

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

通信路特性を考慮した分散通信ミドルウェア
IEEE1516 HLA/RTIの特性評価

上田 裕子, 小堀 壮彦

2006年4月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発報告
JAXA Research and Development Report

通信路特性を考慮した分散通信ミドルウェア
IEEE1516 HLA/RTIの特性評価

Evaluation of Distributed Middleware IEEE1516 HLA/RTI
in Relation to IP Network Performance Conditions

上田 裕子^{*1}、小堀 壮彦^{*2}

Hiroko UEDA , Takehiko KOBORI

*1 : 宇宙航空研究開発機構 情報・計算工学センター
JAXA's Engineering Digital Innovation Center

*2 : 三菱スペース・ソフトウェア
Mitsubishi Space Software Co., Ltd.

2006 年 4 月
April 2006

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

通信路特性を考慮した分散通信ミドルウェア IEEE1516 HLA/RTI の特性評価

Evaluation of Distributed Middleware IEEE1516 HLA/RTI in Relation to IP Network Performance Conditions

上田 裕子(宇宙航空研究開発機構)、小堀 壮彦(三菱スペース・ソフトウェア)

Hiroko Ueda(JAXA) and Takehiko Kobori(MSS)

Abstract:

We examined a distributed computing middleware conformable to IEEE Standard 1516, High-Level Architecture/Run-Time Infrastructure(HLA/RTI). That is applied for parallel developments of H-IIA Transfer Vehicle(HTV) simulator by JAXA and International Space Station(ISS) simulator by NASA. A network emulation tool is used for distributed experiments to actualize reproducible network environments on various conditions. The dependencies on bandwidth and delay of the network as well as the other factors which affect the performance of applications are shown.

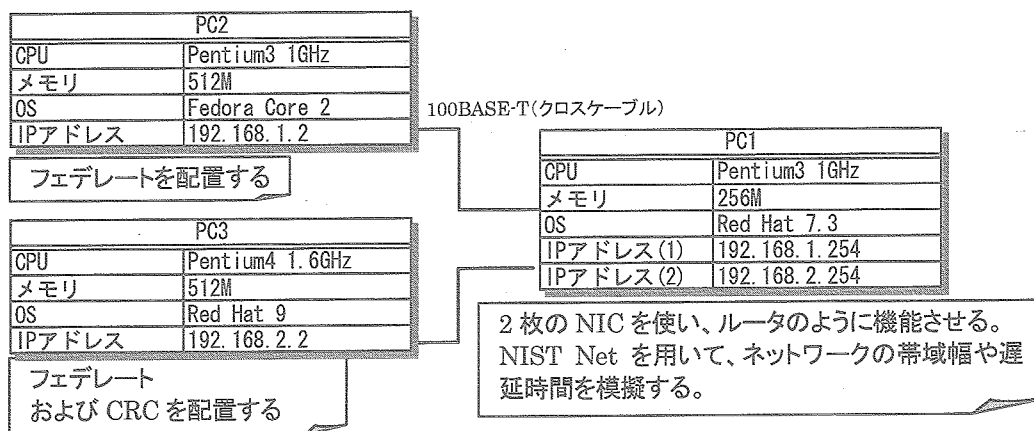
1. はじめに

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、開発中の HTV(H-IIA Transfer Vehicle)運用管制システムの機能の一部として ISS (International Space Station)の搭乗クルーを含む運用訓練等のために HTV シミュレータ と米国航空宇宙局(NASA)が保有、開発する ISS シミュレータ間で通信ミドルウェア HLA/RTI(High Level Architecture/ Runtime Infrastructure)¹⁾を用いた分散シミュレーションの実施が計画され、シミュレータの平行開発および IEEE 1516²⁾準拠の RTI を用いた分散シミュレーション試験が行われている。実際の分散シミュレーション運用時には 1Mbps 程度の帯域幅および日米間太平洋回線を利用することによる往復で 200ms 程度の遅延が想定されるが、その通信路を用いた試験は 2006 年までは行うことができない。そこでこれまでに公衆回線の 128kbps ISDN または ADSL を利用した試験のみが行われ、運用時の通信路を想定した RTI の性能評価および分散シミュレーションの運用性の評価は困難であった。一方、我々は HLA1.3³⁾に基づく RTI の宇宙機シミュレーションへの適用性を 100Mbps LAN および ISDN を利用した環境で確認したが⁴⁾⁵⁾、それらから例えば 1Mbps の通信路における性能を推測することは帯域幅に対する依存性が定量的に確認されていないため難しい。そこで本稿ではネットワーク模擬ツールを用いて帯域幅および遅延等の通信路特性を模擬し、想定されるネットワーク条件における RTI の性能評価の可能性を示す。これには JAXA-NASA 間試験で用いられている IEEE1516 対応の製品である pRTITM1516 を用いる。

