2015 44th International Conference on Parallel Processing

Wha i W g Wi h he T a i i ?

A C ehe ie S d Me age Pa i g Re a ed B g

Mi g i g Zha g Y ei W Ka g Che Wei i Zhe g
T i gh a Na i a Lab a f I f ai Scie ce a d Tech g (TNLIST)
De a e f C e Scie ce a d Tech g , T i gh a U i e i , Bei i g 100084, Chi a
Re ea ch I i e f T i gh a U i e i i She zhe , She zhe 518057, Chi a
Tech g I ai Ce e a Yi zh ,
Ya g ze De a Regi I i e f T i gh a U i e i , Ni gb 315000, Zhe ia g, Chi a
E ai : zha g 12@ ai . i gh a.ed .c { ,che a g, -dc }@ i gh a.ed .c

***Abstract*—Along with the prevalence of distributed systems, more and more applications require the ability of reliably transferring messages across a network. However, passing messages in a convenient and dependable way is both difficult and error-prone. Thus the existing messaging products usually suffer from numerous software bugs. And these bugs are particularly difficult to be diagnosed or avoided. Therefore, in order to improve the methods for handling them, we need a better understanding of their characteristics.**

This paper provides the first (to the best of our knowledge) comprehensive characteristic study on message passing related bugs (*MP-bugs*). We have carefully examined the pattern, manifestation, fixing and other characteristics of 349 randomly selected real world MP-bugs from 3 representative open-source applications (OpenMPI, ZeroMQ, and ActiveMQ). Surprisingly, we found that nearly 60% of the non-latent MP-bugs can be categorised into two simple patterns: the message level bugs and the connection level bugs, which implies a promising perspective of detecting/tolerating tools for MP-bugs. Apart from this finding, our study have also uncovered many new (and sometimes surprising) insights of the message passing systems' developing process. The results should be useful for the design of corresponding bug detecting, exposing and tolerating tools.

***Keywords*—network; message passing; bug characteristics**

I. Introduction

A. Motivation

Wi h he i ce a i g c e i f de ae e , a a ica i i c de c e ha e ch ac e i d f e , ei he a LAN he I e e. Th a ica i de e e f e d d i g e e age a i g ie. H e e, diffe e f e e a fe i g a fe b e be ee de , e di g e age i a c e ie a d de e dab e a i ch e di c f e e a ea : *i)* he abi i be ee diffe e a chi ec e I i a c - e i e e ha he e agi g a e h d be ab e be ee diffe e a chi ec e (a d e e diffe e a g age). Thi ead a i ica e ac i g/ ac i g ced e; *ii)* he a i e f c ica i eci ca i I de faci i a e he e , a e ab e e agi g a e a i - e e a i c ica i eci ca i , hich a e i age a d c e . F e a e, Ze MQ [1], a a c e ib a , c ai 12 diffe e c e e hich ca be c ec ed i 22 a . A d, a i ed b DeS za e a. [2], he MPI a da d i c de a a f 70 a i e e a i g e i - - i c ica i (14 e d ca a d e ece i e ca ha ca be c bi ed a bi a i); *iii)* he e iabi i f e The de i g e f a e age a i g e a be e iab e, hich ea ha he e agi g a e h d be ab e i e a e a e a i i e e e a ai ab e. I eed ha d e e age a d a he a e i ee i i a e d ica e e age , h e c e i i c ea e d a a ica i h he i c ea i g i ze f he e ; a d *iv)* he d a ic de The iece i a e ca be ggi h e i e, a d e e g a a e a i . S e e i e ce a d fa bac echa i a e eeded be i e e ed f idi g e iab e a age a i g. A a e , he e i i g e agi g d c a e ffe ed f e I a e b g . E e e, he e a - age a i g e a ed b g (*MP-bugs*) a e di c diag e a id, beca e eci c g e c di i a be e i ed e d ce he . The e a e e e e MP-b g ha a e de e i i ic, hich ea he e b g de e d i a d e ec i e i e , b a h ead i e ea i g a d he i i g- e a ed e e a ife .

T add e he ab e cha e ge , i i e i e eff f i e e a ed di ec i , i c di g he b g de ec i g, e - i g, e a i g a d i g ech i e . A f he e di ec i ha e ade e g e e he a ea , b i e ai a ed i e :

- H ca he MP-b g be e ca eg i ze d? A e ca eg i za i f b g ca ide ef g ide i e a d i a i f he f e e ea che . I ca be ed a e a ea i gf e i : I he e a a e ha a MP-b g ha e? I he e a e f b g ha ha bee add e ed e b he e i i g ? I a c e h d f e eci c e f b g ea i gf ? A a i a i , i ce f he e i MP-b g de ec i e ea che [3], [4], [5], [6] a e f c ed MPI, hich a e c ai ed i a ica i b a c ica i a e , a c e di g a a e eeded a e he e i : h i a a e he he a e (e.g. b i h- b c ibe)?
- Wha i he e f ea d MP-b g ? A a f de a di g he MP-b g ' ca e , i e iga i g he ef- fec f MP-b g i a i a f a diffe e e f ea . A a zi g he effec ca e e a a g ide f f he de e e f a d e h d gie ha de ec , b a f a d e h d de ig ed

0190-3918/15 $31.00 © 2015 IEEE
DOI 10.1109/ICPP.2015.50

e a e a d ec e f he fa a d e ca ed b ch b g. T gi e a i e e a e, i i i a de a d h f e he MP-b g ca e c ed e age, i de ga ge he effec i e e f i ga e a a e d a ic e i ca i a d a c e di g e e di g e a a ica e a e he.

- Wha i he a ife a i c di i f ea d MP-b g? The a cha e ge f a e e i g i he e e ia i a d i e ea i g ace. I de achie e a c e e e i g c e age f he g a, he e i g ca e eed c e e e ib e i e ea i g f each i e ca e, hich i i fea ib e i ac ice. T add e hi cha e ge, a e e i i e i g i a f : ca e e ec ie e a a i f he h e ib e ace a d i e e f he b g? Th he de e i g f e i g ech i e e ie a g d de a di g f he MP-b g' a ife a i c di i. Tha i, e eed h a c di i a e eeded e iab igge a MP-b g. F e a e, h a b e, a d h a c ie a e a i ed i a ea d MP-b g' a ife a i ?
- Wha i eeded e d ce a MP-b g? The e i a c e c ea i be ee he e d cibi i f a b g a d he c e i f a a -i g i g i. Th de a di g hi e i ca he de ig e effec i e i e a d aci g ech gie.
- H he f a e e i i g i diag i g a d i g he ea d MP-b g de ec ed b he ? F e a e, e MP-b g de ec i ca e i d he ga e ha e e age a e ece i ed b he c e di g ee. S chi f a i ca be e he f he i g a i e i - - i c ica i a e. B he c ica i ca be ch e c e (e.g., ih i e b e a a e f c ica i) h e de ai ed i f a i a be e i ed i ac ice. M ge e a , e a ha ha i f a i i eeded hi e he g a e a e i g a ea d MP-b g.

