構築する場合、使用するロボットの能力・台数・動作・配置などを事前に最適化する必要がある。しかし、これらを実物大の実験などで検証することは難しく、シミュレーション技術が不可欠となる。

本システム(ORBIC-1)は、①建物モデル作成 ②部材組立シミュレーション ③三次元画面表示 ④施工性分析の四つのモジュールから構成される。主に躯体工事を対象として、複数の建設ロボットを使用する組立工程に対して、イベント管理による確定論的シミュレーション方式を採用しており、以下のような特徴を有する。

- ① カラーグラフィックスによる三次元動画として表示されるため、ユーザが視覚的に理解しやすい。
- ② ロボットの動作レベルでの細かな分析が可能であると共に、干渉チェックが行なえる。
- ③ 全体工程表・サイクル工程表・タイムチャートなどの工事用グラフのプロッタ出力が可能である。

1. はじめに

近年の建設労務事情の悪化に伴い、作業の省力化・自動化に対する要請が大きくなってきている。既に、幾つかの建設ロボットの開発をはじめ、それらをシステム化した施工法の開発も積極的に実施されてきている。更に、建設ロボットを活用して生産性を大幅に向上させるために、設計にまでさかのぼって構法・工法を検討し、ロボット集団をコンピュータで統括管理するようなロボット化工法の研究・開発も進められている。

これらの建設自動化システムを構築する場合、事前に各ロボットの動作や連係状況などを確認し、能力や台数などの適正化を図る必要がある。また、ロボット化工法を開発する上においても、コンピュータ・シミュレーション技術による評価・検討が不可欠となる。

本報告は、このような背景から開発された「建設ロボッ

ト施工シミュレーションシステム(ORBIC-1)」の概要についてまとめたものである。

2. システムの概要

2.1 システム開発の目的

一般製造業において、ロボットの動作シミュレーションによるオフラインティーチングシステムの開発が多数行なわれている。従来のダイレクトティーチングでは、作業者が直接的に教示するため、ロボットの暴走などによる危険性が生じるばかりでなく、その間、長時間にわたりラインを停止させなければならない。そこで、コンピュータを用いてロボットの動作を検討しながら教示データを作成し、タクトタイムなどを見積る技術が開発されてきている。

一方、大型ロボットを使用し、動作の終点が毎回異なることの多い建築作業では、作業者がロボットに直接教示することは実質的に不可能である。また、複数のロボットを

用いた新たなロボット化工法を構築する場合、実物大のモデルを製作し実験で検証することは難しい点も多い。

本システムは、建設自動化システムの構築を支援するためのシミュレーション技法の確立を目的として開発された。

2.2 システムの構成

本システムは、四つのサブシステムと、これらを日本語のメニュー画面により統合化管理する、実行制御プログラムによって図-1のごとく構成されている。

システムの主たる機器構成は、ホストコンピュータ (IBM3090-XA, MVS) とグラフィック端末 (IBM5080) であり、端末の付属装置のキーボード・ファンクションキー・タブレット・ダイヤルによって、データ入力が行なわれる。また、工程表などはプロッターに出力される。

各システムの主なデータと処理の関係を図-2に示す。

2.3 システムの機能と処理概要

2.3.1 建物モデル作成サブシステム

シミュレーションに必要となる基本データを生成するサブシステムであり、建物基本形状定義データ (階数・階高・スパン・部材形状データなど) に基づいて、柱・壁・はり・床版などの部材データが自動生成され、グラフィック端末の画面上で修正を行なう。写真-1は修正画面の状況を示している。さらに、投入する部材の順序と供給時間間隔を定義することにより、部材供給順序データ・ファイルが作成される。

2.3.2 部材組立シミュレーションサブシステム

シミュレーションモデル定義データ (ロボットの設置位置・教示データなど) を基に、プログラム内部に図-3のように、ロボットを中心とした組立設備 (以下ロボットと総称する) のネットワークモデルを構築する。構築されたモデルに対して部材供給順序データファイルより、あらかじめ定義された供給時間で部材が投入される。ロボットごとの動作に沿って、部材組立のシミュレーションが行なわれる。

2.3.3 結果表示サブシステム

シミュレーションで計算された各イベント (状態変化) 点におけるロボット及び部材の位置・姿勢データ (シミュレーション結果データ) に基づき施工過程を三次元表示する。建物及びロボットの表示に関する視点変更、表示画面の拡大・縮小、干渉の発生をユーザに知らせるための画面の一時停止及び干渉部