2. 試験環境

2.1 機器構成およびネットワークの模擬

米国の国立標準技術院が無償で提供しているネットワークを模擬するソフトウェア NIST Net (National Institute of Standards and Technology Network emulation tool)⁶⁷⁾は、2 枚の NIC(Network Interface Card)を搭載した計算機上でルータのように機能し、遅延時間、帯域幅、パケット損失率、パケット重複率を制御でき、再現性のあるネットワーク環境を提供するものである。本試験ではこれを用いて遅延時間と帯域幅のみを制御する。第 1 図に本試験の機器構成の概略を示す。また一部の試験を除き NIC は 100BaseTX および全二重の設定で用いた。また第 1 表および第 2 表にはそれぞれ ftp 転送時間および ping によるパケットの往復に要する時間 RTT(Round Trip Time)を計測して NIST Net による帯域設定および遅延の効果を確認した結果を示す。第 1 表では計測された ftp 転送速度は NIST Net の帯域幅設定値に対して平均 96%, また第 2 表では RTT は想定される値に対して平均 105%の値を示すことがわかる。



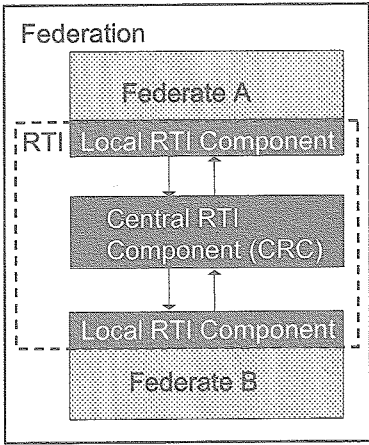
第1図 機器構成

第1表 帯域幅設定の効果

NIST Net 設定 帯域幅 (bps)	ftp 転送速度 (bps)
100M	94M
50M	48M
10M	9.6M
1M	0.96M
512k	503k
128k	126k

第2表 遅延時間設定の効果

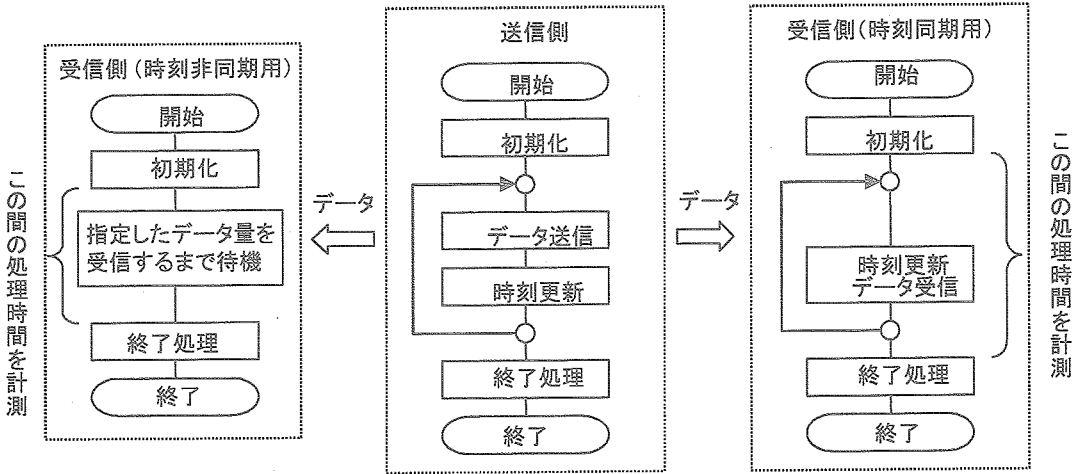
NIST Net 設定 遅延時間 (ms)	ping RTT (ms)
0	0.6
5	10.9
10	20.8
15	31.4
50	103.4
100	204.3



第 2 図 RTI を用いた分散通信の概要

2. 2 ベンチマークプログラム

ネットワークを介して分散した計算機上で RTI を用いて複数のプログラムが協調実行するためには、第 2 図に示すような構成で通信が行われる。HLA では個々の分散アプリケーションは“フェデレート”，それらによる統合シミュレーション全体は“フェデレーション”と呼ばれる。宇宙機シミュレーションを分散実行する際、多くの場合、各フェデレートが互いに時刻同期しながらデータを送受信する必要があるが、たとえば大量のテレメトリを一方的に送信、受信するなど、非同期でも良い場合もありうる。そこで第 3 図に示すようなベンチマークプログラムを作成し、RTI の性能評価に用いる。送信側フェデレートから送られる適当なサイズのデータを受信側フェデレートが受け取ることを同期しながらあるいは非同期に繰り返し、全てのデータを受信するまでの時間を計測する。pRTI には Java および C++ API が用意されているので、第 3 図の機能を両言語で実装し性能を比較したが、実装言語による有意な差は認められなかった。従ってここでは Java で実装したプログラムを用いた結果を示す。