A e i g he ab e e i i ig i ca be e f a be e de a di g f he ea d MP-b g. H - e e, a h gh a e i ica die ge e a g a b g cha ac e i ic (ec i c MP-b g) ha e bee d e i he a [7], [8], [9], [10], a d hei i di g ha e ided ef g ide i e f he f e e ea che, fe die ha e bee c d c ed ea d MP-b g. P e i , e ea che ha e c d c ed e e i i a he i e f MPI [11], [12]. B he a e c ai ed i a ec i c f a e, e e a i ec ica i a e, a d ih b e fai e abi i ie.

B. Contributions

Thi ide he (he be f - edge) c ehe i e ea d MP-b g cha ac e i ic d. S ec i ca , e e a i e he b g a e , b g c e e ce, a ife a i c di i , i g c e i a d he cha ac- e i ic f ea d MP-b g. O d i ba ed 349 a d e ec ed ea d MP-b g, c ec ed f 3 age a d a e e - ce a ica i : O e MPI, Ze MQ, a d Ac i eMQ, hich e e e i g diffe e e e f e iabi i ie. F each b g, e ha e e a i ed e e iece f i f a i e a ed i, i c di g he g a e ' e a a i i he b g e , f di c i , ce c de a che, a d he b g- igge i g e ca e. Thi i f a i ge he ide a e a i e h gh de a di g f he b g.

O d e ea a i e e i g di g, hich ide ef g ide i e f he f e de e i g f MP-b g de ec - i g, e i g, e a i g a d i g ech i e. A a i - a i , ef d ha ea 60% f he - a e MP-b g (e e he e a ic b g) ca be ca eg i ed i i e a e : he e age e e b g a d hec ec i e e b g. Thi di g h ha e e he e a ic b g i MP-b g, hich i fe ca ed b a ica i - ec i c ea , ha e ec a e . A d i i ie i a f he de e e h a a ica de ec e a e MP- b g. We a i e a i di g a d hei i ica i i Tab e I. The a d e e di g a e e ab a ed i he f i g ec i .

Whi e be ie e ha he a ica i a d b g e e a - i ed e e e e a age b d f MP-b g, ed i ed d a a ge ea c c i ab a e age a i g e . I a ic a, e h d e ha a f he cha ac e - i ic a d di g b ai ed i hi d a ea cia ed ih he h ee e a i ed a ica i a d he ga i g a g age he e a ica i e. The ef e, he e h d be a e ih he ec i c a ica i a d e a a i e h d g i id (ee Sec i II-C f di c i ab h ea a idi).

The e ai de f hi a e i ga i ed a f . I Sec i II e de c ibe e h d g. The e e e di g MP-b g' a e , a ife a i a d i g i Sec i III, Sec i IV a d Sec i V e ec ie . O he be e ai , cha he e a e i- a e a chi ec e i e age a i g e , i be b ie di c ed i Sec i VI. A d a , Sec i VII di c e ea ed a d Sec i VIII c c de .

II. Methodology

A. Application selection

Th ee e ce a ica i a e ed i d : O e MPI, Ze MQ, a d Ac i eMQ, i hich O e MPI a d Ac i eMQ a e he de fac i e e e ai f he MPI [13] a d he AMQP [14] a da d e ec ie a d Ze MQ i a high- e f a ce a ch e agi g ib a ai ed a e i ca ab e di ib ed c c e a ica i . The a e a a e a d age a ica i ha a e a ed i i d a d e e - ai ai ed b g e da aba e .

M e i a , each f he e e e a ec i c e e f e iabi i : *i)* i O e MPI, he ib a d e ha de d a ic de a a (ei he ec ec e e d); *ii)* i Ze MQ, he i ai ai he c ec i a a ica , b he e age a e d ab e[1] (ec ec b e e d); a d *iii)* i Ac i eMQ, i i e d ide a f e iab e e age a i g a e (b h ec ec a d e e d). The e h ee a ica i a ha e a g d c e age he di ec i : ih ih b e, a i c ica i a e , diffe e g a i g a g age, e c.

[1] A d ab e e age i a e age ha i be he d b e i d f e iab e b e e if he c e di g ece i e i e a i a ai- ab e.

Findings on Bug Patterns	Implications
(1) Se a ic b g i he d i a ca e (264 f 349) f he e a i ed MP-b g .	M e eff h d be i a aica dee c i g, e i g a d ea i g e a ic b g .
(2) Nea 60% (168 f 289) f he -a e MP-b g a e c e ed b w i e a e : he *message level bugs* a d he *connection level bugs*.	T ha i e d dee c , e e e a e e age a i g e a ed b g ca f c he e w a b g ca eg ie , w hich a e i e ea i gf .
(3) O ab 20% f he MP-b g w i i ediae b i g d w a he e f a i g ge .	P e a ch b g ea i g ca ha d e a a i f MP-b g .
(4) C ica i a e ha a e c e ed b MPI a e a e a e i MP-b g	N e w a e eeded ha d e he he c ica i a e e a ed MP-b g , w hich a e add e ed b he e i i g w .
Findings on Manifestation Conditions	**Implications**
(5) The a ife ai f (312 f 340) e a i ed MP-b g i e a fe (< 6) de .	M f he MP-b g ca be dee c ed b i i g a ea i e a e w , w hich ed ce e i g c e i w i h i g b ge i g ca abi i ch.
(6) A a he e a i ed MP-b g f Ac i eMQ i e e ha 2 b e .	2 b e a e e gh f he e i g f a hi ica ed e iabi i fea e , cha d ab e e age , fai e b e , e c.
(7) Nea 40% f he MP-b g i Ac i eMQ a e e a ed fai e , w hich i fa e ha he a i f c e di g c de egi .	MP-b g e i g c d a e a e i hi i d f b g .
Findings on Bug Fixing	**Implications**
(8) Ab 40% f MP-b g a e de e i i ic, w hich i ch e ha he e f e i die ge e a b g .	B g diag i w i eed i c a e e ech i e (ch a i e- a i g i c i g h ead ched i g) i de e d ce fai e d e he e b g ia i e a i g.
(9) The i e eeded f i g a MP-b g i e e a h a e age.	Thi fac b he eed f be e b g e a i g ech i e .
(10) The ache f MP-b g a e a a ; ab 60% f he a che c ai e ha 20 i e f c de a d f he a che affec 1 e.	The ha d e f i g a MP-b g ai c ce a e diag - i g w h i w i ha e , he f w i g i g e .
(11) The a ch f 79 (f 349) MP-b g w e chec ed i b gg i ade a e.	P g a e eed he i e he a i f hei a che ; f e a e, he a ch e i ca i .

TABLE I: Mai di g f hi d a d hei i ica i .