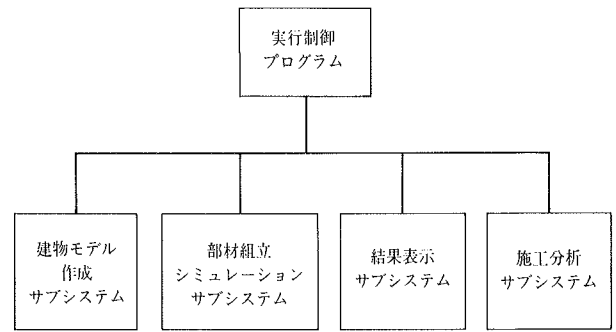


図-1 システムの機能構成

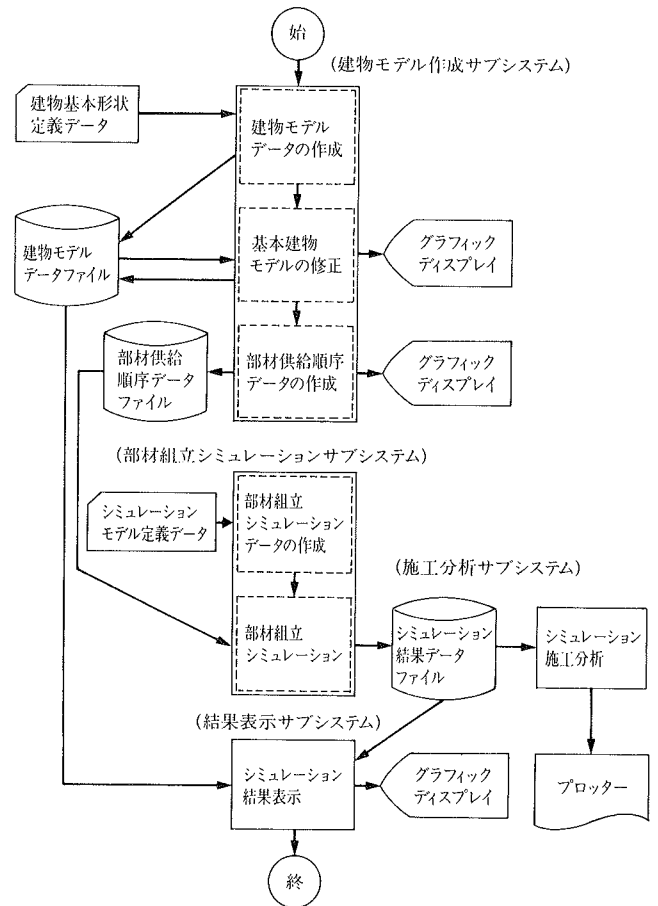


図-2 処理とデータの関連

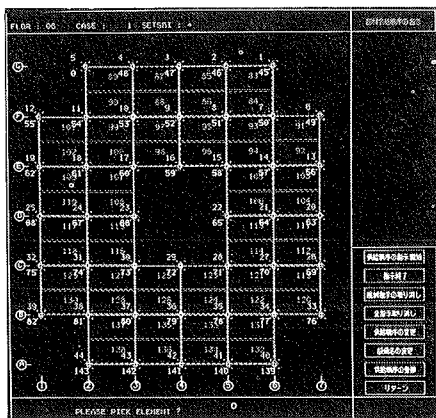


写真-1 グラフィック画面によるデータ修正

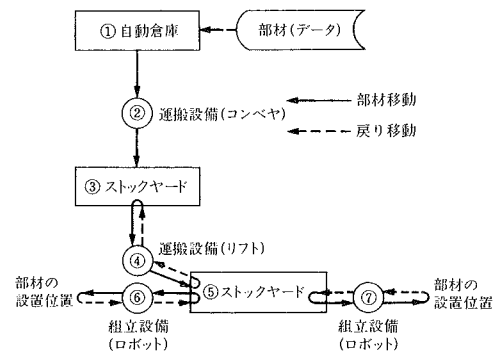


図-3 ロボットのネットワークモデルの例

材・ロボットの色調変更などの機能を有する。

2.3.4 施工分析サブシステム ロボットの動作時間や動作状況を基に、想定したロボット化工法の適否を評価するために、①タイムチャート②サイクル工程表③全体工程表の3種類の資料が作成される。これらは、秒・時間・月と時間軸の粗さを異にして計算される。