第 3 図 ベンチマークプログラムのフローチャート

3. 試験項目および結果

3.1 時刻同期通信

まず、2つのフェデレートが時刻同期しながら通信する場合について、様々な帯域幅の模擬通信路において、データ量を変化させて計測した。ただし、NIST Netの遅延設定は0msとした。結果を第4図に示す。各ケースの値は1000回のデータ送受信に要する時間を10回計測した平均値であり、その際の分散は20Mbpsの場合が最も大きく平均値に対して最大2.6%であった。このときの実際の通信速度は直線の傾きから得られ、2.1で述べたと同様に平均すると設定値の96%の値を示している。

一般に一回のデータ送受信に要する時間は

$$\frac{\text{総時間}}{\text{回数}} = \frac{1}{\text{帯域幅}} \cdot (\text{データ量} + \alpha) + \text{遅延時間} + \beta \quad (1)$$

で表されることが考えられる。ただし、 α はデータ送受信時にRTIにより付加される情報量、 β はRTIの処理時間など通信以外の処理に要する時間である。遅延時間を無視すれば、第4図の各線の交点の(x, y)座標がそれぞれ(- α , β)に相当し、平均値に対する標準偏差が最も大きい20Mbpsを除く2直線間の交点の座標の平均は(-374Byte, 0.450ms)と得られる。第5図はこれらの値を(1)式に代入した横軸を帯域幅とする曲線である。実測値との差は3.5%以内である。この結果は、たとえばJAXA-NASA間のように実際とは異なる帯域幅の回線しか利用できない場合にも、利用が想定される帯域幅で要する時間を推定可能であることを示している。

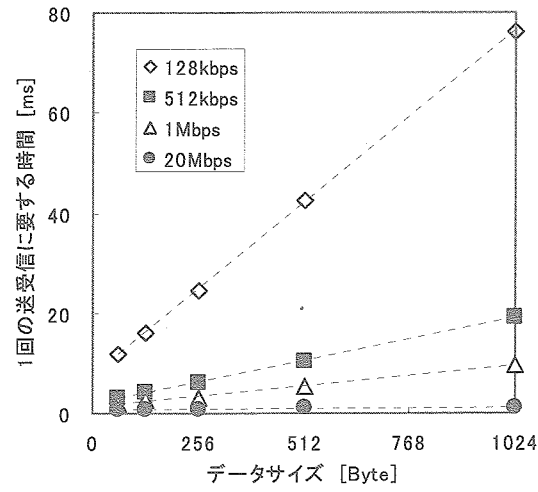
次に、128kbpsと1Mbpsの帯域に対して64Byteのデータ送受信を遅延を付加して計測を行った結果を第6図に示す。図の点線は第1式が妥当だとして推測される値を表している。128kbpsの計測結果は、NIST Netによる通信時間は遅延と帯域を同時に設定した場合は式(1)ではなく

$$\frac{\text{総時間}}{\text{回数}} = \text{Max}(\text{データ送信時間}, \text{遅延時間}) + \beta \quad (2)$$

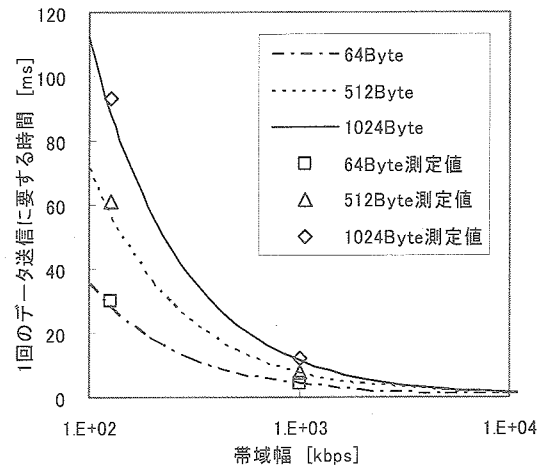
となることを示している。従って計測結果は直ちに実際の通信路における時間とは言えない。しかし第5図からも少なくとも遅延の影響は帯域に関わらず線形とみなせることは明らかなので、NIST Netで帯域設定のみを行った計測結果に実際の通信路でpingなどで計測した遅延時間を合計することで、実際に要する時間はほぼ推測できると考えられる。