B. Bug selection

The b g e da aba e f he e ec ed a ica i c ai a e a ge be f b g . Th w e a a ica e eed b g ha a e i e be e e a b e f i g a ea ch e he b g e da aba e. We ea ched he b g e da aba e f b g ha c ai ed e w d c a cia ed w i h MP-b g , f e a e, ' e age( )', ' ', 'd ica e', '( ) ac ', ' de ', e c. I addi i hi w e ea ched f b g w h e a w a c ed, e ed, e ed (i.e., b g ha a e ge de a a i b he de e e), beca e he he b g e ha a e a ed a c ed (i c e e, e c.) a e i e ha e e gh i f ai f d . F he h a d f b g e ha c ai a ea e e w d f he ab e e w d e, w e a d a ed a b e (ab 200) f he b g f each a ica i a d a a a a -zed he .

A . / Pha e	O e MPI	Ze MQ	Ac i eMQ
T a c ed b g	955	204	2,165
A a -zed b g	81	109	159

TABLE II: B g c f diffe e a ica i .

The a a i ec i e ea ed ha e f he b g ha a ched he ea ch e a e e age a i g e a ed a d w e a e c ded he . I addi i , w e a e c ded b g f w hich he c e di g b g e d e c - ai e gh i f ai a a -ze he . Af e i e i g, w e b ai ed a a e f 349 a a -zed MP-b g , a be ha i c e(e e e i) he be f b g a a -zed i a e i die he i d f b g [9], [15], [16]. Tab e II h w he b g c f diffe e a ica i .

C. Limitations

O e h d g ' i i a i h d be c ide ed w he i g i e e i g e . Li e he e i ica die , e a e i ied b he i d fa ica i a d I a e b g w e ed. Whi e w e be ie e ha he a ica i a d b g w e e a i ed w e e e e a age b d f MP-b g , w e d i ed d a a ge e a c c i ab a he a age a i g e . I a ic a , w e h d e ha a f he cha ac e i ic a d i dig b ai ed i hi d a e a cia ed w i h he h ee e a i ed a ica i a d he g a i g a g age he e a ica i e. The ef e, he e h d be a e w i h he eci c a ica i a d e a a i e h d g i i d.

M e e , w e f c he b g ha a e f d i he i e e a i f e agi g e e e e. Th d a e ec he cha ac e i ic f he e f b g , cha he i e f a age a i g e .

I e f e a i a i e h d g , w e a a a -zed he b g e f he a ed MP-b g . We ha e e a i ed e e iece f i f ai e a ed each e a i ed b g, ic dig ga e ' e a a i , f dic i , ce c de ache , a d he b g- igge i g e ca e . I

Dimension	Category	Description
R Ca e	e	B g ca ed b i e ha d i g f e b ec .
	c c e c	B g ha ha e i i-h eadi g (i- ce e) e i e .
	e a ic	I c i e w ih he igi a de ig e i e e he g a e ' i e i .
I ac	e age- e e	B g ha i ac he de i e i g f e e e a e age .
	c ec i - e e	B g ha a e e a ed he c ec i be w ee w de .
	de- e e	B g ha e i he e i a i f he c e e e e c e f he e ca e e e i e c i f he da a.
	a e	B g ha w i affec he e ' c ec e i ediа e .
C ica i Pa e	e d- ecei e	De i e i g e age be w ee w ai .
	c ec i e	C ica i ha i e a he ce e i a gica g f de .
	d ce-c e	Each d ced e age w i be c ed b e a d e c e .
	b i h- b c ibe	A he e age b i hed b he b i he w i be ecei ed b a he b c ibe .
	ge e a	B g ha d eci c e c ica i a e (e.g., b g ha e a ed a i d f c eci).

TABLE III: Ca eg ie f he h ee di e i . *Some categories and definitions are borrowed from BugBench [17].*

addi i w, e a e a fa i ia w i h he e a i ed a ica i , i ce w e ha e ed he i a f e i ec .

III. Bug Pattern Study

T b i d a e e iab e a age a i g e , i i i - a de a d he e f b g ha a e e a e a d he ica a e ac MP-b g . Si ce diffe e e f b g e i e diffe e a ache de ec a d e a e, he e e-g ai ed b g a e ide ef i f a i de e e a d b i de a i e.

I de ide g ide i e f f e e ea ch MP-b g , i hi ec i , w e f c h ee a ic a di e i : **Root Cause**, **Impact** a d **Communication Pattern**. S eci - ca , *i)* a g he ca e di e i , w e c a if he MP-b g i h ee di i ca eg ie ba ed hei ca e ; *ii)* f he i ac di e i , w e a a -zed he MP-b g w i h e ec hei c e e ce ha a e e ed he e , a d di ided he e i ac i f ca eg ie a d 13 b-ca eg ie ; a d *iii)* w he i c e e he c ica i a e , w e ha e a b e ed e diffe e de . A he e a ed de i i a e gi e i Tab e III a d Tab e IV.

A. Partition by root causes

We e e he a a i e ba ed he b g ' ca e . A e i ed bef e, w e c a if he MP-b g i h ee di i ca eg ie : *memory*, *concurrency*, a d *semantic*. Fig e 1, w hich h w he a be f each e f b g ac diffe e a ica i , a i-ze i e iga i e .

Finding (1): Se a ic b g i he d i a ca e (264 f 349) f he e a i ed MP-b g .
Implication: M e eff h d be i a a i- ca de ec i g, e i g a d e a i g e a ic b g .

F he g e, w e ca b e e ha e a ic b g i he d i a ca e f MP-b g . I c 67% - 84% f he e a i ed MP-b g . O e ib e ea f hi fac i ha e a ic b g a e a ica i eci c. A g a e ca ea i i d ce e a ic b g d e a ac f h gh de a di g f he e , i e i e e i eci ca i . Th i i ch ha de a a ica de ec he . I c a , he ca e f e a d c c e c b g a e ge e a f a a ica i , w hich ea ha he de e e ca e ge e a f e i g he . A a i a i , Va g i d [18] i a a i e a i f a- w f b i di g d a ic a a i . The e a e a a e Va g i d [19], [20] ha ca a a ica de ec a f e a age e a d c c e c b g . M e e, he e a e i ech i e [21], [22], [23] ha i e d e a e he e b g - he- i he d c i . The ca he he e a id fai e , e e w he he b g i a ead igge ed.

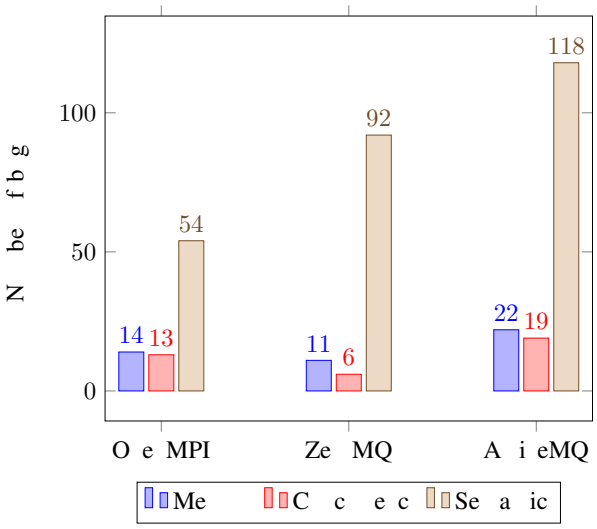

Fig. 1: Di ib i f ca e .