タイムチャートは、ロボットの動作手順・組合せ・動作速度に関する細かな改善点を見出すためのグラフであり、各ロボットの動作内容や待ち時間・稼働時間などが秒単位で表現される。また、サイクル工程表は、同じ作業内容の繰返しとなる工程を対象に、部材の組立所要時間を各階ごとに算出し、グラフィック表示する。

3. シミュレーション・モデルとシステムの特徴

3.1 シミュレーション・モデルの概要

本システムは、イベント管理による離散型確定論的シミュレーション (Event-Driven Discrete Deterministic Simulation) 方式を採用している。

この方式の特徴は、シミュレーションを常に次に発生するイベント点を追い求めながら進めることと、シミュレーションの初期条件と入力データが不変であれば、シミュレーション結果を確定し、再現できることである。

3.2 シミュレーションモデルの構成

シミュレーションモデルは、以下のように構成される。

(1) Entity (構成要素) ネットワーク上を搬送される部材と各ロボットの動作によって、シミュレーションが実行される。

(2) Attribute (Entityの属性) ロボットの動作を表すパラメータには、動作速度や可動範囲などを示す性能データとロボットの位置や姿勢などのデータがある。

(3) Activity (処理) イベントごとに、ロボット間の部材の授受判定・ロボット間の同期判定及び次のイベントに到達するまでの間のロボットの移動ベクトル計算、位置計算及び干渉のチェック計算などが行なわれる。

(4) Event (状態変化) イベントは、稼働中のロボットが次の動作に到達した時点で発生する。プログラムは、これらのイベントの動きを正確に管理しながらシミュレーションを進めていく。

(5) Clock (時刻の管理) イベント管理を行なうために、シミュレーション全体の時刻を管理するメイン・クロックと、各ロボットが次の動作のイベント点に到達するまでの所要時間を示すイベント・クロックとを用いている。

3.3 シミュレーションの処理流れ

シミュレーションの基本的な処理の流れを図-4に示し、以下にフローの説明を記述する。

(1) シミュレーション制御パラメータの初期化 メイン・クロックのリセットやロボットのネットワーク上のシミュレーション制御パラメータの初期化を行なう。

(2) 最早開始イベント時間の探索 各ロボットの持っているイベント・クロック値の中から最小値を示すものを最早開始イベント時間 (ESET: the Earliest Starting Event

Time)と呼び、全体の中からこのESET値をもつロボットを見つける。ただし、相互に関連するロボット間での部材の受け渡しの準備条件が成立せず、稼働が一時停止状態になっているものは、この処理の対象から除く。

(3) シミュレーション時刻の処理 (2)の処理で計算されたESET値分だけ、すべてのロボットの動作を先に進める。同時にメイン・クロックもESET値分カウントアップする。この結果、(2)の処理におけるロボットのイベント・クロック値は「0」になり、その他のロボットのクロック値はすべて「0」かまたはそれ以上となる。この結果、ロボットは次の新しい動作イベント点に到達したことになる。

(4) ESETロボットに対する次動作開始判定 新しい動作イベント点に到達したロボットの現在の動作の種類を調べ、次の動作開始の判定と各種のアクティビティ項目について計算を行なう。判定処理には、ロボット間の同期をとるための信号フラグ (Hand-Shake Flag) のセットや、それに基づく部材の受け渡し判定、次のイベント点までの移動ベクトル及び移動に要する時間値などの計算を行なう。これらは、ロボットの動作の種類に対応する「ユーザ組み込み形式の判定パッケージ・ルーチン」内で処理される。

(5) シミュレーション終了判定 すべてのロボットに対する部材の供給が終了した場合、もしくは、中断の制御命令を認識した場合、シミュレーションの終了を判定する。

3.4 システムの特徴

システムの主な特徴は以下の5項目である。

(1) 干渉チェック 稼働中のロボットのハンド同士及びロボットに把持された部材と既に建物に設置済の部材との干渉チェックを行なう。図-5に示すように、ロボットのハンド並びに各部材ごとの干渉チェック用ゾーンをあらかじめ定義し、簡単なミニ・マックス・テストで互いの干渉をチェックしている。