3.2 非同期通信

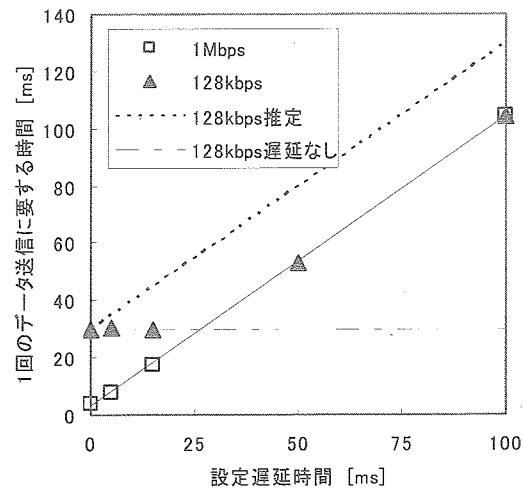
非同期通信の場合に要する時間も基本的には(1)式で表されることが考えられる。同期通信の場合と同様に遅延設定0msで計測した結果を第7図に示す。 α および β はそれぞれ103Byte, 0.6msと得られ、付加される情報 α が同期の場合に比べて少ない。これは同期の場合に必須なRTIの時刻更新要求や更新許可といった手続きが無いためと推測される。



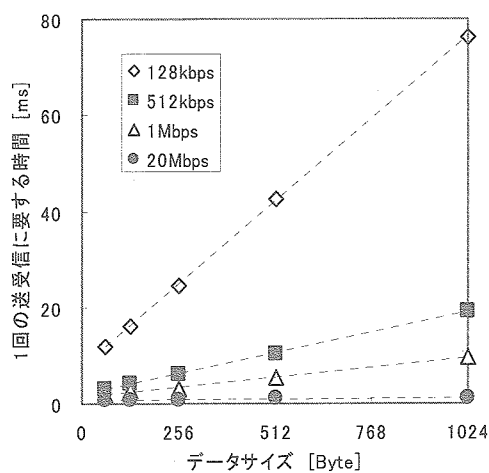
第4図 同期通信における性能測定結果



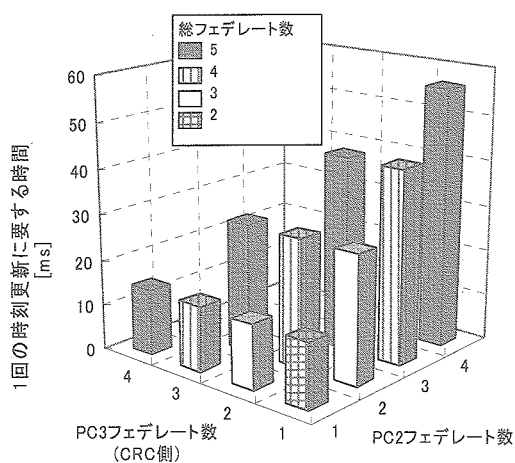
第5図 同期通信における帯域幅依存性



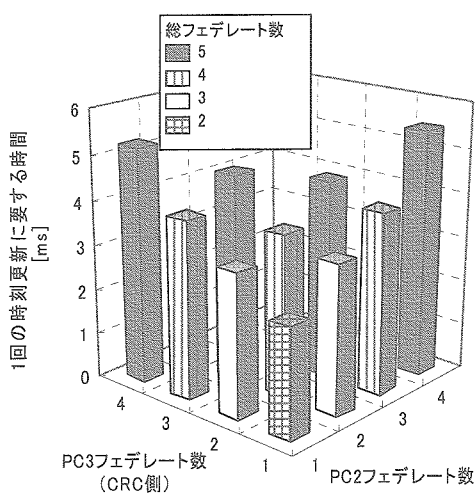
第6図 遅延設定の効果



第7図 非同期通信における性能測定結果



(a) 128kbps



(b) 20Mbps

第8図 同期通信におけるフェデレート数依存性

3.3 フェデレート数

フェデレート数は、特に時刻同期通信の場合は実行時間に大きく影響することが知られている⁴⁾。そこで、ここでも同期通信用のベンチマークプログラムを用いて 2 台の PC にデータ送受信は行わず時刻更新のみ行う複数のフェデレートを配置して計測した。第 8 図から、帯域幅が 128kbps の場合は RTI サーバすなわち CRC が配置されていない PC 上のフェデレートの数が全体の時間を支配するが、通信路が十分に高速な 20Mbps の場合はどちらの PC 上のフェデレートの影響も同様であり、プログラム自身の処理負荷に依存することがわかる。したがって全体の実行時間を短縮しようとする場合、単にフェデレート数のみならずそれらの配置を十分に考慮するべきことが明らかである。