A h gh he e i a i e bi w e ha he 81.1% - 86.7% e ed i a e i ge e a b g cha ac e i ic d [24] (b g e c di g e b g a d c c e c b g); i i i e ig i ca . The ef e, he e i d b ha e eff h d be i a a ica de ec i g, e i g a d e a i g e a ic b g .

B. Partition by impacts

A w e ha e di c ed ab e, a a ge i f MP-b g a e ca ed b a ica i eci c ea , w hich hi de he i i g f g a e ' i e i . A a e , i i ha d a a ica de ec e a e he e b g . H w e e, f he e age a i g e a ed b g he e e i w i d f

Category	Sub-category	Description	Abbr.
Me age Le e B g	C ed e age	The e age ecei ed i he a ea he e e age.	C .
	D ica e e age	The e age i ecei ed ice e.	D .
	L e age	O e e e age a e dee ed de i e ed b ecei ed b he c e di g ecei e (i.e., he e di g ced e i acc i hed cce f , b he e age a e).	L
	U c ai ed e age	Recei ed e e age.	U c.
C ec i Le e B g	Fai ed g ai ai i g	The e age a i g e fai di c e / e e (i.e., e /c e a c ec i ih) a ac i e/c ed de, a added de fai add i e f he .	T .
	Fai ed a a ic ec ec i	The ec ec i ced e ca ed b e a a i i de e a i g i fai ed.	Rec.
	O f de	The e a e a ec i c de f e age ih he c ec i , b hi i e i i g a a eed.	O d.
N de Le e B g	C a h	Se e a de he h e e bec e ab e	C a h
	E	O e a i fai e e ec ed e c de e ed.	E
	Ha g	O e e de f he e age a i g e bec e a i g g e (e.g., i ie , dead c , i e c).	Ha g
La e B g	Lea	S e e ce a e f eed af e age (e.g., e ea , e de c i ea).	Lea
	Pe f a ce	The e ec i a e e e ce (e.g., i e, CPU, ba id h) ha e ec ed.	Pe .
	U ca eg ized a e b g	The he c e e ce, ch a i c ec a ic i f a i .	U .

TABLE IV: B g C e e ce C a i ca i . *This table shows the definitions of various MP-bug consequences.*

i e i ha a e b hi a a d e a e : he e age e a ed i e i a d he c ec i e a ed i e i .

Message related intensions: he e f a e age a i g e a hi /he e age be i ac e he c ec ecei e ce a d ce, b hi i e i a be g a a eed. The e age ca be beca e f he e iabi i f he e I a e e , a he a e i e he c e di g e e di g ced e a ca e d ica e e age . A d i i a ib e ha he e age i c ed d i g he ac i g/ ac i g ced e e ecei e ecei ed a e age ha i e b a e de .

Connection related intensions: I de de i e e - age , he e age a i g e eed ai ai he g f a he ac i e de (e de , b e , ecei e , e c.), hich i dif i c ice he e i e iab e a d he de a be d a ica added/ e ed. A a e , he e a e a b g e a ed hi c ec i ai ai i g ced e, ch a ab e ec ec de fai di c e a e added de.

I i be e he f ga ge he i a e b he e id f i e i a g MP-b g . I de a e hi e i , e d he i ac f MP-b g , a d ca eg ize he f i g he de i i i ed i Tab e IV. A g he f ca eg ie , he *Message Level Bugs* a d he *Connection Level Bugs* c e d he af e e i ed e age e a ed i e i a d c ec i e a ed i e i e ec ie . I he he ca eg ie , he *Latent Bugs* a e e i a , i ce *i)* a e [25] ca be ed de ec e ea age , hich i he d i a e a f *Leak*; *ii) Performance loss* i ha e i i ce i d e i ac he e ' c ec e ; a d *iii)* he e ai i g ca eg ized a e b g a e a i c ec a i ic i f a i , hich i ha f if ed. Tha i , he *Node Level Bugs'* c e di g i e i e ai c ea .

Tab e V e e he a i ic e . N e ha he f a cc e ce i a ge ha he a be f b g beca e e b g i e ha e ca eg .

Te \ A .		O e MPI		Ze MQ		Ac i eMQ	
Me age Le e B g	C .	27	23	26	12	45	13
	D .		1		0		7
	L .		1		12		23
	U c.		2		2		2
C ec i Le e B g	T .	6	6	25	15	39	21
	Rec.		0		10		16
	O d.		0		0		2
N de Le e B g	C a h	39	20	45	22	37	10
	E		9		15		9
	Ha g		10		8		18
La e B g	Lea	11	3	14	6	40	14
	Pe .		5		6		20
	U .		3		2		6

TABLE V: C e e ce f MP-b g .

Finding (2): Nea 60% (168 f 289) f he - a e MP-b g a e c e ed b i e a e : e age e e b g a d c ec i e e b g .
Implication: T ha i e d de ec , e e e - a e e age a i g e a ed b g ca f c he e a b g ca eg ie , hich a e i e ea i g f .

A a f he a e b g ha i ead a fai e i edia e (a d e e ha f i e i e), ea 60% f he e ai i g MP-b g a e e age/c ec i e a ed. Thi i a e f e a ic b g , 143 f 220 - a e e a ic b g be g he e ca eg ie . A e ha e e i ed bef e, he e b g a e ch ea ie be a a ica de ec ed ha he ge e a e a ic b g , beca e he g a e ' c e di g i e i a e e a a e . Acc di g i e iga i , e ha e a i ed a a f e e diffe e a i e i , hich c e d he e e b-ca eg ie de he *Message Level Bugs* a d he *Connection Level Bugs*. A d e hi ec i c ca be b i de ec e a e each f he .

F e a e, F Chec e [26] i a - e head e h d f de ec i g MP-b g i MPI ib a ie . I i e he bi a c de f b h MPI a ica i a d MPI ib a ie hich g MPI f c i ca (e.g., MPI_Se d a d MPI_Rec) a he a ica i e e a d da a e e e a i a he ib a e e i ace e . The , b i e iga i g he MPI ca i he ace e , F Chec e ac he c e d- i g e age b f i g he e e a da a e e

e a i a i g f he e di g b ffe . If he e age da a a e c ec de i e ed he ece i g b ffe a i dica ed b he MPI ca , F W Chec e e he b g a d ide diag ic i f a i , ch a fa MPI f c i i c ec da a e e , he i i he ca e . T i i , F W Chec e ca be ed de ec a he f b-ca eg ie f e age e e b g i MPI. A d W e ca ea i a ici a e ha i i a e h d ca be ed f he he a ica i (a a f MPI).

A f he c ec i e e b g , a a db i g/ g e ca be ed a a efe e ce f he e i ca i (i e he chec ech i e ed i de ec i g e age e e b g). I ce a i g he e ' e iabi i b i e e i g i e f c i a e i a e g a , W hich i ba ed he c a ic idea f N- e i g a i g [27], ha a ead bee cce f ed i a he ed . A a i a i , E FS [28] i e e a hi VFS- i e a e ea he f e e a e ica e e- e (e.g., e 3, Rei e FS, JFS) a d e a i -c e e a e c ec de i e he e i e fa beha i f a de i g c di chid e e . H W e e, W e d (a fa a W e W) d a a e ha ca ha d e c ec i e e b g , a h gh he acc f a g ea i W he e iabi i i eeded.