(2) 部材の盛替え動作

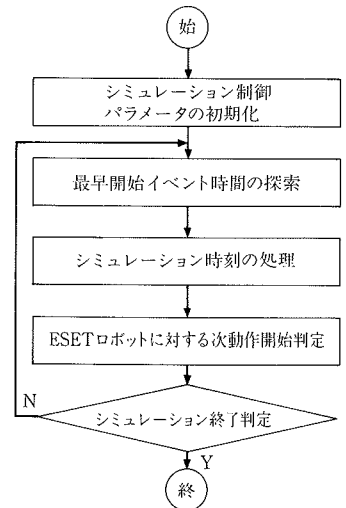


図-4 シミュレーションの処理流れ

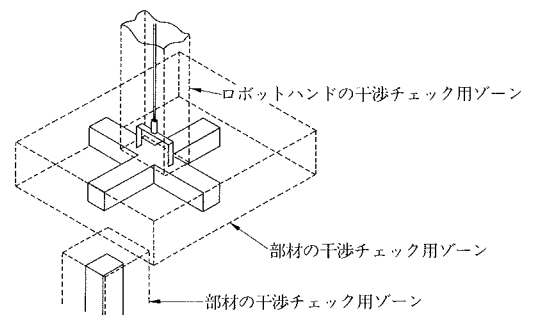


図-5 干渉チェック用ゾーンの例

型枠工事におけるせき板の盛替え作業のように建築作業の中には、この種の動作が多く含まれる。本システムでは、部材の盛替え動作のティーチングデータを作成することができる。

(3) シミュレーションの一時中断・再開 シミュレーションの途中で処理を一時中断 (SAVE) し、処理の流れを乱すことなく、後日、中断した時点からのシミュレーションを再開 (RESTART) することができる。

(4) ストック型ロボットの部材格納・搬出制御 複数個の部材を1度にまとめて搬送したり、一時的に格納しておくようなストック形式のロボット (例えばリフトや自動倉庫など) の部材の搬入→一時格納→搬出の一連の制御を行なうために、先着順 (FIFO : a First-in, First-out または、FCFS : a First-come, First-served) を基本とした待ち行列キュー (Queues¹⁾) を用いて制御を行なっている。

(5) 組立型ロボットの表現 部材組立シミュレーションサブシステムでは各ロボットの基準座標系で表されるハンドの位置を求めている。一方、結果表示サブシステムではロボット・ハンドの位置パラメータを基に、ロボット・アームの機構解析の式を用いた「ユーザ組込形式の計算ルーチン」内で各アームの関節パラメータ (関節の移動・回転量) を求めている。現在、図-6 に示す骨格系を持つ3種類のロボットが定義されている。

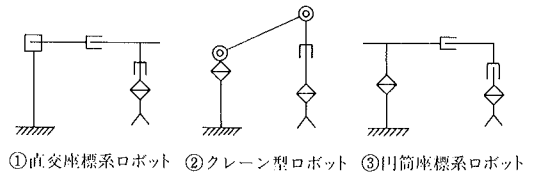


図-6 ロボットの種類

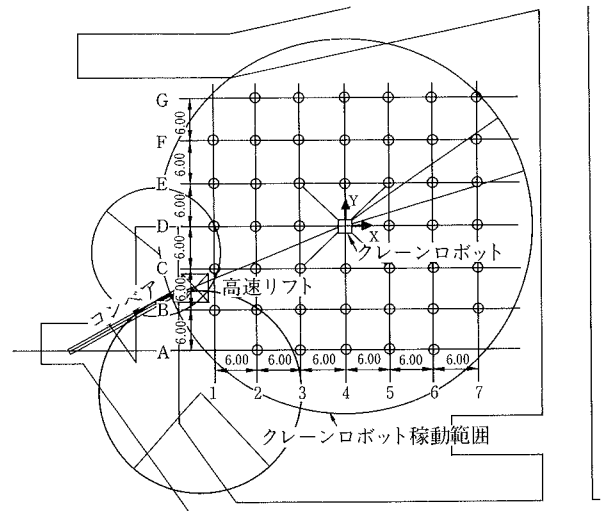


図-7 建物モデルの概要

一般に、ロボット・アームの表示は、機構解析で用いたA行列 (座標変換行列) と関節パラメータを用いて各アーム形状を全体座標系に変換して行なわれる²⁾。しかし、本システムでは図形表示基本ツールに PHIGS (米国 ANSI 準拠標準グラフィックシステム) を用い、その表現特性の一つである図形データ集合単位 (ストラクチャ) により各ロボット・アームの形状を定義し、それらを実際のロボットと同じ骨格系に構成させている。つまり、各アームの関節パラメータを直接 PHIGS に与えることにより、グラフィック端末側の演算処理回路を用いた座標変換処理が可能となる。この結果、ホスト・コンピュータの計算負荷が軽減され、各イベント点におけるアニメーション表示をほぼリアル・タイムで行なうことが可能になった。