3.4 その他の要因の影響

RTI の時刻同期機能を用いる際に実行時間に影響するその他の要因として、データの“オーダータイプ”がある。TimeStamp データの場合はそれを要求する全てのフェデレートが受信するまで時刻更新が許可されないが、ReceiveOrder データであれば時刻更新を拘束しないので、通信時間が短縮すると考えられる。これを確認するため 3.1 のプログラムを用いて 128kbps において 1024Byte のデータをオーダータイプのみ変更して計測した。その結果 ReceiveOrder の場合は TimeStamp に比較して 5%程度、短縮した。データ量がより大きい、またはフェデレート数が多い場合は、より大きな時間短縮の効果が期待できる。

また、これまでの試験は一方のフェデレートからデータを送信し他方が受信する片方向通信であったが、両フェデレート共に送信、受信、時刻同期する同一のプログラムを用いる双方向通信の場合についても 3.1 と同様の計測を行った。通信路は全二重設定であっても、128k、1M、20Mbps それぞれにおいて双方向の場合は片方向に比べて最大 125%、138%、474%の時間を要した。通信路が高速なほど比率が大きいこと、また 128k と 1M の交点から求められる β の値が 1.92ms と片方向の平均値に比べて数倍大きいことから、双方向の場合は転送データ量というより主に RTI による処理が増加することが実行時間増に繋がると推測される。

さらに、NIC の設定を変更し半二重通信路において片方向および双方向の実行時間を計測した。1Mbps、1024Byte における結果を全二重の場合と合わせて第 3 表に示す。予想されるように半二重設定の場合に双方向データ通信を行えば全二重の 2 倍以上の時間を要することが明らかであり、帯域幅以外の通信路の条件にも十分注意するべきである。

第 3 表 半二重通信における測定結果

データ交換	ネットワーク設定	
	全二重 (ms)	半二重 (ms)
片方向	12.0	14.8
双方向	14.0	35.9

4. まとめ

本稿では、実際のネットワーク上では測定が困難である通信ミドルウェア pRTIを用いた分散シミュレーションに対する帯域幅および遅延などネットワーク特性の依存性を把握するために、ネットワーク模擬ツール NIST Net を用いた。NIST Net では帯域幅と遅延を同時に模擬することはできないが、JAXA-NASA 間のように実際の環境での試験が困難な場合には実際の分散アプリケーションの動作、性能を推定するなどの目的に有用である。その不確定要因を排除した再現性のある模擬ネットワーク環境を利用して、分散アプリケーションの実行時間はほぼ式(1)で表されることを確認した。データ送受信時に RTI により付加される情報量 α や RTI の処理時間など通信以外の処理に要する時間通信 β は、同期、非同期、フェデレートの配置およびアプリケーションなどに依存するパラメータであり、これらをベンチマーク試験から求めれば、アプリケーションの当該ネットワークにおける実行時間は推定することができると考えられる。

謝辞

HTV 運用管制システムに関する情報を提供頂いた JAXA JEM 開発・運用プロジェクトチームの山本英子氏に感謝致します。

参考文献

- (1) <https://www.dmsi.mil/public/transition/hla/>
- (2) IEEE: 1516-2000 IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) - Framework and Rules, IEEE, 2000.
- (3) US DoD: High Level Architecture Interface Specification Version 1.3, IEEE, 1998.
- (4) 上田裕子, 高橋孝, 吉岡伸人, 船原慎太郎, 小堀壮彦: 分散通信ミドルウェア HLA/RTI の宇宙機シミュレーションへの適用性評価, 日本航空宇宙学会論文集, 52(2004), pp.160-166
- (5) N. Yoshioka, H. O. Ueda, et. al.: JAXA-ESTEC Joint Experiment of HTV-ISS Distributed Interactive Simulation, Proc. 24th ISTS Selected Papers(2004), pp.1091-1096
- (6) M. Carson and D. Santay: NIST Net: a Linux-based network emulation tool, ACM SIGCOMM Computer Communications Review, Vol. 33, No. 3(2003), pp.111-126
- (7) <http://www-x.antd.nist.gov/nistnet/>

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-001

発 行 平成18年4月28日
編集・発行 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL : <http://www.jaxa.jp/>
印刷・製本 (株)ビー・シー・シー・

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター
〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1
TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体に加工することを禁じます。