Finding (3): O ab 20% f he MP-b g W i i - edia e b i g d W a he e f a i g ge .
Implication: P e a ch b g e a i g ca ha d e a a i f MP-b g .

A g a he 13 b-ca eg ie f he MP-b g , *Crash* a d *Hang* W i i edia e b i g d W a he e f a i g ge . Thi gi e ace a ch b g e a i g . Tha i , he e ca he e age a - i g e i a de W i h ad a ic e i ca i (e.g., F W Chec e , a db i g/ g e). O ce b e i g a b g' ha e i g, a he e edia e ca d e ec e (e.g., e e di g, ec ec i g, e a i g). A ea i ca e ici ig a he e age a i g e , a d h e i W i be ha d ed b he c ie a ica i a ia e .

C. Partition by communication patterns

Fi a , W e d he di ib i f c ica i a - e a g MP-b g .

Finding (4): C ica i a e ha a e c - e ed b MPI a e a e a e i MP-b g .
Implication: N W a e eeded ha d e he he c ica i a e e a ed MP-b g , W hich a e add e ed b he e i i g W .

A W e ha e e i ed bef e, a fa a W e W , f he e i MP-b g de ec i e ea che [2], [?], [5] a e f c ed MPI, W hich a e c ai ed i a ica- i b a c ica i a e . H W e e, he e h W ha he a e a e a i a . M e e, he e c e ed a e (i.e., d ce-c e, b i h- b c ibe) ca be c e ed i - - i c ica i ea i ; beca e e i f a i , ch a he c e e ' g , i eeded e if hei c ec e . Tha i , a h gh

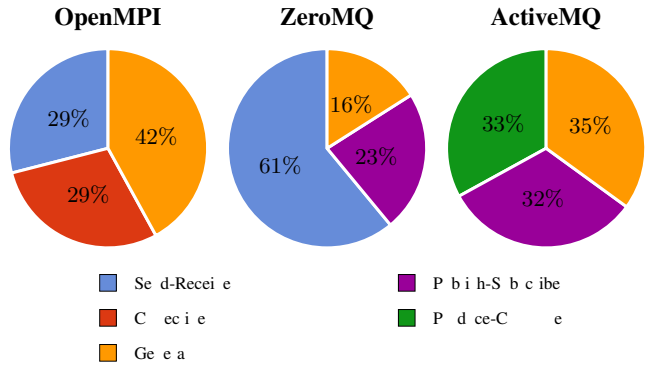

Fig. 2: Di ib i f c ica i a e .

i a a d e a e , he e he a e ha e bee W e died b e i e ea che . Th a b g W i be i ed b he e i i g MP-b g de ec W hich ai f c e d- ece i e b g c ec i e b g ha ca be b e ed i MPI.

IV. Bug manifestation study

The a ife a i c di i f a MP-b g i a a eci c de a g a e f e age e e e . I hi ec i , W e d he cha ac e i ic f ea W d MP- b g' a ife a i . We W i di c he ea ed g ide i e f MP-b g e i g a d de ec i g ba ed b e a i .

A. How many nodes are involved?

Finding (5): The a ife a i f (312 f 340) e a i ed MP-b g i e a f W (e ha 6) de .
Implication: M f he MP-b g ca be de ec ed b i i g a ea i e a e W , W hich ed ce e - i g c e i W i h i g b g e i g ca abi i ch.

Fi di g (5) e ha e e h gh he e a i ed e age a i g e a de ed i a age e W (h d ed f de), i ca e , a a be (e ha 6) f de a e i ed i he a ife a i f a MP-b g.

The de i g ea f hi i ha e age d c e i ea c W i h a de , a d c ica i a d c ab a i i c d c ed be W ee a g f de . A a e , he a ife a i c di i f MP-b g d i e a de . M e e, 234 f he 340 cce f a a -zed MP-b g ca be a ife ed i he i e e W g (2 f MPI/Ze MQ, 3 f Ac i eMQ).

We h d e ha hi di g i i e he c b e a i ha MP-b g a e e i e ea ie a ife a a hea W ad i a age e W . The hea - W ad W i i c ea e he e ce c e i i a d c e

A ica i	≥ 6 de	5 de	4 de	≤ 3 de
O e MPI	9	0	8	55
Ze MQ	5	0	5	99
Ac i eMQ	14	7	38	100

TABLE VI: The be f de i ed i MP-b g . *Some bugs are omitted if not enough information is given.*

w ich i e i . I he ef e i c ea e he ibi i f hi i g ce ai de ha ca igge he b g. The a ife a i c di i i e a fe de .

Finding (6): A a he e a i ed MP-b g f Ac i eMQ i e e ha 2 b e .
Implication: 2 b e a e e gh f he e i g f a hi ica ed e iabi i fea e , ch a d ab e e age , fai e b e , e c.

We f he d he be f b e i ed i he MP-b g f Ac i eMQ. The e a e gi e i Fig e 3. I h w ha a a he e a i ed MP-b g f Ac i eMQ i e e ha 2 b e , w hich ea ha 2 b e a e e gh f he e i g f a hi ica ed e iabi i fea e , ch a d ab e e age , fai e b e , e c.

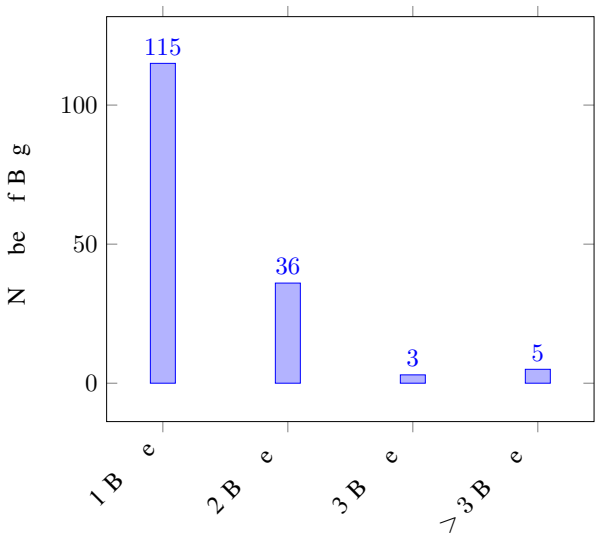

Fig. 3: The be f b e i ed i MP-b g f Ac i eMQ.

O e a , di g i ie ha he e i g f MP-b g ca f c a e . S ch e i g ech i e ca e e he e i g c e i f i ce a i g e e ia w ih he be f de . A he ea i e, fe MP-b g w d be i ed. S ch i ica i i a ece a c di i f ac ica de chec i g f e age a i g e .