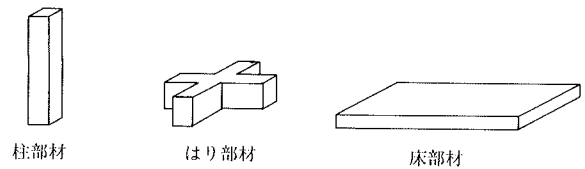


図-8 部材モデルの形状

表-1 ロボットの概要

ロボット名	使用台数	動作数	部材の格納・搬送数
部材供給設備	1	1	1
コンベア	1	2	1
ストックヤード	2	1	2~3
高速リフト	1	2	2
クレーンロボット	1	7	1

4. 適用例

4.1 シミュレーション・モデルの概要

4.1.1 建物と部材モデル 図-7 に示す平面形状を持つ40層の建物を想定し図-8 に示す基本形状からなるPC部材の組立シミュレーションを行なった。柱及びはり部材は1層当たり44本、床版は56枚となり、これらの各部材を指定した供給順序に従ってロボットに自動的に投入する。

4.1.2 ロボットモデル ロボットモデルの概要を表-1 に示す。PC部材が供給から組立てられるまでのロボットのネットワークは以下のモデルで構成されている。

部材供給設備→コンベア→地上ストックヤード→高速リフト→組立階ストックヤード→クレーンロボット
クレーン・ロボットは図-9 に示すような4関節とした。ロボットに関するパラメータは、コンベア及びリフトの

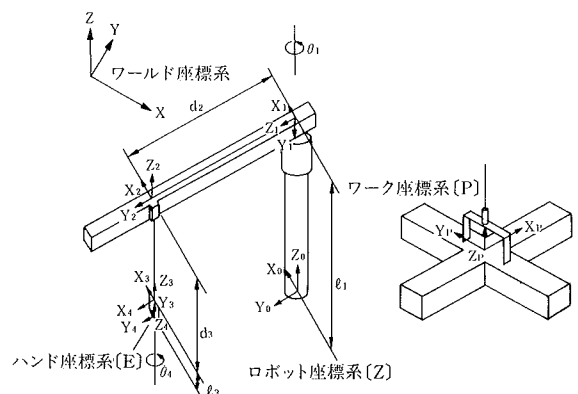


図-9 クレーンロボットの機構と座標系

搬送速度を0.5 m/秒とし、クレーンロボットはアーム伸縮速度0.3 m/秒、旋回速度5°/秒および走行速度を0.5 m/秒とした。また設備間の部材受渡し動作に要する時間として10~15秒の値が各々の動作に組み込まれている。

4.2 シミュレーション結果

建物モデルの4階柱及び5階はり・床部材の組立シミュレーション結果を表-2に示す。合計144体の部材組立に要した時間は、13,367秒(約3時間43分)となった。

各ロボットの稼働状況をチェックするために出力したタイムチャートの例を図-10に示す。同図では、ロボットの動作の種類・ハンドリング中の部材の番号と個数・ロボットの稼働状況(実線:稼働,破線:非稼働)・動作時間などの情報が示されており、部材の供給速度、ストックヤードの容量、ロボットのティーチングの適否、ロボットの能力などについての検討を加えることが可能となった。

また、4種類の作業階の高さ(6・12・25・40階)に関して1工区(フロアを4分割)当たりの柱部材の建込みに要した時間値と各ロボットの稼働率について示したものが図-11である。高層階になるほどリフトの稼働率が高くなり、低層階ではクレーンロボットの施回速度が作業に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。そこで、クレーンロボットの旋回速度のみを2倍(10°/秒)に設定し、低層階(6階)でシミュレーションを行なった結果、作業時間は約7割に減少すると共に、他のロボットの稼働率も向上していることが分かった。写真-2にシミュレーション結果の三次元表示の例を示す。