B. How many MP-bugs are related to failover?

H ha d i he achie i g f e iab e e age a i g? T a e hi e i , e e a i e he be f b g ha

O e MPI	Ze MQ	Ac i eMQ
3 (4%)	14 (13%)	59 (37%)

(a) B A ica i .

Me	C c e c	Se a ic
7 (15%)	11 (29%)	58 (22%)

(b) B R Ca e.

Me age- e e	C ec i - e e	N de- e e	La e
12 (12%)	34 (49%)	20 (17%)	10 (15%)

(c) B I ac .

TABLE VII: Fai e Re a ed B g . *This table shows the number and percentage of the bugs related to failover in MP-bugs.*

A ica i	De e i i ic	I Ti i g De e de	N -de e i i ic
O e MPI	57	1	23
Ze MQ	77	12	20
Ac i eMQ	88	28	43

TABLE VIII: S Re d cibi i Cha ac e i ic .

a e e a ed he fai e ced e (e.g., ec ec i g a e a ed de). Acc di g i e iga i , a b g w e f d a e i c -ca e c de a h b a he i he e a fai e -ha d i g ca e . Thi e f b g i c i ica f he e agi g a e' b e , i ce he a hi de he f e f g a e ' i e i e iabi i ie . I he e f hi ec i , w i a if b g cc e ce fai e -ha d i g a h ; Tab e VII (a), (b) a d (c) e e i e iga i e .

Finding (7): Nea 40% f he MP-b g i Ac i eMQ a e e a ed fai e , hich i fa e ha he a i f c e di g c de egi .
Implication: MP-b g e i g c d a e a e - i hi i d f b g .

A w e ca ee f he ab e, a fe b g a e e a ed fai e i O e MPI, ice i ide a e - ed chec i e . B he i a ce f fai e - e a ed b g i c ea e w ih he i c ea i g e ie e f e iabi i ; a a , ea 40% f he MP-b g i Ac i eMQ a e e a ed fai e , hich i fa e ha he a i f c e di g c de egi .

Whe b e d b b g e a d i ac i he ec d a d hi d ab e, e ca ee ha gh 20% f e a ic b g cc he fai e a h a d i de e e b g . We hi hi ca be a he b ea h gh f i fe i g he g a e ' i e i f e a ic b g .

V. Bug fixing study

A. Bug reproducibility

Re d ci g b g i a e e i ie f e f - i g a a ic b g diag i . I hi ec i w e bc a he

MP-b g b hei e d cibi i . Tha i , ca he b g be e d ced de a d? A d d b g ha e cha ac e i ic ha ea e hi de a a ic b g diag i ? Tab e VIII a i-e e ; he b g a e ca i ed a ei he de e i i ic, i i g de e de , -de e i i ic.

A fai e d e a I a e b g i b e ed be dee- i i ic if he fa igge he a e each i e he a ica i i h he a e e f i e e i he a e de, a ed a chi ec e/OS af a d a ed e e c g a i . O he i e, he b g i -de e i i ic. We a i g e a ecia ca e f -de e i i ic I a e b g a ed i i g de e de . A b g i dee ed a i i g de e de if he i i g f hei e e i addi i hei de de e i e he he a i igge ed a d if hich . I c a , if he cc e ce f he de e d i i g i e ha a e be d he c ie ' c (e.g., he h ead ched i g f c c e c b g), e i ca if ch fai e a -de e i i ic, a i i g de e de .

N e ha d i c e a i e ih e ec he de i i f -de e i i . M e eci ca , e c a if a b g a -de e i i ic if, acc di g he b g e , he ( ) c d be e d ced c ie f a ea (e.g., he a e i a be a ai ab e a f he e i e igh ha e cha ged). I i ib e ha ch b g a e de e i i ic, b e c e a i e a e ha he a e . A , de i i f de e i i i e e ic i e. We be ie e ha a f he de e i i ic b g i d a e ac a de e i i ic ac diffe e e i e a dc g a i a , i a ca e , fai e a e e d ced b de e e diffe e e f he e he e he b g a e de ec ed. B beca e b g e fe ac fi cie i f a i ab he b g' beha i ac diffe e e i e , e ch e de e de e i i ic ea e d cibi i a ed e i e . I e b g e- , he fai e c d be e d ced a e dif c e d ce (a i cc ed i f e e). We c e a i e ca i ed ch b g a -de e i i ic.

Finding (8): Ab 40% f MP-b g a e de e i- i ic, hich i ch e ha he e f e i die ge e a b g .
Implication: B g diag i i ed ic - a e e ch i e (ch a i e- a i g i c i g h ead ched i g) i de e d ce fai e d e he e b g ia i e a i g.

The e e ie a e ef , a i i de e i e he he he diag i ca e iab e d ce he fai e . A d f a e , he e h ha ab 60% f he b g de a e de e i i ic beha i , hich ea he ca be e d ced b gi e he a e e fi e e i he a e de .

H e e he e ai i g 40% f MP-b g , hich a e de e i i ic, a e a -ig ab e. Thi e i ch e ha e i Sah ' e (17%) ge e a b g [9]. O e ib e ea i ha a MP-b g a e e a ed e a d i e de , hich a e ch c e . Addi i a , he e i i g b g de ec i ca effec i e ed ce he diag i a d e i i e f dee i i ic b g .

A a e , i ce he a i f MP-b g a e de e i i- ic, b g diag i h d be ab e e d ce he b e a i g i . B he e i e i a a ge b d f MP-b g ha a e -de e i i ic. Th b g diag i i ed i c a e e ch i e (ch a i e- a i g i c i g h ead ched i g) i de e d ce fai e d e he e b g ia i e a i g.

B. Bug fixing complexity

Fi a , e c a ed MP-b g f diffe e ca eg ie ih e ec hei c e i f i g he , acc di g he b g e ed ha ecif he e e ie . F ea i g he c e i f i g b g e ed h ee e ic ha ca be e ac ed f he b g e : i e he b g, be f e i ed i he ache , a d i e f c de cha ged. A h gh e f he e e ic i e fec , i c bi a i he he e i a e he c e i f i g he e b g .

Ca eg	Ti e	Fi e	L C
Me	102/17	3/1	115/8
C c e c	207/59	4/2	70/22
Se a ic	140/20	2/1	68/14
T a	142/21	2/1	75/15

TABLE IX: C e i f i g MP-b g . *For each class of bugs we present the average/median for each of the three metrics: time to fix the bug in days, number of files in the patches and line of code changed.*

We e e a c a i f he h ee c e i e ic i Tab e IX. Si ce e f he e ed c ai ig i ca ie , i addi i e e i g he a e age f a h ee e ic e a e e he edia .

Finding (9): The i e eeded f i g a MP-b g i e e a h a e age.
Implication: Thi fac b he eed f be e b g e a i g ech i e .

O a a i f he i g c e i e ea ed ha he b g i g i ha di e f c ed i e. I a a e e e a h a e age i a b g. Thi fac b he e ie e f b g e a i g ech i e , ice e e he b g i de ec ed he e i eed ai a a eciab e e id f i e bef e i g ac ec e i f c de. A d he ech i e ha ca a a ica ge e a e a e a a ch (i e L [29] f c c e c b g) a e a ef .

Finding (10): The a che f MP-b g a e a a ; ab 60% f he a che c ai e ha 20 i e f c de a d f he a che affec 1 e.
Implication: The ha d e f i g a MP-b g ai c ce a e diag i g h i i ha e , he f i g i g e .

H e e, he b g ' i g c e i i ha a a e i e f a ch i e. A e ca ee f he ab e, f he a che a e a . A d, acc di g i e iga i , ab 60% f he a che c ai e ha 20 i e f c de a d f he a che affec 1 e. We ca i fe f

hi fac ha he ha d e f i g a b g i c ce a e i diag i g h i i ha e , he f i g i g e .

C. Mistakes during bug fixing

A he i dica f he ha d e f i g a MP-b g i ha a ache e ea ed b g a e a e i b gg . I de i e iga e he a e f b gg ache , e c he be f ache a ied each b g, a d he e a i be ee b g .

Finding (11): The a ch f 79 (f 349) MP-b g e chec ed i b gg i ade a e.
Implication: P g a e eed he i e he a i f hei a che ; f e a e, he a ch e i - ca i .

O d d ha he a ch f 79 (f 349) MP-b g e chec ed i b gg i ade a e; 32 f he e b g a e e ici e e ed b he de e e , hich ea ha he g a e ce i c ec de e i e he b g be ed af e hei e i g. A g he e di i c b gg ache , e f he dec ea e he cc e ce babi i f he igi a MP-b g , b fai he b g c e e . A d, e i a , 19 f he i d ce e b g . Thi h ha g a e eed he i e he a i f hei a che ; f e a e, he a ch e i ca i .

VI. Other characteristics

Many bugs rely on specific system architecture: I d , e d a b g a e e ied e eci c e a chi ec e e e he c e a i f achi e i h e e a eci c a chi ec e . The a i f he e b g a e e a ed he ac i g/ ac i g ced e f he e age . B e f he a e ch ic ie . F e a e, b g *OpenMPI*#213 i ca ed b he diffe e a ig e a eg f diffe e a chi ec- e . S eci ca , he e e c i e g a eg e a i fa ca ed b SIGBUS he i g he f i g i e:

$$hdr->hdr\_match.hdr\_ctx = sendreq->req\_send.req\_base.req\_comm->c\_contextid;$$

Af e i e iga i , he de e e d ha he *hdr* ed a be dd a ig ed i SPARC, hich ca ed he c de e a SIGBUS beca e *hdr_ctx* e i e a 2 b e a ig e . Th he g a e e he b g b a a addi g he a iab e.

Bug severity: B g e e i i ab he i a b g e if i ge i he id. U a he e e i f a b g ca be g he f i g e [30]: *i) Critical:* The fai ed f c i i ab e a d he e i acce ab e a e a i e e h d achie e he e i ed e . *ii) Major:* The fai ed f c i i ab e b he e e i a acce ab e a e a i e e h d achie e he e i ed e . *iii) Minor:* The defec d e e i e i a i , b ca e he e d ce i c ec , i c e e i c i e e . *iv) Trivial:* The defec d e e i e i a i , d e da age he abi i f he e a d he de i ed e ca be ea i b ai ed b i g a d he defec . We d he MP-b g ih e ec hei e e i , acc di g he b g e ed ha ecif he e e ie . We f d ha 70 f 349 MP-b g a e abe ed a c i ica , hich ea ha a acce ab e a e a i e e h d ca be f d f f he b g . I ai e he ibi i f i e e i g b g e a i g .

Some MP-bugs cross many layers: N ada , he a e bec e e a d e c e . S e i e he a h f a e age- e di g e e i a e e a a e . A d he e e a a ea diffe e a each a e . F e a e, a e age- e di g e e i JB MQ i i c ac e d- i g e age e di g i he de i i g Ac i eMQ. Thi , i , e i E he e ac e ac he e , a d a ead a he e age- ecei i g e e a he c e d- i g ee . We a d b g ha c a a e i hi e a e. A a i a i , a e age i Ze MQ ca be i i a b- e age , a d each b- e age i a i ed i de e de . Th he e di g f he h e e age a d he e di g f each b- e age ca be de e i ed a a e . Thi e a e a e i g i c ea e he ha d e f b g diag i . T ha ca a a ica i - i he igh a e i be e he f .

VII. Related work

Bug characteristic studies Gi e he i a ce f a e e iabi i a d he e a e ce f b g , a die b g cha ac e i ic ha e e i bee d e. The e ha e died a a ec f a i id f b g , i c di g hei a e , i ac , e d cibi i , a d e [15], [7], [8]. A d a f he ide eci i f a i he i e a e e iabi i f diffe e a ec , ch a b g de ec i g, fa e a ce, fai e ec e , a d e i g, e c [16], [9].

B f a e , e die ha e bee c d c ed ea d MP-b g cha ac e i ic . P e i , e ea che ha e c d c ed e e i i a he i e f MPI [11], [12]. B he a e c ai ed i a eci c a e, e e a i e c ica i a e , a d ih b e fai e abi i ie . I c a , ide a ch e c ehe i e d ge e a MP-b g .

MPI bug detection The Me age Pa i g I e face ib a i e f he a e age a i g a e i ac ice, a d i bei g ac i e de e ed a d ed h gh e e a i e e a i de ig ed a e h a fa chi ec a a f . Th a c e i a deb ggi g ha e bee de ig ed f MPI g a , ch a he I e Me age Chec e [2]. The e a e i f de ec i g he b g i he de e i g f MPI ib a ie . F e a e, F Chec e [26] ca e ac g a i e i f e age a i g, a d chec he he he e i e i a e f ed c ec b he de i g MPI ib a ie , i.e., he he e age a e de i e ed c ec f eci ed ce eci ed de i a i . If , i e he b g a d ide diag ic i f a i . A he i e f ch a Sca aT ace [31] a d MPIWiz [32] ec d MPI ca i a ace ea d e hi i f a i de e i i ica e a he g a . O i c e- e a he e , i ce i ha he e ia g ide a d i a e he de e e f he e i d f ech i e a d a ache .

Verification solutions for message passing systems I addi he af e e i ed e i g a ache , e ea che ha e a e ed f a e i ca i a d de chec i g e h d f de ec i g b g i he e age a i g e . S i [33], a f a a -z i g he gica c i e c f c c e e , ide b i -i f a be f e age a i g fea e . I ha bee ed e if e age a i g e b a e ea che [3], [4]. S e ece [5], [6] a e a a ach ha i eg a e he be fea e f e i g (abi i di ec e a ica i) a d de chec i g (c e age g a a ee) e if MPI a ica i . The he MPI g a de he c f a e i ca i ched e , g a a ee de ec a e ia a che f -de e i i ic (idca d) ece i e , a d e e each f he e a che i diffe e f he g a . Th , he e ha i e e e a d e e f c e age f -de e i i . O d MP-b g a ife a i c di i ide g ide i e f he f e e ea che f hi e d, hich ca he de a d he ade- ff be ee e i g c e i a d b g e i g ca abi i a d he de ig be e c e age c i e ia.