5. おわりに

本システムは、建設ロボット施工シミュレーションのプロトタイプであり、最小限の機能構成となっている。しかし、複数のロボットの動作の連携や部材の組立状況を視覚的に確認できることは、ロボット化工法の開発や施工計画において、強力な武器となることが幾つかのケーススタディを通じて明らかとなった。今後、こうしたシミュレーションシステムを有効なものにするには、様々な機能拡大を図っていく必要がある。例えば、部材の組立順序や各建設ロボットのネットワークの構成におけるAI技術を活用した最適化の手法、シミュレーション結果から各設備の教示データの自動作成など様々な開発課題が想定される。

参考文献

- 1) J. Trenblay and P. G. Sorenson : An Introduction to Data Structure with Applications, Mcgraw-Hill, (1984)
- 2) R. P. Paul, 吉川恒夫訳: ロボット・マニピュレータ, コロナ社, p. 62~81 (1981)
- 3) A. Sakaguchi et al. : Development of Process Simulation Program for a Building Construction Robotics System, 5th I. S. R. C., p. 669~678 (1988)
- 4) 浜田, 他: 建設ロボット施工シミュレーションシステムの開発 (その2: ロボット施工シミュレーションシステムの適用結果), 日本建築学会学術講演会梗概集 A, (1989)

表-2 各設備の実稼働時間

ロボット名	稼働時間(秒)	稼働率(%)
部材供給設備	1439	11
コンベア	5183	39
高速リフト	4535	34
クレーンロボット	13253	99

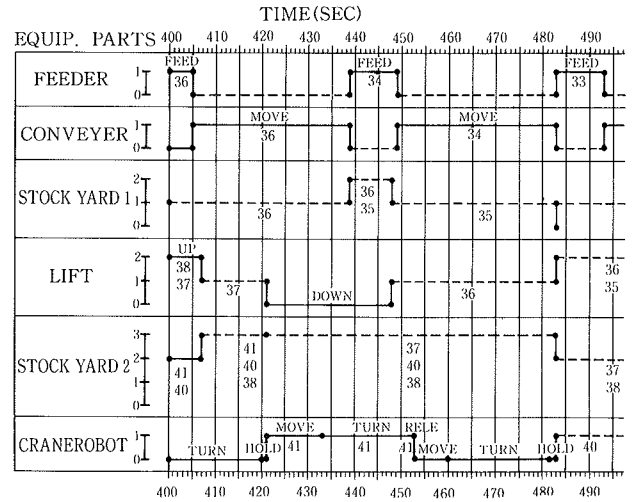


図-10 タイムチャートの例 (部分)

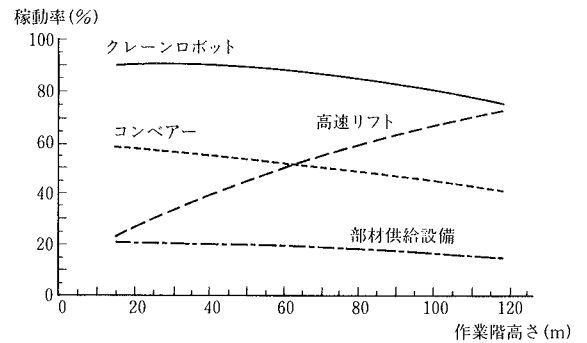


図-11 各ロボットの稼働率と建物高さの関係

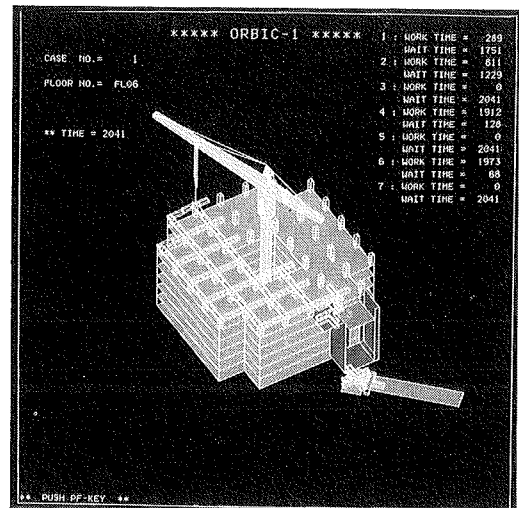


写真-2 シミュレーション結果の表示