VIII. Conclusion and future work

Thi a e ide ac ehe i e d f he a age a i g ea ed b g . We e a i ed hei a e , a ife a i , i g a d he cha ac e i ic . O d i ba ed 349 ea d MP-b g , a d c ec ed f 3 e e e a i e e ce g a : O e MPI, Ze MQ, a d Ac i eMQ. The e f d ic de a i ee i g di g a d i ica i , hich ca be e f e e ea che MP- b g de ec i g, e i g a d e a i g i a i a ec . F e a e, f e ca de ig e b g de ec i add e he e age e e b g a d he c ec i e e b g ; ca f c e i g ea i e a e , ec. I a ic a, e i e i ed de e ha ca a a ica e a e MP- b g .

IX. Acknowledgments

Thi W i ed b Na i a High-Tech R&D (863) P g a f Chi a (2012AA012600), Na a Sci- e ce F da i f Chi a (61433008, 61373145, 61170210, U1435216), Chi e e S ecia P ec f Scie ce a d Tech g (2013 01039-002-002).

References

[1] h :// e . g/.

[2] J. DeS a, B. K h , B. R. de S i i, V. Sa fa , S. Zhe , a d S. B aa , A a ed, ca ab e deb ggi g f MPI g a ih i e & eg; e age chec e , e . SE-HPCS '05.

[3] O. S. Ma i , E. L. L , a d W. McC e, SPIN i g aa e e a e, i *Proceedings of the 9th International SPIN Workshop on Model Checking of Software*. L d , UK, UK: S i ge-Ve ag, 2002, . 213 220. [O i e]. A ai ab e: h : //d .ac . g/ci a i .cf ?id=645881.672236

[4] S. Siege a d G. A i , Ve i ca i f MPI-ba ed f a e f cie i c c ai , i *Model Checking Software*, e . Lec e N e i C e Scie ce, S. G af a d L. M ie , Ed . S i ge Be i Heide be g, 2004, . 2989, . 286 303. [O i e]. A ai ab e: h ://d .d i. g/10.1007/978-3-540-24732-6_20

[5] S. Va a a a, G. G a a i h a , a d R. M. Ki b , D a ic e i - ca i f MPI g a ih ed ci i e e ce f i e a i a d e a ed de i g , e . CAV '08.

[6] A. V , S. Va a a a, M. DeLi i, G. G a a i h a , R. M. Ki b , a d R. Tha , F a e i ca i f ac ica MPI g a , e . PP PP '09.

[7] A. Ch , J. Ya g, B. Che f, S. Ha e , a d D. E ge, A e i ica d f ea i g e e , e . SOSP '01.

[8] L. L , A. C. A aci-D ea , R. H. A aci-D ea , a d S. L , A d f i e e e i , *Trans. Storage*, . 10, . 1, . 3:1 3:32, Ja . 2014. [O i e]. A ai ab e: h ://d i.ac . g/10.1145/ 2560012

[9] S. K. Sah , J. C e , a d V. Ad e, A e i ica d f e ed b g i e e a ihi ica i f a a ed b g diag i , e . ICSE '10.

[10] T. Zi e a , N. Naga a , P. G , a d B. M h , Cha ac e i i g a d edic i g hich b g ge e e ed, e . ICSE '12.

[11] S. Sha a a d G. G a a i h a , Ef cie e i ca i i f e age a i g e , i *IPDPS Workshops*, 2011, . 2026 2029.

[12] S. F. Siege a d G. S. A i , Ve i ca i f MPI-ba ed a e f cie i c c ai , e . SPIN '04.

[13] h :// i-f . g/d c /d c .h .

[14] h :// .a . g/.

[15] S. L , S. Pa , E. Se , a d Y. Zh , Lea i g f i a e: A c ehe i e d ea d c c e c b g cha ac e i ic , e . ASPLOS '08.

[16] P. F eca, C. Li, V. Si gha , a d R. R d ig e , A d f hei e a a d e e a effec f c c e c b g , i *DSN'10*, 2010, . 221 230.

[17] S. L , Z. Li, F. Qi , L. Ta , P. Zh , a d Y. Zh , B gbe ch: Be ch a f e a a i g b g de ec i , i *In Workshop on the Evaluation of Software Defect Detection Tools*, 2005.

[18] N. Ne he c e a d J. Se a d, Va g i d: A fa e f hea eigh d a ic bi a i e a i , e . PLDI '07.

[19] K. Se eb a a d T. I h d -ha , Th ead a i -z e : Da a ace de ec- i i ac ice, e . WBIA '09.

[20] N. Ne he c e a d J. Se a d, H had e e b e f e ed b a g a , e . VEE '07.

[21] M. Zha g, Y. W , S. L , S. Qi, J. Re , a d W. Zhe g, Ai: A igh eigh e f ea i g c c e c b g , e . FSE 2014.

[22] J. Y a d S. Na a a a a , T ea i g c c e c b g i g a - ac i a ifeg a d , e . MICRO '43.

[23] J. Y a d S. Na a a a a , A ca e f a i e ea i g c ai ed ha ed- e i- ce , e . ISCA '09.

[24] M. S i a a d R. Chi a ege, A c a i f P a e defec i da aba e a age e e a d ea i g e , i *Fault-Tolerant Computing, 1992. FTCS-22. Digest of Papers., Twenty-Second International Symposium on*, 1992, . 475 484.

[25] M. Ha i h a d T. M. Chi i bi, L - e head e ea de ec- i i g ada i e a i ica i g, e . ASPLOS '04.

[26] Z. Che , Q. Ga , W. Zha g, a d F. Qi , F chec e : De ec i g b g i MPI ib a ie ia e age chec i g, e . SC '10.

[27] A. A i -z ie i , The e h d g f - e i g a i g, *Software fault tolerance*, . 3, . 23 46, 1995.

[28] L. N. Bai a a da a , S. S da a a a , A. C. A aci-D ea , a d R. H. A aci-D ea , T ea i g e- e i a e ih E FS, e . USENIX '09.

[29] J. W , H. C i, a d J. Ya g, B a i g ace i i e a ica i ih e ec i e , e . OSDI '10, 2010, . 1 13.

[30] ISTQB E a Ce i ca i . h ://i be a ce i ca i .c /.

[31] M. N eh, P. Ra , F. M e e, M. Sch z, a d B. R. de S i i, Sca a ace: Sca ab e c e i a d e a f c ica i ace f high- e f a ce c i g, *J. Parallel Distrib. Comput.*, . 69, . 8, . 696 710, A g. 2009. [O i e]. A ai ab e: h ://d .d i. g/10.1016/ dc.2008.09.001

[32] R. X e, X. Li , M. W , Z. G , W. Che , W. Zhe g, Z. Zha g, a d G. V e e, MPIWiz: S bg e d cib e e a f i a ica- i , e . PP PP '09.

[33] G. H z a , The de chec e SPIN, *Software Engineering, IEEE Transactions on*, . 23, . 5, . 279 295, Ma 1997.